



ANÁLISE DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO VSC HVDC SUBMARINO
PARA ALIMENTAÇÃO DE UNIDADES DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO
OFFSHORE

Thaís Brandão Ribeiro de Almeida

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Rio de Janeiro

Agosto de 2011

ANÁLISE DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO VSC HVDC SUBMARINO
PARA ALIMENTAÇÃO DE UNIDADES DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO
OFFSHORE

Thaís Brandão Ribeiro de Almeida

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

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

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2011

Almeida, Thaís Brandão Ribeiro de

Análise de um Sistema De Transmissão VSC HVDC Submarino para Alimentação de Unidades de Produção de Petróleo Offshore / Thaís Brandão Ribeiro de Almeida – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XIII, 91 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 80-81.

1. HVDC VSC. 2. Cabos HVDC submarinos. 3. Alimentação cargas offshore. I. Ferreira, Antônio Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu grande companheiro Ricardo Cerbino Salles, que está sempre ao meu lado apoiando nos momentos difíceis e comemorando as vitórias.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter trilhado meu caminho ao meu lado, me dando forças e alegrias para seguir adiante nos momentos fáceis e complicados.

Ao meu orientador Antônio Carlos Ferreira por todo acompanhamento e apoio na direção nesse trabalho.

À Ricardo Cerbino pelo companheirismo e dedicação durante todo o período desse trabalho. Pelas incansáveis noites de estudo e discussões, que foram de grande valia para o andamento e conclusão dessa dissertação.

Aos meus pais pelo apoio constante, especialmente meu pai Josias Almeida pelos grandes conselhos em não abrir mão de meus sonhos.

À empresa Chemtech por ter me dado a oportunidade de cursar o mestrado e ter me incentivado a levá-lo até o final.

Agradeço ainda a todos que direta ou indiretamente compartilharam dessa jornada comigo, com palavras de incentivos e ajudas pontuais.

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

ANÁLISE DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO VSC HVDC SUBMARINO
PARA ALIMENTAÇÃO DE UNIDADES DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO
OFFSHORE

Thaís Brandão Ribeiro de Almeida

Agosto/2011

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho analisa um sistema de transmissão de energia submarino em alta tensão utilizando corrente contínua através de conversores fonte de tensão (VSC HVDC submarino), para alimentação de unidades de produção de petróleo localizadas a mais de 2000 quilômetros de distância da costa marítima.

Para avaliar a viabilidade dessa solução, cabos específicos foram dimensionados e diversas perturbações foram simuladas no sistema proposto. Além das vantagens conhecidas de um sistema VSC HVDC, o resultado das análises feitas nesse trabalho indica um sistema eficiente e com resposta rápida a perturbações, o que o torna tecnicamente viável para uma futura aplicação desta solução.

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

POWER SUPPLY SYSTEM ANALYSIS FOR OFFSHORE PLATFORMS BASED
ON SUBSEA VSC HVDC

Thaís Brandão Ribeiro de Almeida

August/2011

Advisor: Antônio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

This work analyzes a submarine high voltage direct current power transmission using voltage source converters (subsea VSC HVDC), to supply oil production installation units located more than 2000 km away from the coast.

To assess the feasibility of this solution, specific cables were sized and various disturbances were simulated in the proposed system. Besides all known advantages of using VSC HVDC, the result of the analysis in this work indicates efficient and fast responses to disturbances, which makes it technically feasible for future implementation of this solution.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Motivação	1
1.2.	Objetivo do Trabalho	2
1.3.	Aplicações do VSC HVDC submarino no mundo.....	3
1.4.	Organização da Dissertação.....	13
2.	HVDC CONTROLADO POR FONTE DE TENSÃO (VSC HVDC).....	14
2.1.	Introdução	14
2.2.	Componentes de um Sistema VSC HVDC.....	14
2.3.	Operação do VSC HVDC	18
2.4.	Controle do VSC.....	26
2.5.	Vantagens e desvantagens do VSC HVDC	28
2.6.	Caso Base de Estudo do Trabalho	29
3.	CABOS HVDC SUBMARINOS	32
3.1.	Introdução	32
3.2.	Características dos Cabos	32
3.3.	Parâmetros Elétricos	35
3.4.	Crítérios de dimensionamento do Cabo.....	37
3.5.	Cabo dimensionado para o sistema simulado.....	43
4.	TRANSMISSÃO VSC HVDC SUBMARINA PARA ALIMENTAÇÃO DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO	44
4.1.	Introdução	44
4.2.	Caso base do sistema modelado.....	44
4.3.	Funcionamento do sistema em regime permanente.....	59
4.4.	Análise de Perturbações no Sistema	65
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
5.1.	Conclusões	77
5.2.	Trabalhos Futuros	78
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
	ANEXO 1 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM CONDUTOR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	82
	ANEXO 2 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - East West Interconnector	4
Figura 2 - Interligação BorWin e planta eólica	5
Figura 3 - Interligação Estlink e Estlink 2 (planejado).....	6
Figura 4 - Interligação Troll A	7
Figura 5 - Plataforma Troll A.....	8
Figura 6 - Interligação Trans Bay.....	9
Figura 7 - Interligação BorWin2	10
Figura 8 – Planta eólica de BorWin2	11
Figura 9 – Localização da planta eólica SylWin1	12
Figura 10 – Esquema de interligação SylWin1	12
Figura 11 - Componentes de um sistema VSC HVDC	15
Figura 12 - Controle da potência ativa	19
Figura 13 - Controle da potência reativa	20
Figura 14 - Inversor trifásico - U_{conv} em função de m_a	23
Figura 15 - Conversor VSC trifásico de 2 níveis e 6 pulsos	23
Figura 16 - Tensões do VSC para operação com ondas quadradas.....	24
Figura 17 - Circuito equivalente do VSC	25
Figura 18 - Sistema HVDC submarino simulado.....	29
Figura 19 - Cabo HVDC submarino para grandes profundidades.....	33
Figura 20 - Distâncias e Temperaturas para dimensionamento do Cabo	38
Figura 21 - Comportamento da corrente em função da variação da temperatura.....	39
Figura 22 - Quedas de tensões admissíveis em cada trecho do cabo	42
Figura 23 - Formação do cabo HVDC submarino.....	43
Figura 24 - Sistema HVDC submarino simulado no Matlab	45
Figura 25 - Sistema CA de entrada.....	45
Figura 26 - Estação retificadora.....	46
Figura 27 - Sistema de controle.....	48
Figura 28 - Controlador da estação retificadora	49
Figura 29 - Cabo submarino modelado em três trechos	49
Figura 30 - Estação inversora	50
Figura 31 - Sistema de controle.....	50
Figura 32 - Controlador da estação inversora.....	51
Figura 33 - Cargas do sistema simulado.....	52
Figura 34 - Filtro CA para harmônicos gerados pelo PWM.....	54
Figura 35 - Forma de onda da tensão e espectro de harmônicos – tensão não filtrada ..	55
Figura 36 - Forma de onda da tensão e espectro de harmônicos – tensão filtrada	56
Figura 37 - Controle de Tensão CC.....	58
Figura 38 - Controle de Tensão CA	59
Figura 39 - Medições na Estação Retificadora.....	61
Figura 40 - Medições na Estação Retificadora – intervalo de 2 a 2,5 segundos	62
Figura 41 - Medições na Estação Inversora	63
Figura 42 - Medições na Estação Inversora – intervalo de 2 a 2,5 segundos.....	64
Figura 43 - Medições na Estação Retificadora.....	66
Figura 44 - Medições na Estação Inversora	67
Figura 45 - Medições na Estação Retificadora.....	69
Figura 46 - Medições na Estação Inversora	70
Figura 47 - Medições na Estação Retificadora.....	72
Figura 48 - Medições na Estação Inversora	73

Figura 49 - Medições na Estação Retificadora.....	75
Figura 50 - Medições na Estação Inversora	76
Figura 51 - Variação da resistência em função da temperatura.....	82
Figura 52 - Parâmetros – fonte de tensão trifásica	84
Figura 53 - Parâmetros – Indutor da fonte de tensão.....	85
Figura 54 - Parâmetros – circuito RL da fonte de tensão	85
Figura 55 - Parâmetros – Transformador abaixador.....	86
Figura 56 - Parâmetros – Reator de alisamento.....	86
Figura 57 - Parâmetros – Ponte trifásica de três níveis	87
Figura 58 - Parâmetros – Capacitor CC.....	87
Figura 59 - Parâmetros – Filtro CC – 3º harmônico.....	88
Figura 60 - Parâmetros – Reator de Alisamento CC	89
Figura 61 - Parâmetros – Transformador da estação inversora	89
Figura 62 - Parâmetros – Carga modelada de 100MW	90
Figura 63 - Parâmetros – Controlador PI.....	90
Figura 64 - Parâmetros – Controlador PI.....	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados principais - East West Interconnector	4
Tabela 2 - Dados principais – BorWin1	5
Tabela 3 - Dados principais – Estlink.....	6
Tabela 4 - Dados principais – Troll A	8
Tabela 5 - Dados principais – Trans Bay	9
Tabela 6 - Dados principais – BorWin2	11
Tabela 7 - Dados principais – SylWin1	13
Tabela 8- Características dos Cabos HVDC submarinos	36
Tabela 9 - Ajustes da capacidade de corrente para diferentes temperaturas	40
Tabela 10 - Valores das resistências para temperatura de 70°C.....	41
Tabela 11 - Resistividade a 20°C	83

LISTA DE VARIÁVEIS

U_L	Tensão eficaz do sistema de potência
I_{conv}	Corrente eficaz que flui no sistema
P_{conv}	Potência ativa que é injetada nos terminais do VSC
X	Impedância total do sistema CA
U_{conv}	Tensão eficaz de entrada do VSC
I_d	Corrente CC no elo de transmissão
U_d	Tensão CC nos terminais do VSC
R_d	Resistência do elo de transmissão
P_{conv}	Potência reativa que é injetada no VSC
θ_L	Ângulo da tensão U_L
θ_{conv}	Ângulo da tensão U_{conv}
k_λ	Fator de relação de tensão
m_a	Índice de modulação de amplitude para modulação PMW
U_{conv_mono}	tensão monofásica de entrada do VSC
U_{L_mono}	Tensão monofásica do sistema CA
P_{cc}	potência nominal do elo
T	Temperatura
U_{B1_meas}	Valor eficaz da tensão em corrente alternada na Barra 1
$Pativa_B1$	Potência ativa na Barra 1 (estação retificadora)
$Preativa_B1$	Potência reativa na Barra 1 (estação retificadora)
$Uabc_B1$	Tensão CA trifásica na Barra 1
$Iabc_B1$	corrente trifásica na Barra 1
Vdc_PN	Tensão do elo de corrente contínua positiva e negativa
U_{B2_meas}	Valor eficaz da tensão em corrente alternada na Barra 2
$Pativa_B2$	Potência ativa na Barra 2 (estação inversora)
$Preativa_B2$	Potência reativa na Barra 2 (estação inversora)
$Uabc_B2$	Tensão CA trifásica na Barra 2
$Iabc_B2$	Corrente trifásica na Barra 2

LISTA DE ABREVIATURAS

AC – Alternating Current;

CA – Corrente Alternada;

CC – Corrente Contínua;

CA – Direct Current;

FACTS – Flexible AC Transmission Systems;

HVAC – High Voltage Alternating Current;

HVDC – High Voltage Direct Current;

IEC – International Electrotechnical Commission;

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers;

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor;

PLL – Phase Locked Loop;

PWM – Pulse Width Modulation;

VSC – Voltage Source Converter;

VSD – Variable Speed Drive;

VSC-HVDC – Voltage Source Converter High Voltage Direct Current.

THD – Total Harmonic Distortion

PI – Controlador Proporcional-Integral

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Com a descoberta de novos poços de petróleo a distâncias maiores do que 100 km da costa marítima, diversas linhas de pesquisa se tornaram necessárias para viabilizar a melhor solução prática e econômica para o suprimento de energia às plataformas localizadas no pré-sal brasileiro.

Ainda hoje é um desafio tecnológico no Brasil a aplicação de elos de corrente contínua para transmissão de energia a grandes distâncias, principalmente em termos de aplicações dos conversores controlados por tensão. Tem-se no Brasil muito bem estudado e aplicado o sistema HVDC convencional, mas ainda não tem-se aplicações em grande escala do VSC HVDC, ou transmissão em alta tensão com corrente contínua utilizando conversor fonte de tensão.

Esse tipo de tecnologia vem sendo largamente aplicado ao redor do mundo para sistemas de transmissão [1] a [5] e existem ainda algumas aplicações para alimentação de cargas offshore [6], e devido as suas características de possuir controles mais rápidos e ter dimensões menores, tem sido o sistema preferido para novas aplicações.

Assim, unindo o cenário apresentado, com a tecnologia mais utilizada para aplicações de transmissões de grandes distâncias, este trabalho foi concebido e focado em explorar as diversas vantagens que esta aplicação pode trazer para o mercado nacional de produção de petróleo.

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo desse trabalho é analisar o funcionamento de um sistema de transmissão submarino para alimentação de um grupo de plataformas de petróleo *offshore*.

Conforme exposto na motivação desse trabalho, com a demanda crescente de soluções e inovações tecnológicas para o pré-sal brasileiro, a área de pesquisa e desenvolvimento de novas soluções faz-se necessária, a fim de garantir um melhor desempenho na produção de petróleo e uma busca maior pela produtividade e minimização de todos os custos envolvidos nessa atividade.

Com base nessa visão, a solução a ser estudada nesse trabalho tem como objetivo principal garantir um fornecimento de energia contínuo e seguro para a operação das plataformas de petróleo que estarão a mais de 300 quilômetros de distância da terra. Com a operação desse sistema, não será necessária a instalação de geradores e seus sistemas de controle em cada plataforma, poupando espaço para ser utilizado em outras aplicações. Neste trabalho não foi feita uma análise de viabilidade econômica, pois o foco foi a análise técnica da solução.

Dito isto, o trabalho focou no funcionamento de um sistema de transmissão em corrente contínua controlado por conversores fonte de tensão, mais comumente chamado de VSC HVDC, sigla oriunda do inglês *Voltage Source Converter e High Voltage Direct Current*. Por se tratarem de siglas comumente utilizadas na literatura brasileira e estrangeira, serão frequentemente utilizadas neste trabalho.

Para analisar o funcionamento desse sistema proposto serão feitas as seguintes considerações:

- O cabo elétrico submarino deverá ser corretamente dimensionado e especificado, para uma simulação mais real do sistema proposto.

- Será analisado o comportamento do sistema para as principais perturbações que podem ocorrer: queda de tensão na geração, partida de um grande motor, curto-circuito nos terminais da carga, perda de operação de algumas plataformas.

O objetivo final é verificar se, ao aplicar todas as condições acima descritas, o sistema poderá ser considerado robusto e controlável a fim de ser uma opção de aplicação real para alimentação de cargas *offshore*.

1.3. APLICAÇÕES DO VSC HVDC SUBMARINO NO MUNDO

A aplicação de sistemas VSC HVDC no mundo é grande e vasta, variando muito a finalidade dessas soluções. Neste item serão apresentadas apenas as aplicações mais recentes de sistemas VSC HVDC para alimentação de cargas *offshore*.

1.3.1. East West Interconnector

Ainda em fase de projeto e construção, com previsão de comissionamento do sistema em 2012, a ABB está fornecendo projeto, cabos e os equipamentos de potência que vão conectar as redes da Irlanda e País de Gales. Com uma potência projetada de 500MW, esse será o primeiro projeto utilizando cabos com tensão $\pm 200\text{kV}$, numa distância de 75 quilômetros.

A Irlanda tem planos de expandir a geração de energia através de plantas eólicas e este elo permitirá a exportação da energia para o mercado do Reino Unido [1].

A interligação do sistema está apresentado na Figura 1 [2].



Figura 1 - East West Interconnector

A Tabela 1 apresenta os dados principais dessa aplicação.

Tabela 1 - Dados principais - East West Interconnector

Características	Dados
Previsão de comissionamento	2012
Potência:	500 MW
Número de circuitos:	1
Tensão CA:	400 kV
Tensão CC:	± 200 kV
Comprimento do cabo aterrado:	2 x 75 km
Comprimento do cabo submarino:	2 x 186 km
Principal razão pela escolha do sistema VSC HVDC	Comprimento dos cabos submarinos e aterrados, controlabilidade, suporte para potência ativa e reativa.

1.3.2. BorWin1

A empresa alemã E.ON Netz GmbH contratou a ABB para fornecer o projeto e equipamentos de uma interligação entre a maior planta eólica de geração de energia à rede elétrica da Alemanha.

São 400 MW de geração providos de 80 geradores elétricos de 5MW, localizados a 130km de distância da costa marítima da Alemanha.

Os geradores fornecem potência numa tensão de 36kV que é transformada para 154kV para ser entregue à estação receptora (BorWin Alpha). A estação inversora (Diele) converte a tensão em 380kV para conectar à rede elétrica alemã.

Os cabos deste sistema foram postos abaixo da terra e abaixo do mar para evitar impactos ambientais.

A interligação desse sistema e sua localização estão apresentadas na Figura 2 [3].



Figura 2 - Interligação BorWin e planta eólica

A Tabela 2 apresenta os dados principais deste sistema.

Tabela 2 - Dados principais – BorWin1

Características	Dados
Previsão de comissionamento	2011
Potência:	400 MW
Número de circuitos:	1
Tensão CA:	170 kV (Plataforma BorWin alpha), 380 kV (Diele)
Tensão CC:	± 150 kV
Comprimento do cabo aterrado:	2 x 75 km
Comprimento do cabo submarino:	2 x 125 km
Principal razão pela escolha do sistema VSC HVDC	Comprimento dos cabos submarinos e terrestres.

1.3.3. Estlink HVDC Light

Em pleno funcionamento, a Nordic Energy Link AS (composta por cinco empresas) contratou a ABB para o fornecimento da linha Estlink que atravessa o Golfo da Finlândia e conecta à subestações perto de Helsinque [4].

Esse elo permite a troca de fluxo de potência entre os países bálticos (Estônia, Letônia e Lituânia) e a rede elétrica nórdica.

Atualmente já está em fase de projeto um novo elo com capacidade de 650MW, a 170km de distância. A previsão é que este elo esteja em funcionamento em 2014.

As interligações do Estlink e do futuro Estlink 2 estão apresentadas na Figura 3 [5].



Figura 3 - Interligação Estlink e Estlink 2 (planejado)

A Tabela 3 apresenta os dados principais deste sistema.

