

BIDIRECIONAMENTO DE POTÊNCIA NO TAP HVDC

Antonio Carlos Borré

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D. Eng.

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2006

BORRÉ, ANTONIO CARLOS

Bidirecionamento de Potência no Tap
HVDC [Rio de Janeiro] 2006

XVI, 101 p. 29,7cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE

1. Transmissão em Corrente Contínua
2. Tap HVDC

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*“Nunca ande pelo caminho traçado,
pois ele conduz somente até onde os
outros já foram!”*

Alexander Graham Bell

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida.

*A todos os meus familiares, em especial aos meus pais, que tanto me incentivaram
no decorrer de mais essa etapa da minha vida.*

*Aos professores Maurício Aredes e Edson Watanabe pelo apoio e
dedicação destinados à confecção desta Dissertação.*

Aos amigos e funcionários do Laboratório de Eletrônica de Potência.

A todos vocês, meu

Muito Obrigado!!!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

BIDIRECIONAMENTO DE POTÊNCIA NO TAP HVDC

Antonio Carlos Borré

Dezembro/2006

Orientador: Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

Com a crescente demanda por energia, os sistemas HVDC tendem a ter um papel cada vez mais importante no cenário mundial. No entanto, a extração ou injeção de pequenos blocos de energia ao longo de linhas HVDC constitui-se em um problema bastante complexo.

Este trabalho tem como objetivo a apresentação de uma nova topologia para o Tap HVDC, permitindo a conexão tanto de consumidores quanto de geradores ao sistema HVDC, de forma a realizar intercâmbio de energia com este. Possibilita também o acesso à rede, em qualquer ponto da linha CC, no intuito de drenar potência a fim de alimentar cargas isoladas ou injetar potência de possíveis fontes de energia.

A fim de comprovar a eficiência do equipamento no que tange ao dreno e à injeção de potência ao longo do HVDC, modelou-se um sistema simplificado no qual o Tap tem seus terminais conectados a uma fonte de corrente e ao potencial de terra. Mais adiante, inseriu-se o equipamento em um sistema HVDC completo (Benchmark do Cigré). A ferramenta computacional utilizada foi o software de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

BIDIRECTIONAL POWER FLOW IN HVDC TAPS

Antonio Carlos Borré

December/2006

Advisor: Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

With the increase of energy demand in balloons areas far from primary energy resources, HVDC systems tend to play a role of increasing importance in worldwide scene electric systems. However, the extraction or injection of small energy blocks along the HVDC line consists in a sufficiently complex problem.

The objective of this work is to present a new topology of a HVDC Tap, allowing bidirectional flow of energy that offers the possibility of connecting consumers as well as generators to the HVDC system. The Tap also makes possible the access to the network at any point of the DC line.

Simulation results were obtained using the using the electromagnetic transients program PSCAD/EMTDC. Firstly, the HVDC Tap was developed and tested in a simplified model of HVDC system. Then, a complete HVDC system Cigré Benchmark was used together with the developed HVDC Tap, in order to investigated its performance and possible influence in the control and operation of the main HVDC Converter Stations.

Sumário

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvi
1 Introdução	1
1.1 Aspectos Gerais	2
1.2 Identificação do Problema	4
1.3 Motivação	5
1.4 Objetivos	6
1.5 Estrutura do Texto	7
2 Tap HVDC Unidirecional	8
2.1 Introdução	9
2.2 Derivações em Sistemas HVDC	12
2.3 Histórico do Tap HVDC	16
2.4 Conexão ao Sistema HVDC e Princípios de Funcionamento	17
2.4.1 Chave-H	20
2.4.2 Transformador com núcleo de ar	22
2.4.3 Controlador do Tap HVDC	23
2.5 Técnicas de Comutação Suave	24
2.5.1 Conversor Série Ressonante	26
2.5.2 Conversor Série Ressonante com Grampeamento de Tensão	27
2.5.3 Conversor Paralelo Ressonante	28
2.5.4 Barramento Ressonante CC (Resonant DC-Link)	28
2.5.5 Conclusões Parciais	29
3 Tap HVDC Bidirecional	30
3.1 Introdução	31
3.2 Conexão ao Sistema HVDC	32
3.3 Ponte-H	35

3.3.1	Equacionamento do Conversor	36
3.3.2	Cálculo do Capacitor C_H	38
3.3.3	Controle do Tap HVDC	39
3.4	Redimensionamento do Transformador	41
3.4.1	Transformador com núcleo de ar	41
3.4.2	Transformador com núcleo de ferro	43
3.5	Controle do Conversor Monofásico	44
3.5.1	Controle Adaptativo de Corrente	47
3.5.2	Controle Vetorial	48
3.6	Controle do Conversor Trifásico	51
3.6.1	Controle por Imposição de Corrente - Teoria p-q	52
3.6.2	Controle por Imposição de Amplitude e Fase	54
3.6.3	Filtro RLC	55
3.7	Conclusões Parciais	57
4	Análise do Modelo Digital do Tap HVDC	58
4.1	Introdução	59
4.2	Definição do Sistema Elétrico	59
4.3	Modelagem dos Conversores	60
4.4	Resultados com o Transformador com Núcleo de Ar	62
4.5	Resultados com o Transformador com Núcleo de Ferro	77
4.6	Resultados utilizando um Sistema HVDC Completo	81
4.7	Conclusões Parciais	85
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	86
5.1	Conclusões e Apontamentos Finais	87
5.2	Propostas de Trabalhos Futuros	88
A	Modulação por Largura de Pulso Senoidal	94
B	Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas	97
B.1	Significado Físico das Potências Relacionadas à Teoria p-q	99

Lista de Abreviações e Símbolos

ΔV_{DC}	Erro de tensão gerado da comparação entre V_{DC} e V_{REF}
Δp	Potência a ser fornecida ou absorvida pelo conversor trifásico
ω	Frequência angular em rad/s
ω_n	Frequência natural de oscilação
ζ	Fator de amortecimento
a	Relação de espiras do transformador
C	Capacitor principal do Tap HVDC
C_H	Capacitor da Ponte-H
C_{DC}	Capacitor do elo CC
C_{H1}, C_{H2}, C_{H3} e C_{H4}	IGBTs do conversor monofásico
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
$COPPE$	Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia
CSI	Current Source Inverter
D	Ciclo de trabalho
D_1 e D_2	Diodos da Chave-H
D_{MIN} e D_{MAX}	Limites Máximo e Mínimo para o ciclo de trabalho D
$erro_d$ e $erro_q$	Erros de corrente nas coordenadas dq
$erro_I$	Erro da comparação entre as correntes I_{SEC} e $I_{SEC(REF)}$
f	Frequência de operação do transformador e do sistema CA

FACTS Flexible AC Transmission Systems

f_s e f_o Frequências de chaveamento e de ressonância, respectivamente

G_1, G_2, G_3 e G_4 GTOs da Ponte-H

GTO Gate Turn-Off Thyristor

GTON Grupo Técnico Operacional da Região Norte

HVDC High Voltage Direct Current

i'_α e i'_β Correntes fictícias utilizadas no PLL

I_D Corrente da linha HVDC

I_d^* e I_q^* Correntes de referência do conversor monofásico nas coordenadas dq

i_α e i_β Correntes nas coordenadas $\alpha\beta$

i_α' e i_β' Correntes de referência geradas pelo conversor trifásico

i_α^* e i_β^* Correntes de referência do conversor monofásico nas coordenadas $\alpha\beta$

i_a, i_b e i_c Correntes nas coordenadas abc

I_{CH} Corrente sobre o capacitor C_H

I_{mag} Corrente de magnetização do transformador

I_{PRI} e I_{SEC} Correntes nos enrolamentos do transformador

$I_{SEC(REF)}$ Corrente de referência no secundário do transformador

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

k Fator de acoplamento

L_S Indutores de alisamento

L_{11} e L_{22} Indutâncias do primário e secundário do transformador

m_a e m_f Índices de modulação de amplitude e de frequência, respectivamente

M_{12} Indutância mútua do transformador

MME Ministério de Minas e Energia

$p'_{3\phi}, p'_\alpha$ e p'_β Potências fictícias

p_{carga} e q_{carga} Potências ativa e reativa requeridas pela carga, respectivamente
 p_{tap} , p_{pri} e p_{sec} Potências no elo CC e nos enrolamentos do transformador
 PI Controlador proporcional-integral
 PLL Phase Locked Loop
 PWM Pulse Width Modulation
 S_1 e S_2 GTOs da Chave-H
 S_{base} Potência aparente do transformador
 SIN Sistema Interligado Nacional
 $SPWM$ Sinusoidal Pulse Width Modulation
 t_{ON} Tempo em que as chaves estão conduzindo
 $UFRJ$ Universidade Federal do Rio de Janeiro
 v'_α e v'_β Tensões fictícias utilizadas no PLL
 V_C Tensão sobre o capacitor principal da Chave-H
 v_d e v_q Tensões nas coordenadas dq
 v_i Sinal de referência para o conversor trifásico
 V_m Valor de pico da tensão de fase
 v_α e v_β Tensões nas coordenadas $\alpha\beta$
 v_a , v_b e v_c Tensões nas coordenadas abc
 V_{CHB} e V_{CHC} Valores fictícios da tensão V_{CH}
 V_{CH} Tensão sobre o capacitor da Ponte-H
 V_{COL} Valor coletivo da tensão sobre o capacitor C_H
 $V_{DC(REF)}$ Tensão de referência do capacitor C_{DC}
 V_{DC} Tensão sobre o capacitor C_{DC}
 V_{LIM} Referência de tensão responsável pelo limite de carregamento da capacitor C
 V_{PRI} e V_{SEC} Tensões nos enrolamentos do transformador

V_{REF}	Tensão de referência do controlador do Tap unidirecional
v_{tap}	Tensão sobre os terminais do Tap
v_{tri}	Portadora triangular
VSI	Voltage Source Inverter
$x_{disp_{pu}}$	Reatância de dispersão em <i>p.u.</i>
Z_L	Carga indutiva conectada ao sistema
Z_{base}	Impedância base da Ponte-H
ZCS	Zero Current Switching
ZVS	Zero Voltage Switching

Lista de Figuras

1.1	Relação custo de investimento versus distância de linhas	3
1.2	Relação perdas versus distância de linhas de transmissão	4
2.1	Percentuais de oferta de eletricidade no Brasil	10
2.2	Troncos de transmissão do Sistema Interligado Nacional	10
2.3	Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira	11
2.4	Complexo Hidrelétrico de Belo Monte	12
2.5	Sistema HVDC bipolar com derivação série	14
2.6	Sistema HVDC bipolar com derivação paralela	14
2.7	Inserção do Tap HVDC no sistema principal	18
2.8	Diagrama do Conversor CC-CC	19
2.9	Diagrama esquemático do Tap HVDC	20
2.10	Estágios de Funcionamento da Chave-H	20
2.11	Arranjo do transformador com núcleo de ar	22
2.12	Diagrama em blocos do controle do Tap HVDC	24
2.13	Diagrama em blocos do controle com circuito de <i>reset</i>	25
2.14	Conversor Série Ressonante	26
2.15	Conversor Série Ressonante com Grampeamento de Tensão	27
2.16	Conversor Paralelo Ressonante	29
3.1	Tap HVDC conectado a um HVDC e a um consumidor isolado	32
3.2	Conversor CC do Tap HVDC bidirecional em potência	33
3.3	Conversor CC-CC em detalhes	34
3.4	Configuração básica de um sistema SVC HVDC	34
3.5	Nova configuração para a Ponte-H	35
3.6	Ponte-H redesenhada como um inversor fonte de corrente	36
3.7	Diagrama em blocos do controlador do Tap HVDC	39
3.8	Tensão sobre os terminais do capacitor da Ponte-H	40
3.9	Valor eficaz da tensão V_{CH} e erro V_{COL}	40
3.10	Topologia usada para o conversor monofásico	45
3.11	Diagrama em blocos do PLL monofásico	45

3.12	Tensão e corrente no PLL e potência trifásica fictícia	46
3.13	Frequência em rad/s e sinal de sincronismo	47
3.14	Diagrama em blocos utilizando controle adaptativo	48
3.15	Diagrama em blocos do controle vetorial monofásico	50
3.16	Diagrama simplificado do controle vetorial	51
3.17	Topologia usada para o conversor trifásico	52
3.18	Diagrama em blocos do controle do conversor utilizando teoria p-q . .	54
3.19	Diagrama em blocos para o controle vetorial	54
3.20	Perfis das tensões utilizando modulação PWM	55
3.21	Filtro RLC	56
3.22	Resposta em frequência de um filtro RLC	57
4.1	Diagrama do Tap HVDC modelado no PSCAD/EMTDC	60
4.2	Circuito de potência utilizado	60
4.3	Disparos dos GTOs da Ponte-H	63
4.4	Tensão e corrente sobre o GTO 1 da Ponte-H	63
4.5	Tensão sobre o capacitor C_H	64
4.6	Sinais fictícios e valor eficaz da tensão V_{CH}	65
4.7	Tensão V_{CH} e respectivo espectro harmônico	65
4.8	Frequência fundamental e sinal de sincronismo	66
4.9	Corrente de referência versus corrente sintetizada	67
4.10	Tensão no barramento contínuo	68
4.11	Corrente de referência sintetizada utilizando Teoria p-q	68
4.12	Corrente sintetizada pelo conversor trifásico	69
4.13	Correntes antes e depois da inserção do filtro RLC	70
4.14	Espectro harmônico das correntes do conversor trifásico e do filtro . .	70
4.15	Corrente de referência versus corrente sintetizada	71
4.16	Tensão sintetizada pelo conversor trifásico	72
4.17	Tensão do conversor trifásico e respectivo espectro harmônico	72
4.18	Tensão e corrente com o equipamento injetando potência	73
4.19	Tensão e corrente com o equipamento drenando potência	74
4.20	Potências no elo CC e nos enrolamentos do transformador	74
4.21	Potências da fonte, carga e do conversor trifásico	75
4.22	Tensão V_{TAP} e respectivo valor médio	76
4.23	Correntes nos enrolamentos do transformador com núcleo de ar	76
4.24	Potência reativa no primário do transformador com núcleo de ar	77
4.25	Tensão V_{CH} e respectivo espectro harmônico	78
4.26	Tensão e corrente com o equipamento injetando potência	78
4.27	Tensão e corrente com o equipamento drenando potência	79

4.28	Potências no elo CC e nos enrolamentos do transformador	79
4.29	Tensão V_{TAP} e valor médio instantâneo	80
4.30	Correntes nos enrolamentos do transformador ferro-magnético	81
4.31	Tap HVDC inserido ao Benchmark do Cigré	82
4.32	Tensões nas estações do HVDC sem a operação do Tap	82
4.33	Correntes nas estações do HVDC sem a operação do Tap	83
4.34	Tensões nas estações do HVDC com o Tap em operação	84
4.35	Correntes nas estações do HVDC com o Tap em operação	84
4.36	Balanco de potências com o Tap em operação	85
A.1	Chaveamento SPWM	95
A.2	Inversor genérico PWM	96
A.3	Espectro harmônico de um inversor com chaveamento SPWM	96
B.1	Potências definidas na Teoria p-q	99

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre sistemas HVDC - fonte de corrente e de tensão . . .	15
2.2	Parâmetros do transformador com núcleo de ar	23
3.1	Sistemas Elétricos Isolados	31
3.2	Parâmetros do transformador com núcleo de ar	43
3.3	Parâmetros do transformador com núcleo de ferro	44
4.1	Eventos ocorridos durante a simulação	62

Capítulo 1

Introdução

São listadas nesse capítulo as principais vantagens e desvantagens da utilização da transmissão em corrente contínua em relação à alternada. Mostra-se que a partir de uma dada distância, a transmissão em CC torna-se economicamente mais atrativa do que a CA. Por último, são apresentados a motivação para o desenvolvimento deste trabalho e os objetivos a que se propõe.

1.1 Aspectos Gerais

No início do século passado, as concessionárias de energia eram conectadas aos seus vizinhos por meio de extensões dos sistemas CA, objetivando um melhor aproveitamento de seus recursos [1]. Essas interconexões eram de extensão geográfica limitada e dependiam de oportunidades locais. No entanto, no fim da década de 50 e meados dos anos 60, as tecnologias referentes à transmissão de energia já haviam sido desenvolvidas, de forma a permitir a interligação de sistemas mais longínquos e com maiores níveis de tensão e potência. Essas interligações permitiram que diferentes regiões permutassem energia entre si, obtendo assim uma melhor utilização dos recursos energéticos disponíveis, além de propiciarem um incremento na confiabilidade dos sistemas elétricos. Apesar de serem mais complexas quanto à operação e planejamento, as mesmas trazem inúmeras vantagens que acabam por suplantar eventuais problemas que possam surgir no decorrer de sua operação.

Os sistemas de transmissão de energia são em sua quase totalidade abastecidos com tensões alternadas, salvo em algumas exceções, onde são utilizados sistemas HVDC (*High Voltage Direct Current*). A utilização dessa tecnologia pode ser economicamente justificável, sobretudo quando a distância entre as estações é muito grande, visto que o investimento para a instalação de uma linha de transmissão CC torna-se menor do que o de linhas CA.

A Fig. 1.1 apresenta a relação custo de investimento da instalação versus distância para linhas de transmissão [2, 3]. Observa-se que a partir de uma dada distância, denominada “*breakeven distance*”, o emprego de sistemas de corrente contínua torna-se mais vantajoso do que os de corrente alternada, mesmo considerando o custo elevado das estações conversoras. É importante salientar que essas considerações são válidas somente para comparações entre uma linha CC e uma linha CA convencional e não otimizada.

De uma forma geral, os sistemas HVDC apresentam outras vantagens quando comparados aos sistemas de corrente alternada convencionais. Essas vantagens são apresentadas a seguir:

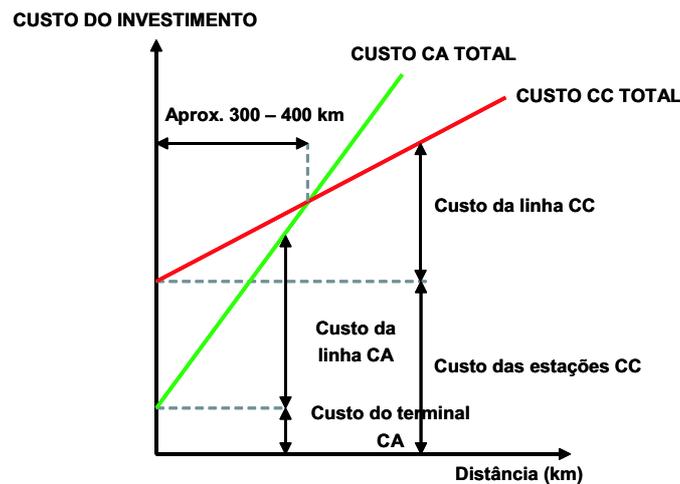


Figura 1.1: Relação custo de investimento da instalação versus distância de linhas de transmissão.

- i. Permitem a interligação de sistemas assíncronos [1], utilizando características de ajustes de potência/frequência não compatíveis com conexão síncrona, como é o caso da estação HVDC *back-to-back* de Garabi que interliga a Argentina (50,0 Hz) ao Brasil (60,0 Hz).
- ii. Diminuição do efeito corona: os problemas relacionados ao efeito corona ocorrem tanto nos sistemas CA quanto nos sistemas CC [4]. Entretanto, as circunstâncias pelas quais ocorre o efeito são diferentes. Por exemplo, em dias secos, um sistema com tensão igual a 600,0 kV, apresenta as mesmas perdas tanto para sistemas CC quanto para CA. Em contrapartida, quando o tempo está tempestuoso, as perdas no sistema CC aumentam de forma bem menos significativa do que nos de CA.
- iii. Limitação da corrente de curto-circuito: quando uma rede CA é construída de uma usina até um centro de carga, o nível de corrente de curto-circuito aumenta no sistema receptor. Esta é a razão pela qual muitas unidades geradoras estão sendo conectadas através de elos CC. O sistema CC não contribui para a variação da corrente de curto-circuito do sistema CA.
- iv. Diminuição das perdas por efeito Joule, considerando mesma secção e mesmo nível de isolamento dos condutores: um sistema de transmissão CC otimizado gera menores perdas que um sistema CA para uma mesma capacidade de potência. Decerto que as perdas devido aos conversores devam ser

consideradas, mas estas são proporcionais à 0,6% da potência transmitida em cada estação (vide Fig 1.2).

- v. Controlam intercâmbios de energia garantindo que as margens de estabilidade do sistema sejam mantidas. É particularmente importante a capacidade de controlar fluxo de energia para impedir a propagação de distúrbios graves, restringindo assim a extensão de blecautes. Esse controle também pode ser realizado em redes CA utilizando equipamentos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*).

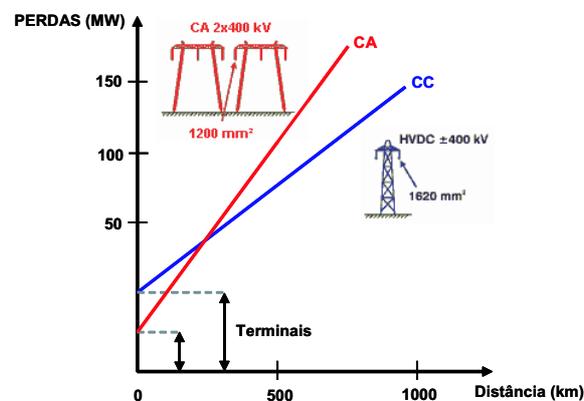


Figura 1.2: Relação perdas versus distância de linhas de transmissão.

As vantagens técnicas aliadas às vantagens de ordem econômica oferecidas por linhas ou cabos de custos mais baixos, a redução nas faixas de servidão e os níveis mais baixos de campos eletromagnéticos tornam a utilização de elos de corrente contínua uma boa opção para a transmissão de energia em longas distâncias.

1.2 Identificação do Problema

Os elos de transmissão em corrente contínua caracterizam-se pela interligação de dois sistemas de corrente alternada através de duas estações conversoras, um terminal retificador e um inversor. A conexão entre estas estações é feita através de uma ou mais linhas de transmissão em corrente contínua, de única ou dupla polaridade. A retificação e a inversão são realizadas nas pontes conversoras através de elementos semicondutores.

Uma das maiores desvantagens dos sistemas HVDC quando comparados à transmissão em corrente alternada é a dificuldade em conectá-los a sistemas CA locais ao longo do tronco de transmissão do sistema, uma vez que é evidentemente impossível o emprego direto de transformadores nas linhas de transmissão de corrente contínua.

Estes sistemas CA compreendem consumidores isolados, consumidores com atendimento limitado ou pequenos geradores sem possibilidade de acesso ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Estão localizados em regiões de baixa densidade demográfica¹ e encontram-se distantes dos grandes centros consumidores, onde as distâncias a serem transpostas de modo a conectá-las aos sistemas existentes tornam a distribuição desinteressante economicamente. O atendimento às necessidades energéticas dessas regiões possui uma estrutura de suprimento bem mais cara que nos sistemas interligados e se contrapõe a consumidores com níveis de renda abaixo da média nacional.

Nesse contexto, os sistemas HVDC de transmissão constituiriam alternativas mais interessantes para a expansão da malha transmissora quando o intercâmbio de pequenos blocos de energia entre as linhas de transmissão CC e os sistemas CA locais fosse realizável de forma econômica e confiável.

A fim de descaracterizar os sistemas HVDC como sistemas de transmissão ponto a ponto e torná-los flexíveis quanto à extração e injeção de potência ao longo da linha, surge o Tap HVDC, dispositivo que atua como um conversor CC-CC com a função de drenar ou injetar potência ativa no HVDC.

1.3 Motivação

A energia elétrica é um dos recursos fundamentais para o desenvolvimento econômico de um país, bem como para promover a satisfação e o bem-estar da sociedade. Com a crescente demanda mundial por energia, a transmissão em corrente contínua tenderá a um papel cada vez mais importante, especialmente quando se fizer necessário o transporte de reservas de energia cujas fontes estejam longe dos pontos de consumo. Assim sendo, um dos requisitos mais exigidos aos sistemas de

¹Atendem a uma área de 45% do território e cerca de 3% da população nacional.

transmissão a longas distâncias é que estes tenham capacidade de entregar parte da potência transmitida ao longo de sua transmissão, beneficiando dessa forma as comunidades que cederam espaço à transmissão e que têm direito a receber parte dessa energia que está sendo transmitida.

Os trabalhos anteriormente publicados se restringiram somente a equipamentos destinados ao dreno de energia do HVDC. Visando o atendimento desses consumidores e a conexão de possíveis geradores locais próximos às linhas de transmissão, propõe-se esse estudo de modo a viabilizar um equipamento capaz de drenar ou injetar pequenos blocos de energia em pontos intermediários das linhas de corrente contínua, possibilitando o intercâmbio entre os mesmos.

1.4 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a apresentação de uma nova topologia para o Tap HVDC, permitindo assim a conexão tanto de consumidores quanto de geradores ao sistema HVDC, de forma a realizar intercâmbio de energia com este. Possibilita também o acesso à rede, em qualquer ponto da linha CC, no intuito de drenar potência a fim de alimentar cargas isoladas ou injetar potência de possíveis fontes de energia. Estes sistemas locais podem ser isolados ou podem estar conectados a um sistema CA qualquer.

Por exemplo, quando a demanda solicitada por um determinado consumidor for inferior à produzida localmente, o excedente de energia do lado CA será injetado na linha HVDC. Quando houver necessidade de complemento de energia visando o atendimento de uma carga maior que a inicialmente prevista, o Tap drenará potência do HVDC de forma a atender a demanda atual.

A fim de comprovar a eficiência do equipamento no que diz respeito ao dreno e à injeção de potência ao longo do HVDC, modelou-se um sistema simplificado no qual os terminais do Tap foram conectados a uma fonte de corrente e ao potencial de terra. Mais adiante, inseriu-se o equipamento em um sistema HVDC completo - o Cigré HVDC Benchmark. A ferramenta computacional utilizada foi o software de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

1.5 Estrutura do Texto

O texto desta Dissertação foi organizado em 5 capítulos, que possuem o conteúdo resumido nos parágrafos seguintes.

No capítulo 2 é feito um levantamento bibliográfico englobando o histórico do equipamento e o que de mais relevante foi publicado acerca do mesmo. São apresentados a topologia do Tap HVDC unidirecional e seu princípio de funcionamento. Em seguida, detalham-se os componentes principais do conversor CC-CC: Chave-H, transformador com núcleo de ar e o controlador do equipamento. Por último, faz-se uma revisão sobre os princípios de comutação suave (*soft-switching*) e respectivos conversores.

No capítulo 3 são apresentados o Tap HVDC bidirecional e seu princípio de funcionamento. São listadas as mudanças na configuração original do equipamento de forma a se atingir a bidirecionalidade de potência. São mostradas as estratégias de controle utilizadas e o redimensionamento dos parâmetros do transformador.

No capítulo 4 são apresentados os resultados do equipamento no que tange ao dreno e injeção de potência ao longo de linhas HVDC. A princípio, modelou-se um sistema no qual os terminais do equipamento estão conectados a uma fonte de corrente e ao potencial de terra. Posteriormente, o equipamento foi inserido a um sistema HVDC completo - o Cigré HVDC Benchmark.

No capítulo 5 seguem-se as principais conclusões obtidas com relação ao tema desenvolvido e apresentadas algumas sugestões para a continuidade do trabalho.

Ao final deste trabalho são adicionados dois apêndices. O Apêndice A é dedicado à apresentação da Modulação por Largura de Pulso Senoidal (SPWM), e o Apêndice B, destinado à Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas - Teoria p-q.

Capítulo 2

Tap HVDC Unidirecional

O objetivo deste capítulo é apresentar uma alternativa ao dreno de energia ao longo de linhas de corrente contínua (Tap HVDC), com vistas ao abastecimento de pequenas localidades isoladas. É apresentado um levantamento bibliográfico a respeito do que mais de relevante foi publicado acerca do equipamento, apontando possíveis incrementos na topologia do mesmo. São descritos o modo de conexão ao sistema HVDC, o princípio de funcionamento, suas estruturas e controles. Por último, procura-se situar o conversor CC-CC no conjunto dos conversores de comutação suave.

2.1 Introdução

A interligação de sistemas elétricos constitui-se, em geral, em uma medida bastante eficiente, tanto técnica quanto econômica. A medida em que se aumenta a demanda de energia, mais fontes necessitam ser exploradas e novas redes de transmissão necessitam ser construídas para conectar essas novas estações geradoras aos novos pontos de distribuição e também às estações já existentes.

Se por um lado, essas interligações implicam numa maior complexidade de operação do sistema como um todo, por outro, são economicamente vantajosas, além de aumentarem a confiabilidade do suprimento às cargas. Se um centro consumidor é alimentado radialmente, falhas na transmissão podem prejudicar ou mesmo comprometer totalmente a sua alimentação, ao passo que se tal centro consumidor fizer parte de um sistema interligado, existirão caminhos alternativos para o seu suprimento [5].

Essas interligações também podem propiciar um melhor aproveitamento das disponibilidades energéticas de regiões com características distintas. Um exemplo é a interligação dos sistemas Sudeste/Centro-Oeste e Sul do Brasil: são sistemas caracterizados por sensíveis diferenças de hidraulicidade de seus rios, isto é, os períodos chuvosos não são coincidentes nas diversas bacias hidrográficas. Dessa forma, através da interligação pode-se fazer um adequado intercâmbio de energia elétrica, sendo o excedente de uma exportado para outra e vice-versa.

O SIN apresenta características peculiares quanto à sua distribuição espacial e constituição técnica. Com características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico, com uma forte predominância de usinas hidrelétricas. A Fig. 2.1 apresenta os percentuais de oferta de energia no Brasil, enquanto que a Fig. 2.2 mostra as interligações² existentes entre os troncos de transmissão do sistema elétrico brasileiro.

²Fonte: Ministério de Minas e Energia em 20/05/2006 - www.mme.gov.br

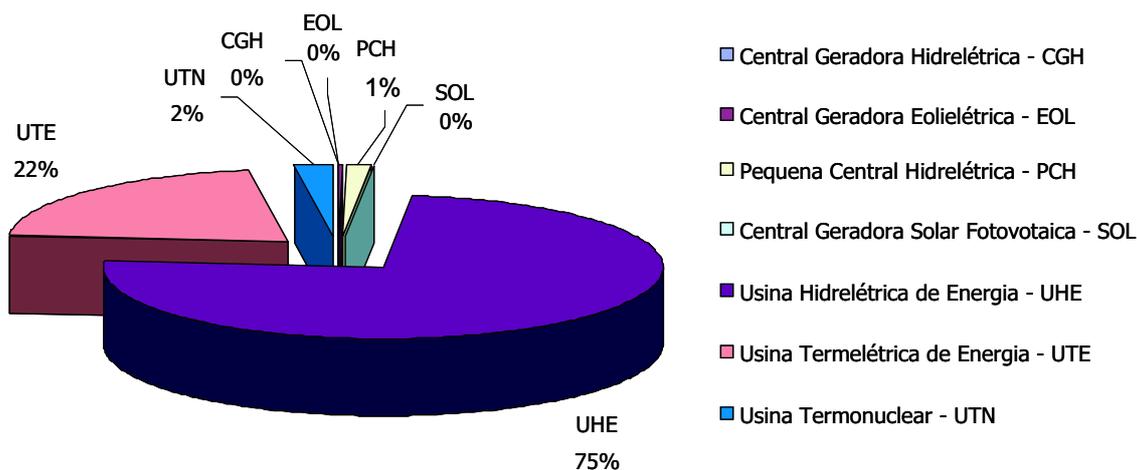


Figura 2.1: Percentuais de oferta de eletricidade no Brasil.



Figura 2.2: Troncos de transmissão do Sistema Interligado Nacional.

Uma das particularidades do SIN é o fato dos aproveitamentos hídricos próximos aos centros de consumo já estarem quase totalmente utilizados. No entanto, ainda hoje, existem áreas com um enorme potencial hidroenergético pouco exploradas, localizadas sobretudo na Região Norte. Os princípios de expansão do SIN devem ser norteados de forma a otimizar o despacho dos reservatórios das usinas hidrelétricas, interconectando de forma robusta as remotas regiões de geração às cargas, que em sua maioria, encontram-se próximas aos grandes centros urbanos. Dessa forma, uma solução potencialmente interessante seria a produção de energia por usinas hidrelétricas localizadas na região Norte, transmitindo-a para as regiões Nordeste e Sudeste do país.

Tendo em vista os novos projetos de expansão destinados ao setor elétrico, entre eles os Complexos Hidrelétricos do Rio Madeira e de Belo Monte (Fig. 2.3 e Fig. 2.4), um considerável acréscimo de energia - cerca de 17.631 MW - estará disponível na matriz energética brasileira³. Para o aproveitamento dessa energia, são necessárias longas linhas de transmissão, onde o uso da transmissão em corrente contínua seria uma opção economicamente viável.

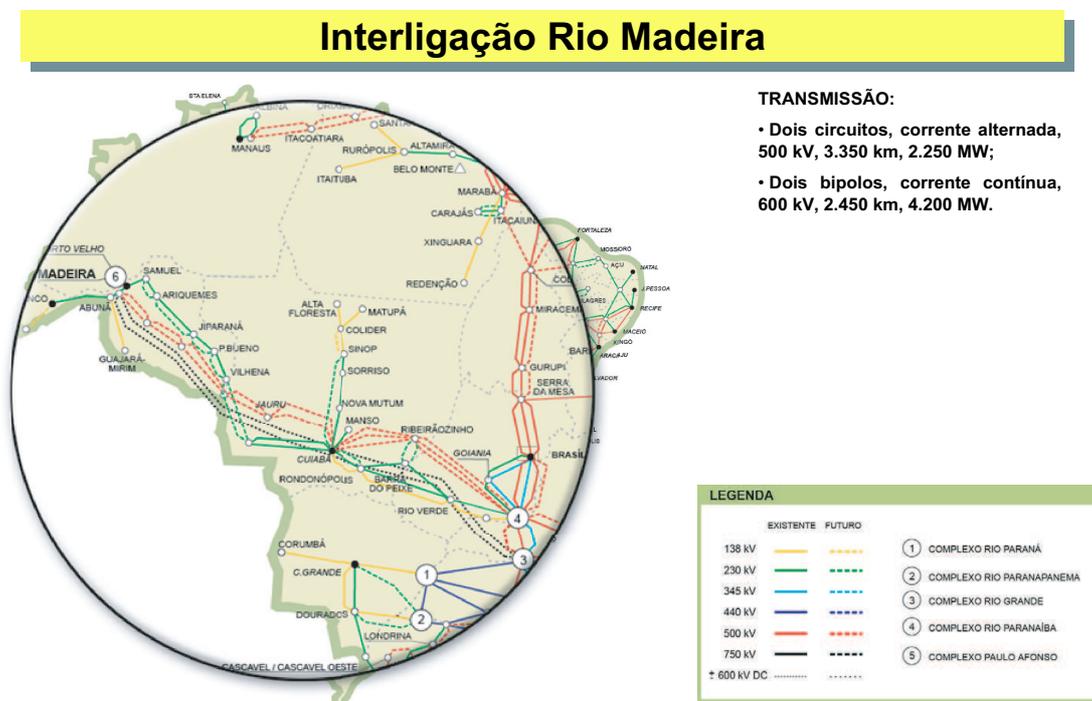


Figura 2.3: Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira.