Tabela 3 - Dados principais – Estlink

Características	Dados
Ano de comissionamento	2006
Potência:	350 MW
Número de circuitos:	1
Tensão CA:	330 kV (Estônia), 400 kV (Finlândia)
Tensão CC:	± 150 kV
Comprimento do cabo aterrado:	2 x 31 km
Comprimento do cabo submarino:	2 x 74 km
Principal razão pela escolha do sistema VSC HVDC	Comprimento do cabo aterrado, travessia de mar e utilização de um sistema assíncrono.

1.3.4. Troll A

Esta aplicação já está em funcionamento há algum tempo, e foi ilustrada nesse trabalho para mostrar uma aplicação semelhante ao que está sendo proposto: geração

em terra e transmissão para cargas em mar. Porém com dimensões significativamente menores.

Esse projeto foi um marco na história da ABB por ser o primeiro projeto no mundo para aplicação do sistema HVDC offshore para a Statoil, Noruega.

O projeto tem a particularidade de combinar a tecnologia VSC HVDC com um motor de tensão muito alta, com enrolamento de cabo. É composto de duas transmissões de 40MW cada, cuja estação inversora conecta diretamente sua saída nas ligações do motor, não necessitando de transformadores.

A interligação do projeto Troll A está apresentada na Figura 5 [6]. A plataforma de operação alimentada pelo VSC HVDC está ilustrada na Figura 5 [6].

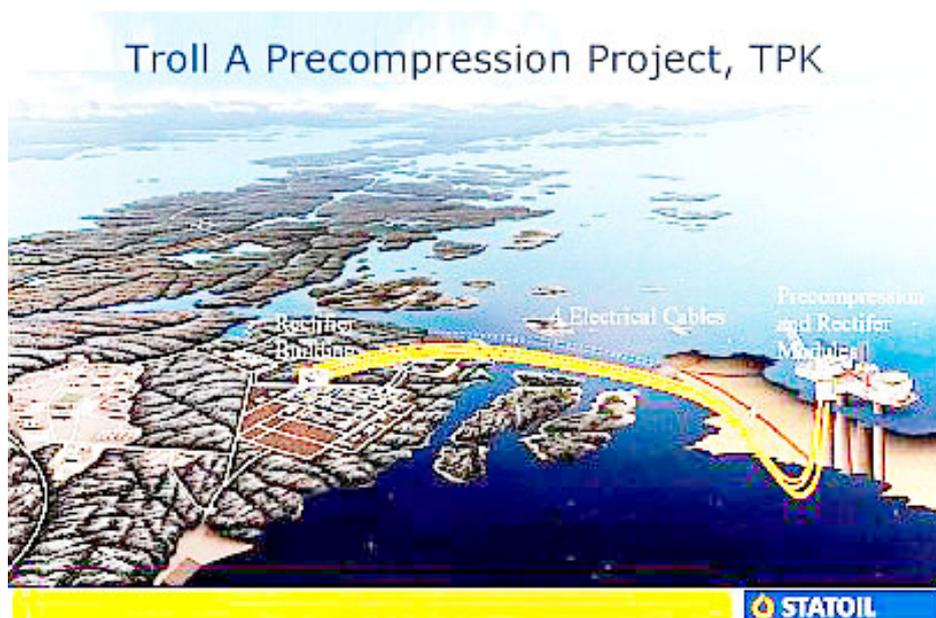


Figura 4 - Interligação Troll A



Figura 5 - Plataforma Troll A

A Tabela 4 apresenta os dados principais deste sistema.

Tabela 4 - Dados principais – Troll A

Características	Dados
Ano de comissionamento	2005
Potência:	84 MW
Número de circuitos:	2
Tensão CA:	132 kV (Kollsnes), 56 kV (Troll)
Tensão CC:	±60 kV
Comprimento do cabo submarino:	4 x 70 km
Principal razão pela escolha do sistema VSC HVDC	Ambiental, comprimento grande para cabo submarino, utilização de conversor mais compacto na plataforma.

1.3.5. Trans Bay

A SIEMENS foi contratada pela Trans Bay Cable, LCC, para fornecer um sistema de transmissão submarino HVDC a fim de interconectar a cidade de São Francisco a uma subestação perto de Pittsburg, Califórnia.

O sistema VSC HVDC da Siemens é baseado em conversores multiníveis. A interligação do projeto Trans Bay está apresentada na Figura 6 [7].



Figura 6 - Interligação Trans Bay

A Tabela 5 apresenta os dados principais deste sistema.

Tabela 5 - Dados principais – Trans Bay

Características	Dados
Ano de comissionamento	2010
Potência:	400MW
Tensão CA:	230kV 138kV
Tensão CC:	± 200 kV
Comprimento do cabo submarino:	88km

Características	Dados
Principal razão pela escolha do sistema VSC HVDC	Aumento da confiabilidade e segurança da rede através de uma melhoria e aumento da rede elétrica e redução de perdas no sistema.

1.3.6. BorWin2

Através de um consórcio entre Siemens Energy e Prysmian Powerlink, a empresa de rede de transmissão da Alemanha contratou um projeto de transmissão submarina utilizando sistema VSC HVDC para conexão das plantas eólicas (Veja Mate e Global Tech 1) à rede elétrica.

Essas plantas eólicas ficam afastadas da costa com de distância de 125km, um desafio grande para transportar aproximadamente 800MW de potência.

A estação retificadora ficará instalada em uma plataforma *offshore*, onde elevará a tensão para 300kV a fim de ser convertida para a tensão CC de operação.

A estação inversora será instalada em terra, onde converterá a tensão CC em 400kV CA para conexão a rede elétrica existente.

A interligação do projeto BorWin2 está apresentada na Figura 7 [7].



Figura 7 - Interligação BorWin2

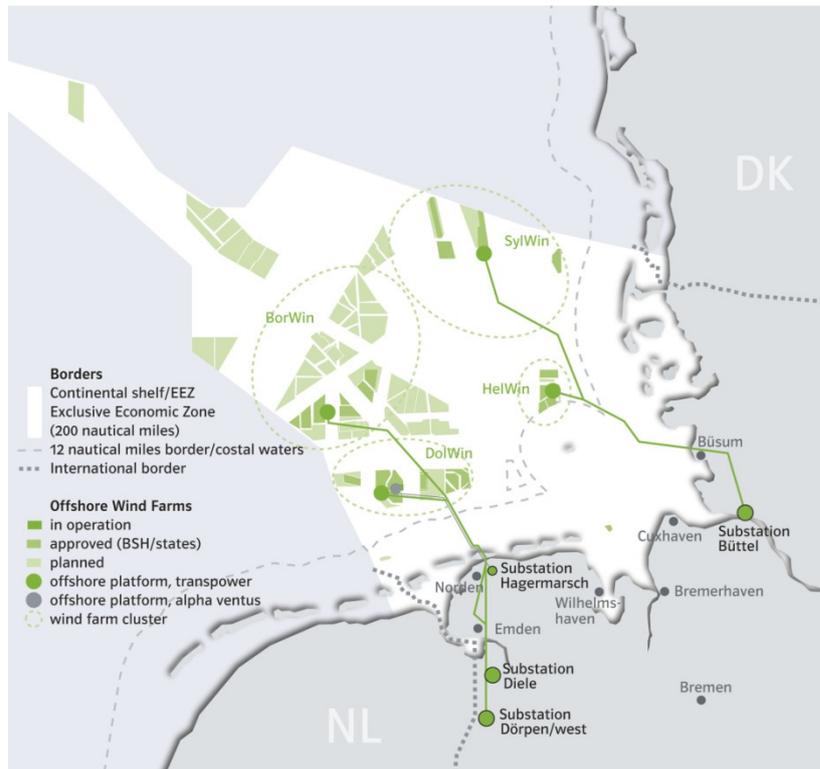


Figura 8 – Planta eólica de BorWin2

A Tabela 6 apresenta os dados principais deste sistema.

Tabela 6 - Dados principais – BorWin2

Características	Dados
Previsão de comissionamento	2013
Potência:	800MW
Tensão CA:	155 kV / 300 kV / 400 kV, CA
Tensão CC:	300 kV, CC
Comprimento do cabo submarino:	125km
Comprimento do cabo terrestre:	75km

1.3.7. SylWin1

A Siemens irá fornecer o maior projeto do mundo em sistema offshore através de VSC HVDC, com uma potência instalada de 864MW, que é o projeto SylWin1.

O sistema VSC HVDC irá conectar a planta eólica Dan Tysk para a rede elétrica da Alemanha.

Toda a estação conversora (conversores, equipamentos, transformadores) ficará instalada em uma plataforma *offshore*, similar ao projeto BorWin2.

A planta eólica do projeto SylWin1 está apresentada na Figura 9 [7].



Figura 9 – Localização da planta eólica SylWin1

A interligação do projeto SylWin1 está ilustrada na Figura 10 [8].

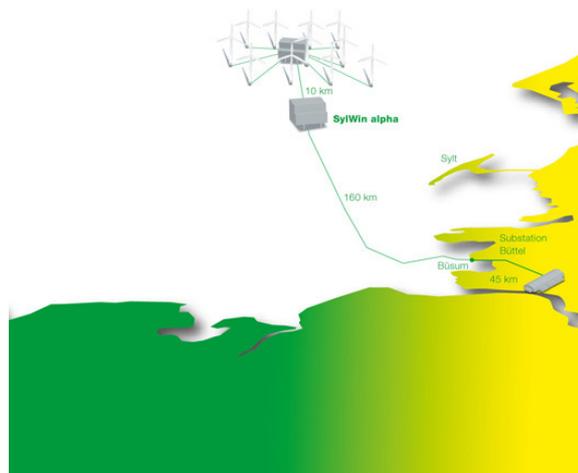


Figura 10 – Esquema de interligação SylWin1

A Tabela 7 apresenta os dados principais deste sistema.

Tabela 7 - Dados principais – SylWin1

Características	Dados
Previsão de comissionamento	2014
Potência:	864MW
Tensão CA:	155 kV/300 kV/380 kV
Tensão CC:	±320 kV
Comprimento do cabo submarino:	210km

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação está estruturada em cinco capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 1 apresenta a motivação que levou ao desenvolvimento desse trabalho, os objetivos a serem atingidos e um histórico de algumas aplicações recentes do sistema HVDC VSC.

O Capítulo 2 descreve o sistema HVDC VSC, apresentando seus componentes e funcionamento. E para isso, foram descritos o modo de operação e os controles normalmente utilizados nesse sistema. Além disso, esse capítulo inclui as vantagens e desvantagens do VSC HVDC. Ao final do capítulo, o caso base a ser estudado nessa dissertação é apresentado.

O Capítulo 3 é focado na descrição e dimensionamento do cabo submarino a ser modelado e estudado nesse trabalho.

O Capítulo 4 finalmente apresenta o sistema simulado nesse trabalho, contendo os resultados e análises obtidos no regime permanente e após a aplicação de diversos tipos de perturbações no sistema.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais desse trabalho e sugestões para alguns trabalhos futuros nesse tema.

2. HVDC CONTROLADO POR FONTE DE TENSÃO (VSC HVDC)

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado um sistema de transmissão HVDC, que utiliza um conversor fonte de tensão (VSC – Voltage Source Converter).

Além disso, será abordado o funcionamento do VSC HVDC através da apresentação da teoria dos princípios de controle das potências ativa e reativa e obtenção das formas de onda de tensão e corrente.

Após a apresentação dos conceitos básicos de funcionamento do VSC, será apresentado neste capítulo os detalhes do funcionamento dos controles utilizados no trabalho, de forma a apresentar como o sistema funcionará na prática.

Ao final do capítulo será apresentado o sistema base proposto nessa dissertação.

2.2. COMPONENTES DE UM SISTEMA VSC HVDC

Basicamente o VSC precisa dos seguintes componentes para funcionar:

- Ponte conversora de tensão CA em CC e vice-versa
- Capacitores CC no conversor para servir de fonte de tensão unidirecional
- Reatância no lado CA para permitir o fluxo de potência ativa e reativa.

Além desses os equipamentos abaixo vão complementar o sistema de forma a operar de forma mais satisfatória e controlável.

- transformadores;
- filtros CC;
- filtros CA;
- disjuntores e
- equipamentos de medição

O sistema VSC HVDC possui a arquitetura básica apresentada na Figura 11 [9].

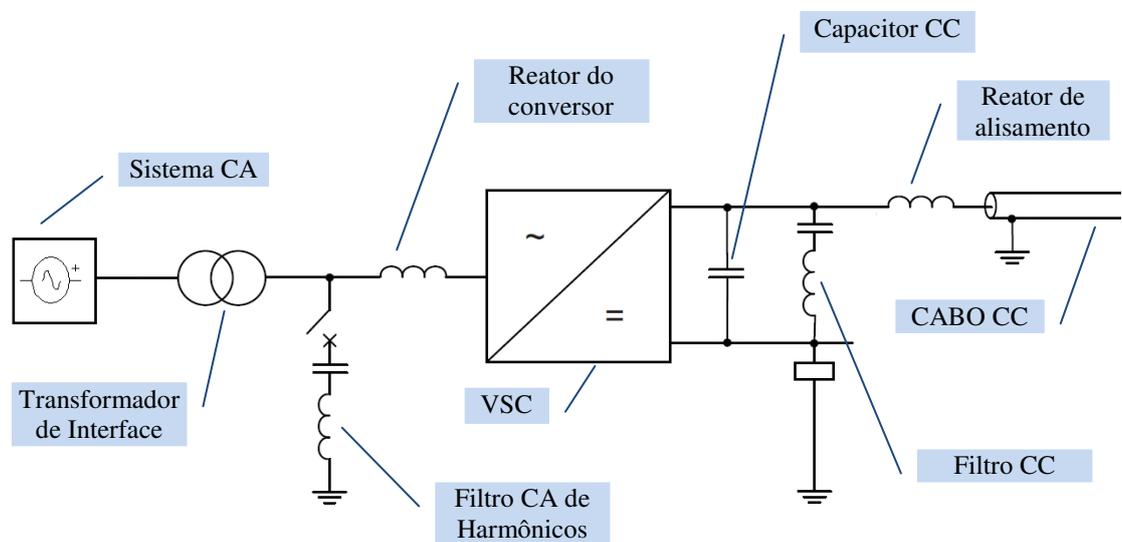


Figura 11 - Componentes de um sistema VSC HVDC

Os componentes utilizados nesse trabalho serão descritos detalhadamente no item 4.2.1. A seguir será apresentada apenas uma breve explicação de cada elemento do sistema.

2.2.1. Transformador de interface

O transformador de interface do sistema possui as seguintes funcionalidades:

- Fornece uma reatância para o sistema, que será utilizada em conjunto com o reator do conversor para controlar a potência ativa do sistema.

- Serve como um adaptador de tensões entre a tensão da rede e a tensão de saída do controlador do conversor.
- Elimina a corrente de seqüência zero proveniente do sistema CC (harmônicos triplos da modulação PWM do conversor) no sistema CA, através da ligação em delta no primário do transformador.

2.2.2. Reator do conversor

O reator do conversor é uma peça chave do conversor controlado por fonte de tensão, inserido no sistema para permitir o controle contínuo e independente da potência ativa e reativa [12]. Entre as principais vantagens de sua utilização, podem-se citar:

- Ser utilizado como um filtro passa-baixa para os harmônicos da corrente produzidos pela modulação PWM do conversor.
- Fornecer controle da potência ativa e reativa, visto que a tensão da frequência fundamental através deste reator define o fluxo de potência.
- Limitar a corrente de curto-circuito.

2.2.3. Filtro CA de Harmônicos

Normalmente o VSC HVDC é operado através de modulação PWM. Sendo assim, o filtro dos harmônicos gerados pela portadora dessa modulação torna-se um elemento importante nesse sistema, permitindo que os valores de tensão e corrente que fluem para o sistema CA tenham uma distorção aceita pelas normas nacionais e internacionais do sistema elétrico.

2.2.4. VSC

Componente básico e essencial para conversão da tensão CA em CC na estação retificadora e tensão CC em CA na estação inversora. Este componente é o equipamento

mais importante do sistema e serão explicados em detalhes nesse trabalho seu funcionamento, operação e os controles utilizados para um perfeito funcionamento do sistema.

2.2.5. Capacitor CC

O capacitor fornece a tensão CC necessária para a operação das chaves do VSC. Seu correto dimensionamento é importante para que o sistema opere de forma satisfatória.

Para que o sistema opere corretamente, o nível CC do elo de transmissão precisa se manter estável para que os controladores consigam atuar e controlar fluxo de potência ativa e reativa. O capacitor tem a capacidade de manter esse valor de tensão CC constante devido a seu armazenamento de energia.

2.2.6. Reator de alisamento

A principal função desse reator é realizar a proteção contra correntes de curto-circuito do lado CC do VSC.

Também possui o objetivo de suavizar as ondulações do nível CC provocadas pelo chaveamento das válvulas e deixar a tensão CC com uma forma de onda com aparência e característica mais contínua.

2.2.7. Filtro CC

É utilizado em paralelo ao capacitor CC e tem as seguintes finalidades:

- Serve como um redutor da impedância equivalente do circuito CC em certas frequências, funcionando como um filtro de harmônicos indesejáveis, como o harmônico de terceira ordem.

- Pode servir como uma alternativa para aumentar o tamanho do capacitor CC em algumas situações específicas.

2.3. OPERAÇÃO DO VSC HVDC

O VSC tem a capacidade de controlar individualmente tanto a potência ativa quanto a reativa, através do controle da fase e amplitude da tensão CA nos terminais do VSC, comparada com a tensão do sistema CA. Essa característica permite que o controle da potência ativa seja independente do controle da potência reativa, podendo inclusive ser simultâneos.

2.3.1. Princípio do controle da potência ativa

A potência ativa é controlada alterando-se o ângulo de fase entre a tensão de entrada do VSC (U_{conv}) e tensão do sistema CA (U_L). A Figura 12 apresenta o diagrama fasorial do funcionamento do controle de potência ativa.

Se a fase da tensão de entrada do VSC estiver em atraso em relação a tensão CA do sistema, o sistema CA irá injetar potência no VSC, ou seja, o VSC irá operar como retificador.

Se a fase da tensão de entrada do VSC estiver em avanço em relação a tensão CA do sistema, o sistema CA irá absorver potência do VSC, ou seja, o VSC irá operar como inversor.