³Fonte: Ministério de Minas e Energia em 20/09/2006 - www.mme.gov.br. Cenário Energético Brasileiro 2006-2105 - A visão do MME sobre Viabilização dos Investimentos.

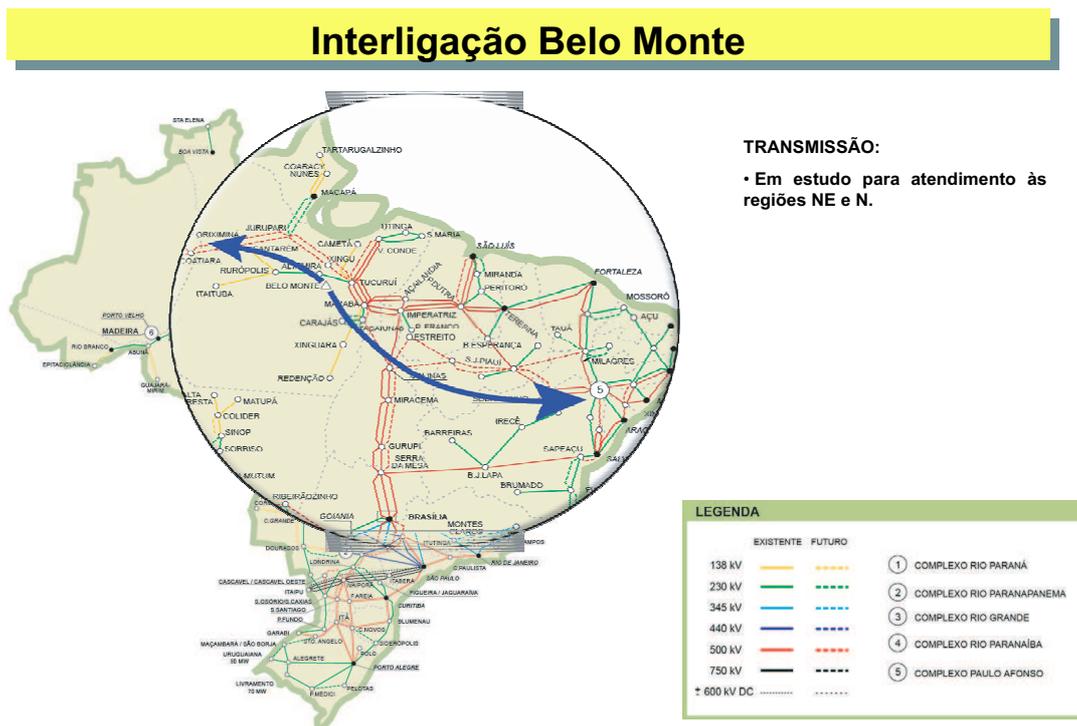


Figura 2.4: Complexo Hidrelétrico de Belo Monte.

O atendimento aos consumidores e aos pequenos geradores locais circunvizinhos a essas linhas de transmissão pode ser realizado por meio de derivações ao longo das mesmas, garantindo que regiões com baixas densidades demográficas sejam abastecidas. Tal medida traria benefícios não só às populações atendidas como também às empresas detentoras das linhas, já que neste caso, haveria um aumento do zelo por parte dos beneficiados às mesmas.

2.2 Derivações em Sistemas HVDC

Em sistemas HVDC convencionais, ou seja, com o lado CC modelado como uma fonte de corrente, a corrente de derivação pode ser obtida através de sistemas conectados em série ou em paralelo com a linha principal [6].

Em configurações do tipo série (Fig. 2.5), a operação das mesmas ocorre mediante à utilização da corrente de linha e de uma fração da tensão. Tais derivações interferem muito pouco na operação normal do sistema principal de transmissão, já que seu funcionamento é independente do fluxo de potência entre os terminais principais,

e do ponto de vista da operação pode ser equacionada como apenas um pequeno aumento nas perdas de transmissão. Para derivações com potências inferiores a 5% da potência total transmitida, o tipo série tem sido preferido em função do custo do conversor.

Já no caso de configurações em paralelo (Fig. 2.6), a operação se dá mediante uma fração da corrente de linha, sendo submetida à tensão total. A maior quantidade de dispositivos semicondutores em série eleva em muito o custo desta configuração. A mesma só se justifica quando a potência envolvida for da mesma ordem de potência do elo CC (sistemas multiterminais) ou quando se fizer necessária a operação com grandes variações de corrente.

A diferença existente entre uma derivação e um sistema HVDC multiterminal reside no fato da primeira ter um controle independente do sistema principal, operando com potência muito menor do que a transmitida.

Embora todos os sistemas HVDC atualmente existentes sejam baseados em fontes de corrente, existem autores que propõem sistemas do tipo fonte de tensão [6]. Uma comparação entre essas duas topologias é apresentada na Tab. 2.1.

Vários trabalhos científicos tem sido publicados no sentido de encontrar soluções técnicas e economicamente viáveis visando o abastecimento de pequenos consumidores próximos às linhas CC. Objetivando tornar os sistemas HVDC flexíveis quanto à extração de potência, assim como são os sistemas CA, surge o Tap HVDC, um conversor CC-CC capaz de drenar energia do HVDC.

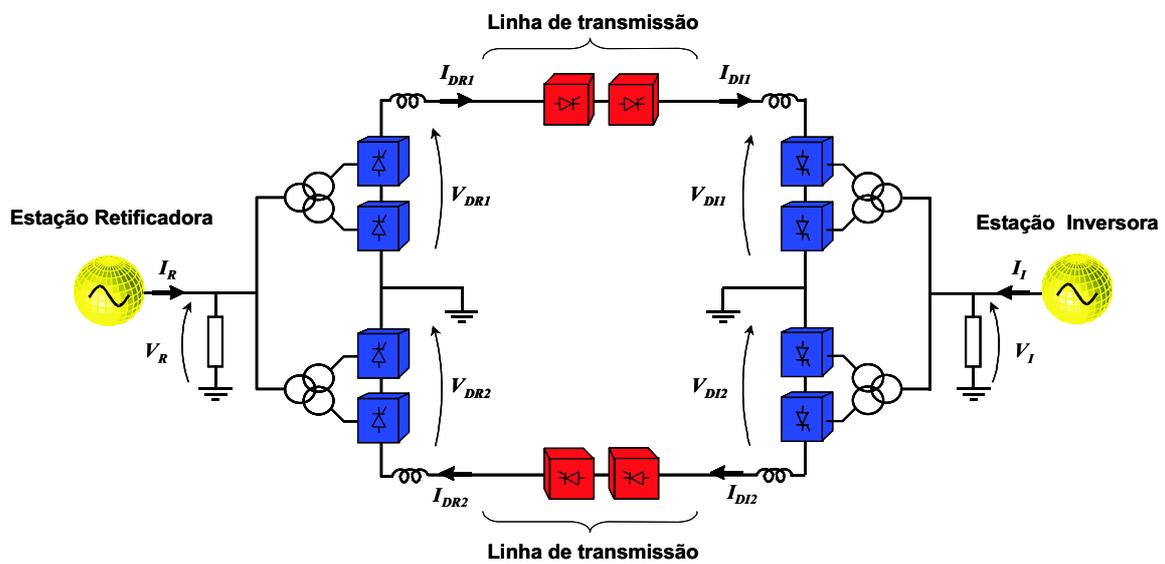


Figura 2.5: Derivação série conectada a um sistema HVDC bipolar.

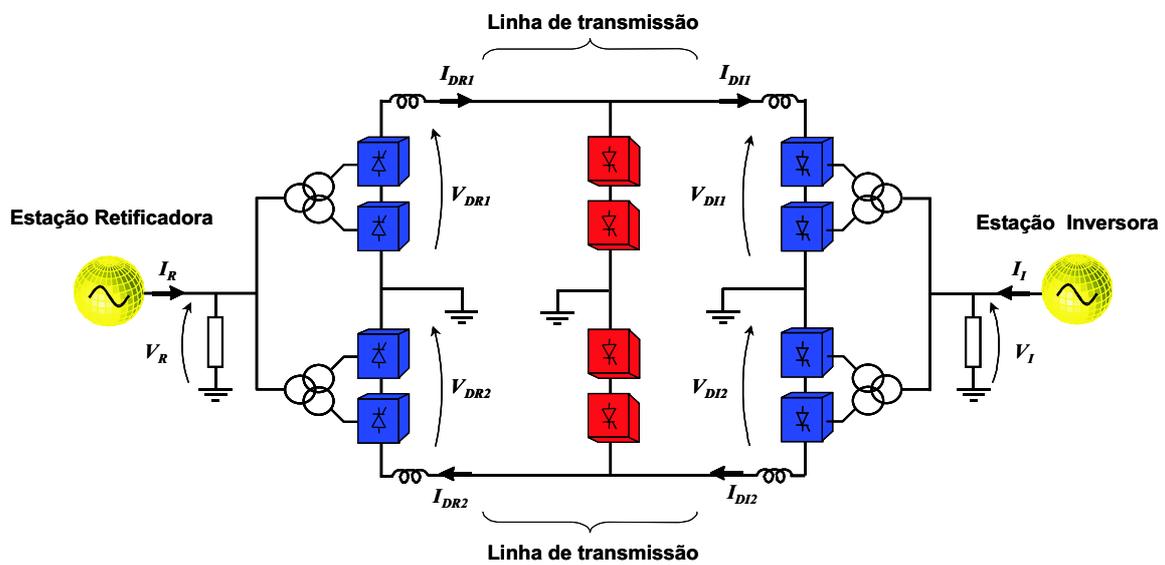


Figura 2.6: Derivação paralela conectada a um sistema HVDC bipolar.

Tabela 2.1: Comparação entre sistemas HVDC do tipo fonte de corrente e fonte de tensão

Sistemas HVDC	Baseados em Fonte de Corrente	Baseados em Fonte de Tensão
Derivação Série	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Corrente CC pela derivação é imposta pelo elo CC. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Controle complexo, já que tensão e corrente CC variam.
Derivação Paralela	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Derivação submetida à tensão total da linha CC. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Derivação submetida à tensão total da linha CC.
Conversores	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Controle PWM complexo; ✓ Necessidade de caminho de circulação de corrente no lado CC; ✓ Chaves unidirecionais para corrente e bidirecionais para tensão. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Controle PWM simples; ✓ Não necessitam de caminho de circulação de corrente no lado CC, gerando perdas menores nas chaves; ✓ Chaves bidirecionais para corrente e unidirecionais para tensão.

2.3 Histórico do Tap HVDC

Esta seção tem por objetivo apresentar o que de mais relevante foi publicado na literatura técnico-científica acerca do Tap HVDC, de modo a listar as principais contribuições que permeiam o assunto em estudo.

Esse estudo não se restringiu apenas às publicações mais recentes, apresentando também tópicos relacionados ao histórico do Tap HVDC e a incrementos na topologia do conversor CC do equipamento.

Em 1981, foi proposto por Bowles *et. al.* [7] uma estação conversora Tap HVDC baseada em semicondutores de potência e em máquinas rotativas. O equipamento era constituído por duas partes principais: uma unidade destinada à extração de potência do HVDC e uma máquina de corrente alternada responsável pelo fornecimento da tensão necessária ao acionamento das chaves, assim como da energia demandada pela carga.

Em 1991, M.P. Muniz [8] propôs a utilização de conversores trifásicos, a fim de alimentar cargas próximas às linhas de corrente contínua. Foi realizada uma criteriosa análise sobre as diversas topologias passíveis de serem utilizadas para este fim, apontando as particularidades de cada uma.

Em 1995, foi apresentada por Barman [9] a integração de pequenas estações Tap HVDC, voltadas sobretudo para o atendimento de comunidades com baixa densidade demográfica e que encontram-se isoladas geograficamente.

Em 1997, Aghaebrahimi e Menzies [10] apresentaram um trabalho no qual o Tap HVDC é constituído por quatro GTOs, dois capacitores, um transformador monofásico e uma ponte retificadora a diodos. O atendimento às cargas trifásicas era feito por um conversor monofásico-trifásico. No ano seguinte, o mesmo Aghaebrahimi [11] publicou um trabalho que descrevia a utilização de transformadores com núcleo de ar em Taps HVDC. Nesse novo trabalho, foi feita uma análise das principais características que devem ser consideradas na ocasião do projeto do transformador do Tap.

Em 2000, Aquino [12] apresentou um novo conversor CC-CC, de chaveamento suave, destinado à extração de energia (5,0 MW) de sistemas de transmissão em corrente contínua. Foi apresentado também o desenvolvimento do modelo analítico completo do conversor, partindo de equações diferenciais que descrevem o seu comportamento.

Em 2003, Machado e Aredes [13, 14] apresentaram uma otimização do modelo do novo conversor CC-CC, agora capaz de drenar 25,0 MW do sistema HVDC. Este conversor consistia em uma chave semicondutora em série com o primário de um transformador com núcleo de ar. Foi apresentado também um estudo baseado em especificações técnicas de fabricantes de capacitores e de dispositivos semicondutores, visando uma futura implementação do equipamento.

Em 2004, Chetty *et. al.* [15] apresentaram um trabalho onde foram analisadas as características dinâmicas de uma estação Tap HVDC aplicada em áreas rurais.

2.4 Conexão ao Sistema HVDC e Princípios de Funcionamento

A inserção do Tap ao sistema HVDC deve ser realizada de forma a não comprometer a operação normal das estações conversoras, ou seja, os níveis de segurança e estabilidade das mesmas deverão ser mantidos. Para isso, faz-se necessário um reduzido número de componentes ligados diretamente ao pólo e a operação destes tem de ser simples, bem como o *bypass* no caso de algum defeito no Tap HVDC que comprometa seu funcionamento.

A conexão do equipamento pode se dar de duas maneiras distintas: em série ou em paralelo com a linha. A ligação em série é utilizada quando a potência a ser drenada ou injetada for bem inferior à potência transmitida pelo HVDC. Já a ligação em paralelo é útil quando a potência do equipamento for da mesma ordem de grandeza do HVDC.

Como o objetivo do equipamento em estudo é o suprimento de pequenas cargas próximas às linhas de corrente contínua, a topologia a ser utilizada é aquela que considera a conexão em série, visto que, a potência a ser drenada pelo mesmo é ínfima em relação à transmitida pela linha. A Fig. 2.7 apresenta o diagrama esquemático do Tap HVDC inserido em série no pólo positivo de um HVDC bipolar. Nela observa-se o conversor CC-CC, o capacitor C_{DC} e o inversor trifásico responsável pelo atendimento das cargas trifásicas localizadas próximas ao elo CC.

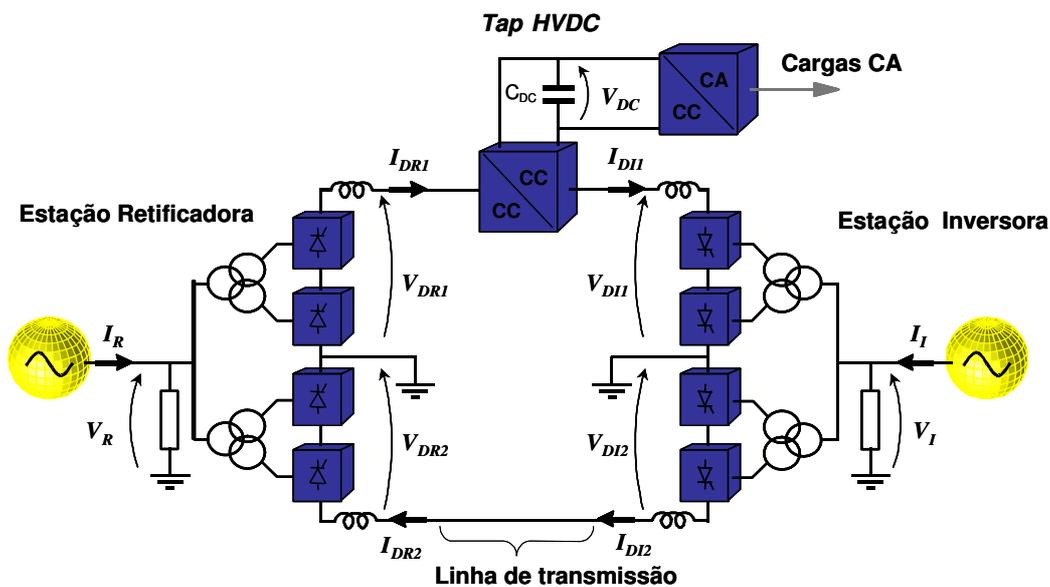


Figura 2.7: Inserção do Tap HVDC no sistema principal.

O conversor CC-CC da Fig. 2.7 é detalhado no diagrama apresentado na Fig. 2.8. Ao pólo positivo do HVDC conecta-se uma chave ideal, um capacitor principal (C), responsável pela circulação da corrente da linha CC nos intervalos que a chave estiver aberta e o primário do transformador com núcleo de ar.

A corrente que circula no conversor é a própria corrente do HVDC. Quando a chave está aberta, a corrente I_D carrega o capacitor C. A chave então fecha-se e a tensão sobre o capacitor é aplicada aos terminais do transformador, descarregando o mesmo. Com este padrão de chaveamento, aparece uma tensão alternada nos terminais do transformador e o Tap drena potência do sistema HVDC.

Essa operação é realizada através de chaves semicondutoras na faixa de algumas centenas de *Hertz*. Nesta faixa de frequência de chaveamento, as perdas devidas à comutação podem ser inaceitáveis. A fim de se eliminar ou minimizar essas perdas

são utilizados circuitos que, nas transições de estado das chaves, produzem uma situação de tensão e/ou corrente nulas, minimizando, conseqüentemente, a potência dissipada. Estes processos são denominados de técnicas de comutação suave. Quando a comutação se dá com tensão nula nos terminais da chave, a mesma é denominada de ZVS (do inglês, *Zero Voltage Switching*). Quando a comutação acontece com corrente nula é chamada de ZCS (do inglês, *Zero Current Switching*). Assim sendo, substituiu-se a chave ideal por uma ponte de chaves controladas (Chave-H) capaz de operar com reduzidas perdas por chaveamento.

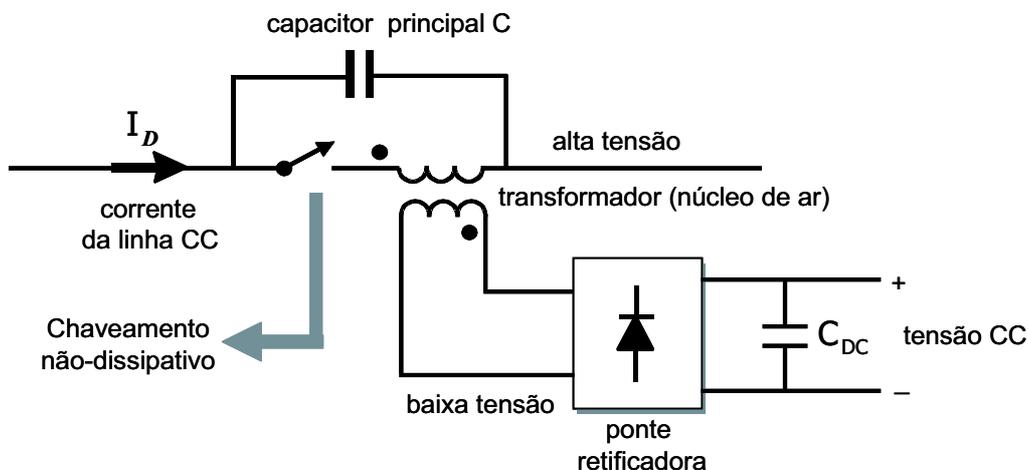


Figura 2.8: Diagrama do Conversor CC-CC.

O Tap HVDC é apresentado em detalhes na Fig. 2.9, onde é mostrada a Chave-H em substituição à chave ideal da Fig. 2.8. Em série com a mesma tem-se o primário do transformador com núcleo de ar (L_{11}) e, em paralelo a esse conjunto, o capacitor principal C. O Tap conta ainda com uma ponte completa de diodos, a fim de retificar as oscilações geradas no secundário do transformador. Assim, pode-se carregar o capacitor C_{DC} conectado à saída do Tap, onde são ligados os inversores destinados ao atendimento das cargas CA.

As seções subseqüentes têm como objetivo a descrição dos componentes do Tap HVDC, assim como suas características e princípios de funcionamento.

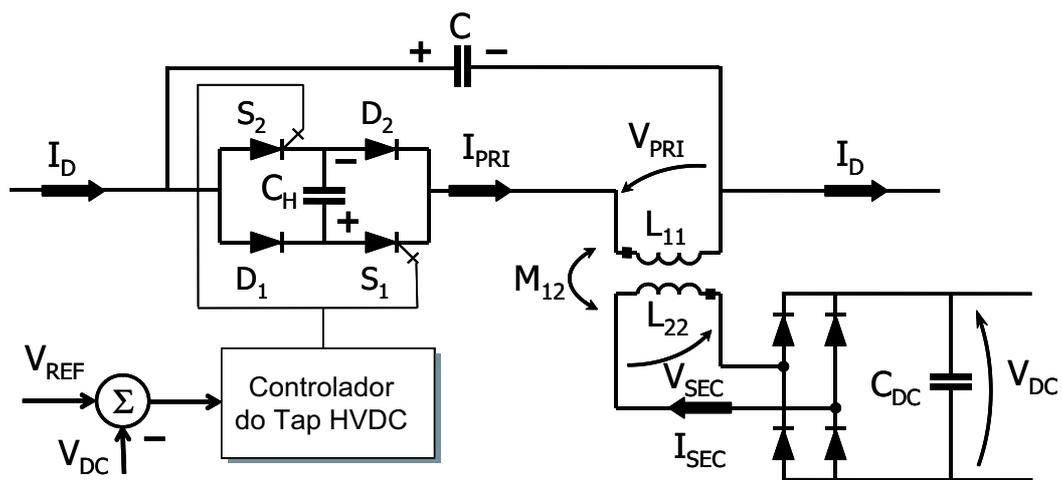


Figura 2.9: Diagrama esquemático do Tap HVDC.

2.4.1 Chave-H

A Fig. 2.10 apresenta o diagrama esquemático da Chave-H. Podem ser identificadas quatro chaves semicondutoras: dois GTOs (S_1 e S_2) e dois diodos (D_1 e D_2). A ponte utiliza um único capacitor de *snubber* (C_H), possibilitando a comutação suave das chaves. A disposição das chaves da ponte faz com que a mesma apresente característica unidirecional em corrente.

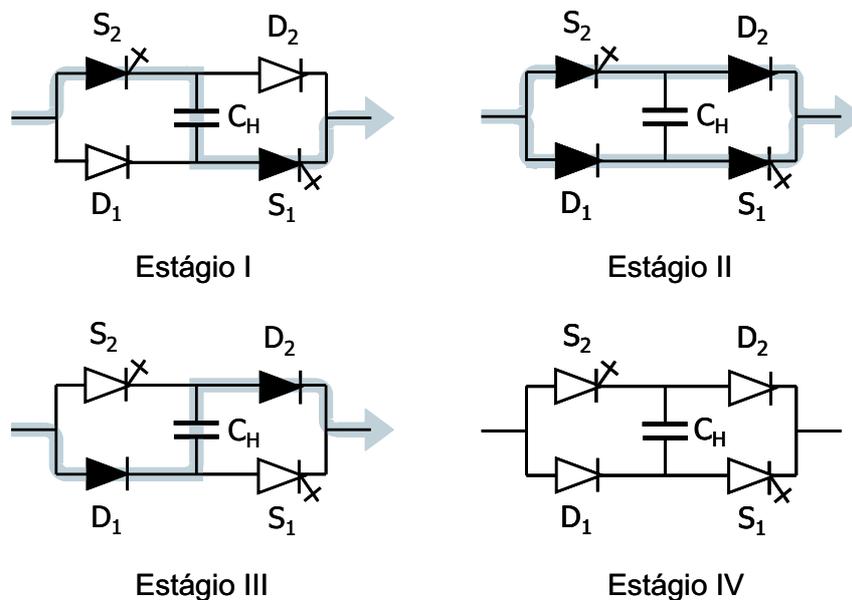


Figura 2.10: Estágios de Funcionamento da Chave-H.

O funcionamento da Chave-H pode ser dividido em 4 estágios distintos que serão analisados a seguir. A Fig. 2.10 auxilia o entendimento desses estágios e indica quais chaves estão em condução (com preenchimento) e, quais estão abertas (sem preenchimento).

- i. Estágio 1 - Esse primeiro estágio é marcado pelo início de condução dos GTOs (S_1 e S_2). Considera-se inicialmente que todas as chaves estão abertas e o capacitor C_H encontra-se carregado. É aplicado um sinal no *gate* dos GTOs, fazendo que os mesmos entrem em condução. O sentido da corrente que se estabelece em C_H faz com que o mesmo comece a descarregar, reduzindo a tensão em seus terminais.
- ii. Estágio 2 - Quando o capacitor está totalmente descarregado, os diodos (D_1 e D_2) entram naturalmente em condução. A partir desse instante, a corrente da Chave-H passa a ser compartilhada pelos dois ramos da estrutura, sendo nula no capacitor, mantendo o mesmo descarregado.
- iii. Estágio 3 - Este estágio é marcado pela abertura dos GTOs, sendo esta realizada sob tensão nula (ZVS). Este fenômeno é verificado pois os diodos da Chave-H ainda encontram-se conduzindo e o capacitor C_H está completamente descarregado. A partir desse momento, a corrente passa a fluir exclusivamente pelos diodos (D_1 e D_2) e pelo capacitor C_H , dando início à carga do capacitor.
- iv. Estágio 4 - A partir do momento que o capacitor C_H vai sendo energizado, a corrente que flui pela Chave-H tende a anular-se e a reverter-se, fazendo com que os diodos (D_1 e D_2) parem de conduzir. Nesse instante, o capacitor C_H está completamente carregado e nenhuma corrente flui pela ponte. Como a corrente é nula, o fechamento dos GTOs (S_1 e S_2) no próximo estágio é do tipo ZCS. O fechamento dos mesmos põe fim ao quarto e último estágio de funcionamento, reconduzindo o dispositivo ao estado verificado na primeira etapa.

2.4.2 Transformador com núcleo de ar

O conversor CC do Tap HVDC trabalha em uma faixa de frequência relativamente alta (algumas centenas de *Hertz*). Assim, a utilização de um transformador de núcleo ferromagnético não seria apropriada, uma vez que as perdas por correntes parasitas e histerese seriam muito grandes. Neste caso, a solução adequada é a utilização de um transformador com núcleo de ar, onde as perdas acima citadas não são verificadas.

O transformador utilizado, mostrado na Fig. 2.11, deverá prover o isolamento galvânico aos equipamentos conectados no seu secundário (retificador, capacitor C_{DC} e inversor ou linhas CC) do nível de tensão do elo HVDC ($\pm 600,0 \text{ kV}$). Além disso, será responsável pelo ajuste de tensões e correntes para os níveis desejados no seu secundário.

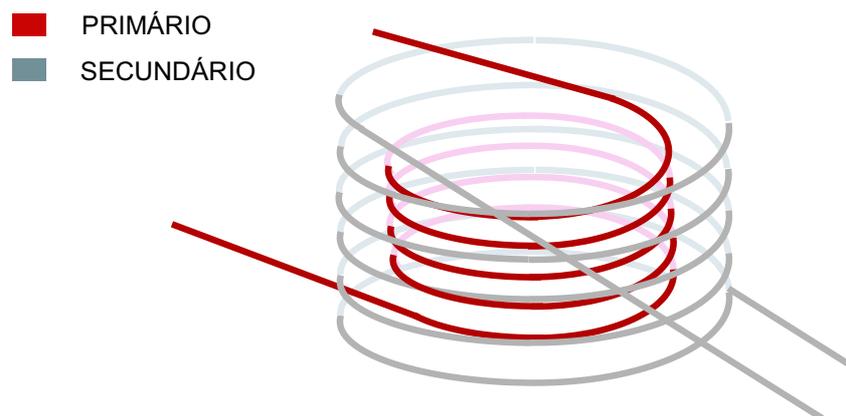


Figura 2.11: Arranjo do transformador com núcleo de ar.

Vários arranjos podem ser utilizados para a construção de um transformador deste tipo. O projeto inicial desse dispositivo foi inicialmente concebido por Portela (COPPE/UFRJ) e consiste em uma estrutura onde os enrolamentos do primário e secundário formam dois solenóides concêntricos. A Tabela 2.2 lista as características principais do equipamento referentes ao dreno de 5,0 MW do sistema HVDC principal [16, 17]. Posteriormente, o transformador foi redimensionado para o Tap de 25,0 MW [14].

Tabela 2.2: Parâmetros do transformador com núcleo de ar

Características do Transformador	Valores
Indutância do enrolamento primário (L_{11})	3,0 mH
Indutância do enrolamento secundário (L_{22})	3,0 mH
Indutância Mútua (M_{12})	2,25 mH
Fator de acoplamento (k)	0,75

2.4.3 Controlador do Tap HVDC

O controlador do Tap HVDC tem como função regular a tensão medida sobre o capacitor C_{DC} no seu valor nominal, assim como drenar um valor pré-estabelecido de potência. Para isso, faz-se uso de um controlador que compara a tensão V_{DC} com uma tensão de referência V_{REF} e envia sinais de disparo e bloqueio aos GTOs, de modo a garantir que a tensão do barramento CC esteja sempre em torno do seu valor nominal.

A potência média drenada pelo Tap está fortemente ligada ao ciclo de trabalho do conversor CC-CC, definido como a razão entre o tempo em que as chaves estão conduzindo t_{ON} e o tempo correspondente ao período de operação T. Por exemplo, quando utilizado um ciclo de trabalho D igual a 1, o equipamento não drena potência e a corrente I_D percorre apenas o primário do transformador. Em contrapartida, quando D fosse nulo, o capacitor principal C se carregaria indefinidamente.

No entanto, a operação do equipamento frente a valores muito pequenos de D compromete a comutação suave das chaves da Chave-H, fazendo com que a mesma opere em modo *hard switching* (chaveamento dissipativo). A fim de se evitar tal condição estabelece-se limites mínimos e máximos para D, aqui denominados de D_{MIN} e D_{MAX} .

O erro ΔV_{DC} gerado da comparação entre V_{DC} e V_{REF} é aplicado a um controlador PI (proporcional-integral), onde os limites D_{MIN} e D_{MAX} são utilizados. A saída corresponde ao ciclo de trabalho que o conversor deverá operar para que se atinja o equilíbrio no balanço de potência. Esta saída é comparada com um sinal de forma trapezoidal, obtido através de um gerador de sinais [12, 18, 19]. O diagrama

em blocos para o controlador do Tap HVDC é mostrado na Fig. 2.12.

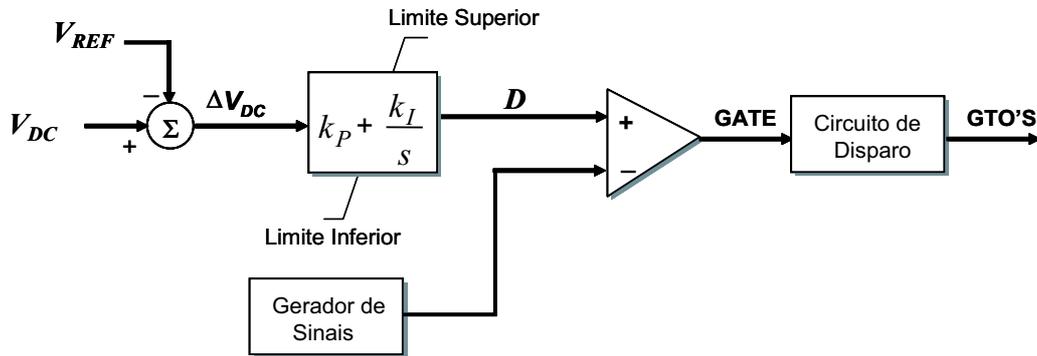


Figura 2.12: Diagrama em blocos do controle do Tap HVDC.

Mais tarde, foi adicionado ao controle um circuito auxiliar que altera a geração da onda trapezoidal, variando a frequência de acordo com a potência a ser drenada [13, 14]. O erro em V_{DC} é integrado com ganho e limites pré-estabelecidos e atua como uma referência dinâmica para a tensão sobre o capacitor principal. Essa referência (V_{LIM}) estabelece os limites de tensão para o carregamento do capacitor C.

Compara-se o valor de V_{LIM} com o valor da tensão V_C do capacitor principal C e aplica-se o erro no *reset* do integrador, gerando o sinal de rampa. O valor limite utilizado para a rampa é um pouco menor do que D_{MAX} , o que permite que o Tap opere com as chaves controladas permanentemente conduzindo e não drenando potência. O diagrama em blocos para o controlador com o circuito auxiliar de *reset* é mostrado na Fig. 2.13.

2.5 Técnicas de Comutação Suave

A frequência de chaveamento dos conversores está intimamente ligada aos esforços sobre os dispositivos semicondutores e ao aumento das perdas de comutação, ou seja, quanto maior for a frequência maior serão as perdas. No entanto, com o aumento da frequência, ocorre a diminuição nos componentes reativos do circuito dos conversores (capacitores e indutores) e do transformador.