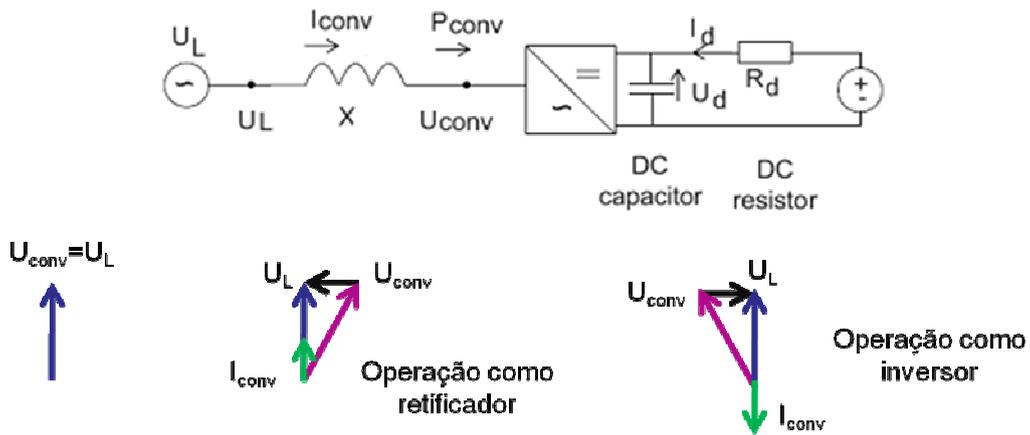


Figura 12 - Controle da potência ativa

Onde:

U_L é a tensão eficaz do sistema de potência;

I_{conv} é a corrente eficaz que flui no sistema;

P_{conv} é a potência ativa que é injetada nos terminais do VSC;

X é a impedância total do sistema CA;

U_{conv} é a tensão eficaz de entrada do VSC;

I_d é a corrente CC no elo de transmissão;

U_d é a tensão CC nos terminais do VSC;

R_d é a resistência do elo de transmissão.

Essa análise é comprovada através da equação do fluxo de potência apresentada em (2.1) [9].

$$P_{conv} = U_d \cdot I_d = \frac{U_L \cdot U_{conv} \cdot \sin(\theta_L - \theta_{conv})}{X} \quad (2.1)$$

Onde:

θ_L é o ângulo da tensão U_L

θ_{conv} é ângulo da tensão U_{conv}

2.3.2. Princípio do controle da potência reativa

A potência reativa é controlada através da regulação da amplitude da tensão CA de entrada do VSC. A Figura 13 apresenta o diagrama fasorial do funcionamento do controle de potência reativa.

Se a amplitude da tensão de entrada do VSC (U_{conv}) for menor do que a amplitude da tensão do sistema CA (U_L), a potência reativa nos terminais do VSC é positiva, ou seja, o conversor tem um comportamento indutivo (corrente atrasada em relação a tensão terminal).

Se a amplitude da tensão de entrada do VSC (U_{conv}) for maior do que a amplitude da tensão do sistema CA (U_L), a potência ativa nos terminais do VSC é negativa, ou seja, o conversor opera no modo capacitivo.

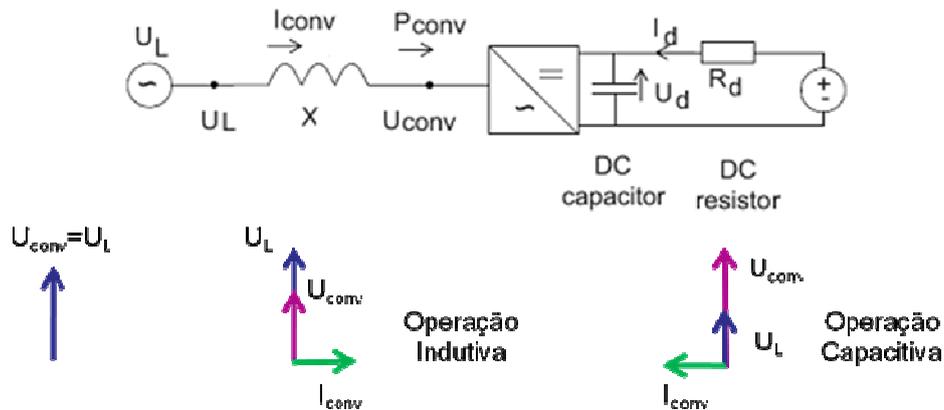


Figura 13 - Controle da potência reativa

Onde:

Q_{conv} é a potência reativa que flui nos terminais do VSC

A equação do fluxo de potência reativa apresentada em (2.2):

$$Q_{conv} = \frac{U_L \cdot (U_L - U_{conv} \cdot \cos(\theta_L - \theta_{conv}))}{X} \quad (2.2)$$

2.3.3. Tensões e Correntes do VSC HVDC

As equações que regem a tensão e corrente no elo de corrente contínua são análogas ao sistema HVDC convencional, onde os dados de corrente são substituídos por dados de tensão [10]. Dessa forma, pode-se dizer que o valor eficaz da componente fundamental da tensão de entrada do conversor é proporcional a tensão nos terminais CC, de acordo com a expressão (2.3).

$$k_\lambda = \frac{U_{conv}}{U_d} \quad (2.3)$$

Onde:

U_{conv} é o valor eficaz da componente fundamental da tensão de entrada do conversor

U_d é a tensão nos terminais CC

k_λ é o fator de relação de tensão, que pode variar de acordo com a relação de transformação do transformador. Também sofre variação através da modulação de pulso PWM do conversor, variando de zero a um valor máximo.

As equações (2.1) e (2.3) resultam na expressão:

$$I_d = k_\lambda \cdot \frac{U_L}{X} \text{sen}(\delta) \quad (2.4)$$

Onde:

$$\delta = \theta_L - \theta_{conv}$$

2.3.4. Modulação PWM

Em uma modulação PMW, o sinal de referência senoidal na frequência desejada é comparado com um sinal de forma de onda triangular. A frequência do sinal triangular

será a frequência de chaveamento do inversor. O índice de modulação de amplitude (m_a) é definido por (2.5) [11]:

$$m_a = \frac{U_{controle}}{U_{tri}} \quad (2.5)$$

Onde:

$U_{controle}$ é a amplitude da forma de onda da tensão de referência senoidal do PWM.

U_{tri} é a amplitude da tensão triangular do PWM.

Segundo MOHAN [11], a modulação PWM atua em duas faixas de operação: região linear ($m_a \leq 1$) e região não linear ($m_a > 1$), também chamada de sobremodulação.

Para a operação trifásica do PMW, tem-se que:

Região Linear ($m_a \leq 1$)

A tensão fase-fase RMS é dada pela equação (2.6).

$$U_{conv} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a U_d \quad (2.6)$$

Sobremodulação ($m_a > 1$)

Para valores grandes de m_a , a modulação PWM degenera em um inversor com forma de onda quadrada. Isso resulta em um valor máximo da tensão fase-fase U_{conv} expresso através da equação (2.7).

$$U_{conv} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d \quad (2.7)$$

A Figura 14 mostra as regiões índice de modulação para uma operação PWM trifásica, onde a tensão fase-fase é desenhada em função de m_a .

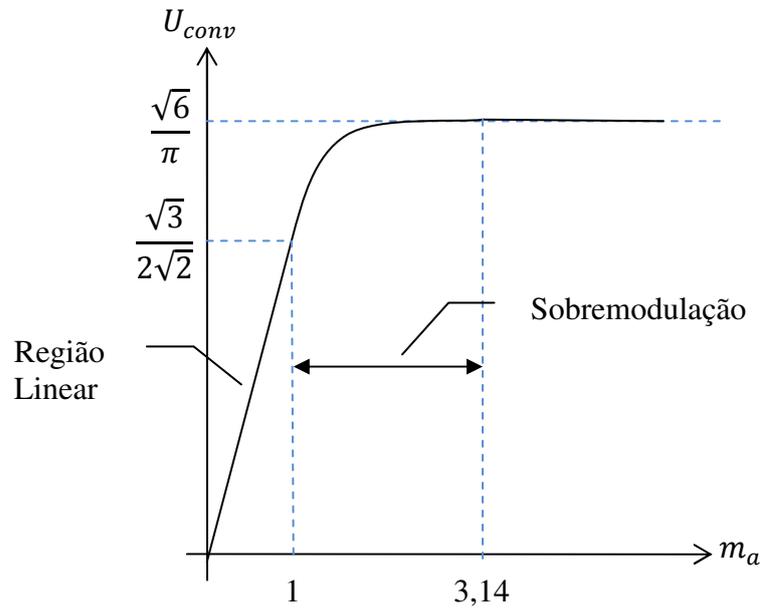


Figura 14 - Inversor trifásico - U_{conv} em função de m_a

2.3.5. Operação em onda quadrada

Para demonstrar as equações fundamentais de tensão e corrente que regem o funcionamento de um conversor VSC, será utilizado o modo mais simples de operação: um VSC de dois níveis, representado na Figura 15 [9].

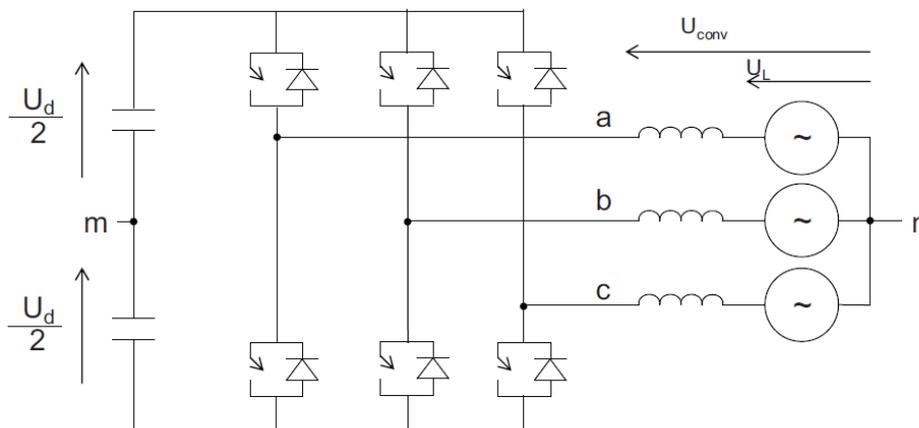


Figura 15 - Conversor VSC trifásico de 2 níveis e 6 pulsos

As tensões terminais dos tiristores no modo de operação em onda quadrada estão apresentadas na Figura 16. Os três primeiros gráficos correspondem as tensões de fase dos terminais (a, b, c) e o ponto de acoplamento “m”. Os três gráficos seguintes representam as tensões fase-fase entre os terminais e o último gráfico corresponde a tensão da fase “a” em relação ao neutro do sistema.

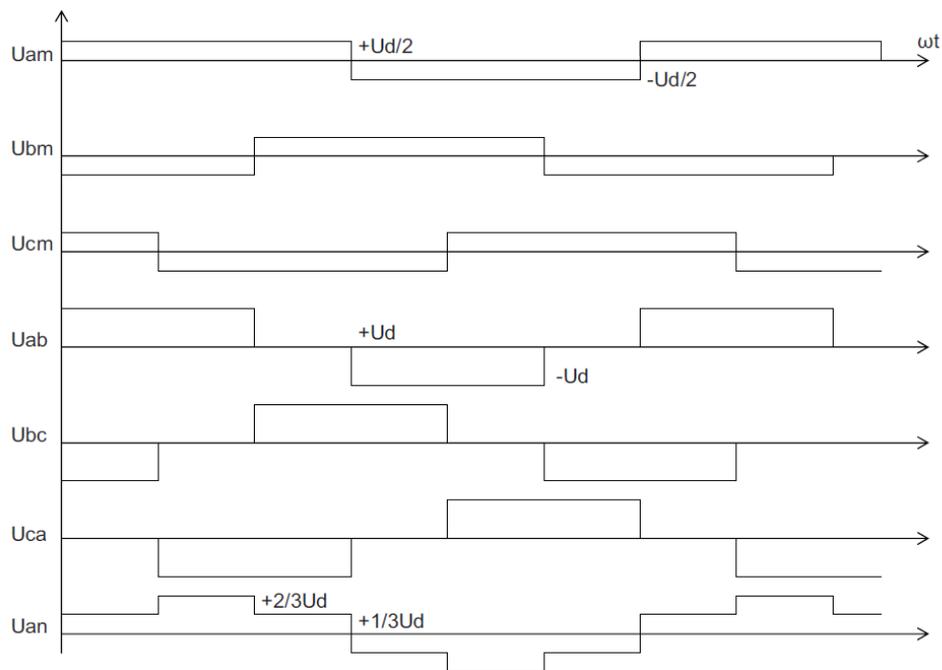


Figura 16 - Tensões do VSC para operação com ondas quadradas

Considerando que o conversor pode ser representado através da Figura 17, e que a tensão U_{conv} equivale a tensão U_{an} (monofásica), a tensão monofásica nos terminais do conversor pode ser obtida através da equação (2.8).

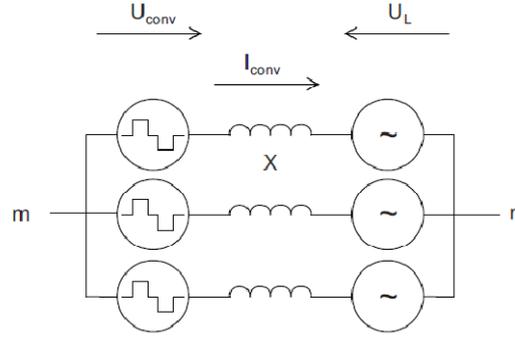


Figura 17 - Circuito equivalente do VSC

$$U_{conv_mono} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot k_{\lambda} \cdot U_d \cdot e^{-j\delta} \quad (2.8)$$

Onde:

U_{conv_mono} é a tensão monofásica de entrada do VSC

Através da equação (2.8), pode-se obter o valor da tensão eficaz de linha (fase-fase), dado pela equação (2.9).

$$U_{conv} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot k_{\lambda} \cdot U_d \cdot e^{-j\delta} \quad (2.9)$$

Onde:

δ é o ângulo de defasagem entre U_{conv} e U_L

k_{λ} é o fator de relação de tensão. Para a operação em onda quadrada, $k_{\lambda} = 1$. De acordo com o apresentado no item 2.3.4, para operação com PWM, esse fator poderá variar de 0 a 1, visto que $\frac{\sqrt{6}}{\pi}$ é o valor máximo da relação entre U_{conv} e U_d . [9].

A corrente então é obtida através de (2.10).

$$I_{conv} = \frac{U_{conv_mono} - U_{L_mono}}{X} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot k_{\lambda} \cdot U_d \cdot e^{-j\delta} - U_{L_mono}}{X} \quad (2.10)$$

Onde:

U_{L_mono} é a tensão monofásica do sistema CA

Ou também pode ser expressa por (2.11), sabendo-se que $P = V_d \cdot I_d$ [10].

$$I_{conv} = \frac{\sqrt{6} \cdot k_\lambda \cdot U_d \cdot e^{-j\delta}}{\pi X} \text{sen}(\delta) \quad (2.11)$$

Como visto anteriormente, a potência reativa é principalmente determinada pela amplitude da tensão U_{conv} , que, utilizando uma tensão contínua fixa, pode ser controlada através do fator de relação de controle k_λ (se for PWM) ou pelo ajuste do tap do transformador.

2.4. CONTROLE DO VSC

A operação do controle de um VSC está diretamente relacionada ao controle da amplitude e da fase da componente fundamental da tensão CA nos terminais dos dispositivos de chaveamento. Como visto nas equações anteriores, essa tensão (U_{conv}) vai variar em função do fator k_λ e do ângulo δ .

O controle da amplitude da tensão U_{conv} é obtido através da geração do sinal conhecido como “fator de relação de tensão” k_λ . Esse índice pode variar dentro de um intervalo de 0 a 1, conforme apresentado no item 2.3.5. Exemplo de aplicação: para o sistema ilustrado na Figura 11, para que o VSC forneça potência reativa ao sistema CA, é necessário que a amplitude da tensão CA nos terminais do conversor seja maior do que a tensão do sistema CA, e para isso o índice de modulação será ajustado para valores próximos de 1. O inverso é feito para que potência reativa do sistema seja absorvida pelo VSC, utilizando índices de modulação menores, para que a tensão U_{conv} seja menor do que a tensão CA do sistema.

O controle da fase da tensão U_{conv} é obtido através de deslocamento do ângulo da frequência fundamental dessa tensão com relação ao ângulo da componente fundamental da tensão CA do sistema, medida através da utilização de um PLL (phase locked loop). Uma variação nesse ângulo permite a variação no fluxo de potência ativa do sistema VSC, injetando mais ou menos potência, de acordo com a necessidade.

Dessa forma, pode-se afirmar que o controle do VSC tem a capacidade de atuar como retificador ou inversor, a depender do fluxo de potência ativa, e pode fazer circular potência reativa positiva ou negativa no sistema CA. Esses controles são feitos de forma independente. Assim, pode-se dizer que a estratégia de controle do VSC é determinada através do controle do fator k_λ e ângulo de fase δ .

2.4.1. Controle da Tensão CA

O controle da tensão CA do sistema é obtido através do ajuste da amplitude da componente fundamental da tensão nos terminais do conversor (U_{conv}). Essa amplitude será ajustada através da variação do fator k_λ , da mesma forma que é feito para o controle de potência reativa, explicado anteriormente.

2.4.2. Controle da Tensão CC

O controle da tensão CC do sistema é obtido através do ajuste da fase da componente fundamental da tensão nos terminais do conversor (U_{conv}). Esse ajuste é feito através da medição da defasagem entre a tensão U_{conv} e a tensão de linha U_L e conseqüente mudança na lógica de controle de disparo das chaves do conversor, de forma que a fase seja ajustada para o nível de tensão CC desejado. É o mesmo princípio utilizado no controle de potência ativa, explicado anteriormente.

2.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO VSC HVDC

Dentre as mais diversas vantagens do sistema VSC HVDC, pode-se citar que as mais relevantes para o contexto estudado são:

- Rápida resposta a perturbações, pois possui um controle rápido de potência ativa e reativa.
- Menores dimensões físicas, principalmente quando comparado ao sistema HVDC convencional (fonte de corrente).
- Os transformadores utilizados não são especiais. Podem ser utilizados transformadores de corrente alternada convencionais, diminuindo o custo do sistema.
- As potências ativa e reativa podem ser controladas de forma independente.
- Não há falhas de comutações devido a faltas no sistema CA ou quedas de tensões no sistema.
- Os filtros utilizados no sistema são projetados apenas para os harmônicos gerados pela modulação PWM.