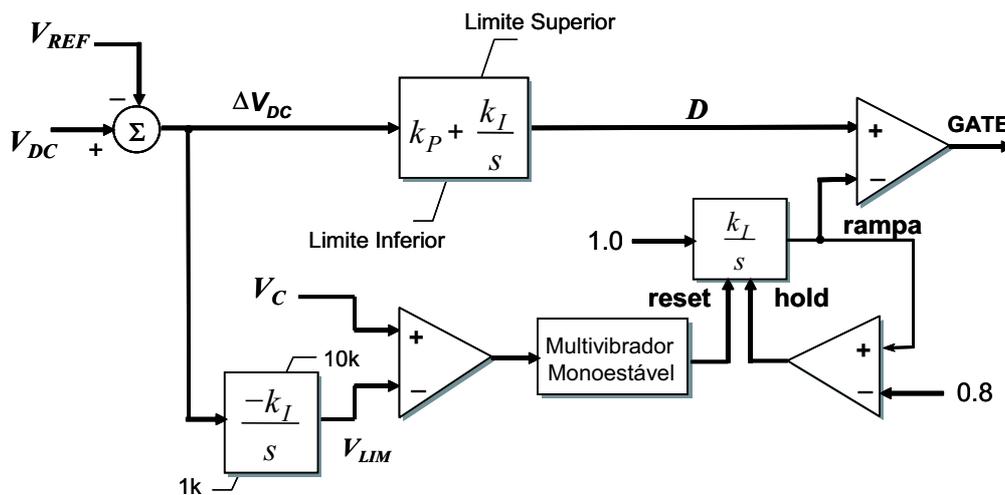


Figura 2.13: Diagrama em blocos do controle do Tap HVDC com circuito de *reset*.

Para diminuir os efeitos causados pela elevação da frequência de chaveamento são acrescentados circuitos de auxílio à comutação das chaves que têm por objetivo reduzir e/ou evitar a sobreposição das formas de onda da corrente e tensão durante os instantes de comutação e controlar a taxa de variação de ambas.

O modo como ocorre a comutação em um dispositivo semiconductor pode ser classificado como comutação dissipativa (*hard-switching*), comutação sob zero de corrente (ZCS) ou comutação sob zero de tensão (ZVS). Os circuitos de comutação suave apresentam como princípio básico proporcionar zero de corrente e/ou zero de tensão para uma chave no momento de sua comutação.

A comutação suave envolve a atenuação de algumas das causas de perdas de um conversor (corrente de cauda de IGBTs e GTOs, recuperação reversa de diodos, capacitância de saída de semicondutores, tempos finitos de *turn-on/turn-off*, entre outras). Assim, grande parte da energia que seria dissipada nas chaves é recuperada e transferida para uma das fontes do conversor através de *snubbers* regenerativos.

As subseções que se seguem procuram situar o conversor CC-CC no conjunto de conversores de comutação suave. Apesar de apresentar características que o distinguem dos demais, seu princípio básico de funcionamento é bastante similar aos conversores abaixo listados.

2.5.1 Conversor Série Ressonante

Esse tipo de conversor, mostrado na Fig. 2.14, utiliza um circuito série ressonante, de forma a realizar a comutação das chaves de maneira não dissipativa. Pode operar com frequência de chaveamento f_s superior ou inferior à frequência de ressonância f_o . Para f_s menor que f_o , as chaves comutam sob corrente nula e para f_s maior que f_o eles comutam sob tensão nula. Em ambos os casos, a potência transferida para a carga é controlada pela variação da frequência de ressonância [12, 20, 21].

O Conversor Série Ressonante tem como características principais:

- i. Proteção intrínseca de sobrecarga;
- ii. Sensibilidade à variação de carga;
- iii. Dificuldades para operar sem carga.

Um inconveniente apresentado por essa estrutura são os elevados valores de tensão sobre o capacitor ressonante. Como alternativa, pode-se interromper o ciclo ressonante através do grampeamento de tensão sobre o capacitor.

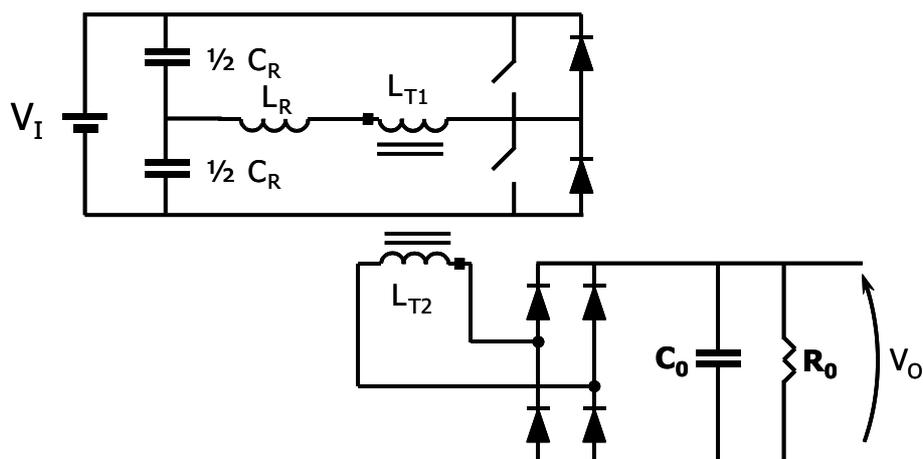


Figura 2.14: Conversor Série Ressonante.

2.5.2 Conversor Série Ressonante com Grampeamento de Tensão

Mediante a interrupção do ciclo ressonante, pode-se alterar consideravelmente as características de saída dos conversores ressonantes. Uma das formas de realizar esta interrupção é a introdução de diodos de grampeamento no conversor série ressonante, de forma a limitar a tensão do capacitor à tensão da fonte de tensão [12, 20, 21]. Na Fig. 2.15 é apresentado o Conversor Série Ressonante com Grampeamento de Tensão no Capacitor.

As principais vantagens desta topologia de conversor são listadas a seguir:

- i. Grampeamento da tensão no capacitor ressonante no valor da fonte de alimentação;
- ii. Operação em condução descontínua de corrente, o que torna a entrada em condução das chaves não dissipativa;
- iii. Característica linear entre a potência de saída e a frequência de chaveamento.

Esse tipo de conversor apresenta a desvantagem de realizar o controle da potência de saída através da variação de f_s . Além disso, apresenta dificuldades para operar sem carga.

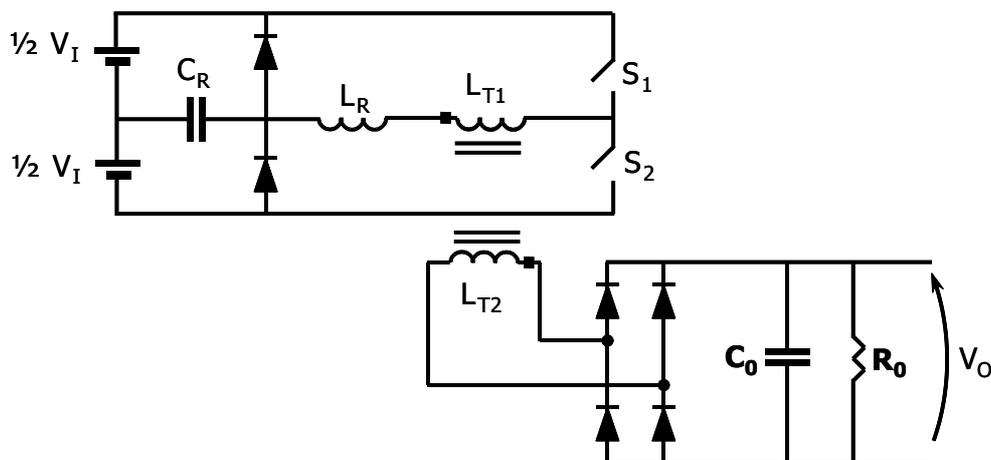


Figura 2.15: Conversor Série Ressonante com Grampeamento de Tensão.

Uma outra estratégia de interrupção do ciclo ressonante é obtida com a introdução de chaves auxiliares comandadas com grampeamento de tensão no capacitor. Esta é conseguida através da variação do tempo de aberturas das chaves auxiliares por modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) [22].

2.5.3 Conversor Paralelo Ressonante

Essa topologia de conversor, mostrada na Fig. 2.16, é utilizada em sistemas condicionadores de energia. A potência de saída é controlada pela variação da frequência de operação. O mesmo pode operar com f_s menor que f_o ou com f_s maior que f_o e apresenta como características principais: insensibilidade às variações de carga e necessidade de proteção para sobrecarga [20, 21].

2.5.4 Barramento Ressonante CC (Resonant DC-Link)

O conceito de Barramento Ressonante CC é aplicável em conversores CC-CA, resultando em duas estruturas: Conversores com Barramento Ressonante CC de Corrente e Conversores com Barramento Ressonante CC de Tensão. São caracterizadas por comutações nos instantes em que a corrente ou a tensão no barramento ressonante de alimentação se anulam, respectivamente [21].

A comutação das chaves sob zero de tensão apresenta uma série de vantagens em relação aos inversores de tensão com modulação PWM. As perdas por chaveamento são eliminadas, resultando em um aumento na eficiência do conversor, e conseqüentemente, em uma redução no volume, no peso e no custo do inversor.

Os conversores com Barramento Ressonante CC de Corrente permitem que as chaves comutem sob corrente nula, sendo controlados por técnicas de modulação por densidade de pulsos. Correspondem ao circuito dual do conversor de Barramento Ressonante CC de Tensão.

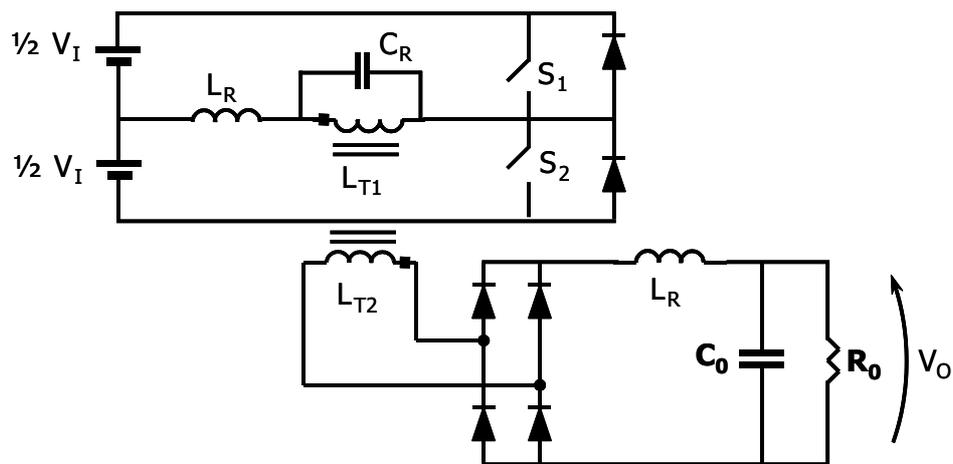


Figura 2.16: Conversor Paralelo Ressonante.

2.5.5 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi apresentada uma descrição geral do funcionamento do conversor CC-CC do Tap HVDC. Foram analisadas as etapas de operação da Chave-H, de forma a se obter chaveamentos com zero de tensão e corrente. Mostrou-se também a necessidade da utilização de um transformador com núcleo de ar e o arranjo básico do mesmo.

O capítulo tratou ainda da estrutura geral do controle do equipamento, enfatizando que a extração de potência ao longo do sistema HVDC está relacionada com o ciclo de trabalho do conversor. Por fim, foi apresentado um breve histórico dos conversores CC-CC de comutação suave existentes.

Capítulo 3

Tap HVDC Bidirecional

Neste capítulo é apresentada uma nova topologia para o Tap HVDC considerando fluxo bidirecional de potência, permitindo desse modo, a conexão tanto de geradores quanto de consumidores ao longo de linhas HVDC. São descritas as estratégias de controle da Ponte-H e do conversor monofásico-trifásico. Os parâmetros do transformador foram redimensionados de acordo com os valores inicialmente concebidos para o Tap de 5,0 MW.

3.1 Introdução

Os elos de corrente contínua geralmente se estendem por centenas de quilômetros, aproximando-se de localidades com baixa densidade demográfica e de sistemas isolados⁴ (consumidores com atendimento restrito ou ainda pequenos geradores sem possibilidade de conexão ao sistema elétrico interligado). A impossibilidade econômica e técnica de conectar essas áreas à rede elétrica convencional resulta da distância entre a rede e a localidade ou do fato das mesmas estarem localizadas em zonas inconvenientes à conexão.

O modelo de geração de energia elétrica nessas regiões baseia-se no consumo de combustíveis fósseis (principalmente óleo diesel), através de inúmeras unidades geradoras isoladas de pequeno porte. No Brasil, a maioria desses sistemas encontra-se situada na Região Norte e entre suas cargas estão pequenas indústrias e municípios com até cem mil habitantes⁵ (vide Tab. 3.1).

Tabela 3.1: Sistemas Elétricos Isolados

Estado	Sistemas	Unidades Geradoras	Potência (MW)
Acre	14,0	105,0	171,4
Amapá	5,0	20,0	205,0
Amazonas	89,0	399,0	1263,7
Maranhão	1,0	1,0	0,9
Mato Grosso	32,0	192,0	97,2
Pará	40,0	150,0	82,9
Rondônia	40,0	179,0	643,0
Roraima	69,0	104,0	168,8
Total	290,0	1150,0	2632,9

O atendimento a consumidores a partir de um sistema HVDC traria benefícios tanto a comunidade local quanto à empresa de transmissão detentora da linha.

⁴O termo sistemas isolados refere-se às regiões geográficas não atendidas pelo sistemas de transmissão.

⁵Fonte: GTON (Grupo Técnico Operacional da Região Norte) - Plano de Operação para os Sistemas Isolados.

Quando houvesse necessidade de suprir uma carga com demanda superior à produzida localmente, extrairia-se potência do elo CC. Caso contrário, quando houvesse um excedente de energia, o mesmo seria injetado na linha HVDC e transmitido para outras áreas. Nestes casos, as potências envolvidas são médias ou pequenas quando comparadas ao sistema ao qual está conectado: conexão para até 50,0 MW ou até 5% da potência transmitida.

Diante do exposto, esse capítulo tem como objetivo apresentar uma nova topologia para o Tap HVDC, na qual é possível a conexão de consumidores e geradores locais às linhas HVDC. Possibilita também o acesso à rede no intuito de drenar potência a fim de alimentar cargas isoladas ou injetar potência de possíveis fontes de energia. Esse intercâmbio deve ser realizado de forma confiável, evitando ao máximo a possibilidade de falhas no corredor principal de energia, ou seja, no sistema principal.

3.2 Conexão ao Sistema HVDC

A Fig. 3.1 apresenta o diagrama esquemático do equipamento inserido em série ao pólo positivo de um HVDC bipolar, tendo um sistema trifásico isolado conectado ao mesmo.

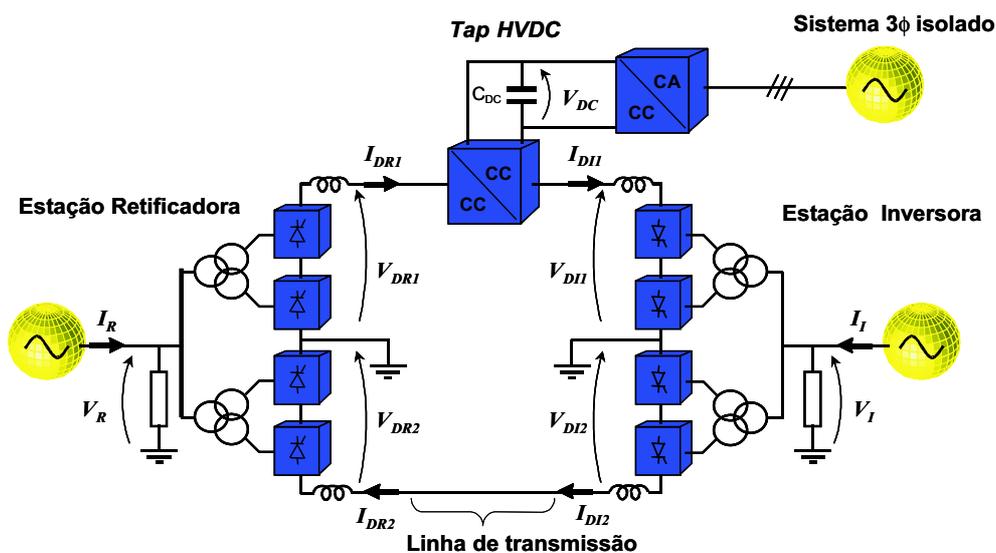


Figura 3.1: Inserção do Tap HVDC ao sistema HVDC e conectado a um consumidor isolado.

O conversor CC-CC mostrado na Fig. 3.1 é detalhado no diagrama apresentado na Fig. 3.2. A um dos pólos do HVDC conecta-se uma estrutura em ponte tendo em paralelo o primário do transformador. Ao secundário do mesmo tem-se um conversor monofásico-trifásico responsável pelo atendimento das cargas CA e também pela conexão de geradores locais, caso existam.

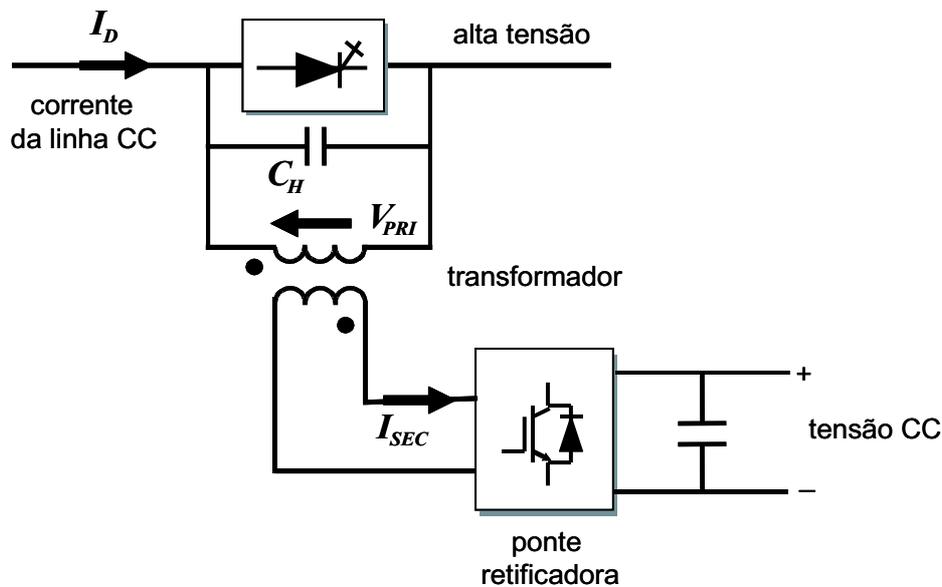


Figura 3.2: Conversor CC do Tap HVDC bidirecional em potência.

De modo a se obter fluxo bidirecional de energia entre o elo CC do sistema HVDC e o sistema CA local são necessárias algumas mudanças nos circuitos de potência e de controle do equipamento. A Chave-H proposta nos modelos anteriores era constituída por dois diodos e dois GTOs, estando ligada em série ao transformador. Nesse novo modelo, a Ponte-H é composta por quatro GTOs, dispostos em ponte como em um retificador monofásico de onda completa, tendo o primário do transformador conectado em paralelo. Quanto ao conversor monofásico, o mesmo é constituído por chaves auto-comutáveis, já que estas serão necessárias quando o equipamento estiver injetando energia no sistema principal. A Fig. 3.3 apresenta o Tap HVDC em detalhes.

O princípio de funcionamento do equipamento pode ser explicado levando-se em consideração a defasagem existente entre a tensão no capacitor da Ponte-H e a corrente no secundário do transformador. Quando V_{CH} estiver defasada de 180° de I_{SEC} , o equipamento estará injetando na linha HVDC o excedente de energia do lado CA. Quando V_{CH} e I_{SEC} estiverem em fase, o Tap estará drenando energia da

linha HVDC de modo a suprir a demanda solicitada pela carga.

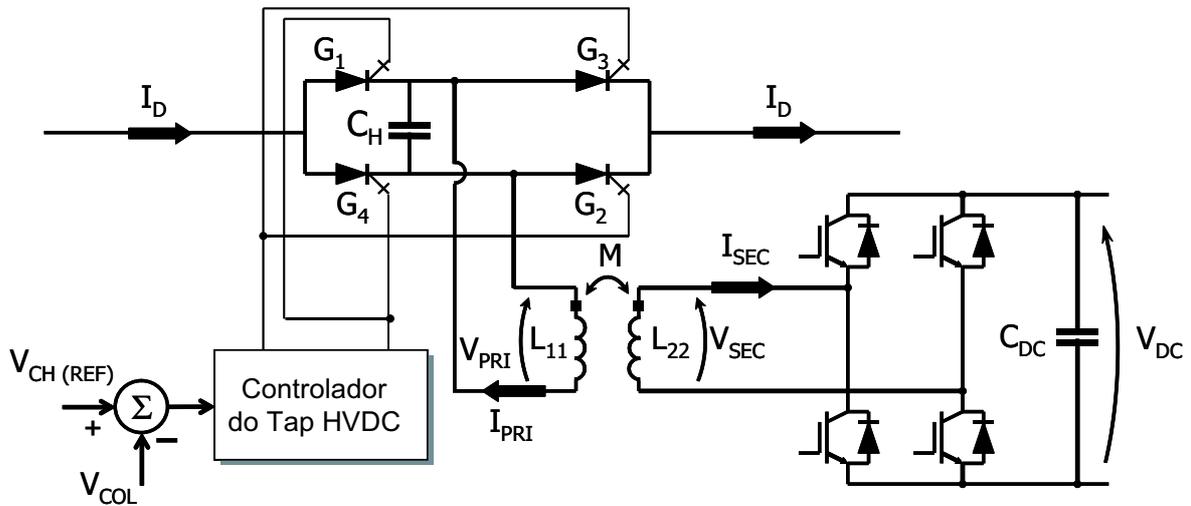


Figura 3.3: Conversor CC-CC em detalhes.

A configuração *back-to-back* do Tap permite que o mesmo opere conforme um SVC HVDC [1, 23, 24], bastando para isso interligar os conversores (monofásico e trifásico) por meio de cabos extrudados. Dessa forma, pode-se criar um subsistema de transmissão em corrente contínua interligando consumidores isolados e possíveis fontes alternativas de energia (parques eólicos, entre outros).

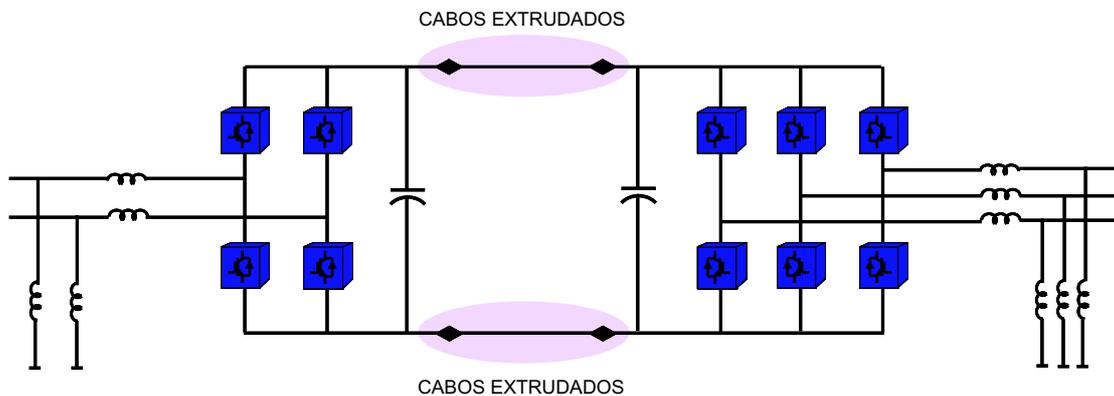


Figura 3.4: Configuração básica de um sistema SVC HVDC.

A energia fluindo pela rede CC deve ser equilibrada, o que significa que a potência ativa suprida à rede CA do conversor trifásico deve ser igual à potência ativa injetada pelo monofásico menos as perdas no sistema. Para atingir este equilíbrio de potência ativa, uma das estações controla a tensão sobre o capacitor e ajusta a ordem de potência para assegurar o balanço da mesma, garantindo que a tensão V_{DC} mantenha-se constante.

Nas seções subseqüentes serão detalhadas a operação da Ponte-H, o redimensionamento do transformador e os demais controles do equipamento proposto.

3.3 Ponte-H

Conforme explicitado acima, uma nova topologia para a Ponte-H foi adotada de forma a atingir um fluxo bidirecional de potência no Tap HVDC. Nessa nova configuração, a mesma é constituída por um conjunto de 4 chaves auto-comutáveis (GTOs) e por um capacitor C_H , tendo o primário do transformador em paralelo com este (L_{11}). Esse arranjo é apresentado na Fig. 3.5.

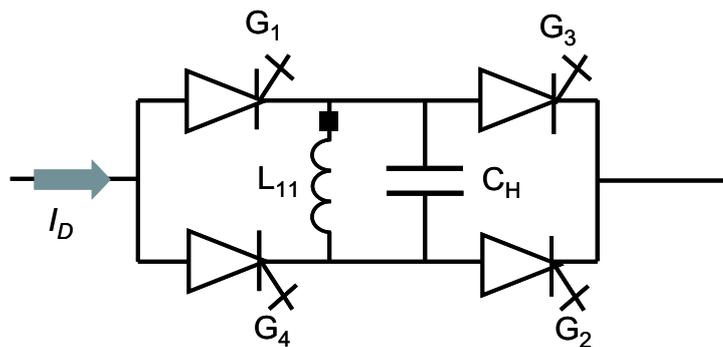


Figura 3.5: Nova configuração para a Ponte-H.

O esquema mostrado na Fig. 3.5 pode ser redesenhado conforme a Fig. 3.6. Observa-se que nessa nova configuração, a Ponte-H nada mais é do que um inversor do tipo fonte de corrente ou CSI (*Current Source Inverter*) [20, 25].

Nesse tipo de inversor a entrada comporta-se como uma fonte de corrente. A corrente de saída é mantida constante, independente da carga do inversor, enquanto que a tensão de saída é forçada a variar. O inversor do tipo fonte de corrente é o dual do inversor fonte de tensão VSI (*Voltage Source Inverter*) [20, 22].

Nessa configuração tem-se sempre duas chaves conduzindo, já que deve existir uma circulação contínua de corrente a partir da fonte. Quando houver a condução em ramos diferentes (por exemplo, G_1 e G_2), a corrente da fonte circula pela carga. Caso contrário, ou seja, quando duas chaves do mesmo ramo estiverem conduzindo

(G_1 e G_3), a fonte de corrente é desviada da carga.

Quando os GTOs G_1 e G_2 estiverem conduzindo, o capacitor C_H irá se carregar positivamente de forma a drenar energia da linha HVDC. Em contrapartida, quando houver condução de G_3 e G_4 , a polaridade da tensão tornar-se-á negativa, indicando a reversão de potência.

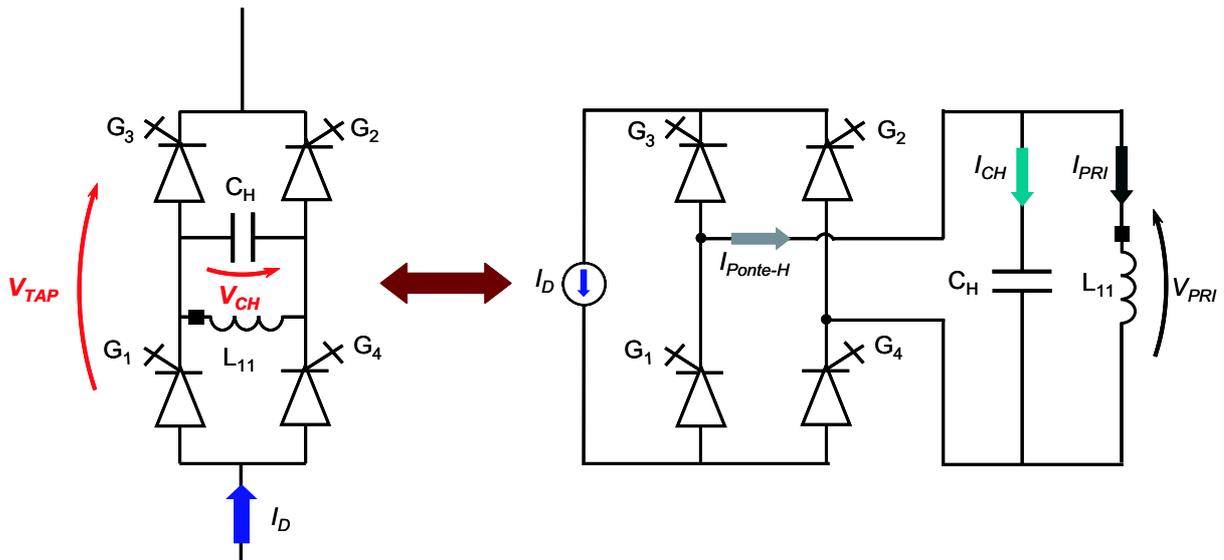


Figura 3.6: Ponte-H redeseñada como um inversor fonte de corrente.

3.3.1 Equacionamento do Conversor

A relação entre a corrente média na saída do conversor e a corrente I_D é dada por:

$$I_{Ponte-H}(t) = m_a(t) \cdot I_D, \quad (3.1)$$

onde m_a é o índice de modulação do conversor PWM e $-1 \leq m_x(t) \leq 1$.

A potência a ser drenada ou injetada no sistema é calculada em três pontos distintos do circuito: nos terminais conectados ao elo CC e nos enrolamentos do transformador, conforme apresentado em (3.2):

$$\begin{cases} p_{tap}(t) = v_{tap}(t) \cdot I_D , \\ p_{pri}(t) = v_{pri}(t) \cdot i_{pri}(t) , \\ p_{sec}(t) = v_{sec}(t) \cdot i_{sec}(t) , \end{cases} \quad (3.2)$$

onde v_{tap} é a tensão sobre os terminais do Tap e v_{pri} , i_{pri} e v_{sec} , i_{sec} são as tensões e correntes nos enrolamentos do transformador.

Admitindo-se a ausência de elementos armazenadores de energia e que as perdas na Ponte-H sejam nulas [6], as potências no lado da linha HVDC e nos terminais do transformador podem ser igualadas, tais como:

$$\begin{cases} p_{pri}(t) = v_{tap}(t) \cdot I_D = v_{pri}(t) \cdot i_{pri}(t) , \\ p_{sec}(t) = v_{tap}(t) \cdot I_D = v_{sec}(t) \cdot i_{sec}(t) . \end{cases} \quad (3.3)$$

Substituindo a corrente apresentada em (3.1) em (3.3), resulta:

$$v_{tap}(t) = m_a(t) \cdot v_{pri}(t) . \quad (3.4)$$

O índice de modulação e a média de v_{pri} podem ser definidos como:

$$m_a(t) = M \cos(\omega t - \phi) . \quad (3.5)$$

$$v_{pri}(t) = V_m \cos(\omega t) , \quad (3.6)$$

onde V_m é o valor de pico da tensão de fase.

Aplicando esses termos em (3.4), resulta:

$$v_{tap}(t) = MV_m [\cos(\omega t - \phi) \cdot \cos(\omega t)] . \quad (3.7)$$

Utilizando-se a identidade trigonométrica apresentada em (3.8) e após alguns algebrismos, chega-se a (3.9):

$$\cos(a \pm b) = \cos(a) \cdot \cos(b) \mp \sin(a) \cdot \sin(b) . \quad (3.8)$$

$$v_{tap}(t) = \frac{1}{2} MV_m [\cos(\phi) + \cos(2\omega t - \phi)] , \quad (3.9)$$

onde $\frac{1}{2} MV_m \cos(\phi)$ corresponde à parcela média de v_{tap} , enquanto que $\frac{1}{2} MV_m \cos(2\omega t - \phi)$ corresponde à parcela oscilante da mesma.

O equacionamento acima descrito não considera o efeito da corrente de magnetização do transformador. Sendo assim, o mesmo só é válido para transformadores cuja corrente de magnetização possa ser desprezada.

3.3.2 Cálculo do Capacitor C_H

A modulação SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) [22] é utilizada de forma a obter um sinal praticamente senoidal na saída do conversor⁶. O capacitor C_H além de prover um caminho de circulação para a corrente CA, atua como filtro passa-baixas para as componentes de frequência mais elevada da corrente gerada pelo PWM [6].

Para uma modulação seno-triângulo, o valor de pico da corrente sobre o capacitor C_H é constante e igual a:

$$I_{CH} = MI_D . \quad (3.10)$$

O valor da capacitância do filtro é obtido a partir de:

$$C_H = \frac{MI_D}{\omega V_m} , \quad (3.11)$$

onde ω é a frequência angular em rad/s .

⁶Maiores detalhes sobre SPWM podem ser vistos no “Apêndice A”.

3.3.3 Controle do Tap HVDC

O controlador do Tap HVDC tem a função de regular o dreno ou injeção de potência em limites pré-estabelecidos. A partir da tensão V_{CH} são criados dois sinais fictícios defasados em 120° elétricos e obtido o valor eficaz coletivo (no inglês, *collective rms value*) [26]:

$$V_{COL} = \sqrt{V_{CH}^2 + V_{CHB}^2 + V_{CHC}^2}. \quad (3.12)$$

Esta grandeza permite medir a variação de tensão sobre o capacitor da Ponte-H, sendo constante quando a mesma for senoidal e balanceada.

Compara-se o valor eficaz de tensão com uma referência e o resultado é entregue a um controlador PI. O sinal obtido na saída desse PI multiplicado por uma senóide é comparado com uma portadora triangular gerando os pulsos de disparo para as chaves. A Fig. 3.7 apresenta o diagrama em blocos do controlador do Tap HVDC.

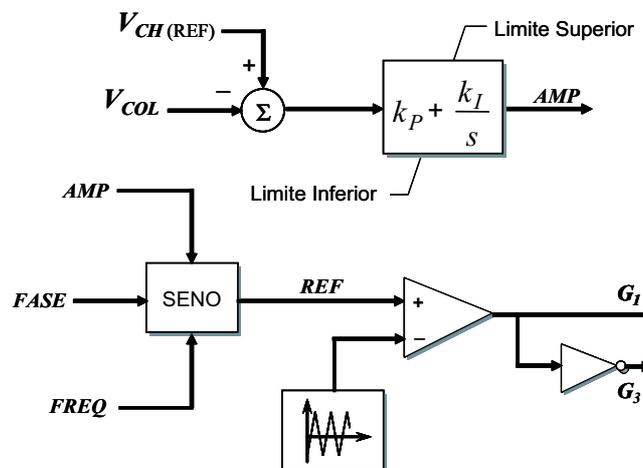


Figura 3.7: Diagrama em blocos do controlador do Tap HVDC.