Pode-se citar ainda as seguintes desvantagens deste sistema:

- Para eliminação de faltas na linha de transmissão CC, é necessária a abertura dos disjuntores CA dos VSCs dos dois lados do esquema, visto que ainda não foram desenvolvidos no mercado disjuntores CC de grande porte.
- As perdas de comutação no VSC são maiores quando comparadas ao HVDC convencional, visto que a frequência de chaveamento é maior do que os conversores comutados pela linha.

2.6. CASO BASE DE ESTUDO DO TRABALHO

Para a análise do sistema HVDC submarino, é proposto o sistema da Figura 18.

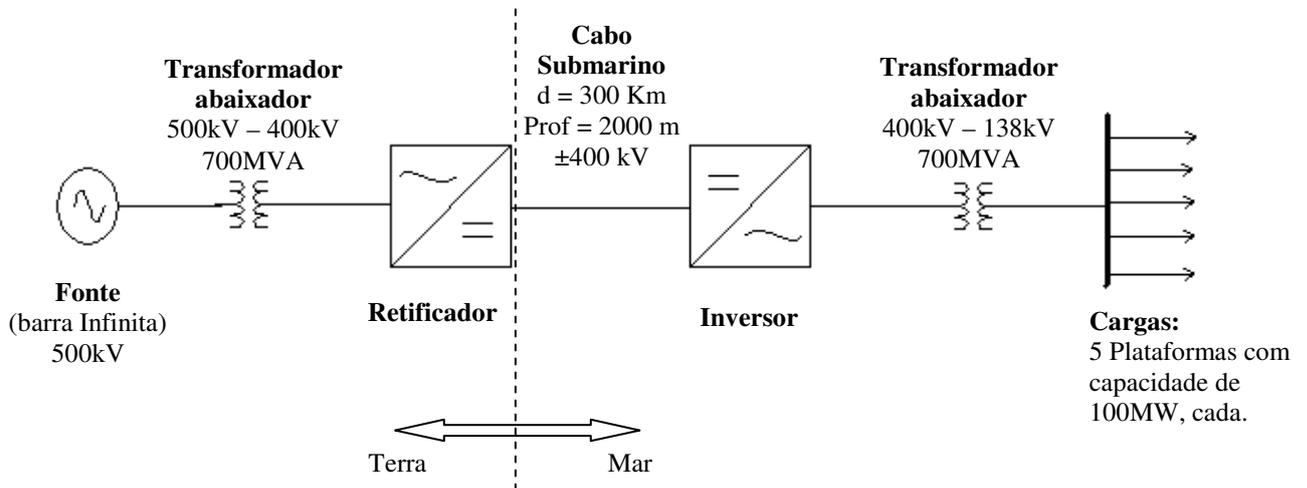


Figura 18 - Sistema HVDC submarino simulado

Trata-se do suprimento de energia para uma planta de capacidade de 500MW. As seguintes considerações e premissas foram feitas:

- Não foi detalhada a fonte geradora de energia, que pode ser suprida por geradores ou alimentada diretamente de uma concessionária de energia. Para o sistema, considera-se uma barra Infinita, com limite de curto de 40kA.
- A estação retificadora ficará em terra, e transformará a tensão CA em CC para ser transmitida através de cabos submarinos até uma estação inversora posicionada no mar (plataforma). A distância estimada até a plataforma inversora é de 300Km, com uma profundidade de 2000m. Desta plataforma serão distribuídas alimentações em 138kV para as 5 plataformas. Os cabos alimentadores destas plataformas não foram simulados.
- As tensões utilizadas no sistema foram:
 - Alimentação através de geração em 500kV

- Tensão do sistema de corrente contínua de $\pm 400\text{kV}$. Apesar de ainda não existir operacionalmente nenhum sistema VSC HVDC com esse nível de tensão (apenas projetos), foi adotado esse nível de tensão pela necessidade de reduzir a corrente nominal de transmissão, visto que as perdas devido as grandes distâncias são significativas.
- Tensão de alimentação das plataformas em 138kV . Está sendo considerado nesse estudo que cada plataforma receberá um alimentador nesse nível de tensão, cabendo a cada uma instalar um transformador para abaixar a tensão aos níveis de operação. A utilização de transformadores submersos com redução da tensão para $13,8\text{kV}$ para ser entregue a cada plataforma pode ser feita em uma análise futura.
- Os cabos do sistema CA não foram considerados como fontes de perdas. O cabo da transmissão em corrente contínua é o único a ser modelado e considerado na análise do sistema, por ser o mais relevante em termos de perdas no sistema.
- Modelagem de cinco cargas de 100MW cada, ligadas ao transformador abaixador. A separação dessas cargas foi feita de forma que os estudos de perturbação e perda de carga possibilitem a análise do comportamento do sistema como um todo.
- O conversor fonte de tensão utiliza modulação PWM com frequência de chaveamento de 1620Hz . Para o trabalho, foi considerada a utilização de controle direto, ou seja, o índice de modulação λ e o ângulo de fase δ são diretamente ajustados pelos parâmetros que são controlados.

- Devido a importância de analisar se o sistema é viável em termos de capacidade e queda de tensão, um capítulo dessa dissertação foi dedicado para estudo e modelagem do cabo CC submarino a ser utilizado.

3. CABOS HVDC SUBMARINOS

3.1. INTRODUÇÃO

Uma das vantagens em se utilizar o sistema de corrente contínua em alta tensão para grandes distâncias é a possibilidade de utilizar cabos com seções menores, visto que não se apresentam os problemas de altos valores de indutâncias e capacitâncias equivalentes de uma linha longa de transmissão.

Com a crescente demanda de sistemas HVDC submarinos, a área de pesquisa e desenvolvimento dos fornecedores de cabos HVDC submarinos tem aumentado bastante, a fim de poder comercializar cabos com maiores capacidades de corrente e isolamento.

O sistema proposto nesse trabalho (potência de 500MW e tensão de $\pm 400\text{kV}$) necessita da utilização de cabos cuja referência de parâmetros ainda não está disponível no mercado para análise até o presente momento. Assim, diversas considerações foram feitas e apresentadas neste capítulo.

3.2. CARACTERÍSTICAS DOS CABOS

O cabo submarino é composto das camadas apresentadas na Figura 19 e descritas a seguir.

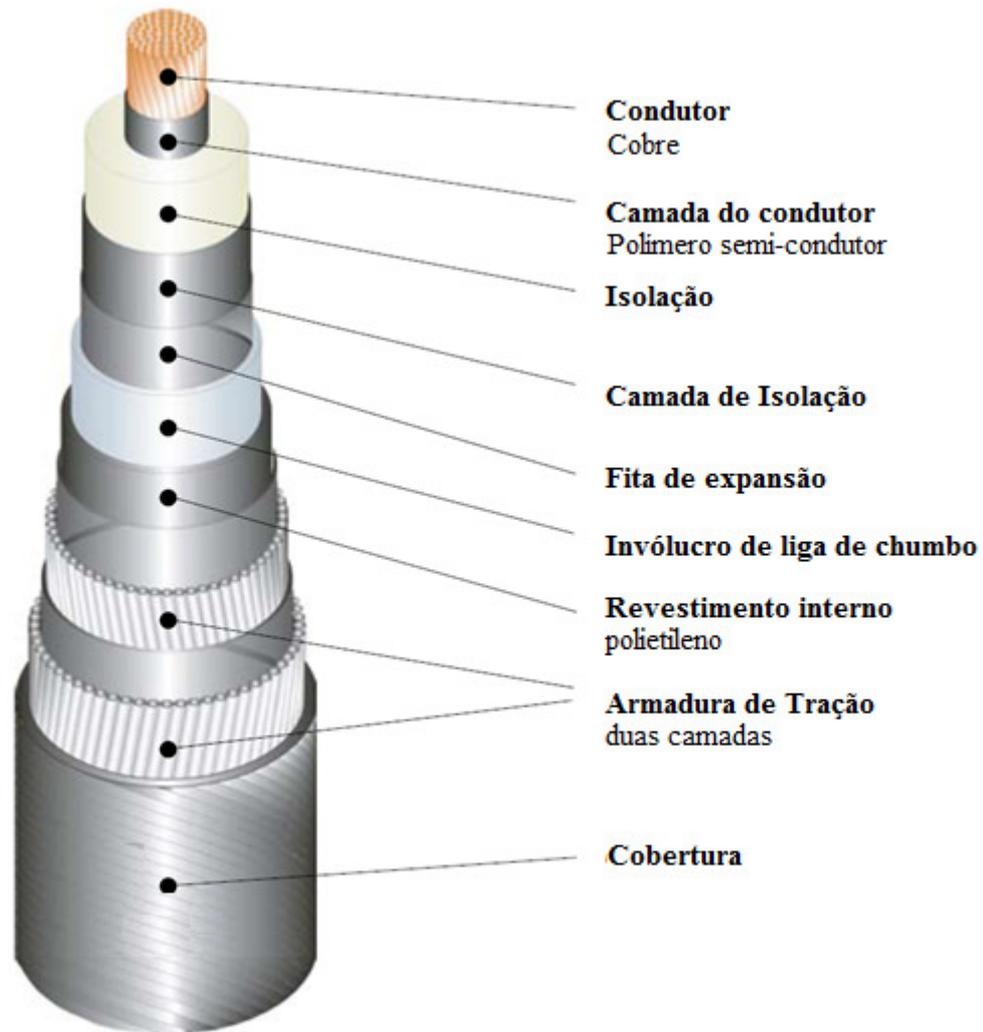


Figura 19 - Cabo HVDC submarino para grandes profundidades

- **Condutor**

O condutor é redondo e construído com fios redondos entrelaçados e compactados, ou, para as grandes seções transversais, camadas concêntricas de fios de formato trapezoidal.

O condutor também pode ser selado, caso haja necessidade de bloquear longitudinalmente a penetração de água em caso de danos ao cabo, visto que o mesmo estará permanentemente imerso em águas profundas.

- **Sistema de isolamento**

O sistema de isolamento polimérica do cabo HVDC consiste em:

- Camada condutora
- Isolação
- Camada de isolamento

O material desenvolvido para cabos HVDC é de altíssima qualidade, e o sistema de isolamento é triplamente extrudado e curado a seco.

Além disso, as superfícies de interface sensíveis entre o isolamento e as camadas condutoras não são expostas em nenhuma fase da fabricação do sistema de isolamento, garantindo a boa qualidade do produto.

- **Invólucro metálico**

Um invólucro de liga de chumbo é fornecido para cabos submarinos, a fim de manter a isolamento e o condutor do cabo seco.

- **Revestimento interno**

Um revestimento de polietileno é extrudado sobre a camada de chumbo. O revestimento de polietileno fornece proteção mecânica e corrosiva para a camada de chumbo.

- **Armadura de tração**

A armadura de tração consiste de fios de aço redondos galvanizados pertos uns dos outros torcidos ao redor do cabo. Essa armadura é inundada com betume, a fim de obter uma eficaz proteção contra a corrosão.

A armadura de tração é necessária quando o cabo é colocado no mar. A armadura de tração também oferece proteção mecânica contra impactos e à abrasão de um cabo que não está enterrado a uma profundidade segura no fundo do mar.

- **Revestimento exterior (cobertura)**

O revestimento exterior dos cabos submarinos consiste em duas camadas de fios de polipropileno, o interno impregnado com betume. O fio de polipropileno é uma cobertura semi-úmida.

A superfície do revestimento exterior pode ser fornecida com uma fina camada condutora, que é simultaneamente extrudadas, e, portanto, fortemente ligado, ao revestimento subjacente não-condutor. Isso é útil para garantir a integridade física do cabo no teste pós-instalação.

3.3. PARÂMETROS ELÉTRICOS

A ABB [12] disponibiliza dados construtivos e elétricos dos cabos submarinos de até 320kV. Esses dados foram utilizados nesse trabalho após devidas correções em função do local de instalação.

Para a análise do estudo desse trabalho, foram feitas as seguintes considerações:

- Os parâmetros elétricos desses cabos também serão válidos para cabos de $\pm 400\text{kV}$, visto que a seção do condutor não será alterada apenas nas camadas isolantes, coberturas e armaduras deverão ser adequadas para essa classe de tensão.
- Estão sendo considerados parâmetros para cabos submarinos com clima tropical, visto que o local de instalação do sistema simulado é a costa brasileira.

- Não foram feitas análises de peso e diâmetro externo do cabo, visto que até o momento não existem dados disponibilizados para tensão de $\pm 400\text{kV}$.

Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8- Características dos Cabos HVDC submarinos

Área	Condução Corrente		Resistência	Queda de tensão		Perdas a 50%		Perdas a 100%	
	Cabos Próx.	Cabos Separ.		Por fase 20° C	Cabos Próx.	Cabos Separ.	Cabos Próx.	Cabos Separ.	Cabos Próx.
mm ²	Amps	Amps	ohm/km	V/km	V/km	W/m	W/m	W/m	W/m
95	282	338	0,193	65	78	8	12	37	53
120	323	387	0,153	59	71	9	12	38	55
150	363	436	0,124	54	65	9	13	39	57
185	411	496	0,0991	49	59	9	13	40	59
240	478	580	0,0754	43	52	9	14	41	60
300	544	662	0,0601	39	48	9	14	42	64
400	626	765	0,047	35	43	10	15	44	66
500	722	887	0,0366	32	39	10	15	46	69
630	835	1030	0,0283	28	35	11	16	47	72
800	960	1187	0,0221	25	31	11	17	48	74
1000	1092	1355	0,0176	23	29	11	17	50	79
1200	1188	1474	0,0151	21	27	11	18	50	80
1400	1297	1614	0,0126	20	24	11	18	52	77
1600	1397	1745	0,0113	19	24	12	18	53	84
1800	1490	1860	0,0098	17	22	12	18	51	82
2000	1589	1987	0,009	17	21	12	19	54	83
2200	1676	2086	0,008	16	20	12	19	54	83
2400	1764	2198	0,0073	15	19	12	19	53	84

Dados do cabo referentes às seguintes condições:

Solo do mar: Temperatura de 28° C, enterrado a 1 metro, resistividade térmica de

$$1.2 \text{ K} \times \text{W} / \text{m}$$

Cabo: Condutor de cobre, isolamento polimérica HVDC, armadura de fios de aço

3.4. CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DO CABO

Para a escolha dos cabos elétricos do HVDC, foram utilizados dois critérios de dimensionamento: pela capacidade de condução de corrente e pela queda de tensão no cabo. O cabo corretamente dimensionado é aquele que atende aos dois critérios simultaneamente.

Por se tratar de um assunto de grande importância para a análise do sistema utilizado, serão mostrados todos os passos para o dimensionamento do cabo do sistema proposto nesse trabalho, incluindo os resultados obtidos em cada fase.

3.4.1. Dimensionamento pelo critério de capacidade de condução de corrente

A corrente nominal do elo de corrente contínua I_d do circuito é dada pela equação (3.1).

$$I_d = \frac{P_{cc}}{2 * U_d} = \frac{500 \times 10^6}{2 * 400 \times 10^3} = 625 A \quad (3.1)$$

Onde P_{cc} é a potência nominal do elo.

Para o dimensionamento de um cabo a uma temperatura de 28° C, foi considerada a capacidade de condução de corrente para o pior caso (Cabos próximos). Assim, a seção necessária do cabo é de 400 mm².

Porém, sabe-se que ao longo do comprimento do cabo, a temperatura ambiente não é em sua totalidade 28° C.

Assim, para um melhor dimensionamento do cabo, serão consideradas as temperaturas de acordo com as distâncias propostas para os cabos apresentadas na Figura 20.

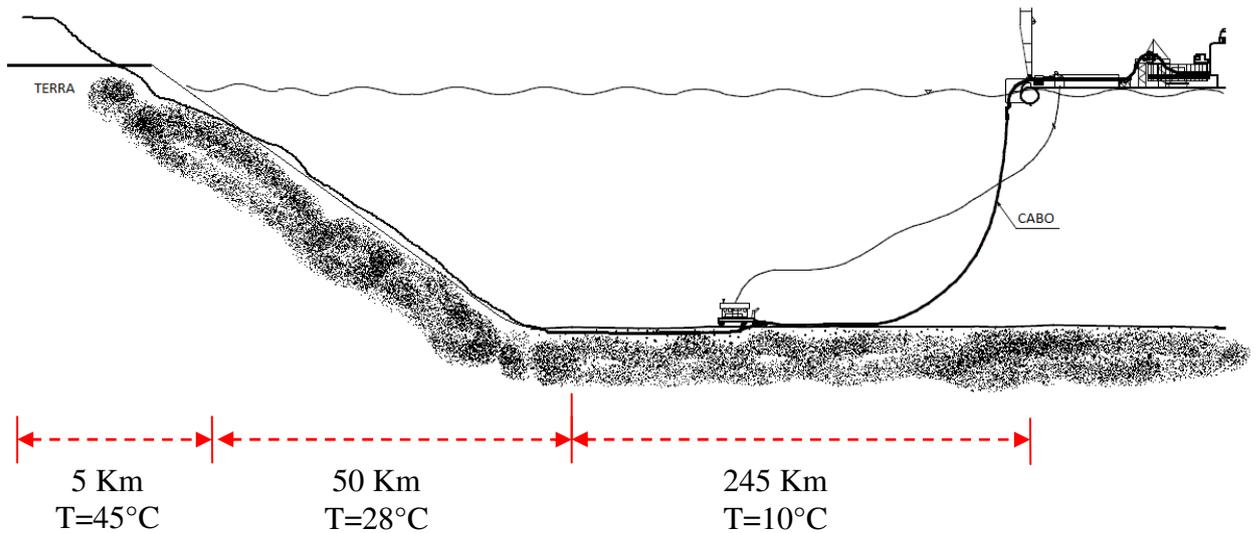


Figura 20 - Distâncias e Temperaturas para dimensionamento do Cabo

Onde: T é temperatura.

As temperaturas apresentadas na Figura 20 estão sendo sugeridas nesse trabalho com base no que normalmente é utilizado em projetos de instalações submarinas e em suposições climáticas do oceano brasileiro. As distâncias também foram estimadas como base para análise e dimensionamento dos cabos neste trabalho.

Como o comprimento total do cabo é muito maior do que a capacidade de fornecimento da bobina, serão necessárias a realização de diversas emendas nos cabos, portanto, é possível a utilização de diferentes dimensões de seções dos cabos para os dados trechos. Essa solução foi adotada tendo em mente a redução de custos na implantação do sistema HVDC submarino em grandes distâncias.

A capacidade de condução de corrente para diferentes temperaturas pode ser obtida através das equações apresentadas no ANEXO 1, referentes a variações de resistividade em função da temperatura.

Pode-se perceber que, para uma temperatura de 70° C, a resistência calculada de 0,0562 Ω /Km coincide com as perdas apresentadas a 100% da carga. Portanto, é

possível considerar a aproximação de que a temperatura máxima de operação do cabo é de 70°C.

Com base no modelo linear da variação da resistência com a temperatura, pode-se dizer que o valor da corrente máxima pelo cabo também varia linearmente com a temperatura, obedecendo ao comportamento da Figura 21.

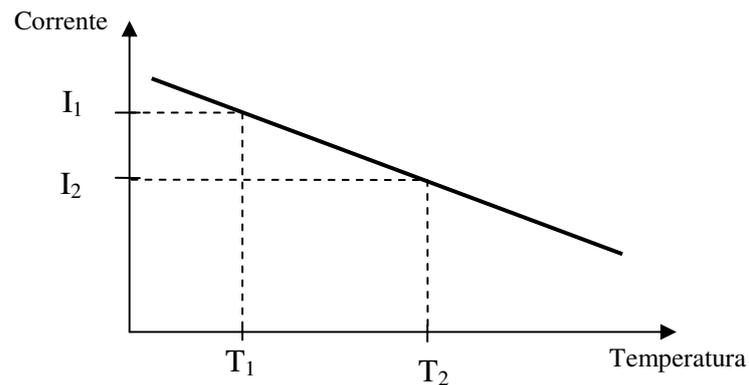


Figura 21 - Comportamento da corrente em função da variação da temperatura

A equação (3.2) pode ser utilizada para o cálculo da capacidade de corrente:

$$I_{ajuste\ temperatura} = K \times T + I_0 \quad (3.2)$$

Onde:

$I_{ajuste\ temperatura}$ é a corrente resultante da correção da temperatura

K é a inclinação da curva, que varia de acordo com a seção do cabo

I_0 é o valor inicial da curva, que varia de acordo com a seção do cabo

T é a temperatura

Com base nessas informações, os valores das capacidades de corrente após ajuste das temperaturas escolhidas para todas as seções pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Ajustes da capacidade de corrente para diferentes temperaturas

Área Condutor Cobre mm ²	Corrente para T= 28°		Corrente para T= 45°		Corrente para T= 10°	
	Cabos Próx. Amps	Cabos Separ. Amps	Cabos Próx. Amps	Cabos Separ. Amps	Cabos Próx. Amps	Cabos Separ. Amps
95	282	338	202	252	366	429
120	323	387	233	288	419	492
150	363	436	261	322	471	556
185	411	496	295	365	534	634
240	478	580	341	427	623	742
300	544	662	390	485	707	849
400	626	765	444	560	818	982
500	722	887	511	645	945	1143
630	835	1030	589	748	1095	1329
800	960	1187	679	859	1258	1535
1000	1092	1355	774	977	1428	1755
1200	1188	1474	835	1059	1562	1913
1400	1297	1614	909	1159	1708	2096
1600	1397	1745	975	1251	1844	2268
1800	1490	1860	1045	1330	1961	2421
2000	1589	1987	1113	1438	2093	2569
2200	1676	2086	1171	1492	2210	2715
2400	1764	2198	1233	1570	2326	2863

Para o sistema proposto, tem-se que:

- Dimensionamento do cabo para uma temperatura de 45°C

Como a corrente nominal do sistema é de 625 A, será necessária a utilização de um cabo de seção de 800mm², considerando o pior caso (cabos separados).

- Dimensionamento do cabo para uma temperatura de 28°C

De acordo com o mostrado anteriormente, o cabo terá uma seção de 400mm², sem necessidade de correção de temperatura.

- Dimensionamento do cabo para uma temperatura de 10°C

Para essa temperatura, pode-se utilizar um cabo de seção 300mm².

3.4.2. Dimensionamento pelo critério de queda de tensão

Para essa análise, será utilizado o valor de resistência na máxima temperatura de operação, ou seja, 70°C. Os valores das resistências das diversas seções com base na temperatura de 70°C estão apresentados na Tabela 10. Para equações que demonstram esse cálculo, ver ANEXO 1.

Tabela 10 - Valores das resistências para temperatura de 70°C

Área	Resistência	Resistência
Condutor Cobre	Por fase 20° C	Por fase 70° C
mm ²	ohm/km	ohm/km
95	0,193	0,2306
120	0,153	0,1828
150	0,124	0,1482
185	0,0991	0,1184
240	0,0754	0,0901
300	0,0601	0,0718
400	0,047	0,0562
500	0,0366	0,0437
630	0,0283	0,0338
800	0,0221	0,0264
1000	0,0176	0,0210
1200	0,0151	0,0180
1400	0,0126	0,0151
1600	0,0113	0,0135
1800	0,0098	0,0117
2000	0,009	0,0108
2200	0,008	0,0096
2400	0,0073	0,0087

Para o dimensionamento do cabo pelo critério de queda de tensão, será admitida uma perda de apenas 8% ao longo de todo o trecho, distribuída de acordo com a Figura 22. A norma NBR 14039 recomenda a utilização de uma queda de tensão máxima de 5% para sistemas convencionais. No caso de um sistema HVDC, a queda de tensão pode ser compensada com a elevação da tensão através dos controles do VSC. Assim, com o objetivo de propor cabos com seções menores, foi considerável admissível um

acréscimo de 3% na queda de tensão total do trecho, em virtude do comprimento total do circuito ser muito alto. Para o cabo projetado, está sendo considerado que será admissível uma maior queda de tensão para o maior trecho.

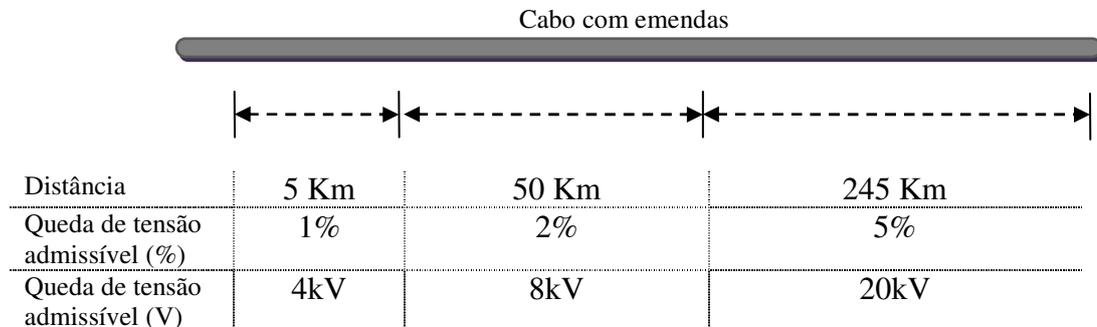


Figura 22 - Quedas de tensões admissíveis em cada trecho do cabo

A queda de tensão total do trecho é calculada através de (3.3).

$$U_{\text{queda_tensão}} = R(\Omega/\text{Km}) \times I_{\text{nominal}}(A) \times d(\text{Km}) \quad (3.3)$$

Assim, tem-se que:

- Distância do primeiro trecho do cabo = 5 Km (cabo 800mm², T=45°C)

A queda de tensão no trecho de 5 Km é de 82,5V, portanto o cabo de 800mm² atende ao critério de queda de tensão.

- Distância do segundo trecho do cabo = 50 Km (cabo 400mm², T=28°C)

A queda de tensão no trecho de 50 Km é de 1,76kV, portanto o cabo de 400mm² atende ao critério de queda de tensão.

- Distância do terceiro trecho do cabo = 245 Km (cabo 300mm², T=10°C)

A queda de tensão no trecho de 245 Km é de 11kV, portanto o cabo de 300mm² atende ao critério de queda de tensão.

3.5. CABO DIMENSIONADO PARA O SISTEMA

SIMULADO

Em resumo, o cabo a ser utilizado no sistema proposto será uma composição de três trechos de seções diferentes, conforme o apresentado na Figura 23.

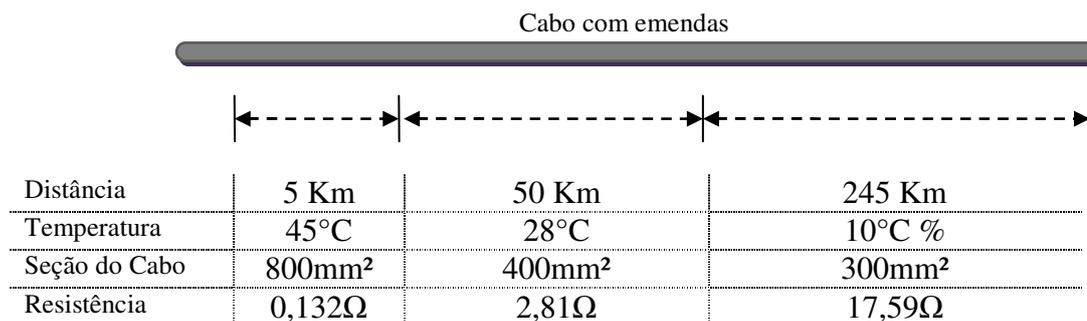


Figura 23 - Formação do cabo HVDC submarino

4. TRANSMISSÃO VSC HVDC SUBMARINA PARA ALIMENTAÇÃO DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO

4.1. INTRODUÇÃO

Dado o cenário a ser simulado da Figura 18 e utilizando os parâmetros dos cabos calculados no capítulo 3, foi realizada no Matlab a modelagem desse sistema, que será descrito ao longo desse capítulo.

Neste capítulo serão apresentados o funcionamento do sistema em regime permanente e a aplicação de diferentes tipos de perturbação ao sistema, como curto-circuito, queda de tensão na geração, perda de carga e partida de um grande motor. O objetivo dessa análise é verificar o comportamento do sistema mediante o funcionamento dos controles e concluir se o caso apresentado é robusto e confiável para a aplicação proposta nesse trabalho.

4.2. CASO BASE DO SISTEMA MODELADO

O sistema modelado no software Simulink/Matlab dentro da ferramenta *SimPowerSystems* é apresentado na Figura 24. Esse modelo teve como base inicial o modelo presente no banco de dados do Simulink/Matlab [13], mas teve todos os seus parâmetros e controles substituídos e adaptados ao sistema proposto nesse trabalho.

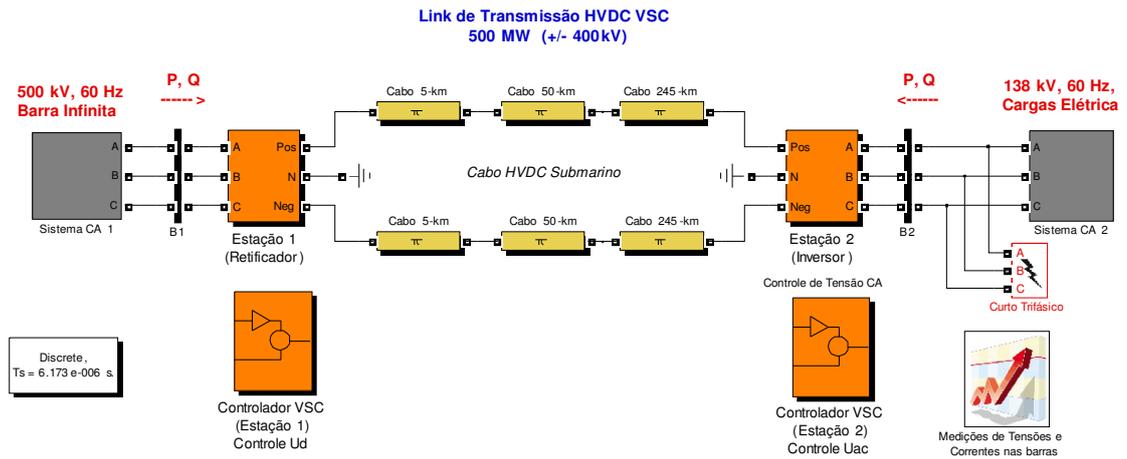


Figura 24 - Sistema HVDC submarino simulado no Matlab

4.2.1. Componentes do Sistema

O sistema apresentado na Figura 24 está dividido nos seguintes componentes:

- **Sistema CA de entrada**

Para a modelagem da geração de energia ao sistema, foi considerado como uma barra infinita de tensão 500kV fornecendo a potência demandada pela carga/sistema.

Uma impedância é conectada a fonte limitando a corrente de curto em 40kA. Essa modelagem está apresentada na Figura 25.

Sistema CA 1

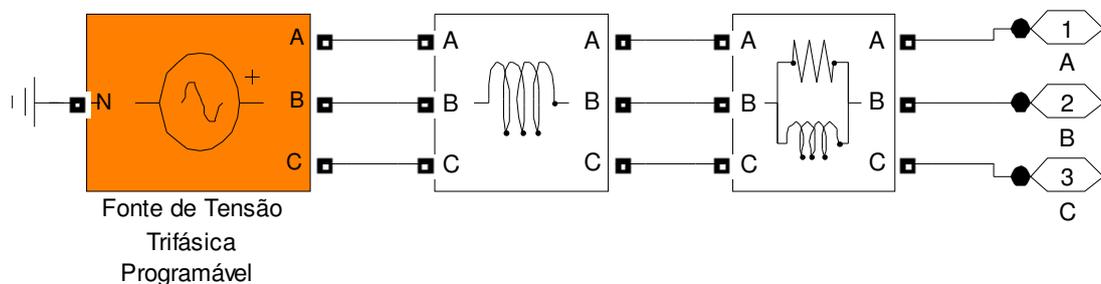


Figura 25 - Sistema CA de entrada

- **Estação retificadora**

A estação retificadora modelada está apresentada na Figura 26. Ela é composta de um transformador de entrada de 700MVA, relação de transformação de 500kV-400kV, com um TAP de 0,985:1. O transformador é utilizado para uma melhor conversão da tensão, e o arranjo delta-estrela utilizado auxilia na eliminação dos harmônicos múltiplos de três produzidos pelo conversor.

O reator do conversor inserido no sistema é de 0,15 pu (base de 400kV e 500MW). A reatância do transformador em conjunto com a reatância do conversor permite que a tensão de saída do VSC desloque em fase e amplitude em comparação a tensão do sistema CA, permitindo o fluxo de potência ativa e reativa no sistema [13].

Um filtro CA é inserido no sistema para eliminar as componentes harmônicas geradas pela modulação PWM da ponte conversora formada por IGBTs e Diodos.

Os conversores fonte de tensão (VSC) foram modelados com pontes de três níveis utilizando modelos ideais dos dispositivos de chaveamento (IGBTs e diodos). A ponte de três níveis tem a vantagem de possuir um *ripple* na tensão menor, quando comparado com um conversor bipolar. Os pulsos de disparo desse conversor são gerados pelo controlador dedicado para a estação conversora, detalhado mais a frente.

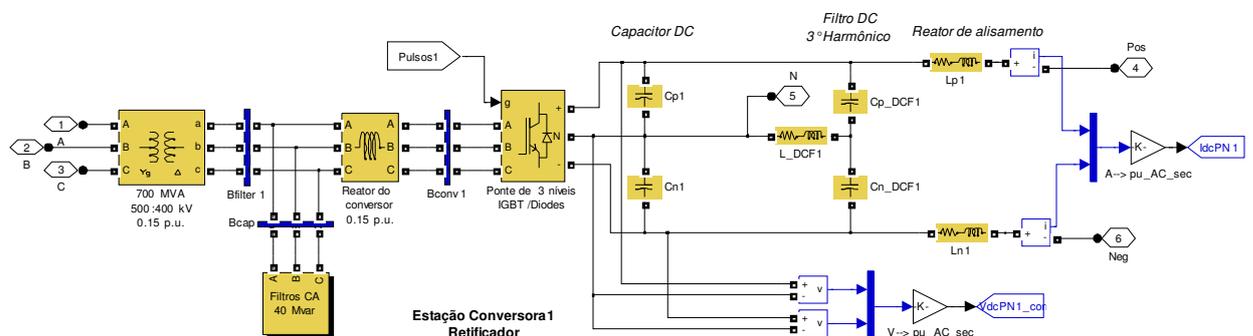


Figura 26 - Estação retificadora

Conectado aos terminais do conversor VSC, foram dispostos capacitores CC. Esses capacitores possuem uma influência na dinâmica do sistema e na oscilação de tensão no lado CC, tentando manter este valor constante. Eles são dimensionados de acordo com a constante de tempo τ , que corresponde ao tempo que se leva para carregar o capacitor na base de tensão (400kV), se ele for carregado por uma corrente base especificada (625A, corrente que flui em cada pólo do elo CC).

Assim, tem-se que:

$$\tau = C \cdot Z_{base} \quad (4.1)$$

Onde:

τ é a constante de tempo

C é o valor do capacitor, em F

Z_{base} é a impedância base do sistema, com $Z_{base} = 400\text{kV}/0,6251\text{kA} = 640 \Omega$

Considerando um tempo de carregamento do capacitor de 7ms para dimensionamento do capacitor a ser utilizado no caso estudado, tem-se que:

$$C = \frac{\tau}{Z_{base}} = \frac{7 \cdot 10^{-3}}{640} = 10,93\mu\text{F} \quad (4.2)$$

A corrente reativa do conversor gera um terceiro harmônico relativamente grande em ambos os pólos positivo e negativo do lado CC [13]. Os harmônicos presentes na tensão CC também podem ser interpretados como harmônicos de sequência zero (pares múltiplos de 3) transferidos para o lado CC através dos filtros CA aterrados.

Por essa razão, são colocados filtros de terceiro harmônico após os capacitores CC.

Além disso, um reator de alisamento é conectado em série em cada terminal (positivo e negativo), para amenizar o *ripple* decorrente da conversão de tensão CA em CC.

- **Sistema de Controle da estação retificadora**

O sistema de controle projetado é apresentado na Figura 27. As tensões e correntes medidas são filtradas para que o controle trabalhe apenas com a componente fundamental desses valores.

Nessa estação são feitas as medições de potência ativa e reativa para apresentação dos resultados obtidos com a simulação.