As Fig. 3.8 e Fig. 3.9 apresentam alguns resultados com a Ponte-H operando sem carga, indicando a possibilidade de fluxo bidirecional de energia. As oscilações presentes referem-se a mudanças no valor de referência a ser comparado com V_{COL} . Inicialmente, o mesmo é mantido em $1,0 p.u.$, sendo reduzido para $0,8 p.u.$ e, posteriormente, elevado para $1,2 p.u.$

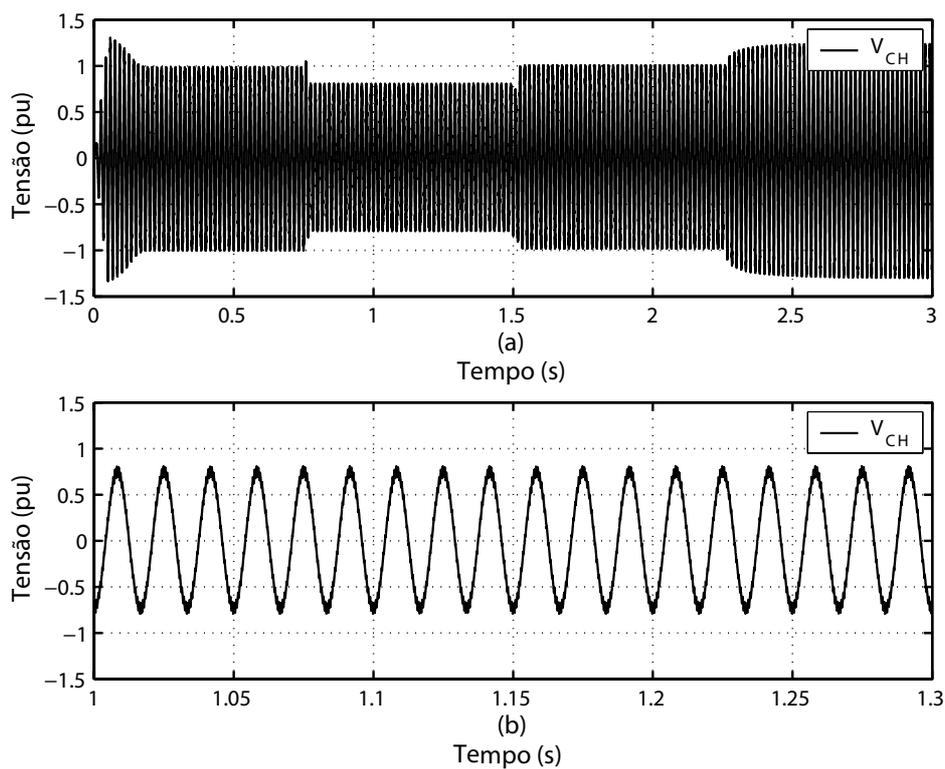


Figura 3.8: (a) e (b) Tensão sobre os terminais do capacitor da Ponte-H.

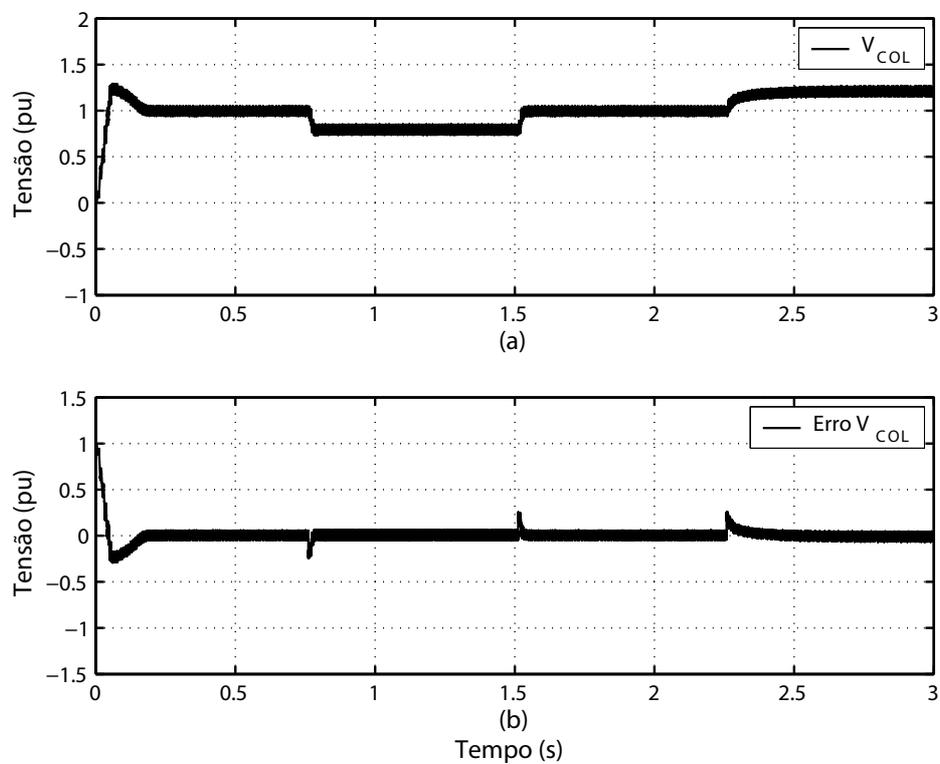


Figura 3.9: (a) Valor eficaz da tensão V_{CH} ; (b) Erro V_{COL} .

3.4 Redimensionamento do Transformador

Como visto no capítulo anterior, cabe ao transformador a função de prover o isolamento galvânico necessário à proteção dos equipamentos conectados ao secundário e adequar os níveis de tensão e corrente em limites pré-estabelecidos.

Como não são previstos estudos de viabilidade técnica e econômica quanto à disponibilidade do equipamento, dois modelos de transformadores serão utilizados: o convencional com núcleo ferro-magnético e o com núcleo de ar. Algumas considerações devem ser feitas em relação à utilização dos mesmos:

- i. O entrave na utilização de um transformador com núcleo de ferro é o custo da isolação da tensão do elo CC para o potencial de terra. Neste caso, o isolamento entre os enrolamentos tem de ser muito confiável para que não ocorra um defeito como um curto-circuito entre os mesmos.
- ii. Já no caso do núcleo de ar, o grande número de espiras de cabo isolado para o nível de tensão do elo CC e a área necessária para compor o transformador devido à dispersão são os grandes empecilhos.

O dimensionamento desses transformadores serão apresentados nas seções subsequentes.

3.4.1 Transformador com núcleo de ar

Para se obter a potência total desejada, deve-se modelar um novo transformador com capacidade total equivalente a dez transformadores iguais ao da Tab. 2.2, totalizando os 50,0 MW previstos. Considerou-se que o transformador inicialmente concebido esteja dimensionado para correntes maiores que a responsável pela potência ativa, sendo possível a utilização do mesmo frente à cargas com fator de potência igual a 0,8.

A base de tensão no secundário do transformador será a mesma do sistema CA local, ou seja, $V_{SEC} = 34,5 \text{ kV}$. A frequência nominal de operação é $f = 180,0 \text{ Hz}$.

As indutâncias nos enrolamentos primário e secundário (L_{11} e L_{22} , respectivamente) e a indutância mútua (M_{12}) do transformador são expressas por:

$$L_{11} = \frac{S_{base}}{S_{base (orig)}} \cdot L_{11 (orig)} = 30,0 \text{ mH} . \quad (3.13)$$

$$L_{22} = \frac{S_{base(orig)}}{S_{base}} \cdot \left[\frac{V_{SEC}}{V_{SEC (orig)}} \right]^2 \cdot L_{22 (orig)} = 14,28 \text{ mH} . \quad (3.14)$$

$$M_{12} = k\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}} = 15,5 \text{ mH} . \quad (3.15)$$

Como a relação de espiras de um transformador é dada por $Z_1 = a^2 Z_2$, chega-se a:

$$a = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} = 1,45 . \quad (3.16)$$

As bases de tensão e corrente no primário do transformador são expressas por:

$$V_{PRI} = a \cdot V_{SEC} = 50,0 \text{ kV} . \quad (3.17)$$

$$I_{PRI} = \frac{S_{base}}{V_{PRI}} = 1,0 \text{ kA} . \quad (3.18)$$

Com os valores de L_{11} , V_{PRI} e I_{PRI} , pode-se calcular a corrente de magnetização percentual do transformador, tal como:

$$I_{mag} \% = 100 \cdot \frac{V_{PRI}}{\omega \cdot L_{11} \cdot I_{PRI}} = 147,37 \% . \quad (3.19)$$

A impedância base referida ao lado da Ponte-H é definida como:

$$Z_{base} = \frac{V_{PRI}^2}{S_{base}} = 50,0 \Omega . \quad (3.20)$$

A reatância de dispersão em *p.u.* é dada por:

$$x_{disp_{pu}} = \omega \cdot \frac{L_{11} + a^2 \cdot L_{22} - 2 \cdot a \cdot M}{Z_{base}} = 0,34 \text{ p.u.} \quad (3.21)$$

A Tab. 3.2 resume as características do transformador com núcleo de ar redimensionado para 50,0 MW.

Tabela 3.2: Parâmetros do transformador com núcleo de ar

Características do Transformador	Valores
Potência Aparente (S_{base})	50,0 MVA
Indutância do enrolamento primário (L_{11})	30,0 mH
Indutância do enrolamento secundário (L_{22})	14,28 mH
Indutância Mútua (M_{12})	15,5 mH
Fator de acoplamento (k)	0,75

3.4.2 Transformador com núcleo de ferro

Para os cálculos abaixo foram adotados como base os valores de 62,5 MVA, de 50,0 kV e de 60,0 Hz referentes à potência, à tensão no primário do transformador e à frequência nominal, respectivamente. Deste modo, a corrente I_{PRI} pode ser obtida por meio de:

$$I_{PRI} = \frac{S_{base}}{V_{PRI}} = 1,25 \text{ kA} . \quad (3.22)$$

Admitindo-se que a tensão no secundário do transformador seja igual à adotada no sistema CA local ($V_{SEC} = 34,5 \text{ kV}$), a corrente I_{SEC} é obtida por meio de:

$$I_{SEC} = a \cdot I_{PRI} = 1,81 \text{ kA} . \quad (3.23)$$

A partir de uma reatância de dispersão igual a 0,25 p.u., as indutâncias L_1 e L_2 são dadas por:

$$L_1 + L_2 = \frac{x_{disp_{pu}} \cdot Z_{base}}{\omega} = 26,52 \text{ mH} . \quad (3.24)$$

Considerando que a indutância de dispersão esteja distribuída igualmente entre os dois enrolamentos, tem-se que:

$$L_1 = L_2 = 13,26 \text{ mH} . \quad (3.25)$$

Com os valores da tensão no primário do transformador, da frequência e da corrente de magnetização (1% da I_{PRI}) pode-se calcular o valor da indutância L_m , conforme mostrado em (3.26):

$$L_m = \frac{V_{PRI}}{\omega \cdot I_{mag}} = 10,61 \text{ H} . \quad (3.26)$$

As indutâncias L_{11} , L_{22} e M_{12} são expressas por:

$$L_{11} = L_1 + aL_{12} = 10,61 \text{ H} . \quad (3.27)$$

$$L_{22} = \frac{L_2 + aL_{12}}{a^2} = 5,05 \text{ H} . \quad (3.28)$$

$$M_{12} = \frac{L_m}{a} = 7,31 \text{ H} . \quad (3.29)$$

O fator de acoplamento é definido por:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} = 0,99 . \quad (3.30)$$

A Tab. 3.3 resume as características principais do transformador com núcleo ferro-magnético.

Tabela 3.3: Parâmetros do transformador com núcleo de ferro

Características do Transformador	Valores
Potência Aparente (S_{base})	62,5 MVA
Indutância do enrolamento primário (L_{11})	10,61 H
Indutância do enrolamento secundário (L_{22})	5,05 H
Indutância Mútua (M_{12})	7,31 H
Fator de acoplamento (k)	0,99

3.5 Controle do Conversor Monofásico

A topologia utilizada no conversor monofásico é a mostrada na Fig. 3.10. Trata-se de uma estrutura em ponte composta por 4 chaves controladas tendo diodos em anti-paralelo. Esses últimos são responsáveis pela circulação de corrente em sentido contrário, tendo em vista a possibilidade de fluxo reverso de energia.

O circuito PLL (*Phase Locked Loop*) é um componente de suma importância para o desenvolvimento da estratégia de controle a ser implementada no conversor. A partir de um sinal de entrada periódico, o PLL é capaz de rastrear valores de frequência e fase, mesmo que esta entrada apresente um alto conteúdo harmônico.

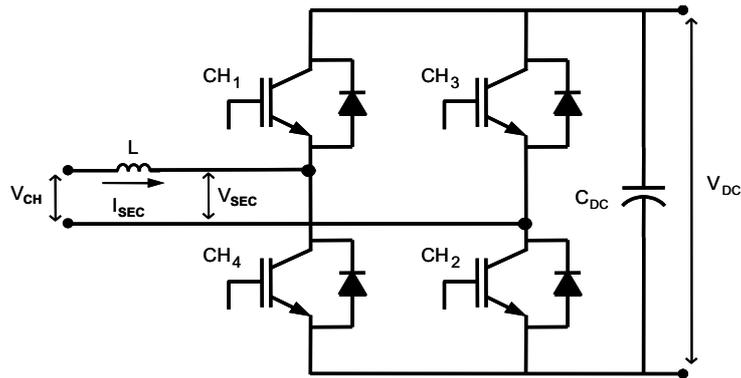


Figura 3.10: Topologia usada para o conversor monofásico.

Para a aplicação do PLL em um conversor monofásico, são necessárias algumas mudanças em relação ao PLL trifásico já conhecido [27]. A Fig 3.11 apresenta o diagrama esquemático com as mudanças necessárias ao novo PLL [28].

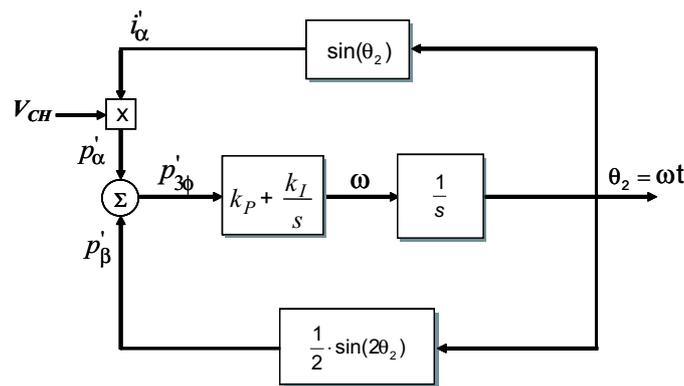


Figura 3.11: Diagrama em blocos do PLL monofásico.

A tensão de entrada V_{CH} é aplicada ao PLL e então, redefinida como v'_α e a partir desta, é criada uma tensão fictícia v'_β , que estará em quadratura com v'_α . Os sinais i'_α e i'_β são mantidos conforme definidos no PLL trifásico. As expressões relativas a esses sinais são mostradas em:

$$\begin{cases} v'_\alpha = V_{CH} , \\ v'_\beta = -\sin(\omega t) , \\ i'_\alpha = \sin(\omega t) , \\ i'_\beta = -\cos(\omega t) . \end{cases} \quad (3.31)$$

A potência fictícia $p'_{3\phi}$ pode ser dividida em duas partes, a saber:

$$\begin{cases} p'_\alpha = v'_\alpha \cdot i'_\alpha, \\ p'_\beta = v'_\beta \cdot i'_\beta. \end{cases} \quad (3.32)$$

Substituindo os valores de v'_β e i'_β em p'_β e fazendo alguns algebrismos resulta:

$$p'_\beta = \frac{1}{2} [\sin(2\omega t)]. \quad (3.33)$$

O PLL torna-se estável quando a potência fictícia $p'_{3\phi}$ tiver um valor médio igual a zero, ou seja, quando a frequência angular ω for igual à frequência angular do sinal de entrada e quando as correntes fictícias i'_α e i'_β estiverem avançadas em 90° das tensões v'_α e v'_β , respectivamente. As Fig. 3.12 e Fig. 3.13 apresentam alguns resultados obtidos com o PLL considerando uma tensão com alto conteúdo harmônico.

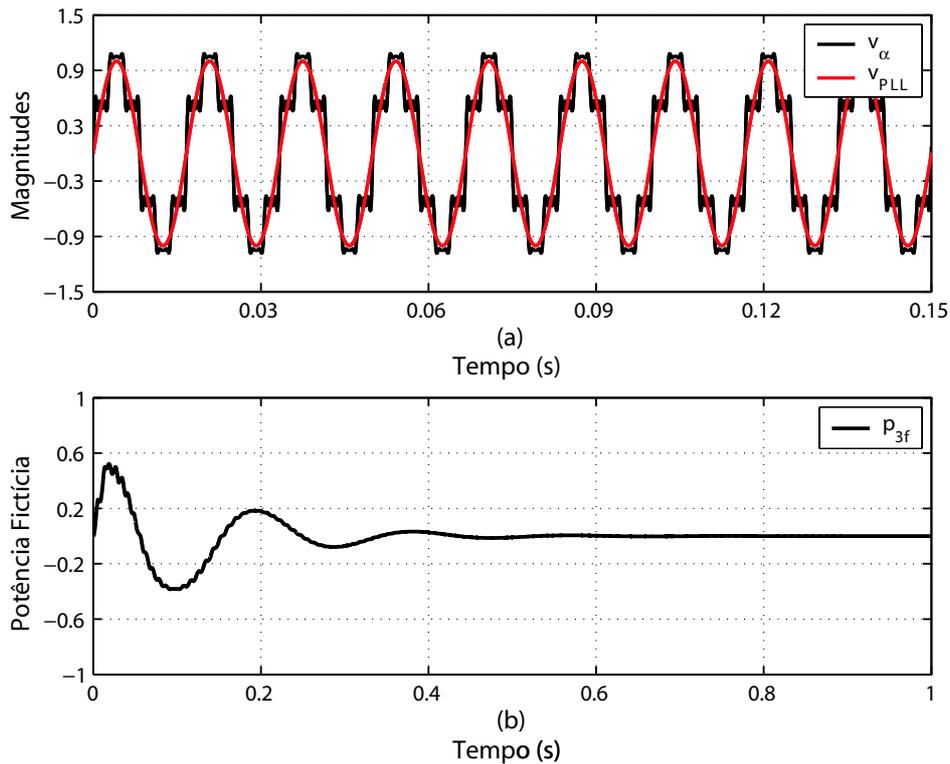


Figura 3.12: (a) Tensão e corrente no PLL; (b) Potência trifásica fictícia.

Após a detecção da fase e frequência da tensão sobre o capacitor da Ponte-H, o passo seguinte é a definição do tipo de controle a ser utilizado. As seções que se seguem apresentam duas estratégias passíveis de serem implementadas: o controle adaptativo e o vetorial.

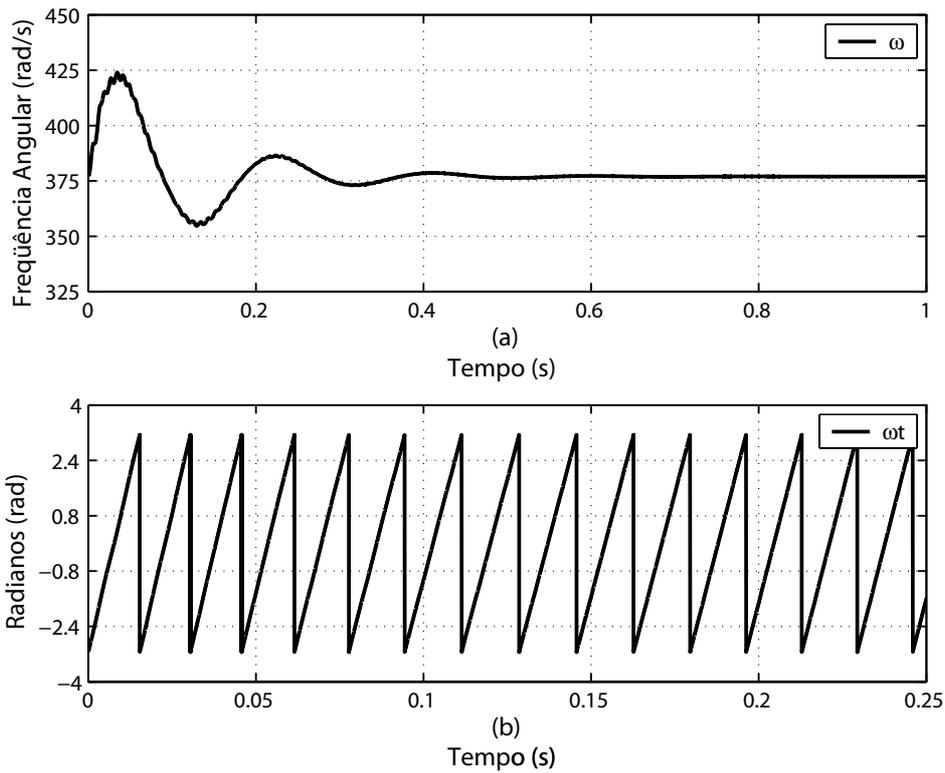


Figura 3.13: (a) Freqüência em rad/s; (b) Sinal de sincronismo.

3.5.1 Controle Adaptativo de Corrente

No controle adaptativo de corrente, o resultado da comparação entre a tensão V_{DC} com a referência $V_{DC(REF)}$ é entregue a um controlador PI. Através de um circuito PLL é extraída a frequência e a fase da tensão V_{CH} , de forma a se obter uma senóide de amplitude unitária de mesma fase e frequência. O resultado obtido na saída do controlador PI multiplicado por essa senóide, resulta na referência de corrente $I_{SEC(REF)}$, que mais adiante é comparada com a corrente I_{SEC} , gerando o erro da corrente ($erro_I$). A partir desse sinal é feita uma estratégia de controle por bandas de histerese. O diagrama em blocos para o controle por modo de corrente é mostrado na Fig. 3.14.

Neste tipo de controle é criada uma região de tolerância em torno da referência de corrente de compensação desejada, permitindo que a corrente possa excursionar entre dois valores limites. Ao detectar o cruzamento da corrente medida com um dos limites impostos, uma das chaves da perna do conversor, referente à fase em questão, é acionada. O valor instantâneo da corrente, em regime, é mantido sempre dentro

dos limites estabelecidos e o conversor comporta-se como uma fonte de corrente.

Quando a corrente medida ultrapassa o limite superior, deve-se desligar a chave de cima (por exemplo, C_{H1}) e ligar a chave de baixo (C_{H4}), causando assim um decréscimo no valor da corrente de fase. Por outro lado, quando a corrente fica abaixo do valor do limite inferior, a chave de cima deve então ser ligada e a chave de baixo desligada, o que vai gerar um acréscimo no valor da corrente. Esse controle também é conhecido como *bang-bang* [29].

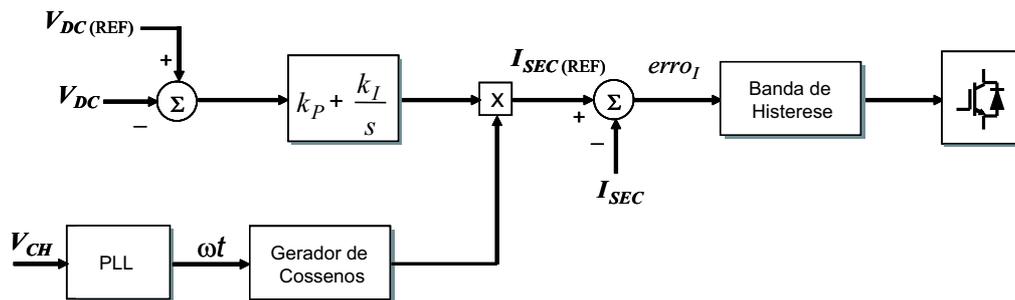


Figura 3.14: Diagrama em blocos utilizando controle adaptativo.

Uma das características deste tipo de controle é que os pulsos de tensão gerados não têm a mesma duração, ou seja, esses pulsos têm uma frequência de chaveamento variável.

3.5.2 Controle Vetorial

Esse controle faz uso da Transformada de Park, que nada mais é do que a transformação de coordenadas para um sistema de eixos síncronos dq .

Em sistemas trifásicos, as componentes abc são transformadas em coordenadas ortogonais e estacionárias $\alpha\text{-}\beta$ e, posteriormente, para eixos girantes dq . As transformadas direta e inversa de *Park* para tensões são mostradas em (3.34) e (3.35). Para se obter as de corrente, basta que se mudem os índices v por i .

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}. \quad (3.35)$$

No entanto, para a aplicação dessa transformada em sistemas monofásicos, torna-se necessária a criação de uma corrente fictícia, uma vez que, nesses sistemas há apenas uma única variável [30].

A corrente $I_{SEC(REF)}$ tem fase e frequência ditadas pelo sinal ωt gerado pelo circuito PLL, dada por:

$$i_{\alpha}^* = I_{SEC(REF)} = I \cos(\omega t) . \quad (3.36)$$

É possível a criação de uma segunda referência de corrente atrasada em 90° em relação a $I_{SEC(REF)}$, conforme mostrada em (3.37):

$$i_{\beta}^* = I \sin(\omega t) . \quad (3.37)$$

Aplicando-se as equações (3.36) e (3.37) à (3.34) e substituindo-se θ por ωt , obtém-se as correntes em coordenadas girantes:

$$I_d^* = I . \quad (3.38)$$

$$I_q^* = 0 . \quad (3.39)$$

A corrente de entrada I_{SEC} é redefinida como:

$$i_{\alpha} = I_{SEC} = I \cos(\omega t) . \quad (3.40)$$

Considerando-se que não há perdas no circuito, tem-se que:

$$L \frac{dI_{SEC}}{dt} = V_{CH} - V_{SEC} . \quad (3.41)$$

Aplica-se a transformada dq em (3.41), substituindo-se as variáveis mostradas pelas expressas em:

$$\begin{aligned} v_{CH}(t) &= V \cos(\omega t) , \\ I_{SEC} &= I_d \cos(\omega t) - I_q \sin(\omega t) , \\ V_{SEC} &= V_d \cos(\omega t) - V_q \sin(\omega t) . \end{aligned} \quad (3.42)$$

Expandindo a equação em termos de senos e cossenos, tem-se que:

$$\frac{dI_d}{dt} = \omega I_q - \frac{V_d}{L} + \frac{V}{L}, \quad (3.43)$$

$$\frac{dI_q}{dt} = -\omega I_d - \frac{V_q}{L}. \quad (3.44)$$

Derivando-se termo a termo as equações (3.43) e (3.44) e igualando-as a zero, encontram-se os pontos de equilíbrio do sistema:

$$V_d = \omega L I_q + V, \quad (3.45)$$

$$V_q = -\omega L I_d. \quad (3.46)$$

O diagrama em blocos do controle é mostrado na Fig. 3.15. As correntes I_d e I_q são comparadas com seus valores de referência e os controladores PI garantem que o erro em regime permanente seja igual a zero. O ganho ωL fornece os termos desacoplados e adição da tensão V_{CH} pretende compensar o efeito contrário à tensão de alimentação [30].

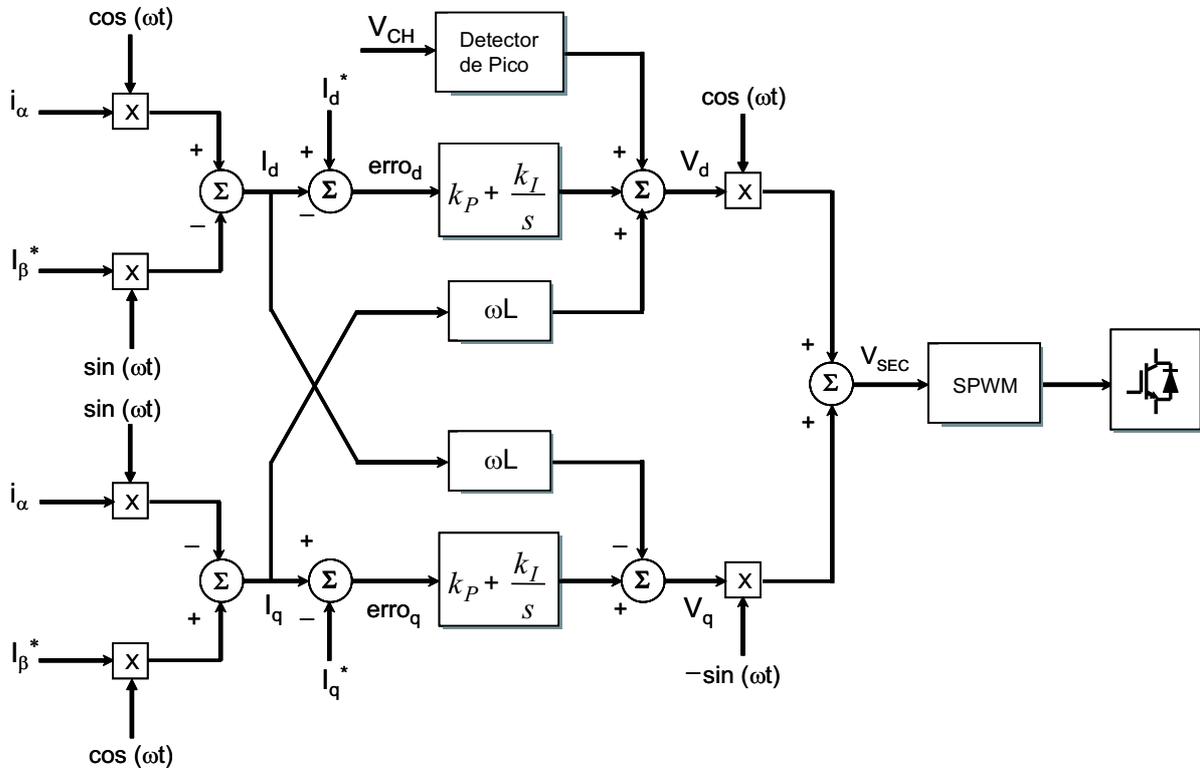


Figura 3.15: Diagrama em blocos do conversor monofásico utilizando controle vetorial.

O controle acima apresentado pode ser simplificado utilizando-se as equações (3.47) e (3.48), reduzindo-se assim o número de operações matemáticas [30]. Baseadas nessas simplificações, tem-se o diagrama em blocos mostrado na Fig. 3.16.

$$erro_d = I_d^* - I_d = (i_\alpha^* - i_\alpha) \cos(\omega t) . \quad (3.47)$$

$$erro_q = I_q^* - I_q = -(i_\alpha^* - i_\alpha) \sin(\omega t) . \quad (3.48)$$

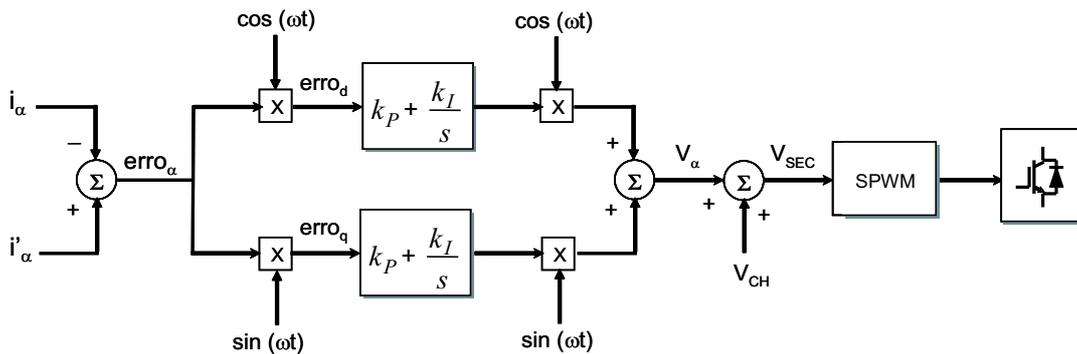


Figura 3.16: Diagrama simplificado do controle vetorial.

3.6 Controle do Conversor Trifásico

Há duas formas distintas de se realizar o controle do conversor trifásico: no primeiro caso, utiliza-se uma estratégia de controle baseada na aplicação da Teoria das Potências Ativa e Reativa Instantâneas - Teoria p-q [26, 31, 32, 33], onde são geradas correntes de referência que, posteriormente, serão utilizadas no chaveamento do conversor. No segundo caso, faz-se uso de um controle baseado na geração de três senóides de referência, devidamente defasadas em 120° e de amplitude constante e uma portadora triangular. A Fig. 3.17 apresenta a topologia utilizada para o conversor. Neste tipo de configuração, o fluxo de potência é permitido do lado CA para o lado CC através dos diodos presentes na estrutura.

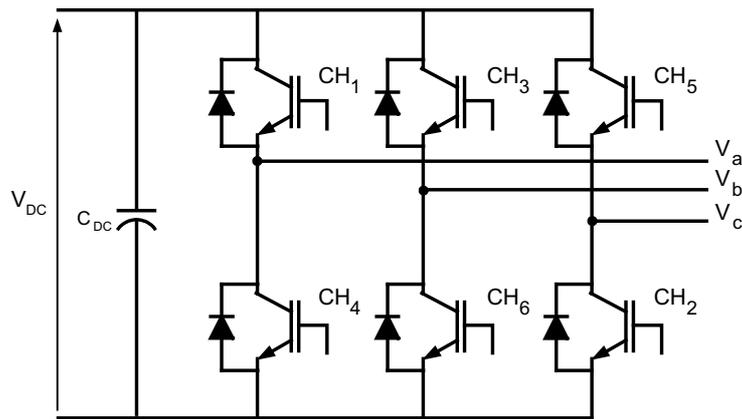


Figura 3.17: Topologia usada para o conversor trifásico.

3.6.1 Controle por Imposição de Corrente - Teoria p-q

Aplicável a sistemas trifásicos com qualquer tipo de formas de onda, a Teoria p-q⁷ faz uso da *Transformada de Clarke* [34], transformando as componentes do sistema de coordenadas abc (fases) para um sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$, onde α e β são sempre ortogonais entre si e a coordenada 0 corresponde à componente de seqüência zero. Em sistemas a três fios, as componentes de seqüência zero das tensões e corrente são nulas, assim sendo, é usual a utilização da Transformação de Clarke normalizada para tensões e correntes apresentadas em:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (3.49)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (3.50)$$

As transformadas inversas de Clarke para os casos de tensão e corrente são apresentadas em:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.51)$$

⁷Maiores detalhes acerca da Teoria p-q podem ser encontrados no “Apêndice B”.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.52)$$

Uma vez determinadas as tensões e correntes nas componentes de Clarke, as potências em termos das variáveis neste novo sistema de coordenadas (p_{carga} e q_{carga}) são definidas por meio de:

$$\begin{bmatrix} p_{carga} \\ q_{carga} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.53)$$

Para a extração da componente oscilante da potência requerida pela carga faz-se uso de um filtro do tipo Média Móvel, de modo que na saída do mesmo, obtenha-se somente a componente média p_{barra} . Compara-se a saída do filtro com um valor de potência de referência, obtendo-se assim a potência a ser fornecida ou absorvida pelo conversor trifásico (Δp).