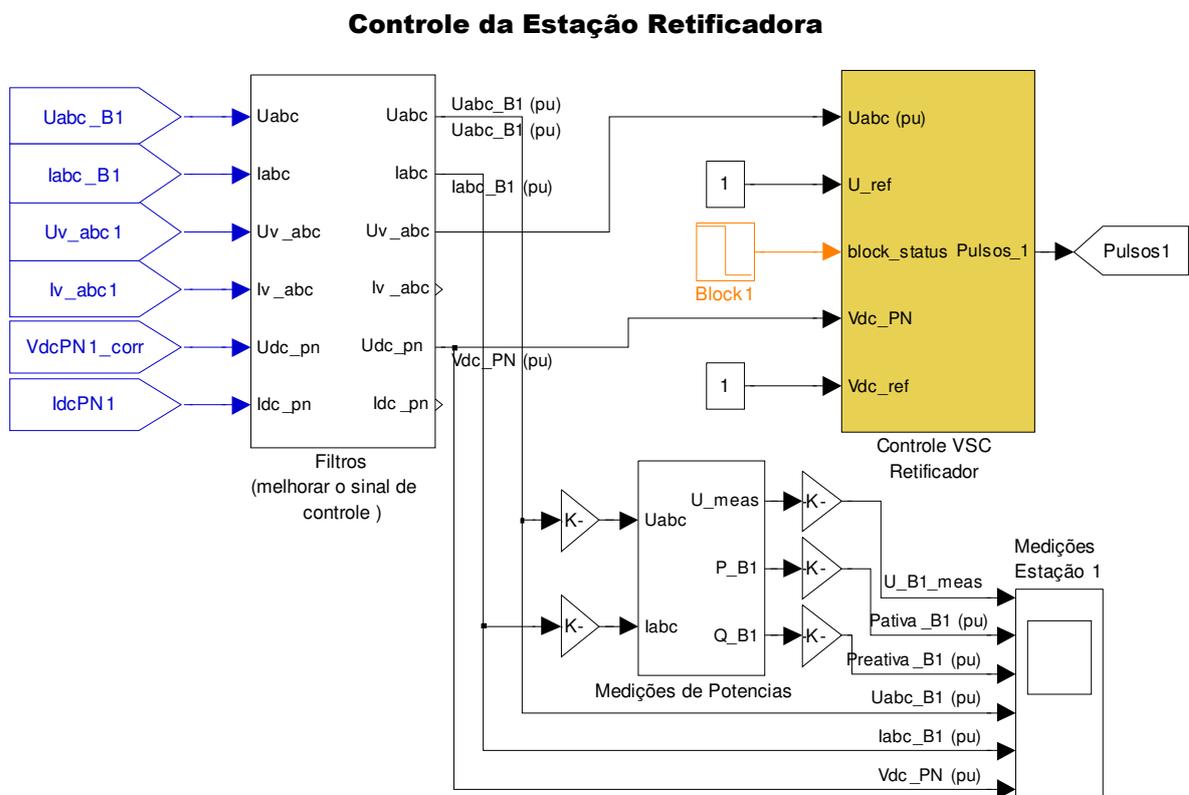


Figura 27 - Sistema de controle

O controle da estação retificadora foi projetado para controlar a tensão CC do sistema, conforme modelo apresentado na Figura 28. O funcionamento desse controle será discutido mais a frente nesse capítulo.

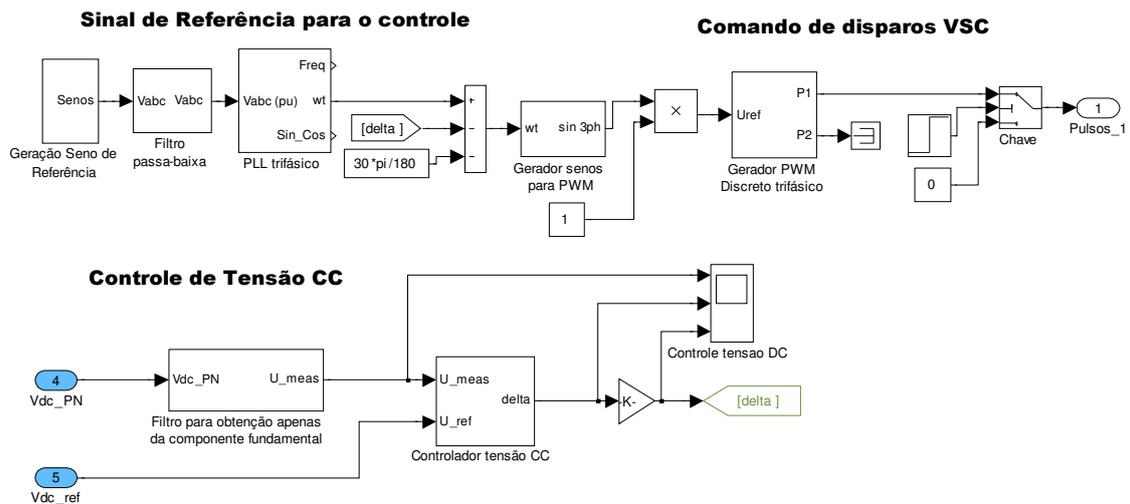


Figura 28 - Controlador da estação retificadora

- **Cabo submarino**

O cabo submarino modelado, conforme dimensionado no capítulo 3, é apresentado na Figura 29.

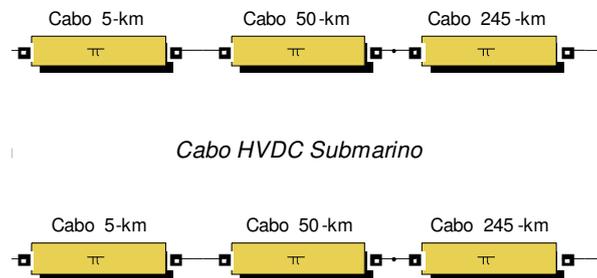


Figura 29 - Cabo submarino modelado em três trechos

- **Estação inversora**

Esta estação é semelhante a estação retificadora, e está apresentada na Figura 30. Os capacitores CC, filtros CC e CA, reatores de alisamento e do conversor são exatamente os mesmos apresentados para a estação retificadora. Porém o TAP do transformador é diferente e ajustado para 1:1,015. O transformador projetado já abaixa a tensão para 138kV, para distribuição direta para as cargas (plataformas).

O controle da estação retificadora foi projetado para controlar a tensão CA do sistema CA 2, ou seja, a tensão 138kV de alimentação das cargas, conforme apresentado na Figura 32. O funcionamento desse controle será discutido mais a frente nesse capítulo.

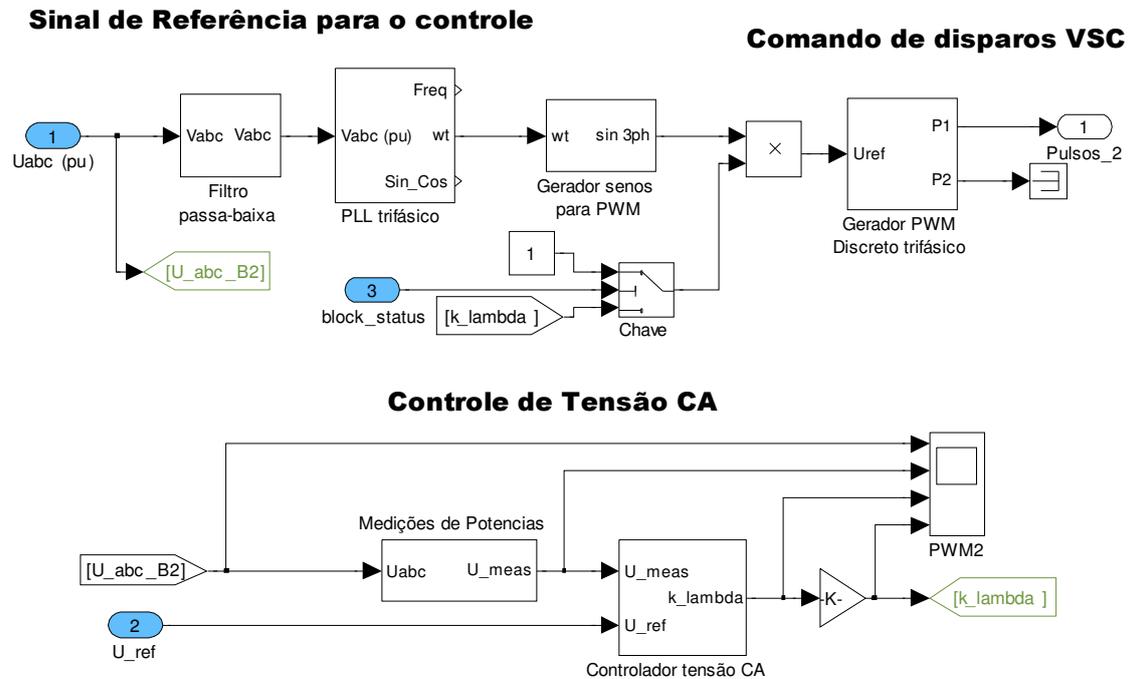


Figura 32 - Controlador da estação inversora

- **Cargas**

As cargas, plataformas de petróleo, foram modeladas e representadas como impedâncias em paralelo, calculadas para uma demanda de potência de 100MW com fator de potência de 0,9.

Para simulações de perturbações no sistema, foram feitas as seguintes alterações nas cargas:

- Plataformas P4 e P5 → inseridos dois disjuntores para abertura no tempo especificado e poder avaliar uma simulação de perda de demanda de duas plataformas.

- Plataforma P1 → modelada como uma carga de 100MW para o regime permanente, porém em um tempo especificado, a modelagem muda para uma carga de 85MW com fator de potência de 0,9 mais uma carga de 15MW com fator de potência de 0,2 (potência equivalente de um motor em partida) durante 1 segundo. Essa modelagem foi feita para estudar o efeito inicial da partida de um motor, com o objetivo de analisar o efeito da variação da tensão no sistema no momento dessa partida.

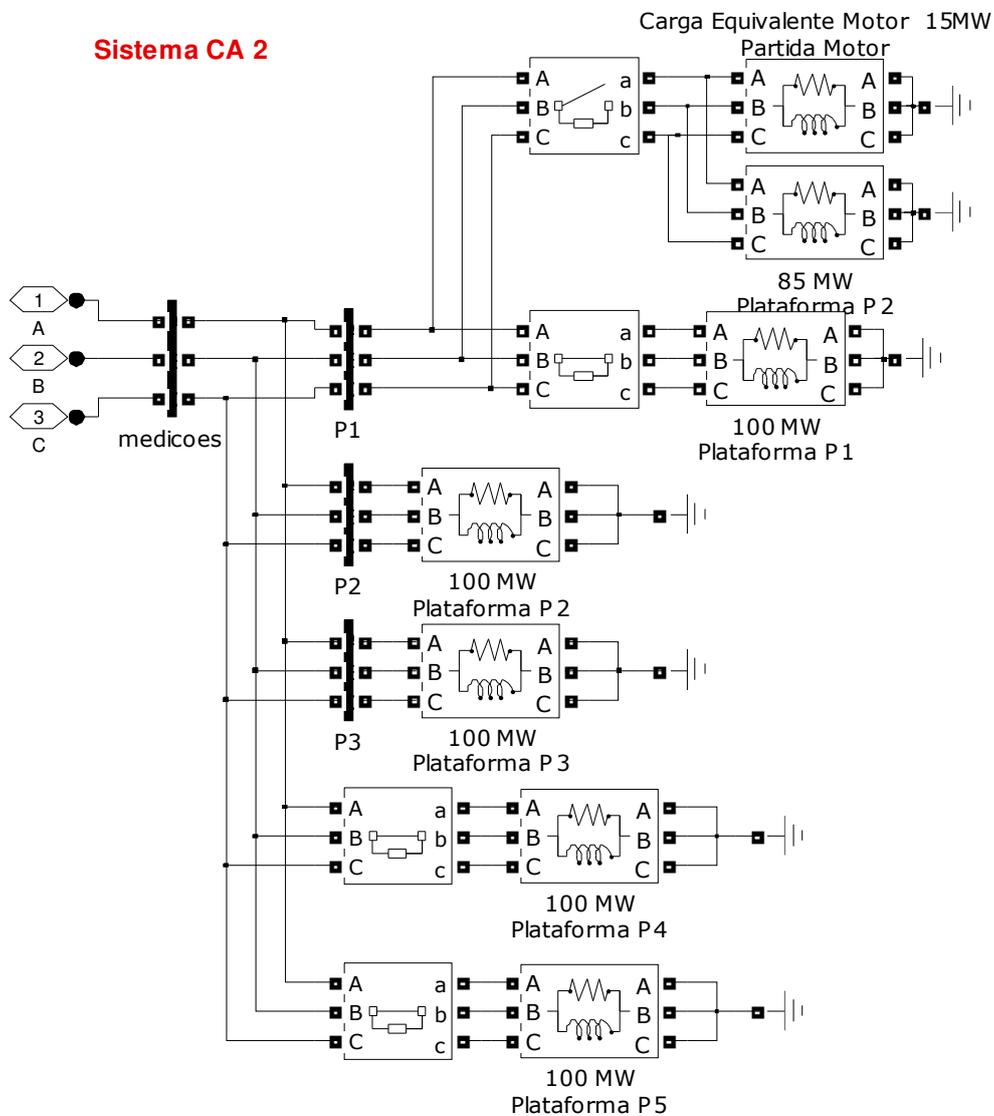


Figura 33 - Cargas do sistema simulado

- **Harmônicos e Filtros**

Conforme apresentado nos componentes do sistema, para manter o sistema dentro de níveis toleráveis de harmônicos, diversos filtros foram introduzidos no modelo. Esses filtros foram conectados como elementos em paralelo, tanto do lado CA como do lado CC do sistema. Os filtros utilizados são pequenos, quando comparados aos filtros do HVDC convencional, visto que há predominância de harmônicos de alta frequência nesse sistema.

De uma forma geral, pode-se dizer que a geração de harmônicos depende basicamente de:

- Tipo de modulação utilizado.
- Índice de frequência p , onde $p = \text{frequência da portadora} / \text{frequência fundamental}$.
- Fator de relação de tensão k_λ , onde $k_\lambda = \text{tensão CA do conversor} / \text{tensão CC pólo a pólo}$.

Assim, os principais harmônicos de tensão são gerados pelos múltiplos de p e arredores. O filtro paralelo (*shunt*) utilizado e apresentado acima é ajustado para eliminar apenas os harmônicos múltiplos de p .

Para mostrar o perfeito funcionamento desses filtros, foram medidas as tensões CA (da estação conversora, por exemplo) antes e depois do filtro projetado e apresentado na Figura 34.

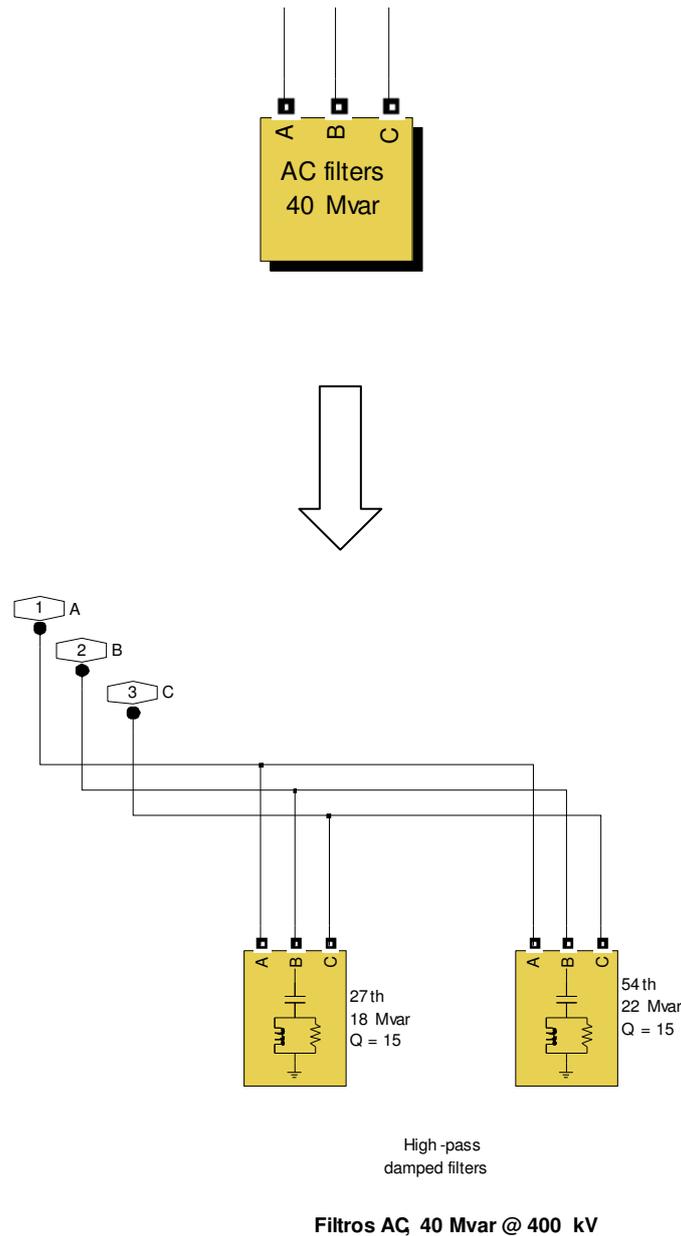


Figura 34 - Filtro CA para harmônicos gerados pelo PWM

A tensão nos terminais do conversor VSC apresenta altos níveis de harmônicos de ordem 27 e múltiplos, já que esta é a frequência da forma de onda da portadora da modulação PWM. A forma de onda da tensão e o espectro de frequência estão apresentados na Figura 35. Este gráfico de análise de harmônicos é gerado através da ferramenta *FFT Analysis* do Matlab.