De posse dos valores de Δp e das tensões da fonte nas coordenadas α - β , calcula-se as correntes de referência, conforme apresentadas em:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha' \\ i_\beta' \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.54)$$

Conhecendo-se as correntes de referência nas coordenadas α - β , basta utilizar a transformada inversa, de forma análoga ao feito em (3.50), para se obter as mesmas nas coordenadas abc . A Fig. 3.18 apresenta o diagrama em blocos para o controle do conversor trifásico.

De posse das correntes de referência, o próximo passo é a definição da estratégia de controle de corrente a ser utilizada. Optou-se por utilizar o controle vetorial, uma vez que com esse enfoque, o rastreamento “*tracking*” de três correntes de referência senoidais se transforma em um problema de regulação de um sistema realimentado. Neste caso, faz-se uso da transformada dq ou transformada de *Park* e da modulação SPWM.

As correntes medidas nas coordenadas abc são transformadas em coordenadas $\alpha\beta$ e posteriormente em coordenadas dq de eixo girante, onde são controladas através de reguladores PI. Após passarem pelos reguladores, os sinais sofrem as transformadas inversas e então seguem como referências de tensão para o controle PWM e disparo das chaves. Neste caso, pode-se impor a frequência de chaveamento através da frequência da onda portadora triangular. A Fig. 3.19 apresenta o diagrama em blocos para o controle vetorial.

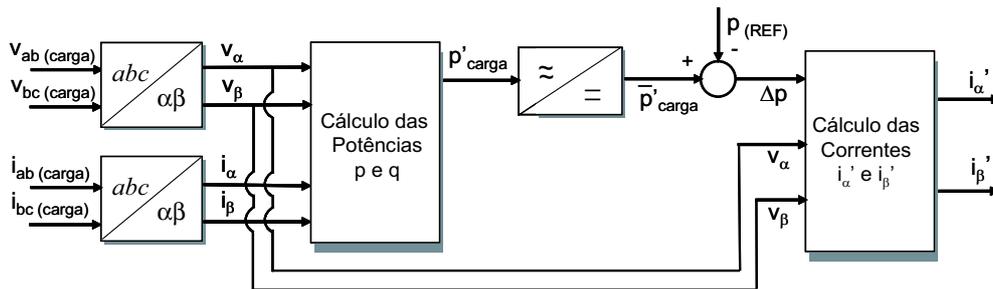


Figura 3.18: Diagrama em blocos do controle do conversor utilizando teoria p-q.

A representação do conversor em um sistema de coordenadas girantes oferece como vantagens uma redução do número de variáveis, permitindo a representação das grandezas de um sistema trifásico simétrico e equilibrado através de pares de componentes constantes.

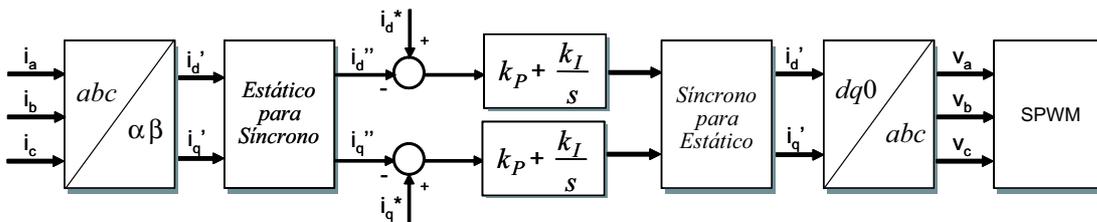


Figura 3.19: Diagrama em blocos para o controle vetorial.

3.6.2 Controle por Imposição de Amplitude e Fase

Essa técnica de controle é utilizada quando a geração local não estiver conectada ao sistema. São geradas três senóides de referência de amplitude constante v_i ($i = a, b, c$) e uma portadora triangular v_{tri} , responsável pela frequência de chaveamento.

mento do conversor. O índice de modulação de amplitude m_a é dado por:

$$m_a = \frac{v_i}{v_{tri}}. \quad (3.55)$$

As amplitudes das componentes fundamentais das tensões resultantes na saída do conversor são dadas por:

$$V_{io} = m_a \frac{V_{DC}}{2}. \quad (3.56)$$

Neste caso, verifica-se que não há a necessidade de medição das tensões de saída, uma vez que essas são controladas através da tensão no elo CC (V_{DC}).

A Fig. 3.20 apresenta os sinais de referência criados, a portadora triangular v_{tri} e os sinais utilizados no disparo das chaves do conversor.

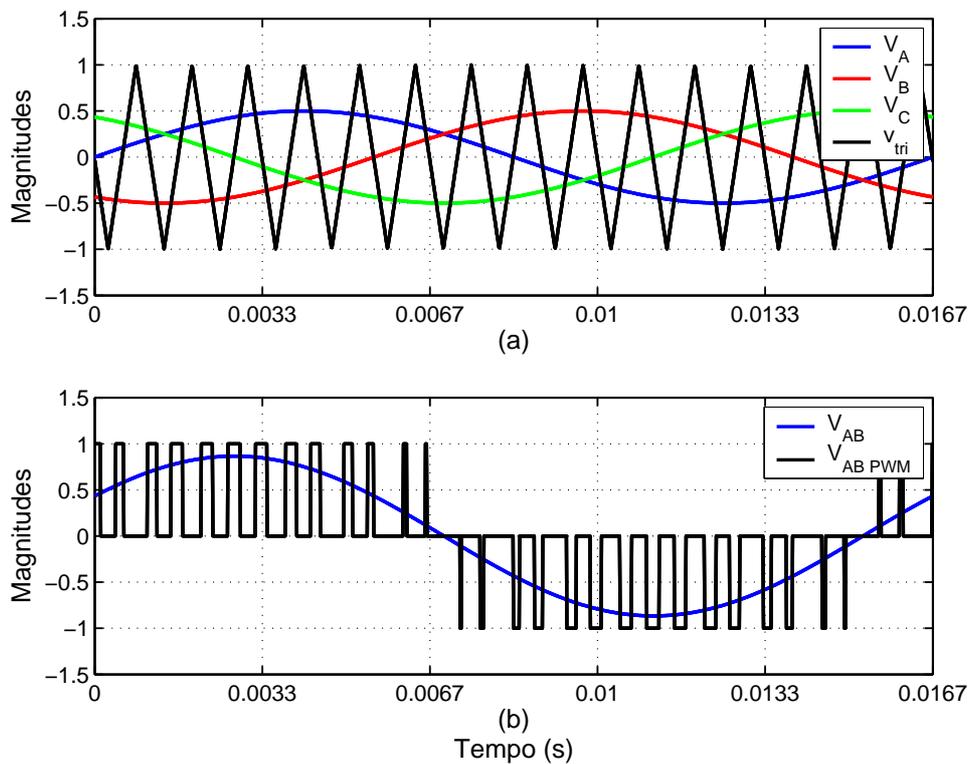


Figura 3.20: (a) e (b) Perfis das tensões utilizando modulação PWM.

3.6.3 Filtro RLC

A fim de se eliminar os harmônicos de frequências elevadas introduzidas pelo chaveamento eletrônico dos dispositivos que compõem o conversor trifásico, torna-se necessária a utilização de um filtro na saída do mesmo. O filtro mostrado na

Fig. 3.21 é do tipo passa-baixas de segunda ordem. Em baixas frequências, o indutor se comporta como um curto-circuito e o capacitor, como um circuito aberto.

A função de transferência do filtro, relacionando a tensão na saída do conversor (U_i) com a tensão de entrada (U_t), é apresentada em:

$$\frac{U_t(s)}{U_i(s)} = \frac{2 \zeta \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \zeta \omega_n s + \omega_n^2}, \quad (3.57)$$

onde: $\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ e $\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$.

O ajuste dos parâmetros R, L e C possibilita determinar as frequências em que o filtro atenua ou deixa passar um sinal. Mantendo-se constantes os valores de L e C, observa-se que a variação de R afeta os ganhos e as fases das frequências em torno da frequência de ressonância do filtro (vide Fig. 3.22).

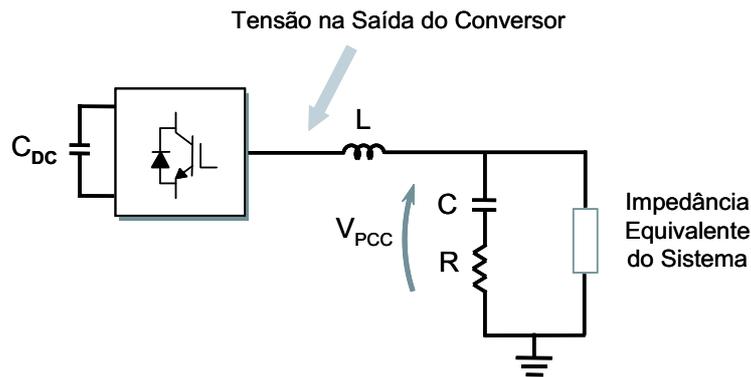


Figura 3.21: Filtro RLC.

Outro ponto de grande relevância no projeto de um filtro RLC é o seu comportamento frente às correntes sintetizadas pelo conversor. A escolha dos parâmetros do mesmo deve ser realizada de forma a minimizar a corrente drenada pelo ramo RC, minimizando, desta forma, as perdas produzidas pelo elemento resistivo.

Além de todos os aspectos teóricos mencionados, deve-se considerar ainda, os aspectos práticos e financeiros quando da especificação dos componentes RLC do filtro.

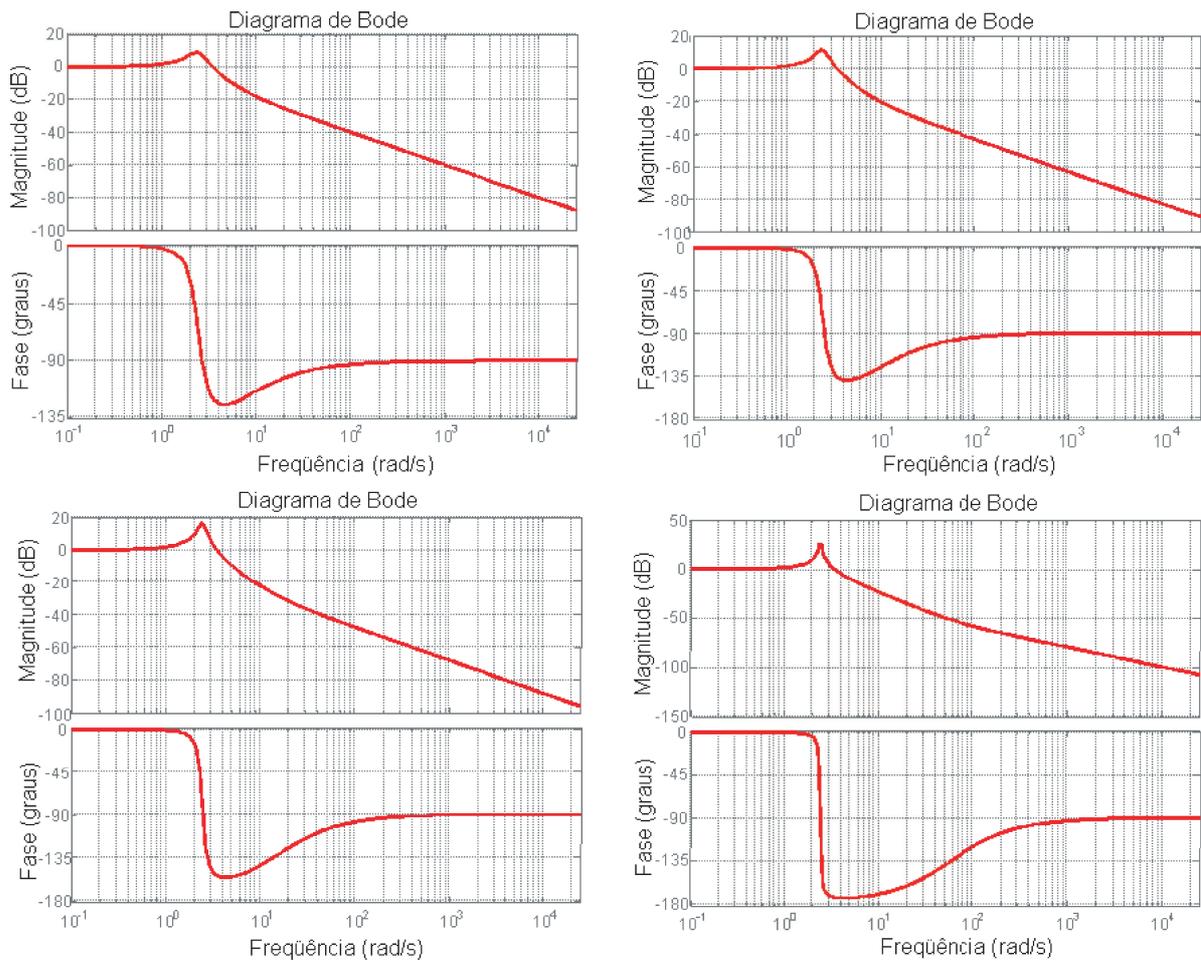


Figura 3.22: Resposta em frequência de um filtro RLC.

3.7 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram apresentadas as principais mudanças nos circuitos de potência e de controle do Tap HVDC de modo a se atingir a bidirecionalidade de energia entre os sistemas HVDC e o CA. Foram discutidos os modos de operação e controle da Ponte-H, indicando os momentos de injeção e dreno de energia.

Em seguida, foram redimensionados dois transformadores (núcleo de ar e ferro-magnético) para o nível de potência desejado, e por último, apresentadas as estratégias de controles utilizadas nos conversores monofásico e trifásico.

Capítulo 4

Análise do Modelo Digital do Tap HVDC

O objetivo deste capítulo é apresentar a simulação e a análise do modelo digital do Tap HVDC no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

Modelou-se a princípio, um sistema simplificado no qual os terminais do Tap foram conectados a uma fonte de corrente e ao potencial de terra. Em seguida, o equipamento foi inserido em um sistema HVDC completo (Benchmark do Cigré). Foram feitas análises sobre a performance do Tap operando com transformador com núcleo de ar ou com núcleo de ferro.

4.1 Introdução

O estudo proposto destina-se a apresentar um equipamento com capacidade de dreno ou injeção de pequenos blocos de energia em pontos intermediários das linhas de corrente contínua, permitindo intercâmbio entre os mesmos. Para tal utilizou-se uma topologia em série com a linha HVDC e adotou-se um conversor do tipo fonte de corrente com modulação por largura de pulso (PWM).

A análise do Tap se dará por meio de simulações em duas situações distintas. No primeiro caso, o equipamento terá seus terminais conectados a um modelo simplificado de transmissão HVDC, sendo utilizados os dois tipos de transformadores. No segundo caso, será analisada sua performance com o modelo completo de HVDC.

Convém ressaltar que não é escopo desse trabalho estudos de viabilidade econômica ou análises quanto à disponibilidade do equipamento, sendo o objetivo primordial do estudo a validação dos controles implementados. Entretanto, em aplicações nas quais a potência drenada ou injetada da linha HVDC for muito baixa, outras alternativas poderão ser utilizadas, por exemplo, a geração termelétrica. Para o extremo oposto, onde a demanda da carga comprometeria a própria operação da linha, a utilização de um sistema multiterminal é a solução mais adequada.

4.2 Definição do Sistema Elétrico

O sistema de transmissão HVDC foi modelado por uma fonte de corrente com magnitude igual a 2,61 kA, alimentando o lado CC do conversor série. O circuito de potência do Tap HVDC é composto por um conversor CSI (Ponte-H), tendo em paralelo o primário do transformador. Ao secundário do mesmo conecta-se um conversor monofásico-trifásico, responsável pelo atendimento das cargas e, em paralelo com essas, um sistema CA é inserido ao sistema.

Esse sistema CA possui tensão nominal de 34,5 kV com uma carga dimensionada para uma potência ativa de 50,0 MW e fator de potência igual a 0,8 indutivo. Para tal, utilizou-se uma impedância $Z_L = (15,23 + j 11,43) p.u.$. Essa carga absorve 5% ou menos da potência nominal do elo CC, o que corresponde, aproximadamente, as

perdas ôhmicas da linha de transmissão. Como a mesma é isolada e de baixa potência, o controle da derivação é local e desvinculado do sistema HVDC, eliminando problemas de conexão, coordenação, entre outros.

A Fig. 4.1 apresenta o diagrama esquemático do sistema elétrico em questão.

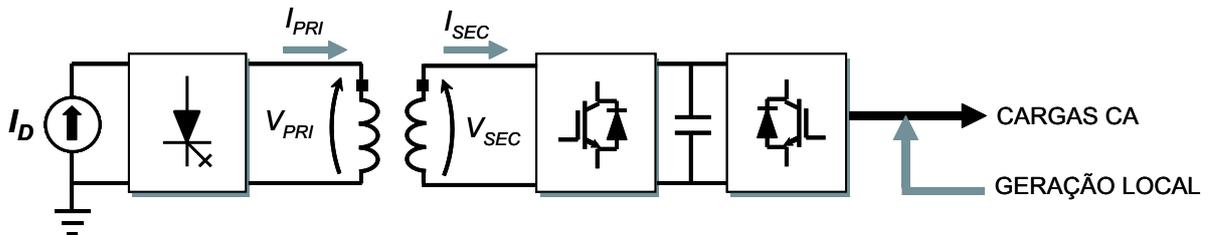


Figura 4.1: Diagrama do Tap HVDC modelado no PSCAD/EMTDC.

4.3 Modelagem dos Conversores

Para a modelagem do sistema tem-se o circuito equivalente mostrado na Fig. 4.2, onde observam-se o conversor CSI (Ponte-H) conectado ao primário do transformador e ao secundário do mesmo, o conversor monofásico-trifásico alimentando uma carga trifásica, tendo em paralelo uma alimentação local.

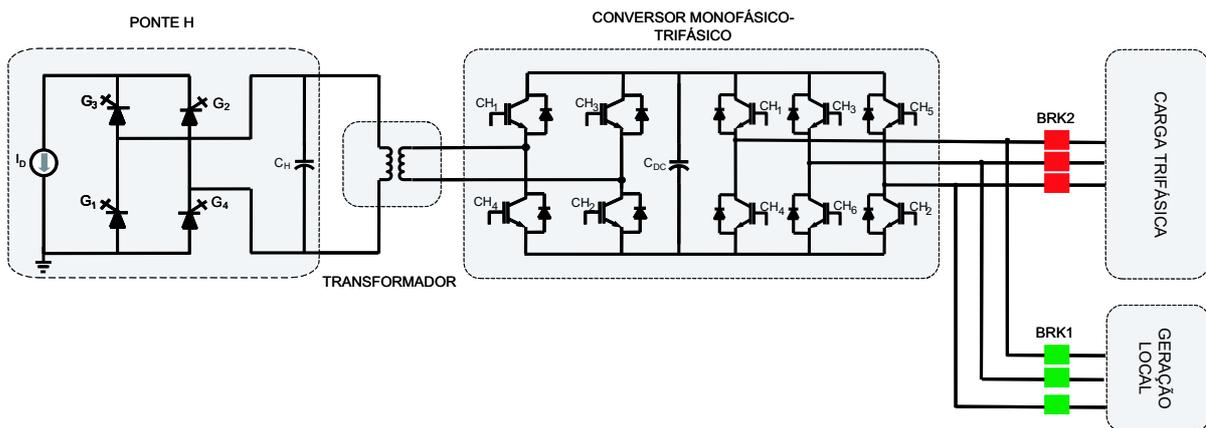


Figura 4.2: Circuito de potência utilizado.

O conversor CSI é uma estrutura em ponte composta por quatro GTOs e por um capacitor C_H . A modulação escolhida para os disparos dos mesmos foi a SPWM com uma frequência de chaveamento igual a 1,62 kHz. A tensão na derivação foi fixada em 50,0 kV, correspondendo a uma queda de tensão igual a 8,3% em um dos pólos do sistema HVDC.

Tanto o conversor monofásico quanto o trifásico utilizados nas simulações são do tipo VSI - inversores alimentados com fonte de tensão. O barramento contínuo entre os mesmos apresenta um capacitor com tensão contínua de magnitude igual a 65,0 kV. A estratégia de chaveamento de ambos os conversores foi baseada no controle vetorial, utilizando técnica PWM com uma portadora triangular de 1,5 kHz.

Os indutores na saída de cada fase no lado do inversor (L_S) foram dimensionados de maneira que suas magnitudes fossem iguais a 10% da impedância base do sistema. Foram instalados filtros passivos do tipo RC após as indutâncias de comutação, objetivando a eliminação dos harmônicos gerados pelo chaveamento PWM. Os resistores possuem a função de amortecer possíveis ressonâncias.

Considerando as condições acima listadas, o procedimento para a conexão do Tap HVDC ao sistema elétrico está descrito a seguir:

- i. O tempo total de simulação corresponde a 5,0 s, sendo que o conversor monofásico entra em operação em 0,1 s, enquanto que o conversor trifásico, em 1,0 s.
- ii. O disjuntor BRK1 é responsável pela inserção ou retirada da geração local. No intervalo entre $0,0 \leq t \leq 2,5$ s, a mesma é conectada ao sistema. Para garantir que o barramento esteja isolado do restante do circuito após a retirada da geração, foram utilizadas chaves aterradas por meio de impedâncias.
- iii. O disjuntor BRK2 destina-se à inserção ou retirada da carga trifásica do circuito. O mesmo está programado por mantê-la conectada ao sistema no intervalo compreendido entre $2,5 \text{ s} \leq t \leq 4,0 \text{ s}$.

A Tabela 4.1 lista os principais eventos ocorridos durante a simulação.

Tabela 4.1: Eventos ocorridos durante a simulação

Intervalo (s)	Eventos
$t = 0,1$	Inicialização do Conversor Monofásico
$t = 1,0$	Inicialização do Conversor Trifásico
$0,0 \leq t \leq 2,5$	Entrada e Saída da Geração
$2,5 \leq t \leq 4,0$	Conexão da Carga
$4,0 \leq t \leq 5,0$	Desconexão da Carga

Depois de definidos o sistema elétrico e os conversores a serem utilizados, iniciou-se a simulação e análise do modelo digital do Tap HVDC no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC. As seções a seguir apresentam os resultados obtidos utilizando-se os dois tipos de transformador: com núcleo de ar e ferro-magnético.

4.4 Resultados com o Transformador com Núcleo de Ar

Nas Fig. 4.3 e Fig. 4.4 são mostradas as formas de onda para os sinais de disparo das chaves e os perfis de tensão e corrente sobre um dos componentes da Ponte-H, respectivamente. A estratégia de chaveamento utilizada garante que a corrente no ramo central da Ponte-H varie sempre entre 0 e $+I_D$ ou entre $-I_D$ e 0. Com essa menor variação de corrente, a tensão sobre os terminais do conversor tende a ter um menor *ripple*.

Esforços consideráveis foram empreendidos a fim de se obter chaveamentos com zero de tensão e zero de corrente nos GTOs da Ponte-H (*soft-switching*). No entanto, não se conseguiu atingir a ressonância necessária para que os dispositivos da mesma pudessem ser comutados de forma suave.

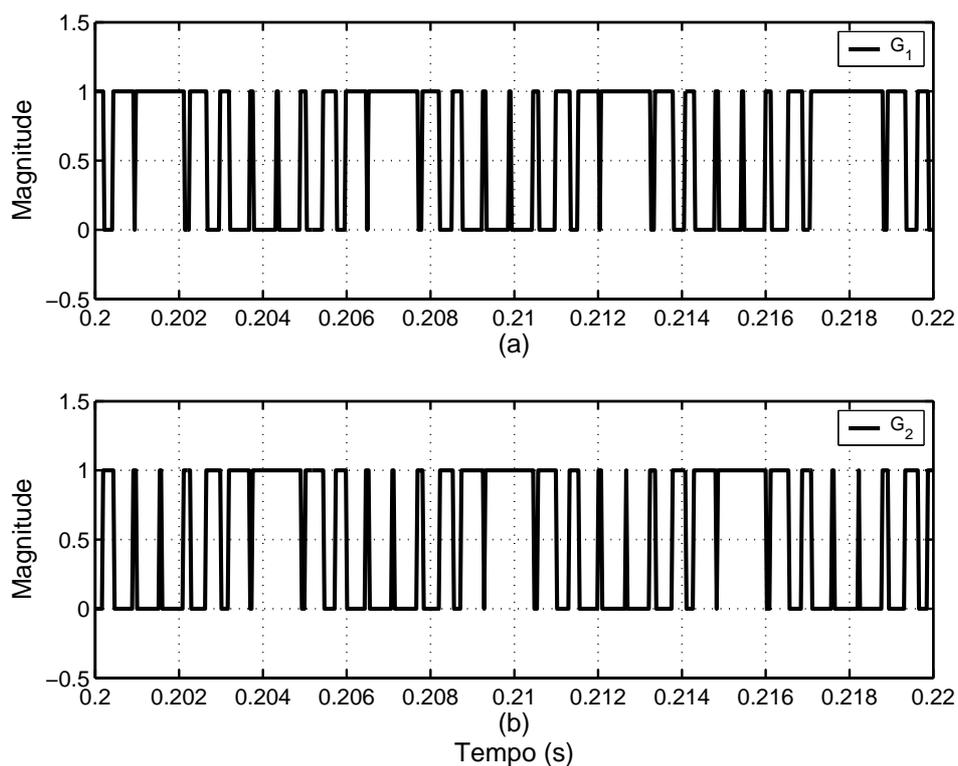


Figura 4.3: (a) Disparo do GTO 1; (b) Disparo do GTO 3.

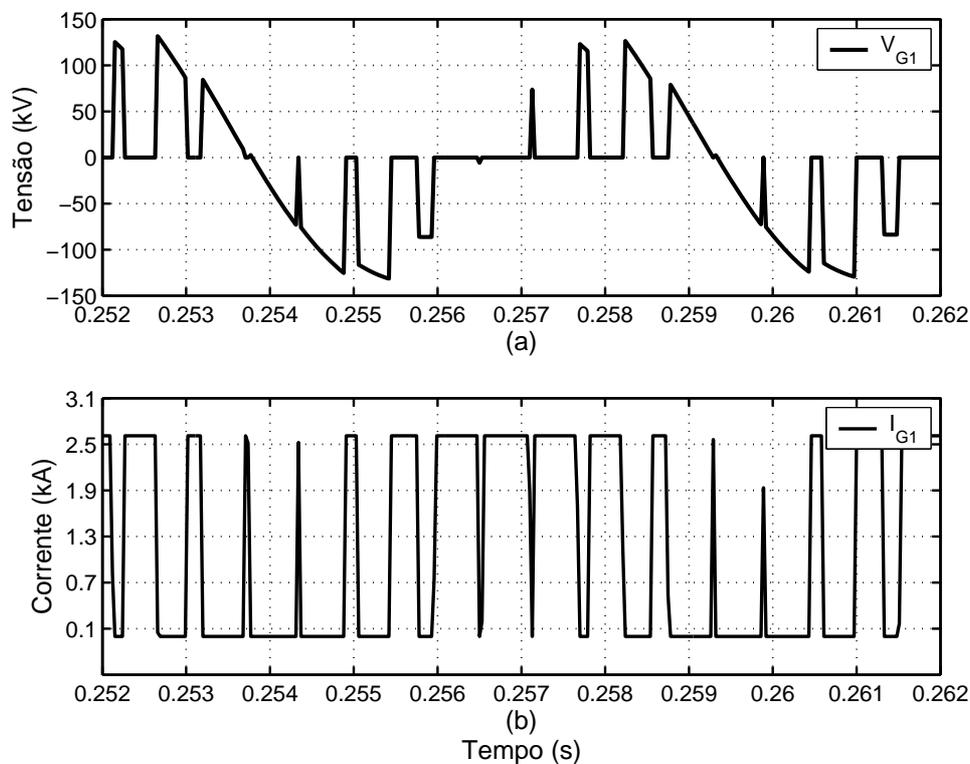


Figura 4.4: (a) Tensão sobre o GTO 1; (b) Corrente sobre o GTO 1.

Como visto na seção 3.3.3, a tensão sobre os terminais do capacitor da Ponte-H é obtida a partir da comparação de uma referência senoidal com uma portadora triangular. A Fig. 4.5 apresenta o perfil da tensão V_{CH} em instantes distintos, enquanto que a Fig. 4.6 mostra os sinais fictícios e o valor eficaz da tensão sobre C_H .

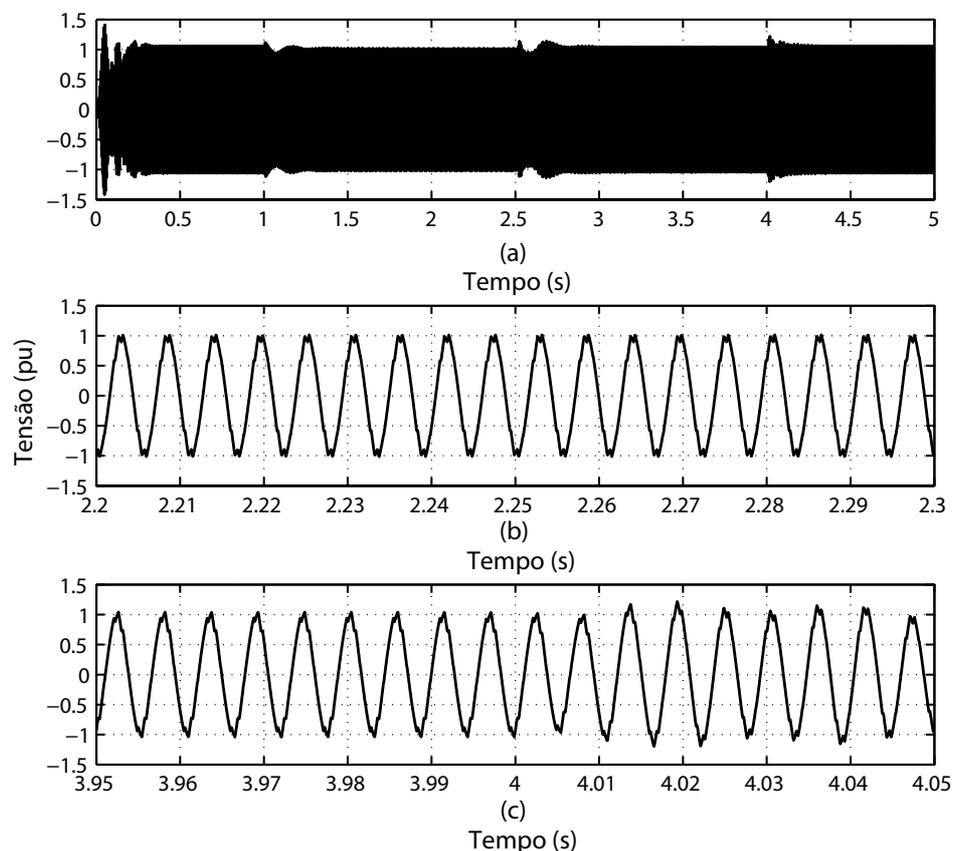


Figura 4.5: (a), (b) e (c) Tensão sobre o capacitor C_H .

A Fig. 4.5 mostra a existência de uma ondulação de alta frequência sobreposta à tensão sobre o capacitor. Duas alternativas podem ser utilizadas a fim de reduzir a amplitude da mesma: aumentar a frequência de chaveamento, a qual é limitada pelas perdas e características das chaves semicondutoras ou aumentar a capacitância do filtro, que no entanto elevaria a demanda de potência reativa a ser suprida pelo conversor, limitando a potência disponível para a carga [6].

O espectro harmônico da tensão V_{CH} é mostrado na Fig. 4.7. Percebe-se que os harmônicos encontram-se agrupados em torno dos múltiplos da frequência de chaveamento.

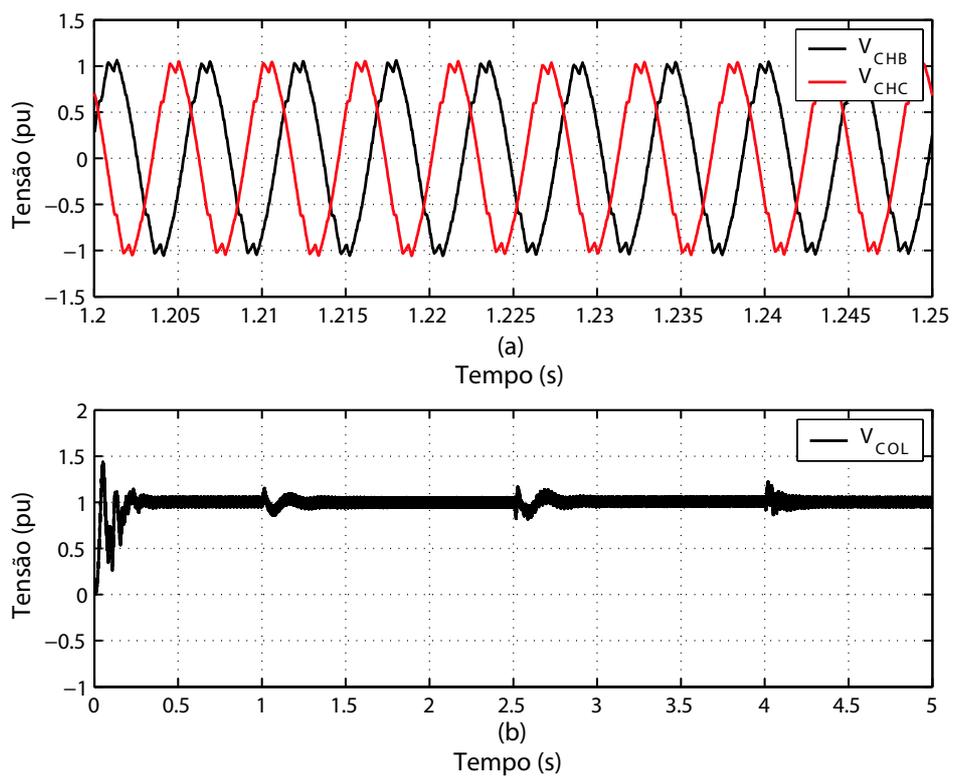


Figura 4.6: (a) Sinais fictícios; (b) Valor eficaz da tensão V_{CH} .

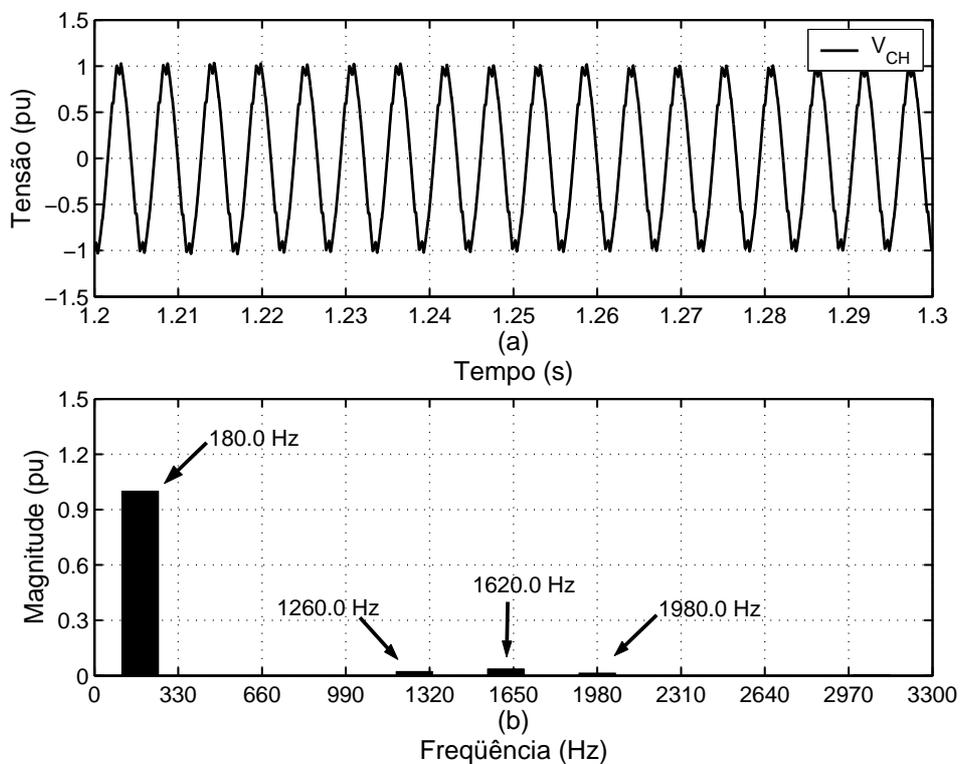


Figura 4.7: (a) Tensão V_{CH} ; (b) Espectro harmônico da tensão V_{CH} .

A partir da tensão sobre o capacitor C_H , o PLL detecta a frequência fundamental da mesma gerando o sinal de sincronismo. A Fig. 4.8 mostra a dinâmica do sinal de frequência ω e o sinal ωt gerado pelo PLL. O coeficiente angular da reta em ωt é aproximadamente igual à frequência angular de V_{CH} , ou seja, 1131,0 rad/s.

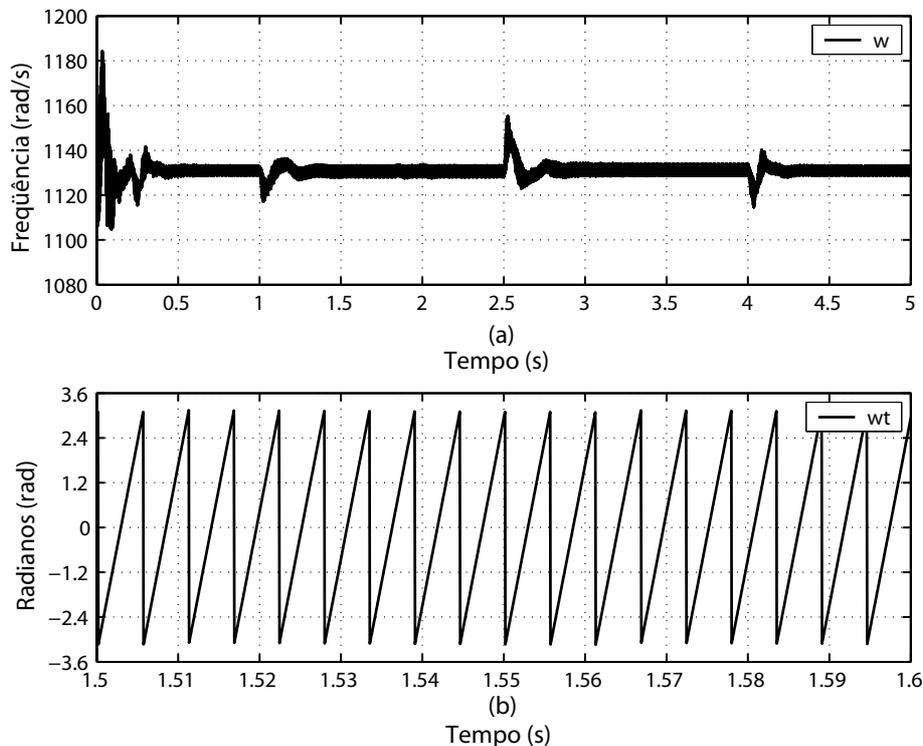


Figura 4.8: (a) Frequência fundamental; (b) Sinal de sincronismo.

Nesta figura pode-se observar o intervalo transitório entre o instante de acionamento do PLL e a estabilização do sinal de frequência em 1131,0 rad/s (180,0 Hz). São mostradas também as perturbações relativas às inicializações dos conversores e a entrada e saída do gerador local e da carga. Quanto ao sinal de sincronismo, não se observa a interferência do acionamento dos conversores porque o integrador do PLL é naturalmente um filtro passa-baixa.

A partir do sinal de sincronismo, o passo seguinte é a obtenção da corrente de referência a ser sintetizada pelo conversor monofásico. Na Fig. 4.9 observa-se a coincidência entre a corrente de referência e a medida no secundário do transformador.

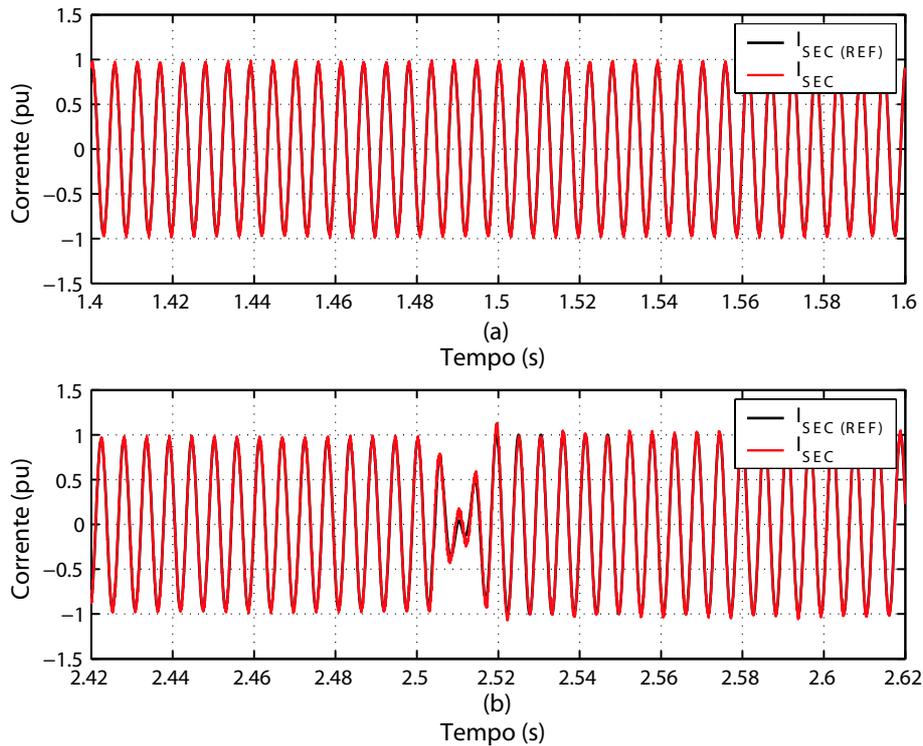


Figura 4.9: (a) Correntes com o equipamento injetando potência na linha HVDC;
(b) Correntes com o equipamento drenando potência da linha HVDC.

A Fig. 4.10 mostra a tensão no elo CC do inversor VSI. No instante em que o conversor monofásico inicia sua operação, a tensão CC apresenta uma oscilação entre 0,98 e 1,04 *p.u.* o que equivale a, aproximadamente, 6,0% em relação à tensão base. Em torno de 1,2 s a tensão no elo CC se encontra estabilizada com oscilações equivalentes a, aproximadamente, 1,25% da tensão de referência.

Partindo do pressuposto de que a tensão sobre o capacitor do elo CC esteja regulada, o conversor trifásico tem como objetivo controlar o intercâmbio de energia entre o Tap e o subsistema local, determinando as correntes que deverão ser sintetizadas. As mesmas são determinadas a partir da Teoria das Potências Ativa e Reativa Instantâneas - Teoria p-q.

A Fig. 4.11 apresenta a corrente de referência sintetizada pelo controle quando utilizada a Teoria p-q. Em 2.5 s a corrente $I_{A(REF)}$ deixa de existir, já que a geração local é desconectada do sistema e o controle do conversor passa a ser realizado mediante imposição de magnitude e fase. Optou-se por apresentar apenas uma das fases, visto que as outras apresentam comportamento similar.

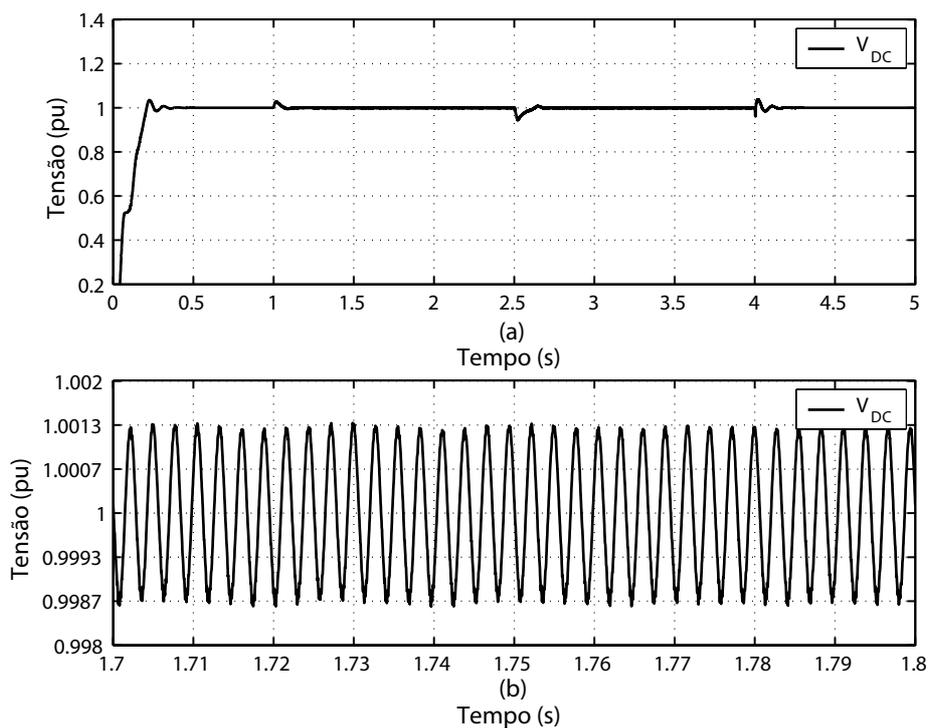


Figura 4.10: (a) e (b) Tensão sobre os terminais do capacitor C_{DC} .

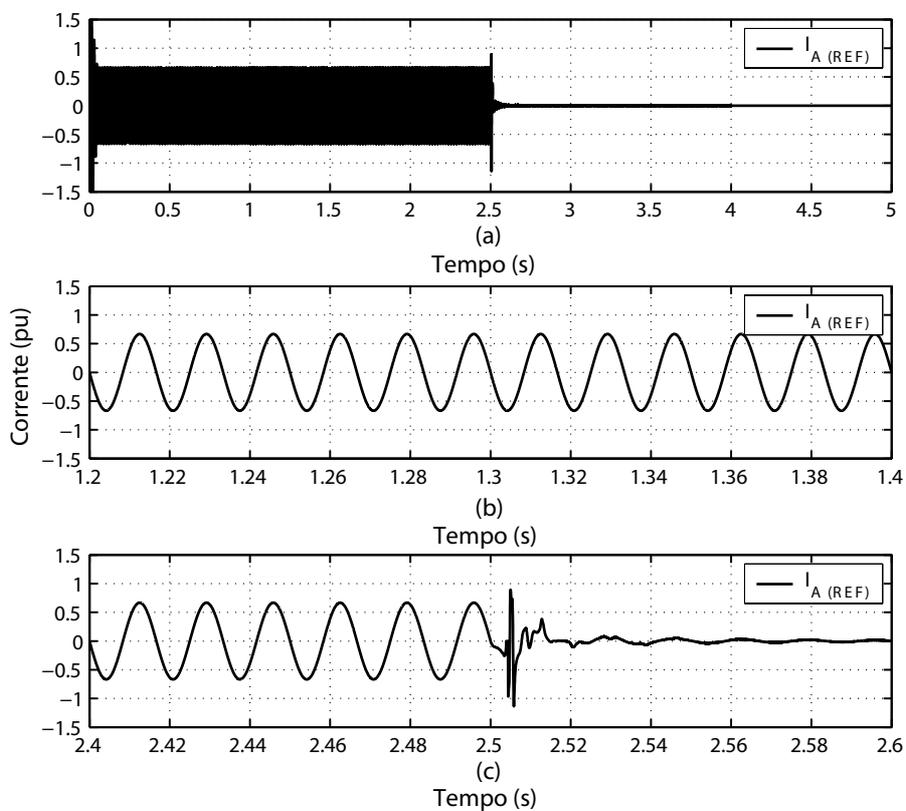


Figura 4.11: (a), (b) e (c) Corrente de referência sintetizada utilizando Teoria p-q.

O comportamento da corrente sintetizada pelo conversor trifásico é ilustrado na Fig. 4.12. Pode ser observada a existência de componentes de alta frequência, agrupados em torno dos múltiplos da frequência de chaveamento utilizada.

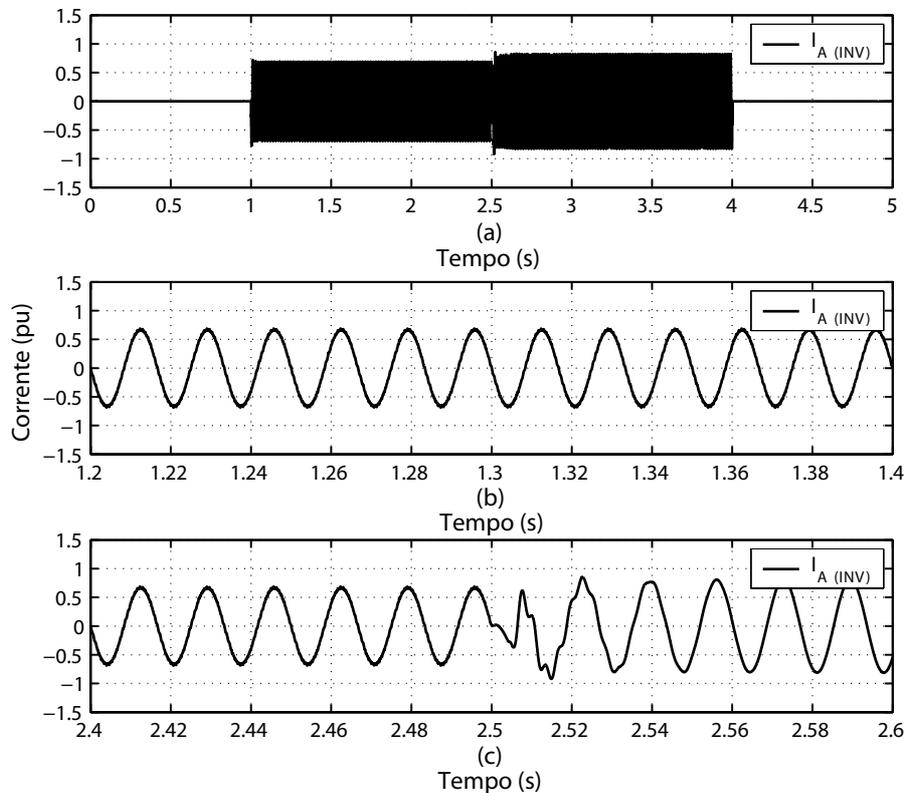


Figura 4.12: (a), (b) e (c) Corrente sintetizada pelo conversor trifásico.

A fim de se minimizar esses harmônicos foi introduzido um banco de filtros trifásico na saída do conversor, sendo o mesmo projetado com uma frequência de corte inferior a de chaveamento (300,0 Hz). Vale ressaltar que o objetivo desse filtro é bloquear os harmônicos gerados pelo chaveamento e não alterar a frequência fundamental, disponibilizando um ganho unitário para as frequências desejáveis e ganhos praticamente nulos para as indesejáveis.

A Fig. 4.13 apresenta o perfil de corrente do conversor trifásico antes e depois da inserção do filtro, enquanto que a Fig. 4.14 mostra o espectro harmônico das mesmas. Como a princípio, a corrente do inversor é sintetizada mediante uma referência senoidal resultante da Teoria p-q, os harmônicos são pouco significativos. A partir do momento em que se desconecta a geração local e utiliza-se o controle por imposição de magnitude e fase, tem-se uma corrente com alto conteúdo harmônico devido à tensão chaveada do conversor.

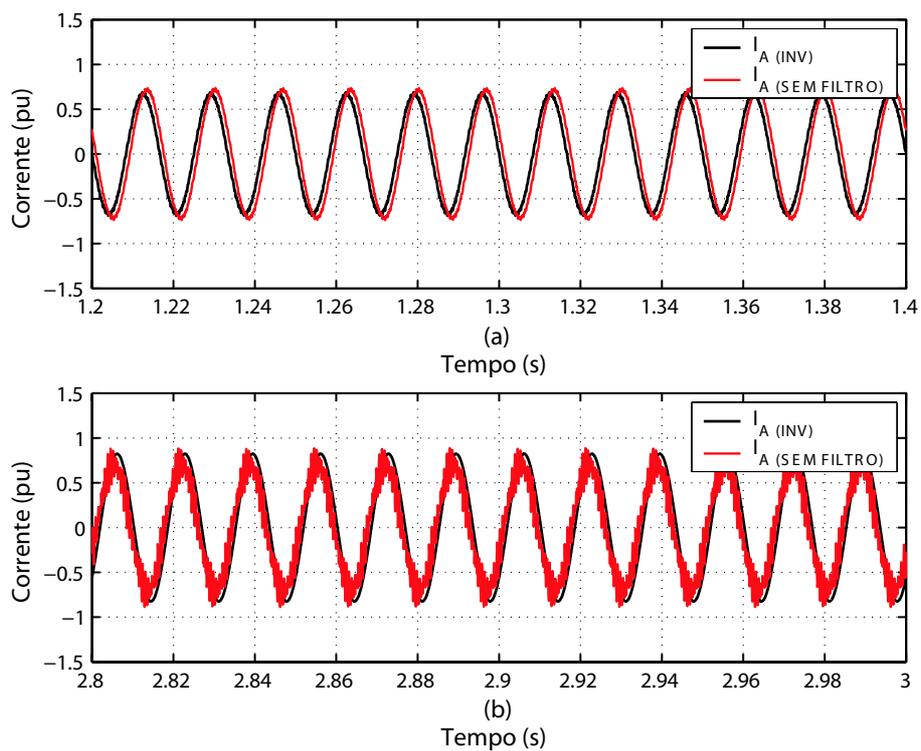


Figura 4.13: (a) Correntes com o equipamento injetando potência na linha HVDC;
(b) Correntes com o equipamento drenando potência da linha HVDC.

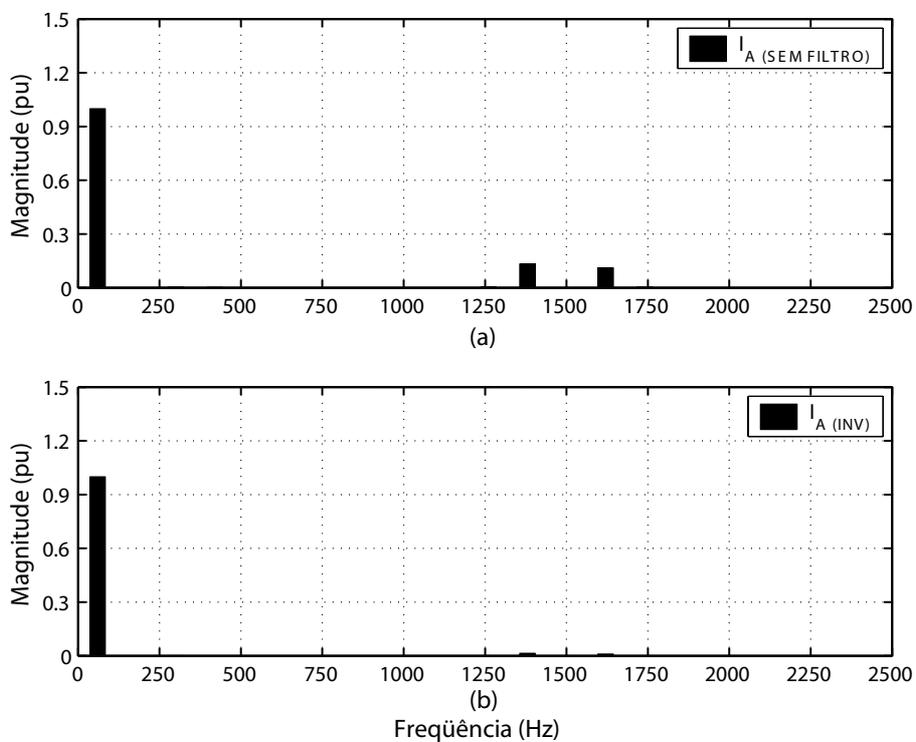


Figura 4.14: Espectro harmônico das correntes do conversor trifásico e do filtro RLC.

Na Fig. 4.15 tem-se a corrente de referência em oposição à obtida nos terminais do conversor (fase A). Pode-se observar a coincidência entre a corrente de referência e à sintetizada pelo conversor trifásico.

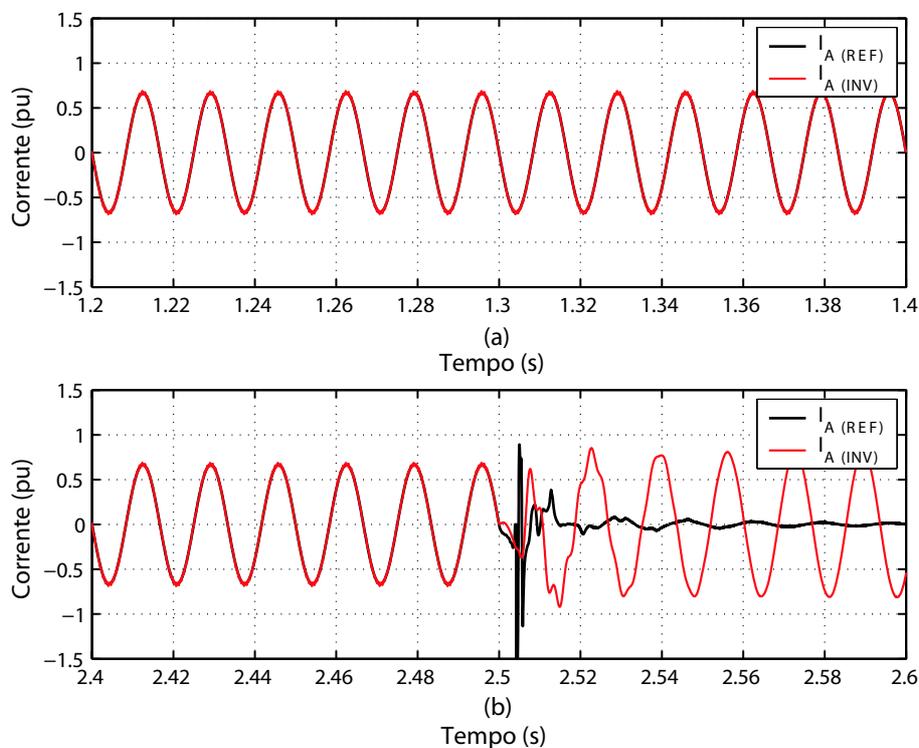


Figura 4.15: (a) Correntes com o equipamento injetando potência na linha HVDC;
(b) Correntes com o equipamento drenando potência da linha HVDC.

A tensão sintetizada pelo inversor é apresentada na Fig. 4.16. Observa-se que com a inclusão do filtro praticamente se elimina o efeito dos harmônicos gerados pelo inversor, produzindo uma tensão quase senoidal nos terminais da carga.

O espectro harmônico dessa tensão é apresentado na Fig. 4.17. O mesmo é formado predominantemente pela componente harmônica fundamental e por componentes de alta frequência. Assume-se que a componente harmônica fundamental está localizada abaixo da frequência natural do filtro enquanto as demais estão localizadas acima desta frequência.

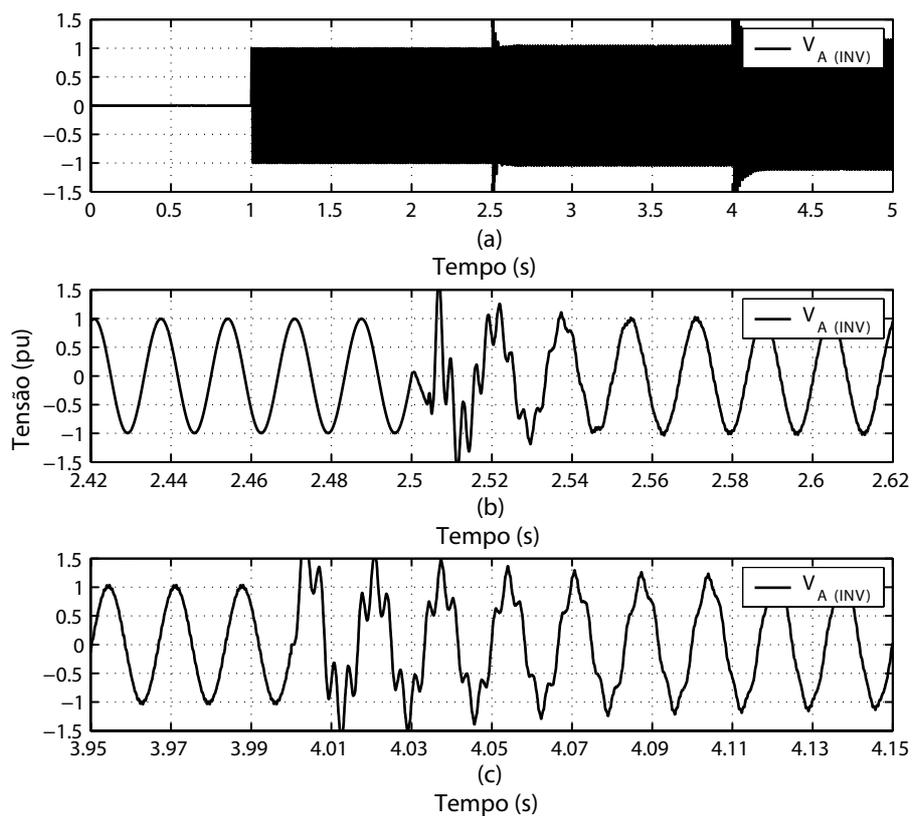


Figura 4.16: (a), (b) e (c) Tensão sintetizada pelo conversor trifásico.

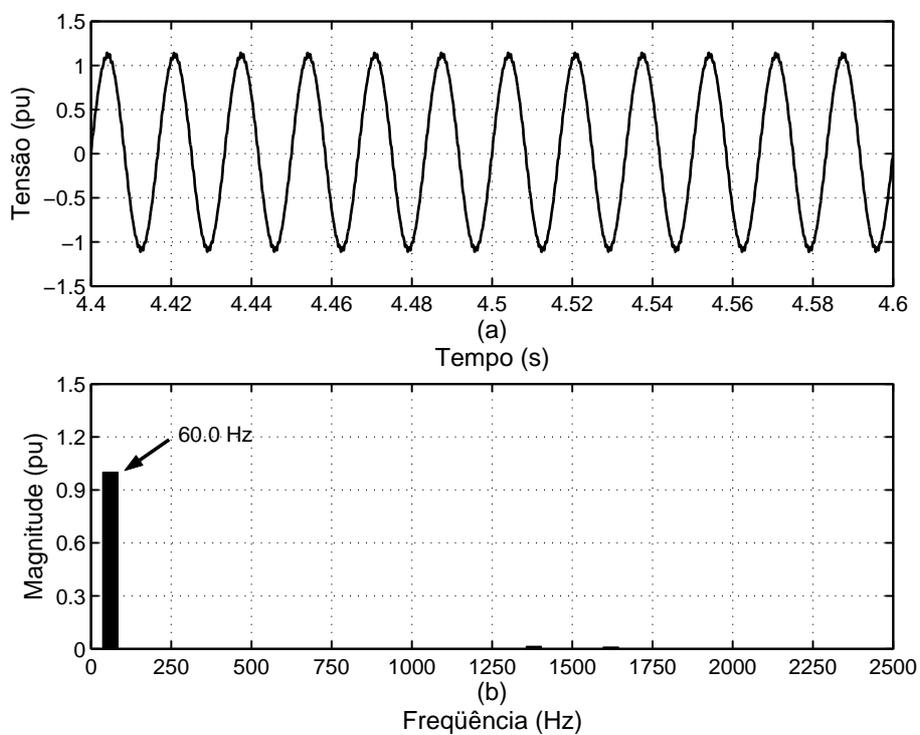


Figura 4.17: (a) Tensão do conversor trifásico; (b) Espectro harmônico.

Como visto na Seção 3.2, a injeção ou dreno de potência está relacionada à defasagem entre a tensão V_{CH} e a corrente I_{SEC} . Quando a geração local estiver ligada e a carga desconectada do sistema, o controle do equipamento atuará de forma a gerar uma defasagem de 180° entre V_{CH} e I_{SEC} , fazendo com que haja transferência de energia entre o sistema CA e a linha HVDC. Caso contrário, quando a carga estiver inserida no sistema e a geração local desligada, não haverá defasagem entre tensão e corrente, e o Tap irá drenar energia do HVDC de forma a suprir a demanda solicitada pela carga. As Fig. 4.18 e Fig. 4.19 ilustram os perfis de tensão e corrente nessas duas situações citadas.

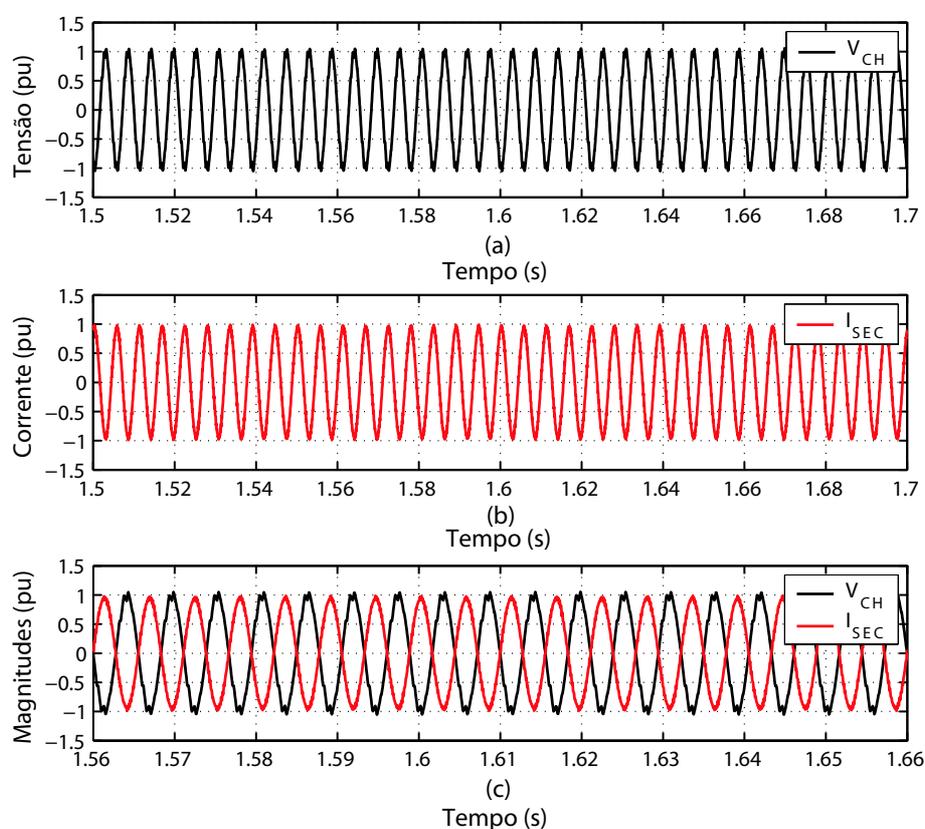


Figura 4.18: (a), (b) e (c) Formas de onda da tensão V_{CH} e da corrente I_{SEC} com o equipamento injetando potência no sistema HVDC, respectivamente.

Na Fig. 4.20 estão dispostas as potências no elo CC e nos enrolamentos do transformador. No intervalo compreendido entre $1,0 \text{ s} \leq t \leq 2,5 \text{ s}$ observa-se a transferência de energia entre o sistema CA e o HVDC, enquanto que a partir de $t = 2,5 \text{ s}$, há a reversão total de energia, a fim de suprir a demanda solicitada pela carga. Em $t = 4,0 \text{ s}$, tanto a carga quanto a geração local estão desconectadas do sistema e não há injeção ou dreno de potência na linha HVDC.

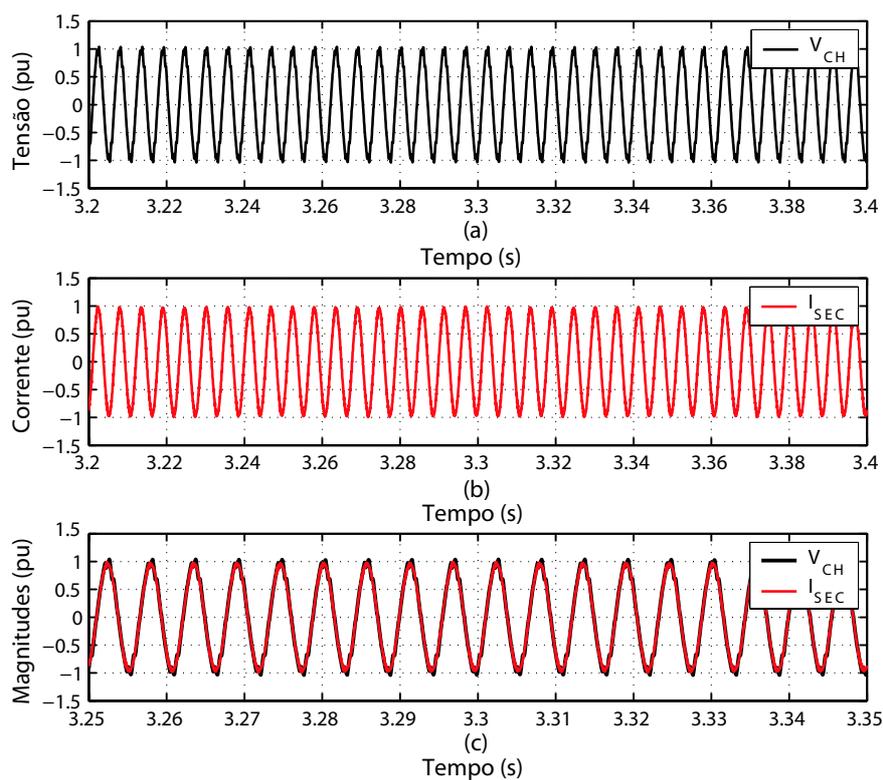


Figura 4.19: (a), (b) e (c) Formas de onda da tensão V_{CH} e da corrente I_{SEC} com o equipamento drenando potência do sistema HVDC, respectivamente.