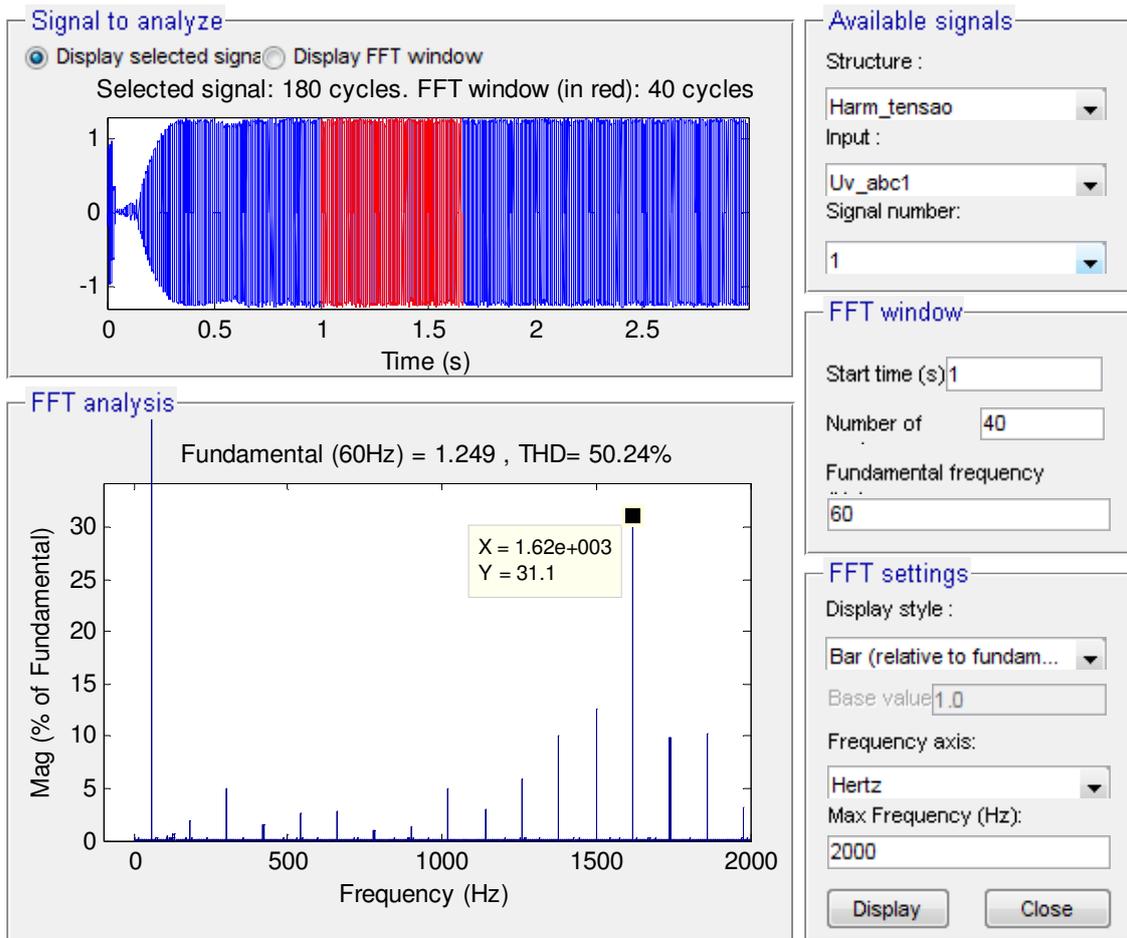


Figura 35 - Forma de onda da tensão e espectro de harmônicos – tensão não filtrada

A tensão nos terminais do transformador, após passagem pelo filtro sintonizado nos harmônicos 27 e 54 apresenta níveis de distorção harmônica toleráveis. Além disso pode-se confirmar que os harmônicos de ordem 27 e múltiplos não estão mais presentes. O espectro de harmônicos nos terminais do transformador está apresentado na Figura 36.

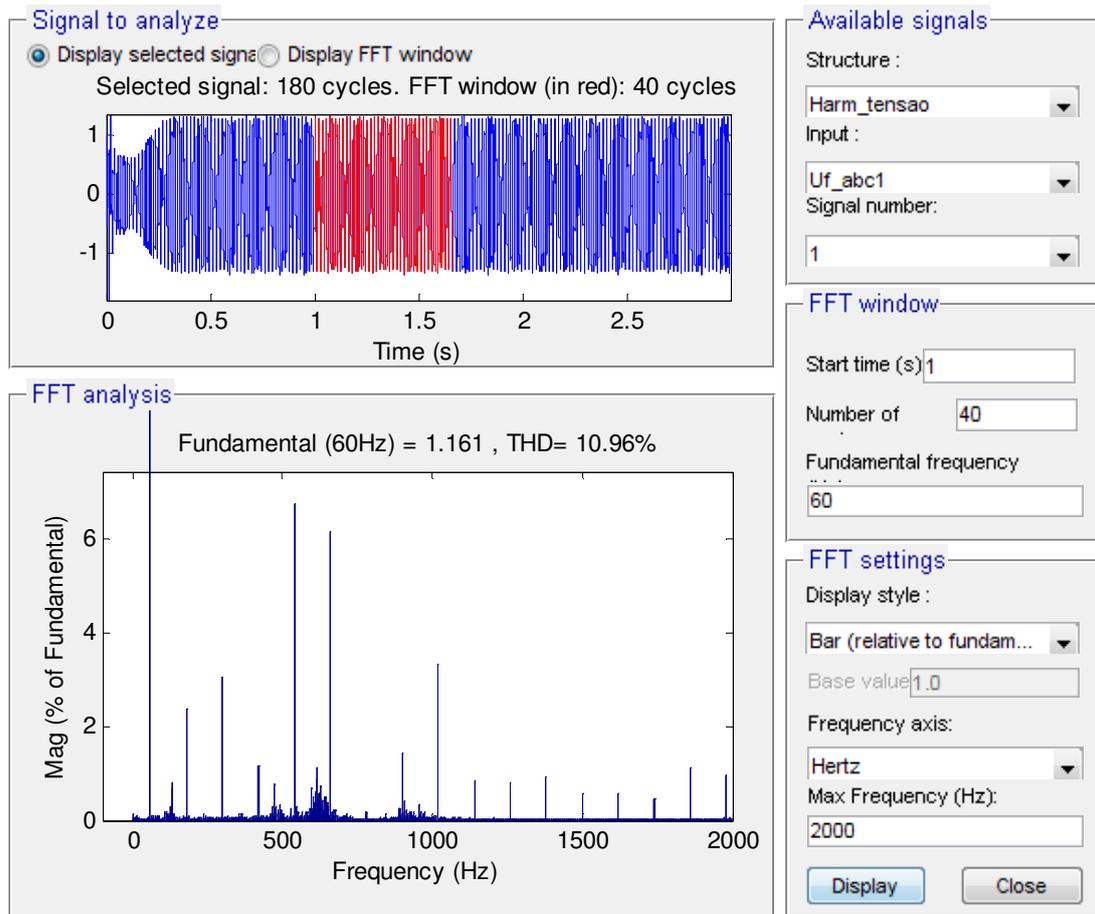


Figura 36 - Forma de onda da tensão e espectro de harmônicos – tensão filtrada

4.2.2. Funcionamento do sistema

O modo de operação normal de uma transmissão VSC HVDC é que cada estação conversora controle o seu fluxo de potência reativa independente da outra estação. Porém, o mesmo não ocorre com o controle da potência ativa. A potência ativa fluindo pela rede CC deve ser equilibrada, o que significa que a potência ativa suprida na rede CA do inversor deve ser igual à potência ativa injetada pela rede CA do retificador, mais as perdas no sistema. Como o fluxo de potência ativa depende da defasagem do ângulo entre tensão nos terminais CA do VSC e tensão CA de linha, qualquer diferença do fluxo entre as estações significa que a tensão CC no sistema vai aumentar ou

diminuir, pois a tensão CC também é controlada variando-se a defasagem entre essas duas tensões [9].

Para atingir o equilíbrio de potência ativa, uma das estações fará o controle da tensão CC, de tal forma que o fluxo de potência não se altere por variações na tensão no elo CC.

A estação que fará esse controle é a estação retificadora. O controle funciona da seguinte forma: a tensão CC na saída do retificador é medida e comparada com o valor de referência ao qual se deseja que a tensão seja constante. O erro dessa comparação deverá ser zero para garantir o valor constante da tensão CC. Para isso, um controlador PI (Proporcional-Integral) é utilizado para ajustar o valor do ângulo da tensão de referência para disparo do PWM, de forma que a defasagem entre a tensão nos terminais CA do VSC e tensão CA de linha mantenha o fluxo de potência ativa equilibrado.

Esse controle está representado na Figura 37, onde “delta” (δ) é o ângulo gerado pelo controle PI que será utilizado na geração da forma de onda a ser usada na modulação PWM.

Observação: Como todos os equipamentos utilizados nesta modelagem foram discretizados para melhorar o desempenho computacional da simulação, os controladores PI utilizados neste trabalho também foram discretizados utilizando o mesmo tempo de amostragem do controle (cem vezes menor do que o tempo de amostragem do sistema de potência).

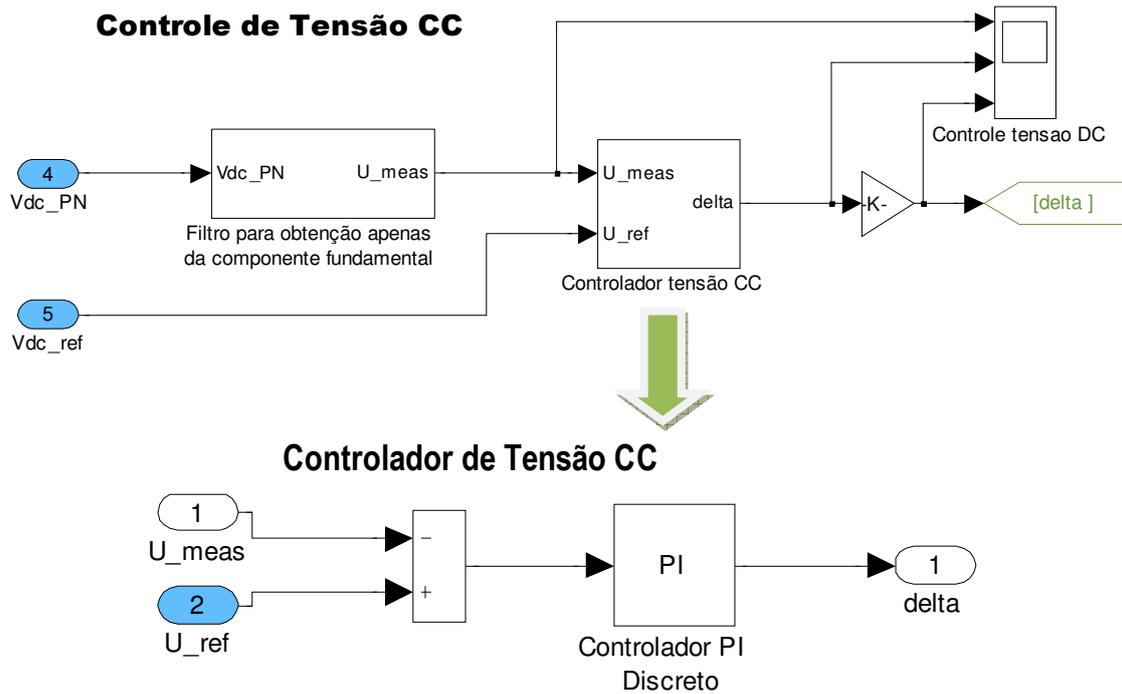


Figura 37 - Controle de Tensão CC

A estação inversora fará o controle da tensão CA nos terminais da carga. O objetivo desse controle é garantir que a carga receberá exatamente a potência demandada, já que ela foi modelada como uma impedância constante.

O controle funciona da seguinte forma: a tensão CA nos terminais da carga é medida e comparada com o valor de referência ao qual se deseja que a tensão CA seja constante. O erro dessa comparação deverá ser zero para garantir o valor desejado da tensão CA. Para isso, um controlador PI é utilizado para ajustar o valor da constante que irá modular o sinal PWM de forma que a saída do VSC seja exatamente a tensão desejada.

Esse controle está representado na Figura 38, onde “k_lambda” (k_λ) é o fator de relação de tensão que será multiplicado pela forma de onda a ser usada na modulação PWM.

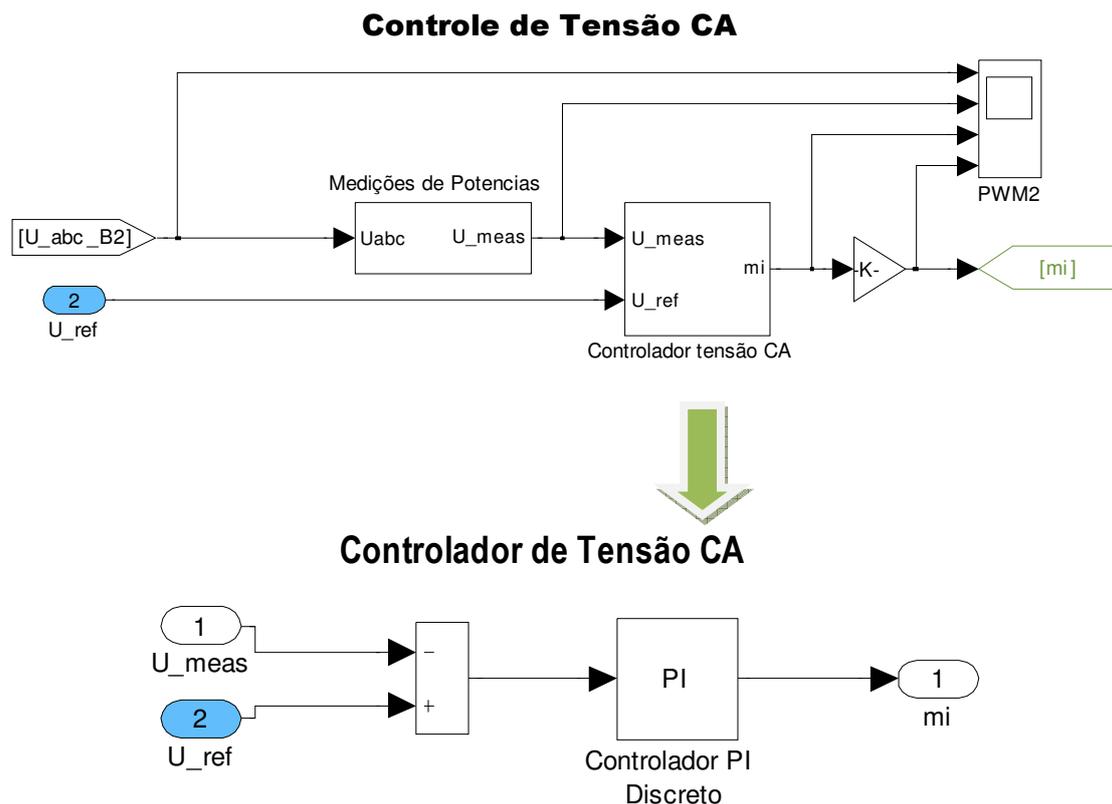


Figura 38 - Controle de Tensão CA

4.3. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA EM REGIME

PERMANENTE

4.3.1. Simulação

Para análise dos resultados em regime permanente, foi feita uma simulação com duração de 3 segundos. Tanto o controle da estação retificadora (Estação 1) quanto o controle da estação inversora são acionados em $t=0,02s$.

4.3.2. Resultados obtidos

Dos resultados obtidos e apresentados no intervalo da Figura 39 até a Figura 42, pode-se afirmar que após 1 segundo de inicialização da transmissão, o sistema entra em

regime permanente e atende a demanda de 500MW da carga instalada, mantendo as tensões CA no ponto de medição da carga e tensões CC com valores de 1 pu (desejado).

Para os gráficos apresentados nos resultados das análises deste capítulo, considerar a seguinte descrição de variáveis:

U_B1_meas – Valor eficaz da tensão em corrente alternada na Barra 1

Pativa_B1 – Potência ativa na Barra 1 (estação retificadora)

Preativa_B1 – Potência reativa na Barra 1 (estação retificadora)

Uabc_B1 – Tensão CA trifásica na Barra 1

Iabc_B1 – corrente trifásica na Barra 1

Vdc_PN – Tensão do elo de corrente contínua positiva e negativa

U_B2_meas – Valor eficaz da tensão em corrente alternada na Barra 2

Pativa_B2 – Potência ativa na Barra 2 (estação inversora)

Preativa_B2 – Potência reativa na Barra 2 (estação inversora)

Uabc_B2 – Tensão CA trifásica na Barra 2

Iabc_B2 – corrente trifásica na Barra 2

Os medidores de corrente das Barras 1 e 2 estão com o os terminais positivos de medição direcionado para os conversores de tensão. Portanto, na análise dos resultados, o valor positivo de potência ativa na estação 1 representa um fluxo de potência na direção do conversor, e o valor negativo da potência ativa na estação 2 representa um fluxo de potência em direção as cargas do sistema. Os valores base do sistema são:

- Potência base = 500MW
- Tensão Base do sistema CA de entrada = 138kV
- Tensão Base do sistema CC = 400kV
- Tensão Base do sistema CA da carga = 138kV
- Tensão CA antes dos conversores (para as duas estações) = 400kV