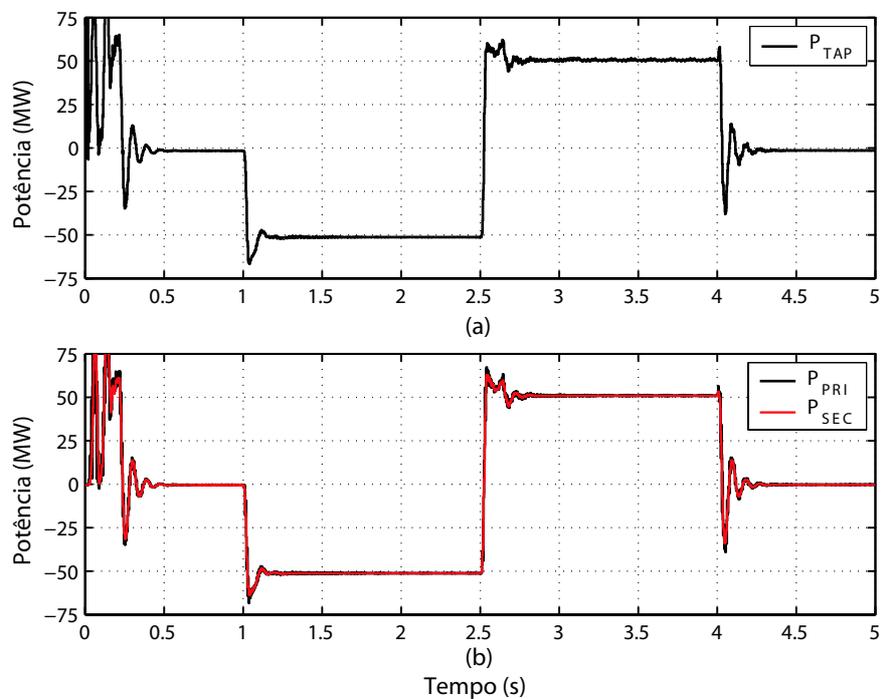


Figura 4.20: (a) Potência sobre os terminais do Tap HVDC;
(b) Potências nos enrolamentos do transformador.

A Fig. 4.21 mostra as potências da fonte, da carga e do conversor trifásico (P_{FONTE} , P_{CARGA} e P_{CONV} , respectivamente).

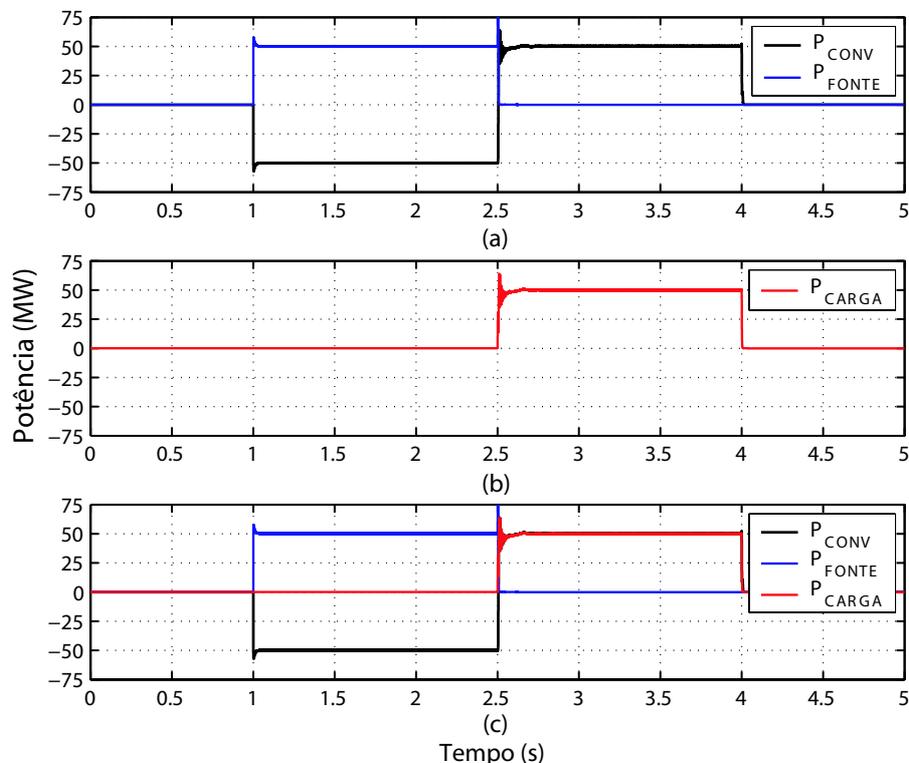


Figura 4.21: (a), (b) e (c) Potências da fonte, carga e conversor trifásico.

A Fig. 4.22 apresenta a tensão v_{tap} e o seu valor médio instantâneo (v_{tapCC}), obtido através de um filtro passa-baixas. Como a potência a ser drenada ou injetada é da ordem de 50,0 MW, a tensão v_{tapCC} é cerca de 19,0 kV conforme evidenciado na figura.

As correntes nos terminais do transformador são mostradas na Fig. 4.23. A elevação na amplitude da corrente no primário deve-se ao alto valor de magnetização do transformador.

A energia reativa no primário do transformador está associada à corrente de magnetização do mesmo. A Fig. 4.24 apresenta essa grandeza em duas situações distintas: no primeiro caso, com uma frequência de operação igual a 180,0 Hz e no segundo, com 400,0 Hz. Como a corrente de magnetização é inversamente proporcional à frequência, há uma diminuição dessa corrente e, conseqüentemente, do reativo no primário do transformador.

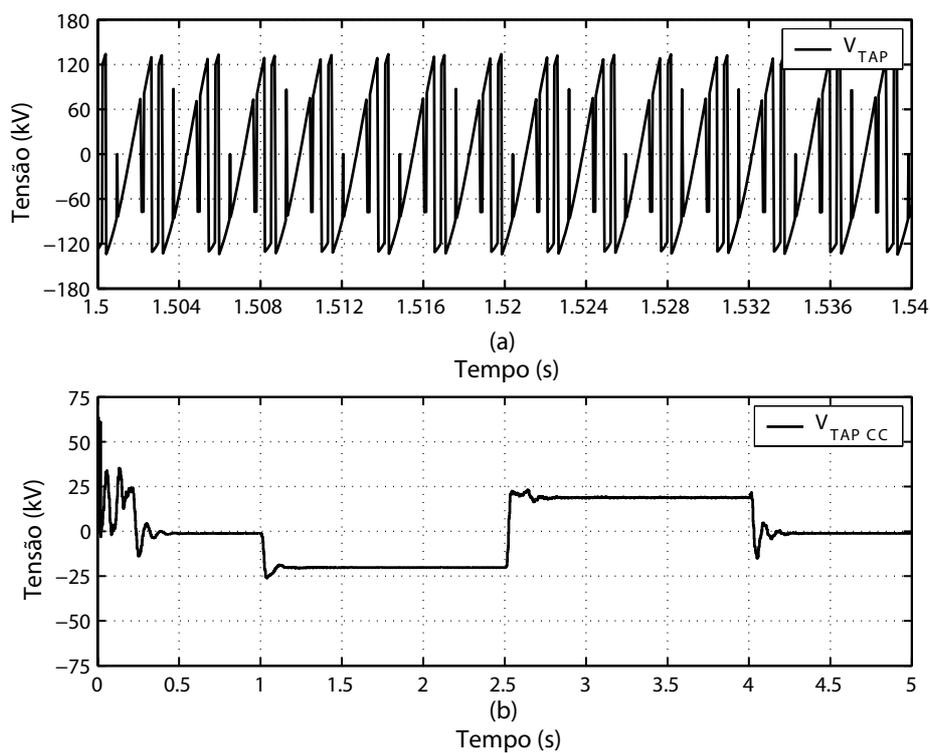


Figura 4.22: (a) Tensão V_{TAP} ; (b) Valor médio de V_{TAP} .

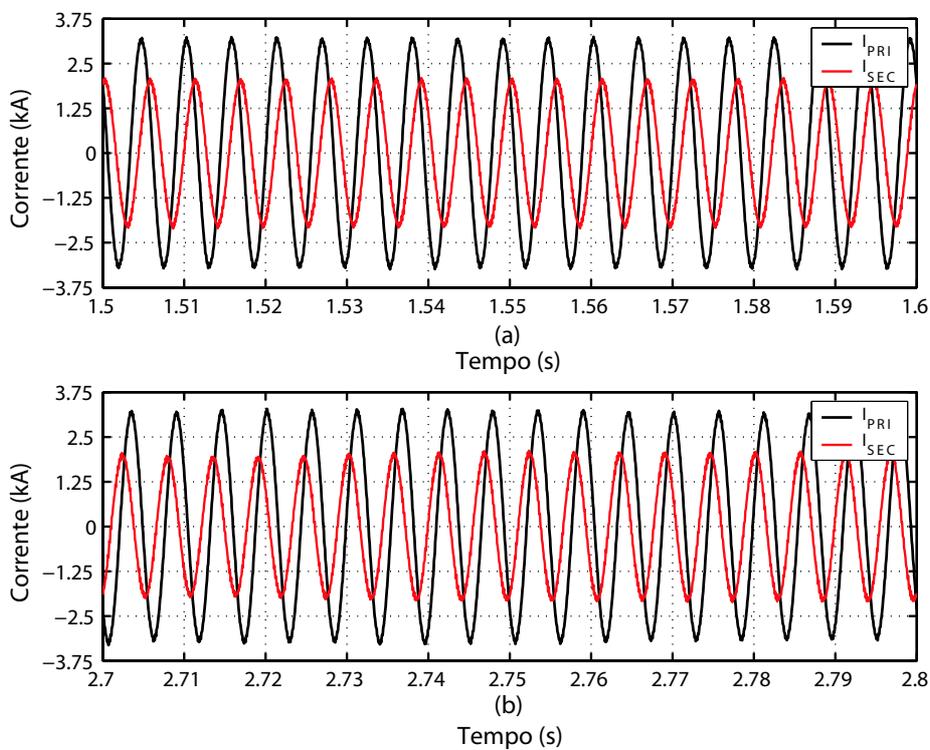


Figura 4.23: (a) Correntes no transformador com o equipamento injetando potência; (b) Correntes no transformador com o equipamento drenando potência.

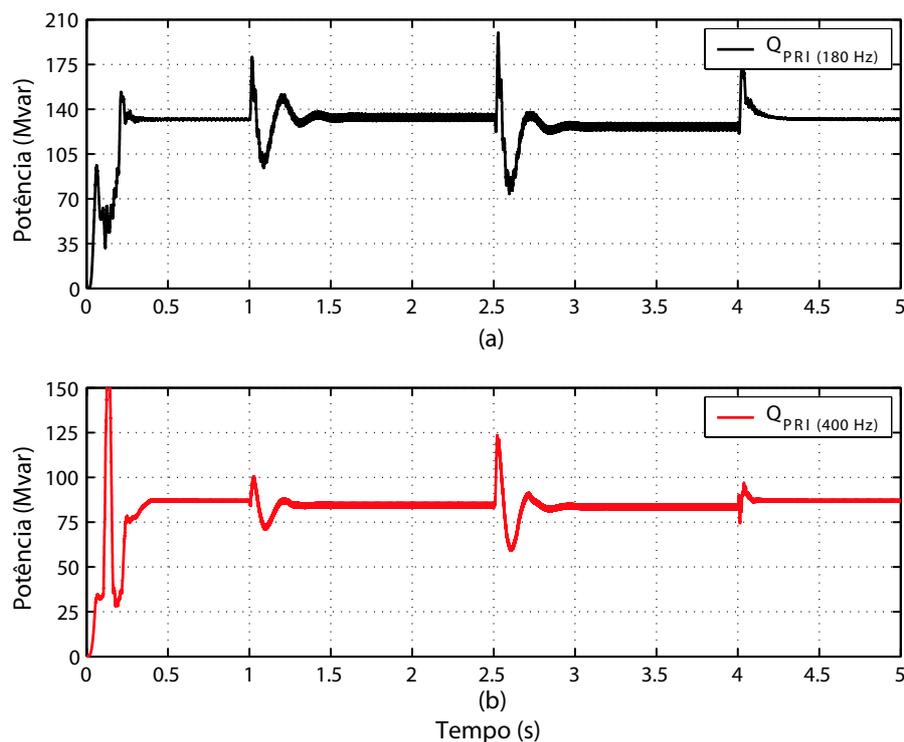


Figura 4.24: (a) Potência reativa para uma $f = 180,0$ Hz;
 (b) Potência reativa para uma $f = 400,0$ Hz.

4.5 Resultados com o Transformador com Núcleo de Ferro

A frequência nominal de operação do transformador é a mesma do sistema CA, ou seja, 60,0 Hz. A Fig. 4.25 mostra a tensão V_{CH} e seu respectivo espectro harmônico. Neste caso, como o índice de modulação de frequência é igual a 25 vezes a fundamental, a componente sobreposta à tensão sobre o capacitor reduz-se sensivelmente, tornando-a mais próxima de uma senóide.

As Fig. 4.26 e Fig. 4.27 apresentam as formas de onda para a tensão V_{CH} e para a corrente I_{SEC} nos períodos de transferência de energia entre o sistema CA e a linha HVDC, enquanto que na Fig. 4.28, estão dispostas as potências medidas no elo CC e nos enrolamentos do transformador.

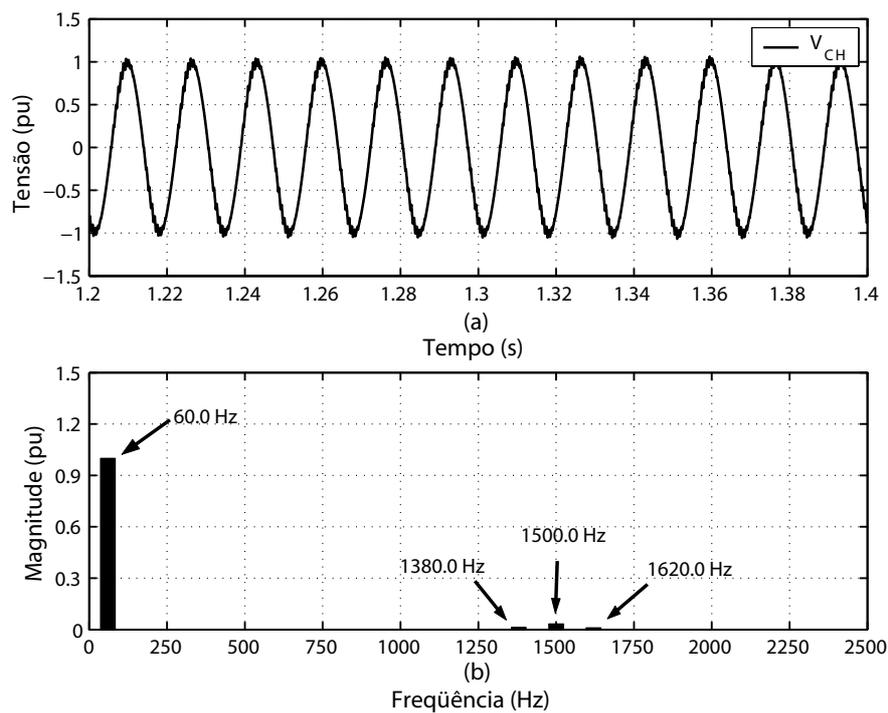


Figura 4.25: a) Tensão V_{CH} ; (b) Espectro harmônico da tensão V_{CH} .

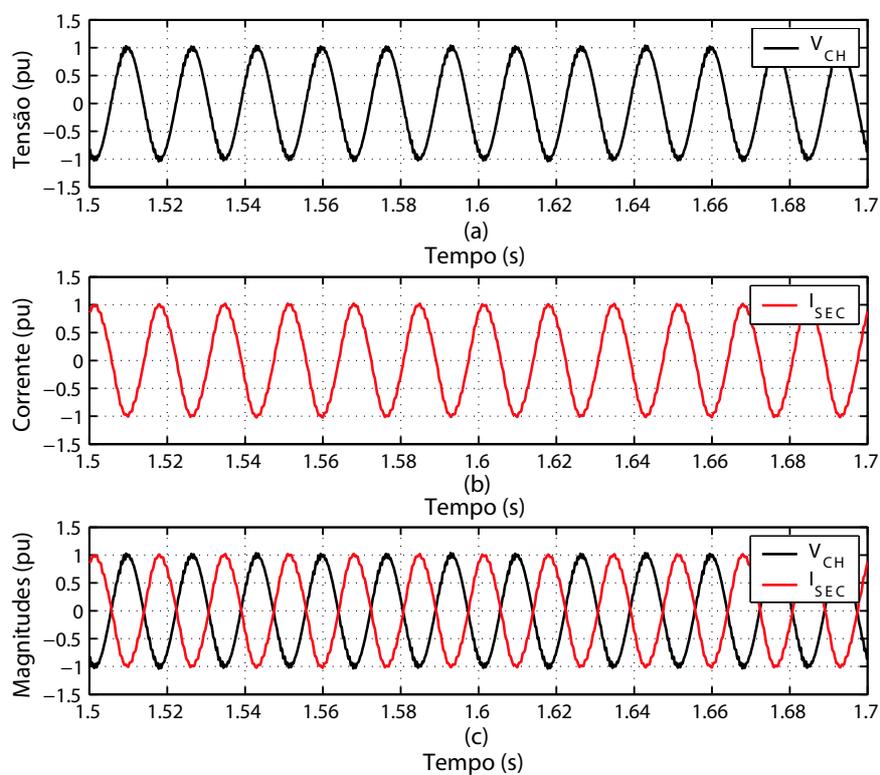


Figura 4.26: (a), (b) e (c) Formas de onda da tensão V_{CH} e da corrente I_{SEC} com o equipamento injetando potência no sistema HVDC, respectivamente.

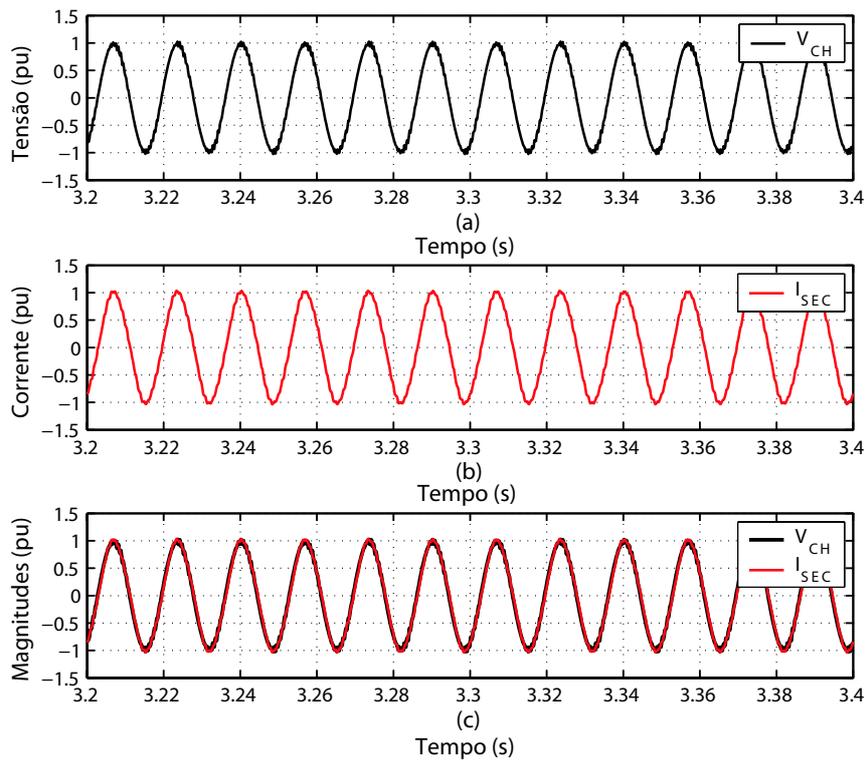


Figura 4.27: (a), (b) e (c) Formas de onda da tensão V_{CH} e da corrente I_{SEC} com o equipamento drenando potência do sistema HVDC, respectivamente.

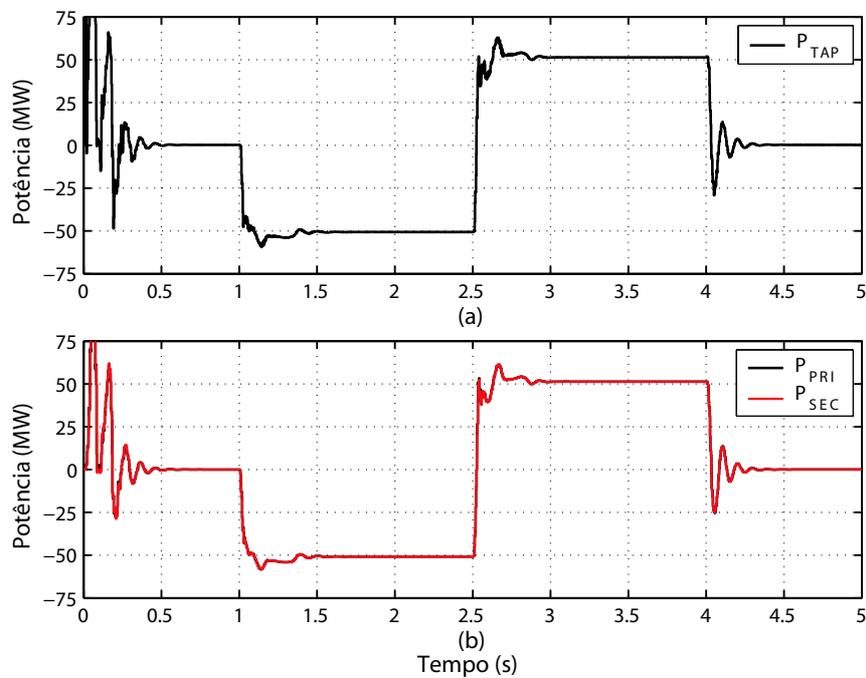


Figura 4.28: (a) Potência sobre os terminais do Tap HVDC.
(b) Potências nos enrolamentos do transformador.

A variação de v_{tap} e o seu valor médio instantâneo são apresentados na Fig. 4.29. Neste caso, como o ramo *shunt* do transformador pode ser desprezado, v_{tap} tem a mesma magnitude da tensão no primário do transformador. Outro fato a ser salientado é a diminuição na oscilação da potência ativa a ser drenada ou injetada no HVDC.

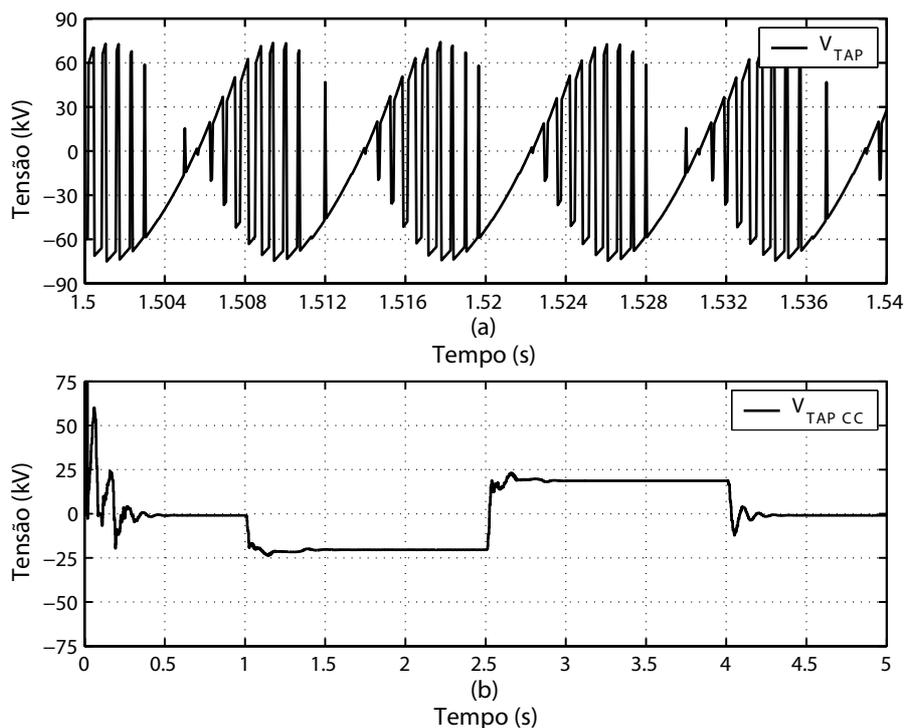


Figura 4.29: (a) Tensão V_{TAP} ; (b) Valor médio de V_{TAP} .

As correntes nos terminais do transformador são mostradas na Fig. 4.30. Neste caso, como a magnetização do transformador é desprezível, as mesmas apresentam fases idênticas e amplitudes ditadas pela relação de espiras.

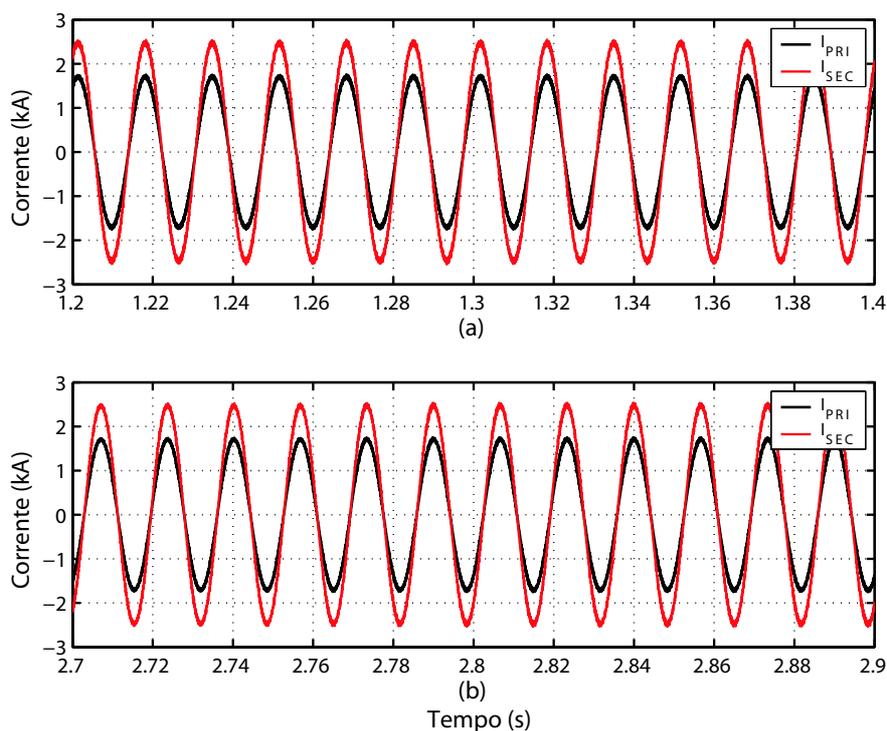


Figura 4.30: a) Correntes no transformador com o equipamento injetando potência; (b) Correntes no transformador com o equipamento drenando potência.

4.6 Resultados utilizando um Sistema HVDC Completo

A fim de validar os resultados obtidos nas seções anteriores, o equipamento foi inserido a um elo CC de um sistema HVDC completo - o Cigré HVDC Benchmark. Será mostrado que a conexão do Tap ao sistema principal não causa grande influência na operação normal do mesmo.

O Cigré HVDC Benchmark é um sistema HVDC monopolar de 12 pulsos, com tensão e corrente nominais de 500,0 kV e 2,0 kA, respectivamente [35, 36]. Os sistemas CA, ao qual estão conectadas suas duas estações, têm potência de curto-circuito de 2,5 GW cada. A tensão nominal do sistema CA no lado da estação retificadora é 345,0 kV, enquanto que no lado da estação inversora, a tensão de 230,0 kV. A frequência nominal de operação dos dois sistemas está fixada em 50,0 Hz.

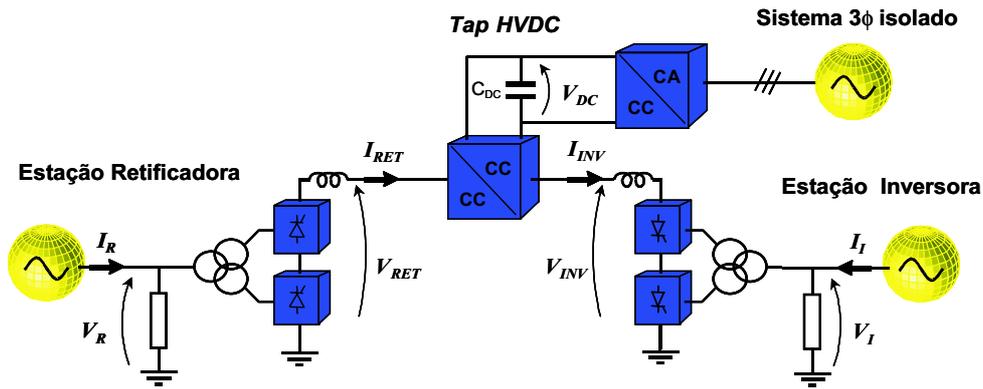


Figura 4.31: Tap HVDC inserido ao Benchmark do Cigré.

Não pretende-se neste estudo realizar análises quanto aos harmônicos presentes na linha CC. O intuito primordial é a validação dos controles e a constatação de que a inserção do equipamento ao longo do HVDC não compromete a operação normal do sistema.

As Fig. 4.32 e Fig. 4.33 mostram os perfis de tensão e corrente nas estações retificadora e inversora sem a conexão do Tap HVDC, respectivamente.

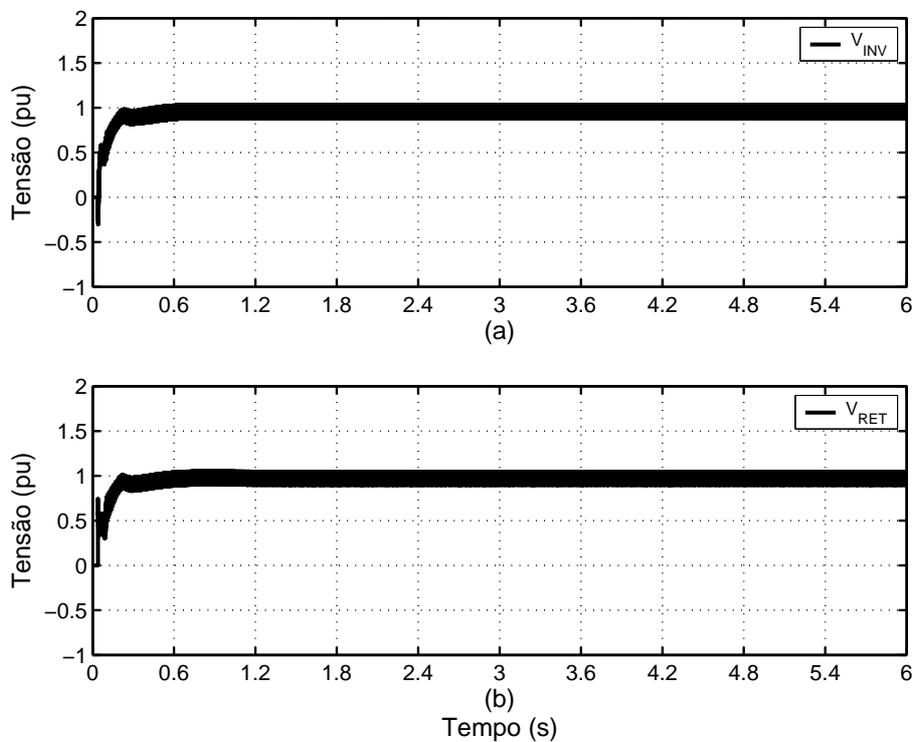


Figura 4.32: (a) e (b) Tensões nas estações retificadora e inversora sem o Tap HVDC.

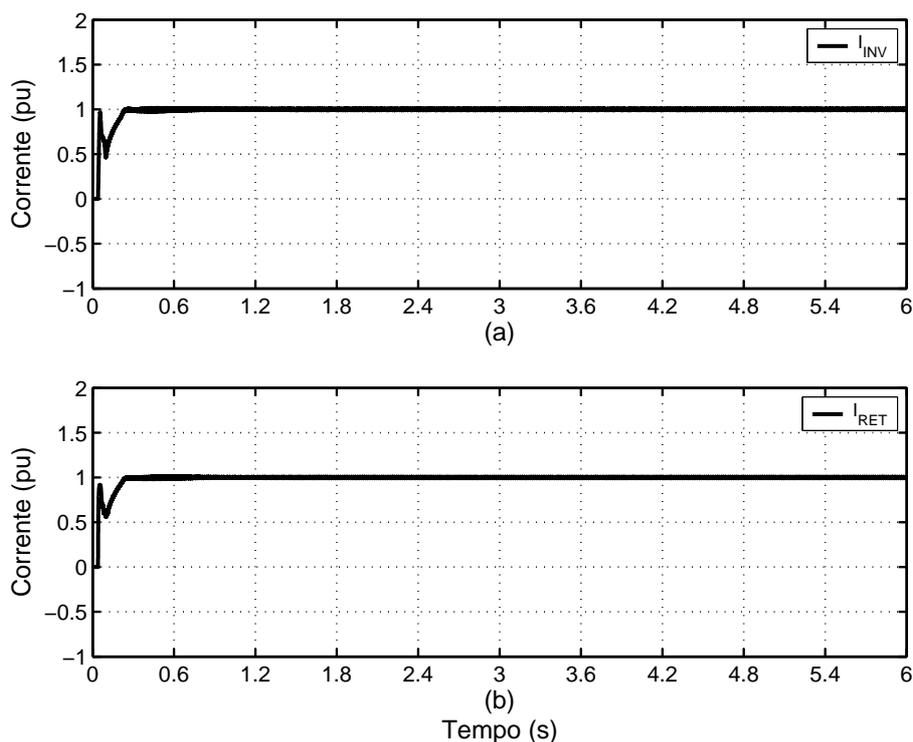


Figura 4.33: (a) e (b) Correntes nas estações retificadora e inversora sem o Tap HVDC.

O procedimento para a conexão do Tap ao sistema HVDC é descrito a seguir:

- i. O tempo total de simulação corresponde a 6,0 s, sendo que o conversor monofásico entra em operação em 1,2 s, enquanto que o trifásico, em 2,2 s.
- ii. O disjuntor BRK2, responsável pela inserção e retirada da geração local, permanece fechado no intervalo entre $0,5 \leq t \leq 3,5$ s.
- iii. O disjuntor BRK3 está programado para manter a carga de 50,0 MW conectada ao sistema no intervalo entre $3,5 \leq t \leq 5,0$ s.

As Fig. 4.34 e Fig. 4.35 mostram os perfis de tensão e corrente nas estações retificadora e inversora com o Tap em operação, respectivamente, enquanto que a Fig. 4.36 apresenta as potências no elo CC e nos enrolamentos do transformador. Conforme esperado, nenhuma influência significativa foi observada na operação normal do sistema HVDC com a inserção do equipamento.

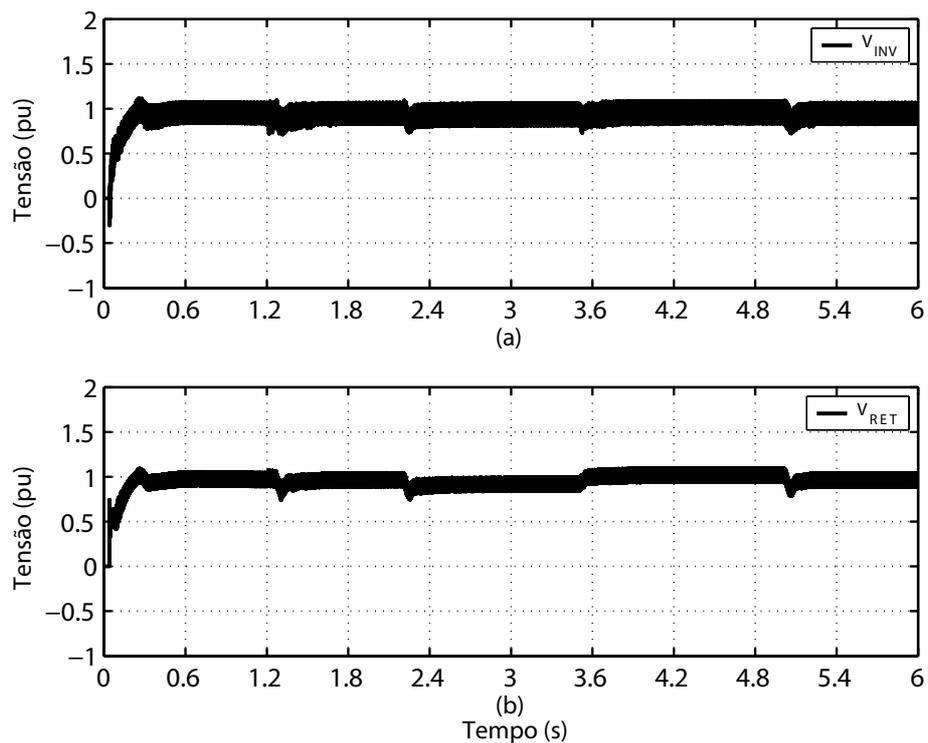


Figura 4.34: (a) e (b) Tensões nas estações retificadora e inversora com o Tap em operação.

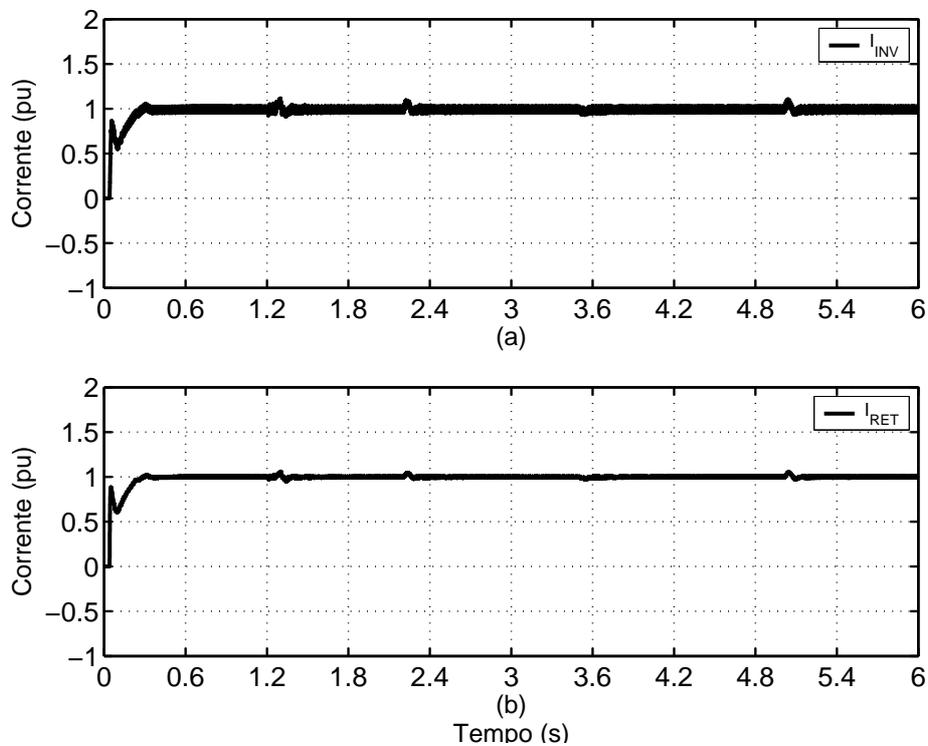


Figura 4.35: (a) e (b) Correntes nas estações retificadora e inversora com o Tap em operação.

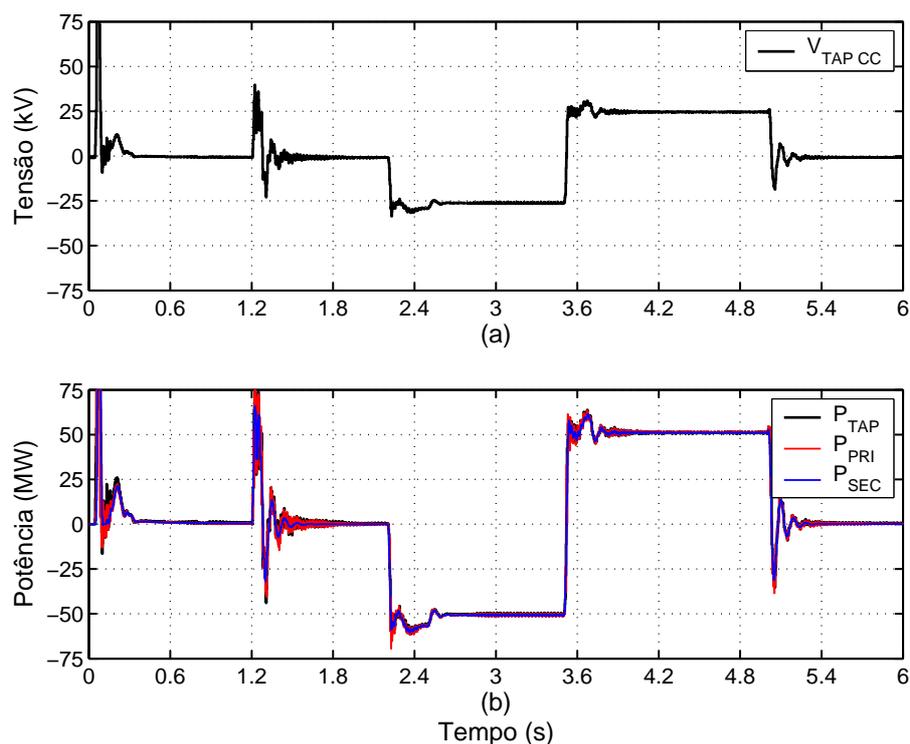


Figura 4.36: (a) e (b) Potências no elo CC e nos enrolamentos do transformador com o Tap em operação.

Os resultados apresentados anteriormente mostram que em ambos os cenários analisados - no sistema simplificado e no completo - o Tap conseguiu realizar o intercâmbio de energia entre a rede CA e o HVDC, possibilitando dessa forma o acesso de pequenos geradores locais ou consumidores isolados à linha HVDC.

4.7 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram apresentados a modelagem dos conversores que compõem o Tap HVDC e a análise dos resultados obtidos em simulações, sendo divididos em duas situações distintas. No primeiro caso, o equipamento teve seus terminais conectados a um modelo simplificado de HVDC e no segundo, foi analisada a performance do equipamento frente a um modelo completo de HVDC.

Em ambos os casos, foi mostrada a eficiência do Tap quanto ao dreno e injeção de energia em linhas CC e que, a inserção do equipamento ao sistema HVDC não influenciou de forma significativa a operação do mesmo.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Nesse capítulo são apresentadas e comentadas as principais conclusões obtidas com esse estudo. São sugeridas também algumas propostas para a continuidade deste trabalho.

5.1 Conclusões e Apontamentos Finais

Face aos novos empreendimentos de expansão no setor elétrico, os sistemas HVDC tendem a ter uma papel cada vez mais importante no cenário mundial. No entanto, a extração ou injeção de blocos de energia em pontos intermediários das linhas de corrente contínua constituem-se em um problema bastante complexo, pois envolvem soluções de alto custo que, em geral, comprometem o sistema principal.

Esse trabalho teve como objetivo a modelagem e a simulação digital de uma derivação em linhas HVDC, permitindo a conexão tanto de consumidores quanto de geradores ao sistema principal, de forma a realizar intercâmbio de energia entre os mesmos.

Como a potência envolvida é muito pequena em relação à transmitida, a configuração utilizada foi a do tipo série. Conectado ao HVDC tem-se um inversor monofásico do tipo fonte de corrente e em paralelo com este, o primário do transformador (L_{11}). No secundário do transformador, conecta-se um conversor monofásico-trifásico e na saída do mesmo, um conjunto gerador + cargas.

A análise apresentada no capítulo 4 mostrou a performance do equipamento no que tange à injeção ou dreno de potência ao longo do HVDC. Em um primeiro momento, o Tap HVDC teve seus terminais conectados a uma fonte de corrente e ao potencial de terra, sendo utilizados dois tipos de transformadores. Em seguida, o equipamento foi inserido a um elo CC de um sistema HVDC completo - o Cigré HVDC Benchmark.

Os itens listados a seguir incluem as principais conclusões obtidas com a finalização desse estudo:

- i. Verificou-se a existência de componentes de alta frequência superpostas à tensão do capacitor da Ponte-H.
- ii. Não se observou a interferência do acionamento dos conversores no sinal de sincronismo gerado pelo PLL e as oscilações presentes no sinal ω são relativas ao chaveamento dos conversores, da geração local e da carga.
- iii. Ao se utilizar um transformador com núcleo de ferro, onde a corrente de magne-

tização é desprezível, as correntes nos enrolamentos do mesmo possuem fases idênticas. Quando usado um transformador com núcleo de ar, com elevada corrente de magnetização, percebe-se uma diferença nas amplitudes e uma defasagem nas mesmas.

- iv. A tensão no barramento contínuo existente entre os conversores (monofásico e trifásico) mantém-se regulada no valor pré-estabelecido, apresentando uma oscilação de aproximadamente 1,25% em relação à tensão base.
- v. As correntes geradas pelo conversor trifásico acompanham de forma satisfatória as correntes sintetizadas pelo controle. A filtragem das componentes harmônicas geradas pelo chaveamento PWM é conseguida através de um banco de filtros RLC.
- vi. A injeção ou dreno de potência ao longo do HVDC está relacionada com a defasagem entre a tensão sobre o capacitor da Ponte-H e a corrente no secundário do transformador. Com uma defasagem de 180° entre as mesmas, o Tap está injetando energia do lado CA para o HVDC. Em contrapartida, quando não houver defasagem, o Tap estará drenando energia visando o abastecimento da carga.
- vii. A conexão do equipamento a um sistema HVDC completo não influenciou de forma significativa a operação do mesmo, comprovando os resultados obtidos com o modelo simplificado.
- viii. A configuração *back-to-back* do Tap permite que o mesmo opere conforme um HVDC *Light*, interligando as estações conversoras por meio de linhas de transmissão ou por cabos.

5.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho surgiram temas que não foram suficientemente esclarecidos, dada a abrangência dos mesmos. Nos itens seguintes, alguns desses temas são comentados sucintamente com a intenção de interessar ao leitor continuar a desenvolvê-los:

- i. Investigar estruturas de controle que garantam chaveamentos com zero de tensão e zero de corrente na Ponte-H (ZVS e ZCS, respectivamente), verificando a possibilidade de *soft-switching* sob altas frequências de chaveamento, considerando-se os elevados níveis de tensão e corrente aos quais a Ponte-H é submetida.
- ii. Modelar de forma mais elaborada os conversores, ajustando os mesmos aos atuais níveis de tensão e corrente. As limitações de tensão e corrente nas chaves controláveis podem ser contornadas pela associação série e paralelo de componentes. No entanto, essa alternativa não melhora o desempenho dos conversores no tocante à frequência máxima de operação, devido a limitações tecnológicas das chaves.
- iii. Estudar os custos de cada tipo de transformador de forma a obter subsídios para se definir a melhor solução técnica e econômica a ser adotada, haja vista os fatores limitantes intrínsecos na utilização dos mesmos.
- iv. Levantar a resposta em frequência da linha CC substituindo o Tap HVDC por uma resistência positiva ou negativa, nos casos de dreno e injeção de energia;
- v. Analisar a conexão de vários equipamentos ao longo da linha HVDC, de forma a se estimar o número máximo de conversores a serem conectados e a distância entre os mesmos.
- vi. Construir um protótipo em escala reduzida do equipamento, de forma a se implementar as estratégias de controle aqui apresentadas e identificar problemas que não foram previstos em estudos anteriores.
- vii. Levantamento do custo total do equipamento, de forma que o mesmo possa ser comparado com outras formas de suprimento de energia às áreas circunvizinhas às linhas HVDC.

Referências Bibliográficas

- [1] J. Graham, G. Biledt, J. Johansson, *Interligação de Sistemas Elétricos através de Elos HVDC*, IX SEPOPE, Rio de Janeiro - RJ, Maio de 2004.
- [2] V.K. Sood, *HVDC and FACTS Controllers - Applications of Static Converters in Power Systems*, Kluwer Power Electronics and Power Systems Series, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [3] E.W. Kimbark, *Direct Current Transmission*, Wiley-Interscience, New York, 1971.
- [4] A.M. de França, J.I.S. Filho et. al., *Análise e Medição dos Efeitos devido ao Corona, ao Campos e aos Íons da Linha de Furnas em Corrente Contínua*, XIV SNPTEE, Belém - PA, 1997.
- [5] P.C.M. Domingues, *A Interconexão Elétrica dos Sistemas Isolados da Amazônia ao Sistema Interligado Nacional*, Dissertação de Mestrado (UFSC), Florianópolis - SC, 2003.
- [6] W. Komatsu, *Conversores Auto-Comutados Aplicados em Derivações de Sistemas de Transmissão de Corrente Contínua e Alta Tensão*, Tese de Doutorado (USP), São Paulo - SP, 1998.
- [7] J.P. Bowles, H.L. Nakra, A.B. Turner, *A Small Series Tap on an HVDC Line*, IEEE Transactions on Power Applications and Systems, vol. PAS-100, n°. 2, pp. 857-862, February 1981.
- [8] M.P. Muniz, *Algumas Aplicações de Conversores com Comutação Forçada em Sistemas de Potência*, Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro - RJ, 1991.

- [9] M.P. Bahrman, M.H. Baker et. al., *Integration of Small Taps into HVDC Links*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, n°. 3, pp. 1699-1706, July 1995.
- [10] M.R. Aghaebrahimi, R.W. Menzies, *Small Power Tapping from HVDC Transmission Systems: A Novel Approach*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, n°. 4, pp. 1698-1703, October 1997.
- [11] M.R. Aghaebrahimi, R.W. Menzies, *A customized Air-core Transformer for a Small Power Tapping Station*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, n°. 4, pp. 1265-1270, October 1998.
- [12] A.F.C. Aquino, *Alimentação de Pequenas Cargas a partir de um Sistema de Transmissão em Corrente Contínua*, Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro - RJ, Setembro de 2000.
- [13] F.C. Machado, *Otimização de um Tap HVDC*, Projeto de Fim de Curso (DEE/UFRJ), Rio de Janeiro - RJ, Janeiro de 2003.
- [14] M. Aredes, C. Portela, F.C. Machado, *A 25 MW Soft-Switching HVDC Tap for ± 500 kV Transmission Lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1835-1842, October 2004.
- [15] L. Chetty, N.M. Ijumba, A.C. Britten, *Parallel-Cascaded Tapping Station*, Power System Technology, POWERCON 2004, pp. 1874-1879, November 2004.
- [16] M. Aredes, C. Portela, E.H. Watanabe, *HVDC Tapping Using Soft-Switching Techniques*, Electrical Engineering, Archiv für Elektrotechnik, vol. 83, 2000.
- [17] M. Aredes, C. Portela, A.F.C. Aquino, C.A.O. Peixoto, *A 500 kV Soft-switching HVDC Tap*, 39th Session of the CIGRÉ, Paris, França, August de 2002.
- [18] A.F.C. Aquino, M. Aredes, C. Portela, E.H. Watanabe, *Um Tap HVDC de Chaveamento Suave*, X ERLAC - IX Encontro Regional Latino-Americano da Cigré, pp. 1-6, Foz do Iguaçu, Brasil, Maio de 2001.
- [19] A.F.C. Aquino, M. Aredes, *Análise de um Novo Tap HVDC de Chaveamento Suave*, XIII Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis - SC, 2000.
- [20] M.H. Rashid, *Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações*, Makron Books, São Paulo, 1999.

- [21] P.D. Garcia, *Uma Visão sobre Energia Fotovoltaica*, Apostila sobre Energia Fotovoltaica (DEELT-UFMG), Belo Horizonte - MG, Novembro de 1995.
- [22] N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, *Power Electronics: converters, applications and design*, John Wiley & Sons, New York, 2nd edition, 1995.
- [23] S. Bittencourt, K. Eriksson, G. Bileedt, “*HVDC LIGHT*” para Transmissão de Energia Elétrica num Mercado Desregulamentado, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu - PR, Outubro de 1999.
- [24] L. Weimers, *HVDC Light: A New Technology for a Better Environment*, IEEE Power Engineering Review, August 1998.
- [25] T.M.L. Assis, R.S.S. Imbuzeiro, M. Aredes, *Aplicação Eficiente de um Conversor Fonte de Corrente*, XIII Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis-SC, Setembro de 2000.
- [26] M. Aredes, *Active Power Line Conditioners*, Tese de Doutorado, Technische Universität, Berlin, 1996.
- [27] D.R. Costa Jr., L.G.B Rolim, M. Aredes, *Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing Circuit – PLL Circuit*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Rio de Janeiro - RJ, 2003.
- [28] U. Miranda et al., *Implementação em DSP de um Conversor Monofásico-Trifásico (MONOTRI) para a Eletrificação Rural*, XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado - RS, 2004.
- [29] L.H.S.C. Barreto et al., *The Bang-Bang Hysteresis Current Waveshaping Control Technique Used to Implement a High Power Factor Power Supply*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19 , n°. 1 - January 2004.
- [30] U. Miranda, M. Aredes, L.G.B. Rolim, *A DQ Synchronous Reference Frame Control for Single-Phase Converters*, PESC - 36th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Recife - PE, June 2005.
- [31] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, *Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits*, International Power Electronics Conference, Tokyo, pp. 1375-1386, 1983.

- [32] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, *Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components*, *IEEE Transactions on Industrial and General Applications*, vol. IA-20, n.º. 3, pp. 625-630, 1984.
- [33] E.H. Watanabe, R.M. Stephan, M. Aredes, *New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, n.º. 2, pp. 697-703, April 1993.
- [34] E. Clarke, *Circuit Analysis of A-C Power Systems*, General Electric Co., 2 vols., Schenectady, New York, 1950.
- [35] M. Szechtman, T. Wess, C.V. Thio, *A Benchmark Model for HVDC System Studies*, International Conference on AC and DC Power Transmission, pp. 374-378, April 1991.
- [36] M.O. Faruque, Y. Zhang, V. Dinavahi, *Detailed Modeling of Cigré HVDC Benchmark System Using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, n.º. 1, January 2006.
- [37] C.F.T. Soares, *Filtro Ativo de Potência com Controle Digital para a Compensação das Potências Reativa e Harmônica*, Projeto de Fim de Curso (DEL/UFRJ), Rio de Janeiro - RJ, Março de 2004.
- [38] E.H. Watanabe, M. Aredes, *Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS*, XII Conferência de Controle e Automação, Uberlândia - MG, Setembro de 1998.

Apêndice A

Modulação por Largura de Pulso Senoidal

O SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) é a técnica do tipo PWM mais utilizada no controle de inversores em aplicações industriais. Ao invés de manter a largura de todos os pulsos constante, como no caso da modulação de pulsos múltiplos, a largura de cada pulso é variada em proporção à amplitude de uma onda senoidal, analisada no centro de cada pulso [22].

Os sinais de comando para o controle das chaves é feito a partir da comparação de um sinal de referência senoidal com uma onda portadora triangular. A frequência do sinal de referência determina a frequência de saída do inversor e sua amplitude máxima controla o índice de modulação, que por sua vez, controla a tensão eficaz de saída. O número de pulsos por semiciclo depende da frequência da portadora. Os mesmos sinais de comando podem ser gerados usando uma portadora triangular unidirecional.

Na Fig. A.1 são apresentados o sinal de controle com amplitude $v_{control}$ e frequência f_1 e a portadora triangular, com amplitude v_{tri} e frequência f_s , respectivamente.

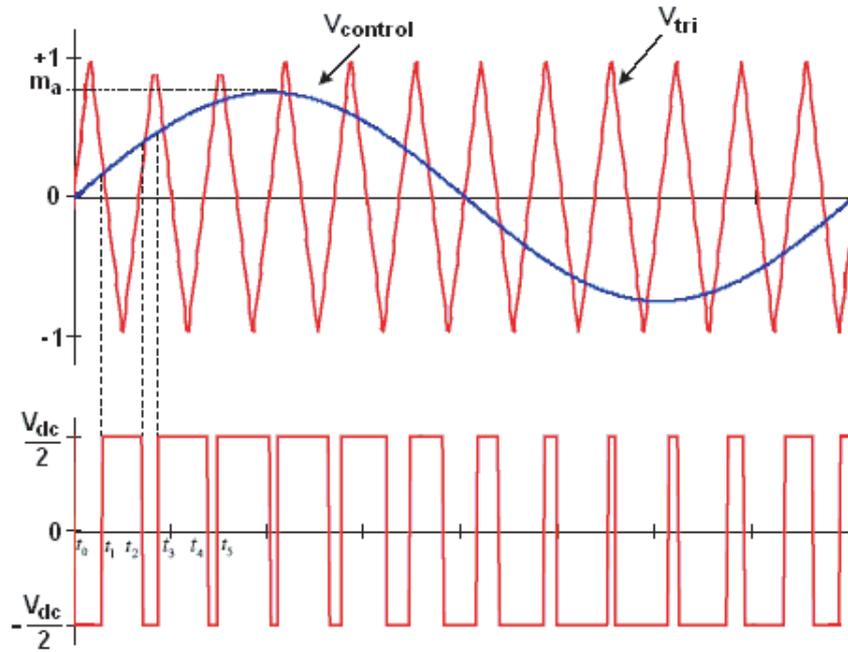


Figura A.1: Chaveamento SPWM.

Baseadas nesses dois sinais são definidas duas constantes que caracterizam a modulação PWM: a relação de modulação de amplitude (m_a) e a relação de modulação de frequência (m_f) dadas por:

$$m_a = \frac{v_{control}}{v_{tri}} , \quad (A.1)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} . \quad (A.2)$$

A lógica de disparo das chaves referente a fase A de um inversor genérico (vide Fig. A.2) é expressa por:

$$\begin{cases} v_{control} \geq v_{tri} \Rightarrow S_{A+} \text{ fechada e } S_{A-} \text{ aberta} \\ v_{control} < v_{tri} \Rightarrow S_{A+} \text{ aberta e } S_{A-} \text{ fechada} \end{cases}$$

Esta lógica garante que as duas chaves do mesmo ramo nunca estejam abertas simultaneamente, fazendo com que o valor instantâneo da tensão de saída varie entre $1/2 V_{DC}$ e $-1/2 V_{DC}$.

O controle das duas fases restantes é idêntico ao apresentado. Os sinais de controle ($v_{control A}$, $v_{control B}$ e $v_{control C}$) são senóides defasadas entre si de 120° e são comparados com a mesma portadora triangular.

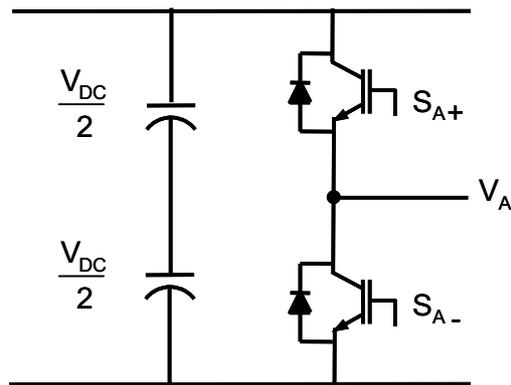


Figura A.2: Inversor genérico PWM.

O espectro da tensão na saída de um inversor PWM contém harmônicos próximos aos múltiplos da frequência de chaveamento (vide Fig. A.3). Um filtro passa-baixas com frequência de corte um pouco acima da frequência da referência é perfeitamente capaz de produzir uma atenuação bastante efetiva nesses componentes na faixa dos quilohertz.

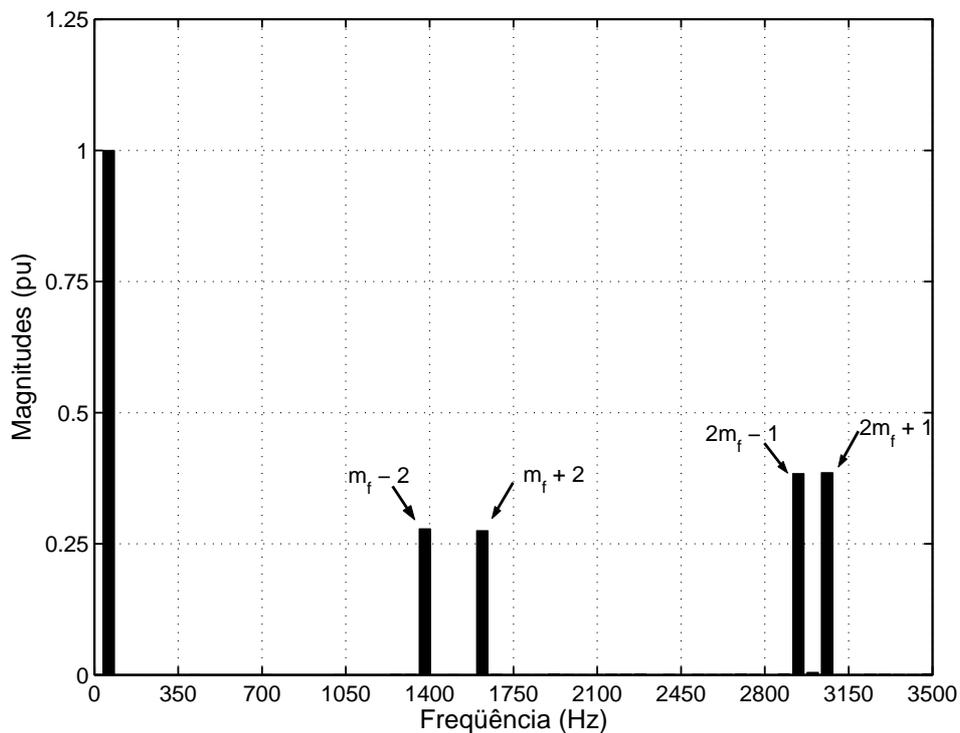


Figura A.3: Espectro harmônico na saída de um inversor com chaveamento SPWM.

Apêndice B

Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas

Nos últimos anos, os conversores estáticos de potência têm sido largamente utilizados nas indústrias em acionamento de motores elétricos de velocidade variável, retificadores de potência e outras aplicações onde haja a necessidade de se fazer conversões do tipo CC-CA, CA-CC e CC-CC. Além disso, houve um crescente aumento no uso de aparelhos eletrônicos que são cargas extremamente não-lineares. A operação dessas cargas resulta no aparecimento de harmônicos na corrente, que causam problemas cada vez mais perceptíveis e incômodos no sistema elétrico [37].

No intuito de minimizar o problema da poluição harmônica foram desenvolvidas técnicas baseadas na utilização de filtros passivos sintonizados nas frequências harmônicas e conectados em paralelo com a fonte de harmônicos. Os trabalhos apresentados por Akagi et al. contém grandes contribuições às áreas de cálculo de potências instantâneas e filtragem ativa, sobretudo sem a necessidade de elementos armazenadores de energia [31, 32].

A teoria original ficou conhecida como Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas - Teoria p-q. A princípio, essa teoria foi desenvolvida para sistemas trifásicos a três fios, mas já trazia desde sua primeira publicação uma menção a sistemas com quatro fios (neutro).

A Teoria p-q faz uso de uma transformação linear de um sistema de referência estacionário de coordenadas abc para um sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$, também estacionário. A transformação que faz a conversão do sistema de coordenadas abc para o sistema $\alpha\beta 0$ é dada por (B.1). Entretanto, existe uma outra versão desta matriz, utilizada quando se pretende trabalhar com potências constantes (vide B.2).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (\text{B.1})$$

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (\text{B.2})$$

As potências requeridas pelo sistema neste novo sistema de coordenadas (potências instantâneas de seqüência zero, real e imaginária) são expressas por:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (\text{B.3})$$

O valor instantâneo da potência ativa trifásica pode ser reescrito em termos de coordenadas $\alpha\beta 0$ conforme apresentado em (B.4). A potência imaginária q para coordenadas $\alpha\beta 0$ e grandezas de fase é representada pela expressão (B.5).

$$p_{3\phi} = p + p_0 = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0. \quad (\text{B.4})$$

$$q_{3\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_a - v_b)i_c + (v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b] = -v_\alpha i_\beta + v_\beta i_\alpha. \quad (\text{B.5})$$

Por meio de filtros passa-baixas e passa-altas é possível extrair, respectivamente, as componentes média e oscilantes. As correntes de compensação em função das componentes de potência instantâneas medidas da carga são expressas por:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix}. \quad (\text{B.6})$$

Enquanto que as correntes em termos de grandezas de fase são dadas por:

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}. \quad (\text{B.7})$$

B.1 Significado Físico das Potências Relacionadas à Teoria p-q

Em situações em que o sistema apresenta tensões e correntes senoidais e balanceadas, a teoria de potência ativa e reativa convencional proporciona resultados coerentes. No entanto, quando o sistema apresenta tensões e/ou correntes distorcidas e/ou desequilibradas surgem incoerências nos resultados.

Ao contrário da teoria convencional, a Teoria p-q apresenta resultados satisfatórios tanto em sistemas em que as tensões e correntes sejam senoidais e balanceadas, quanto naqueles em que as tensões e correntes estejam desbalanceadas e/ou distorcidas. Pode-se dizer que a teoria convencional é um caso particular da Teoria p-q, não havendo nenhuma contradição entre ambas. Sendo assim, faz-se necessário descrever o significado físico das potências e seus termos [38]. No caso de imperfeições em nível de desequilíbrio e/ou distorções nas tensões e/ou correntes, as potências instantâneas real, imaginária e de seqüência zero irão apresentar componentes relacionados a valores médios e oscilantes, conforme apresentado na Fig. B.1.

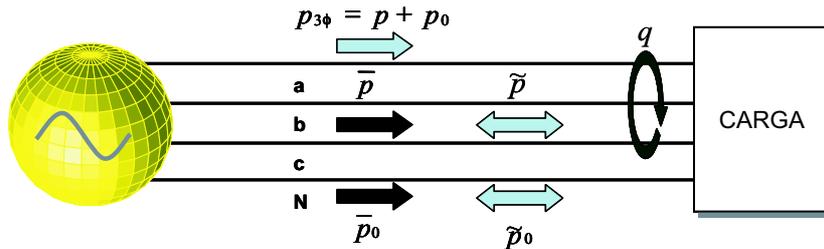


Figura B.1: Potências definidas na Teoria p-q.

A tarefa de separar os componentes médios e oscilantes das potências instantâneas é feita através do emprego de filtros passa-baixas ou passa-altas, respectivamente. Assim, têm-se:

$$\begin{cases} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ p_0 &= \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

A potência imaginária instantânea (q) corresponde a energia que circula entre as fases do sistema trifásico, sem que haja qualquer transferência de energia entre a fonte e a carga.

As componentes de seqüência zero das tensões e correntes não contribuem para as potências instantâneas p e q .

O fluxo instantâneo total de energia por unidade de tempo, ou seja, a potência ativa trifásica instantânea é sempre igual a soma das potências real e de seqüência zero ($p_{3\phi} = p + p_0$).

As componentes \bar{p} e \tilde{p} correspondem aos valores médio e oscilante associados à potência real instantânea p , onde \bar{p} representa o fluxo de energia por unidade de tempo para a carga e \tilde{p} representa o fluxo de energia por unidade de tempo oscilante entre a carga e fonte.

As componentes \bar{q} e \tilde{q} correspondem aos valores médio e oscilante associados a potência instantânea imaginária q .

As componentes \bar{p}_0 e \tilde{p}_0 correspondem aos valores médio e oscilante associados à potência instantânea de seqüência zero, onde \bar{p}_0 corresponde ao fluxo médio de energia por unidade de tempo da fonte para a carga, capaz de realizar trabalho, por intermédio das componentes de seqüência zero presentes simultaneamente nas tensões e correntes. A segunda parcela significa um fluxo longitudinal de energia entre fonte e carga, contudo, oscilante e por isso não realiza trabalho.

O surgimento das potências oscilantes \tilde{p} e \tilde{q} está diretamente relacionado com a existência de formas de ondas de tensões e/ou correntes genéricas (com harmônicos e/ou desequilíbrios). Um outro aspecto importante é o fato da potência instantânea

de seqüência zero ($p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0$), não pode ter as suas partes média e oscilantes desacopladas.