- Estação 1

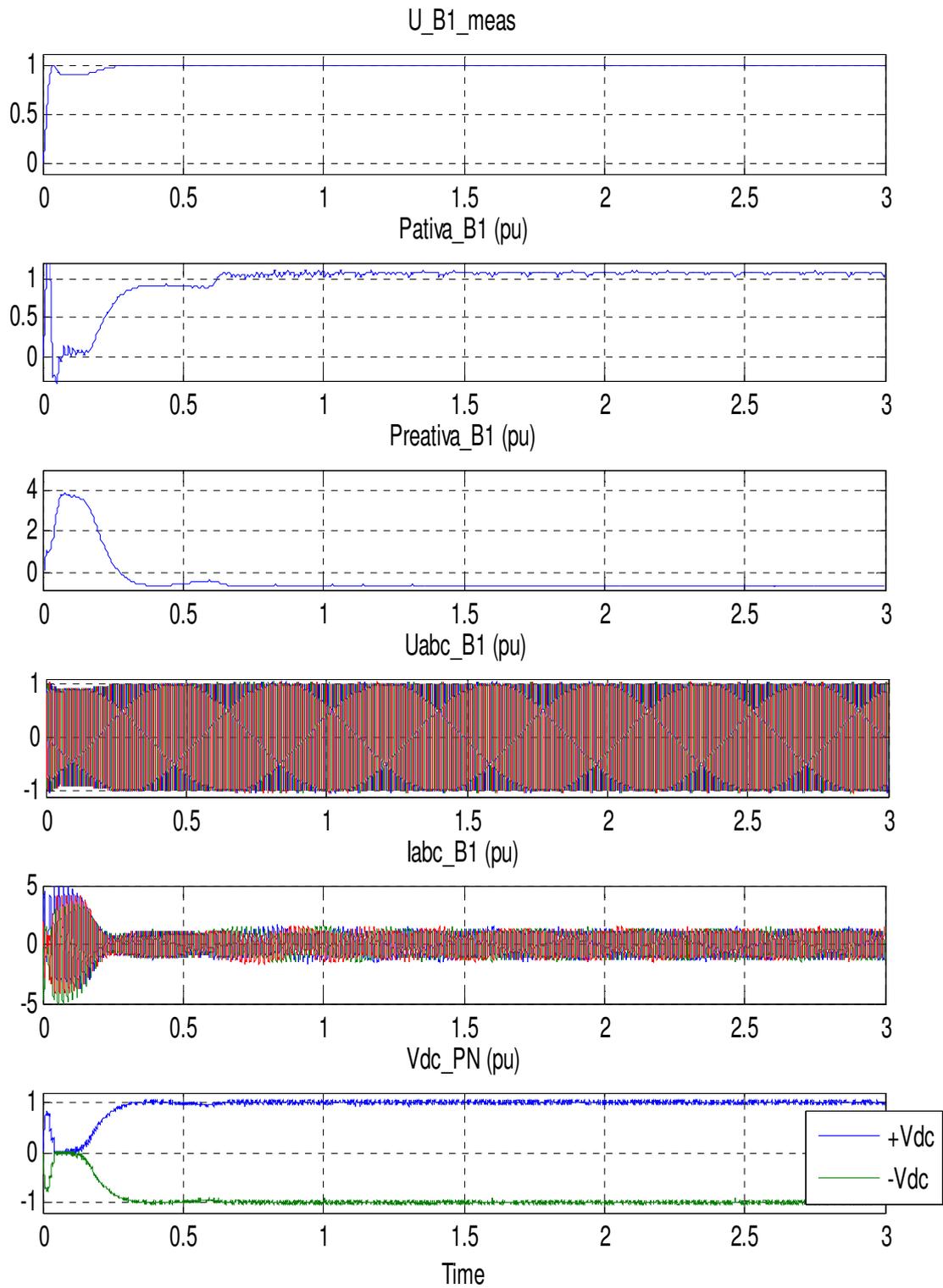


Figura 39 - Medições na Estação Retificadora

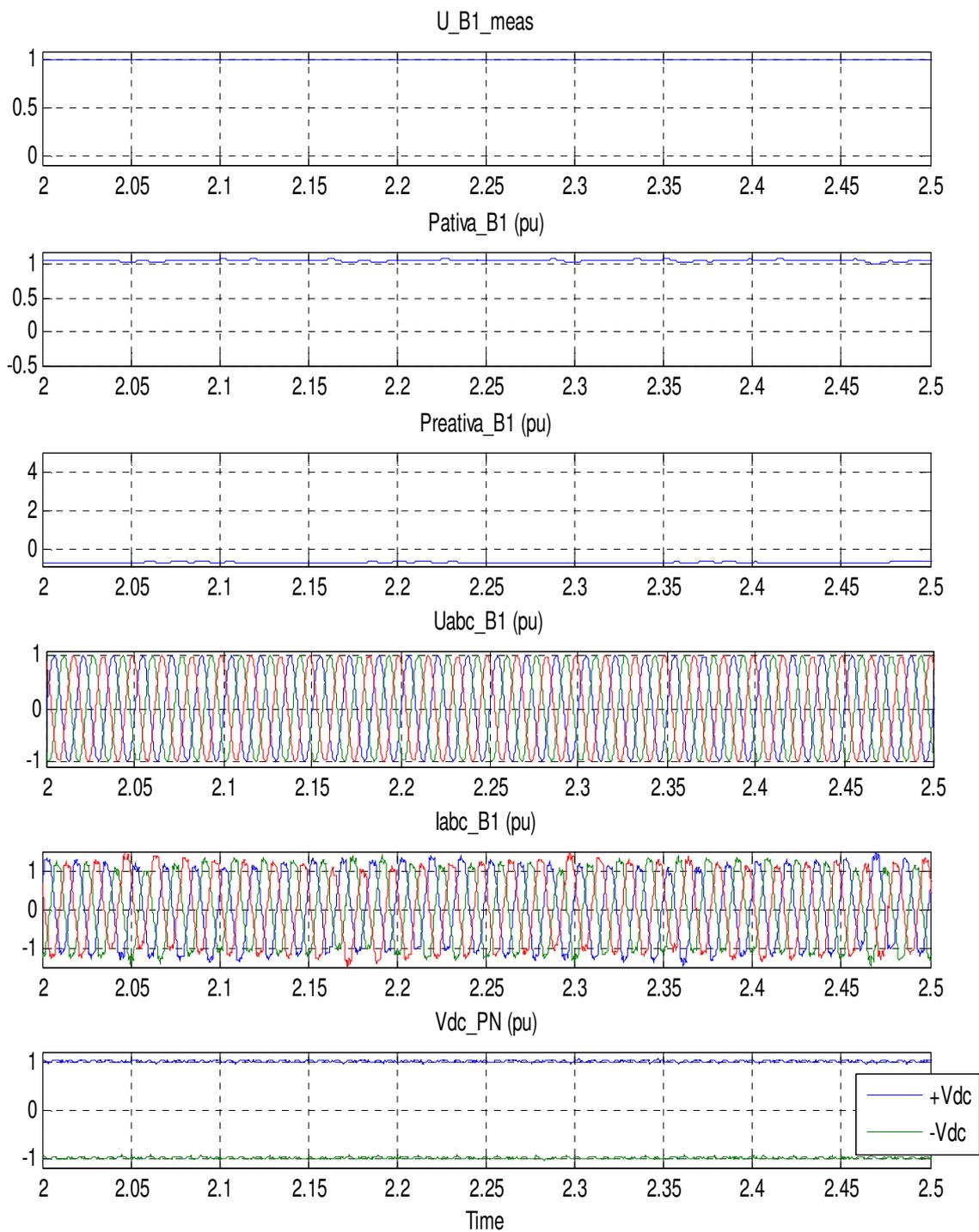


Figura 40 - Medições na Estação Retificadora – intervalo de 2 a 2,5 segundos

- Estação 2

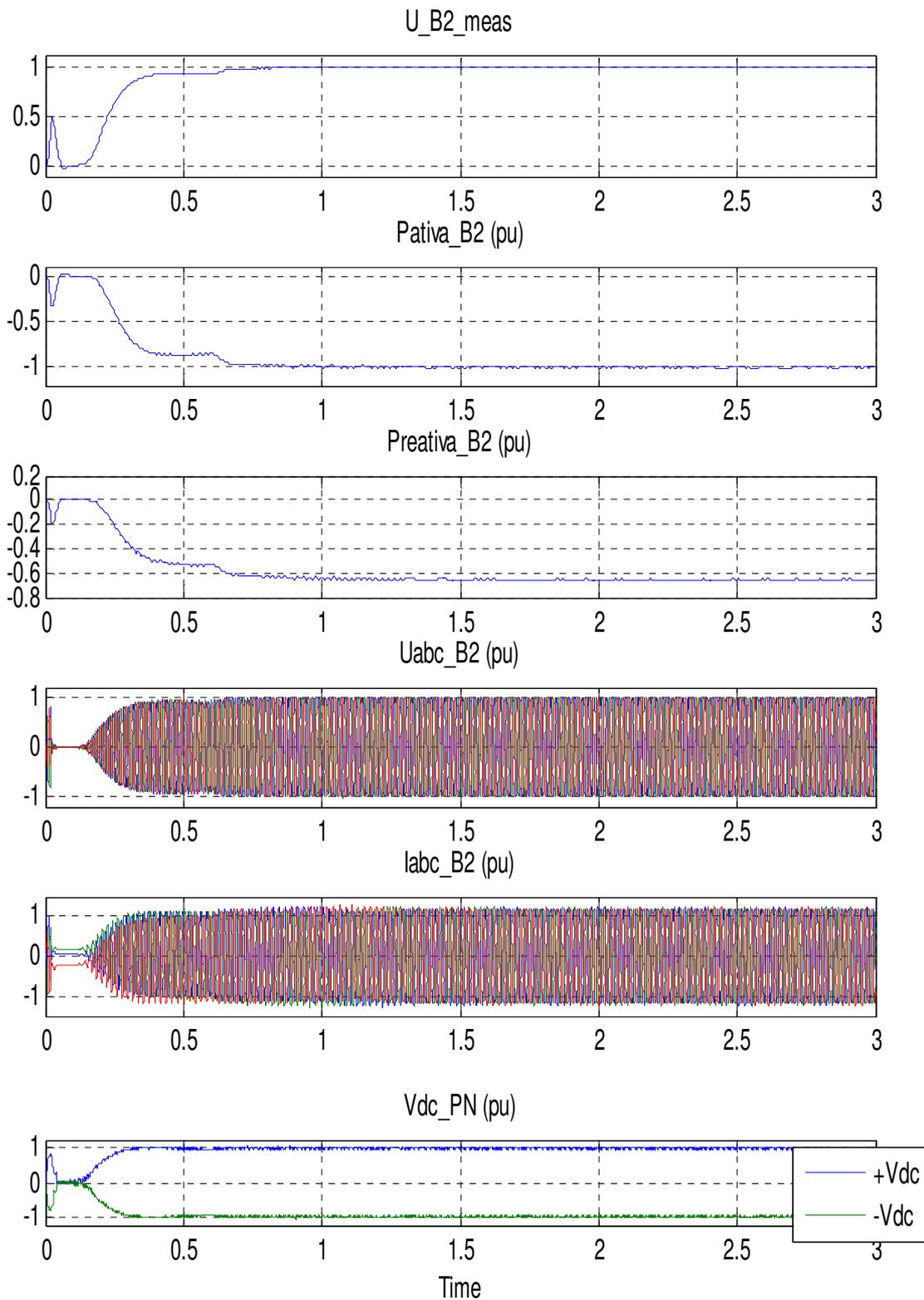


Figura 41 - Medições na Estação Inversora

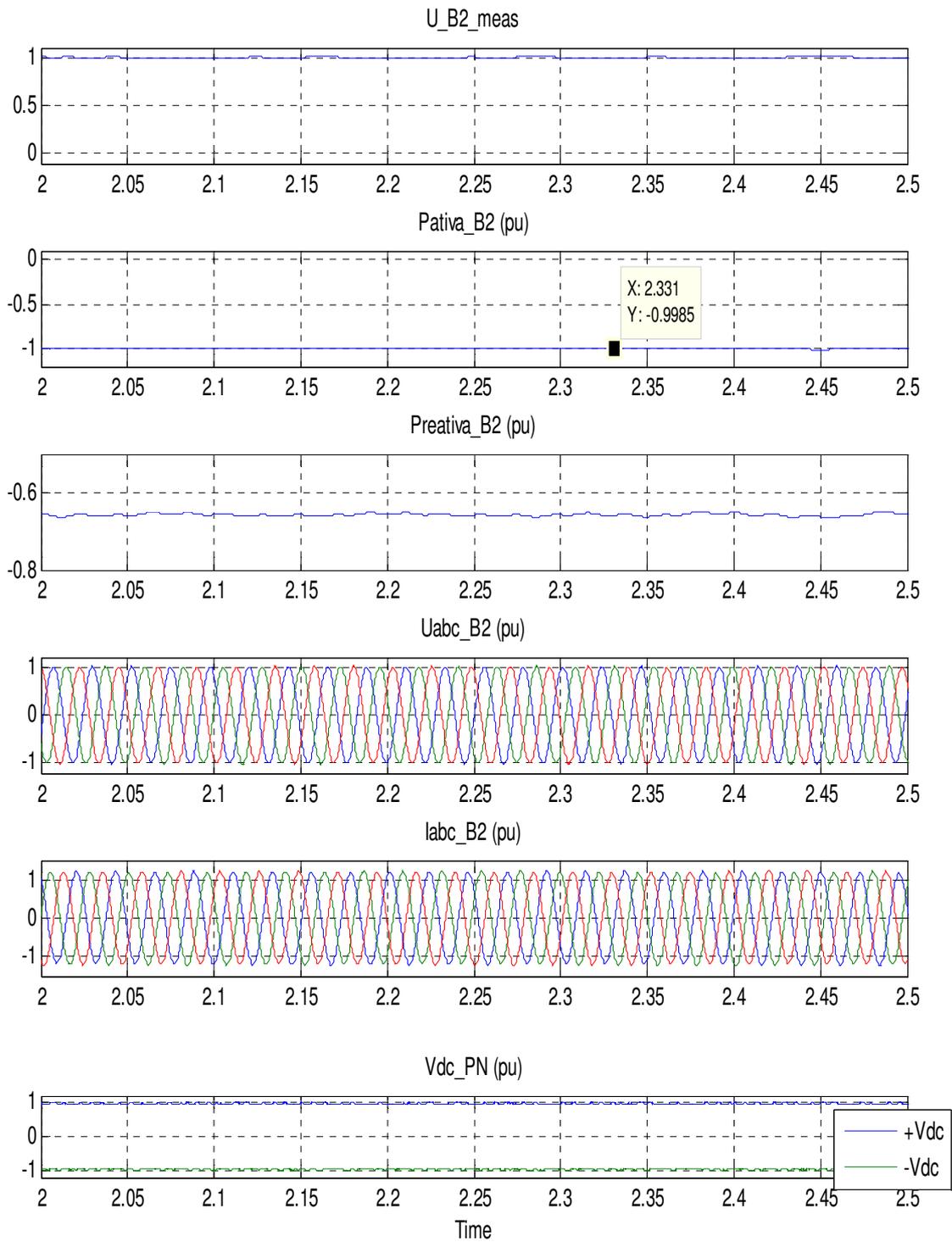


Figura 42 - Medições na Estação Inversora – intervalo de 2 a 2,5 segundos

4.4. ANÁLISE DE PERTURBAÇÕES NO SISTEMA

Para esta análise serão simulados alguns tipos de perturbações, tais como aplicação de um curto-circuito trifásico, perda de uma ou duas plataformas, partida de motor e queda de tensão na geração de energia.

Todas essas simulações usarão o caso base para análise e o cabo modelado conforme descrito no item 4.3.

4.4.1. Queda de tensão na fonte alimentadora

Para essa simulação, foi aplicada uma queda de tensão (variação momentânea da tensão) trifásica de 10% no instante $t = 1,5s$, mantendo esse cenário por 0,7 segundos. Esse ajuste foi feito na fonte de tensão controlada.

Dos resultados apresentados na Figura 43 e na Figura 44, pode-se perceber que o controle projetado é robusto e consegue manter a tensão CC no elo de corrente contínua no valor de 1 pu, após leve perturbação. O mesmo pode ser afirmado para o controle da tensão CA nos terminais da carga. A tensão é mantida em 1 pu e a potência demandada pela carga não sente a perturbação da geração.

Pode-se dizer que, devido à dinâmica e rapidez de resposta dos controles de um sistema de transmissão VSC HVDC, o sistema apresenta uma boa estabilidade para perturbações de quedas de geração devido a uma instabilidade no sistema elétrico alimentador. Isso faz com que o sistema não seja tão susceptível a sistemas fracos de alimentação, e garante uma confiabilidade maior.

- Estação 1

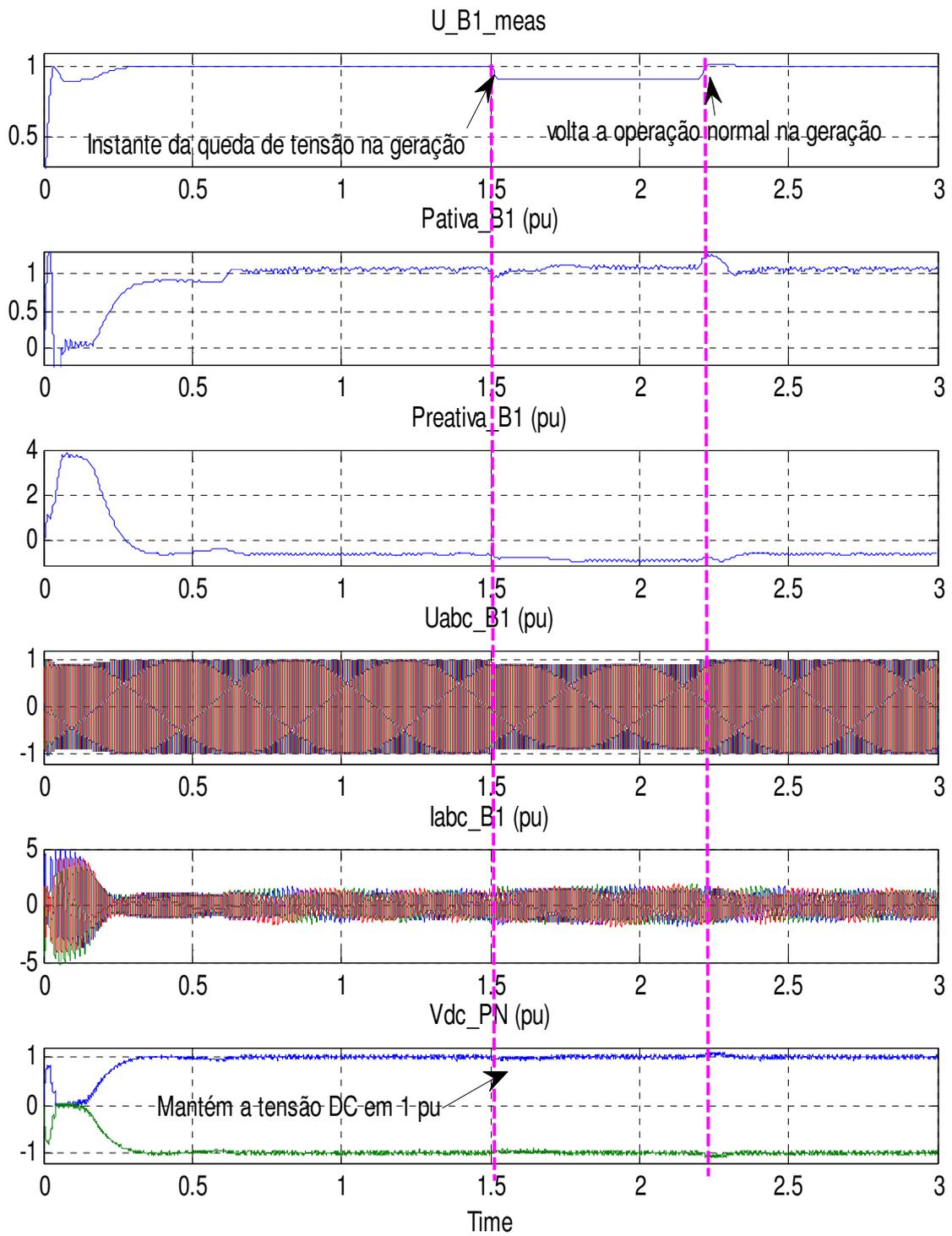


Figura 43 - Medições na Estação Retificadora

- Estação 2

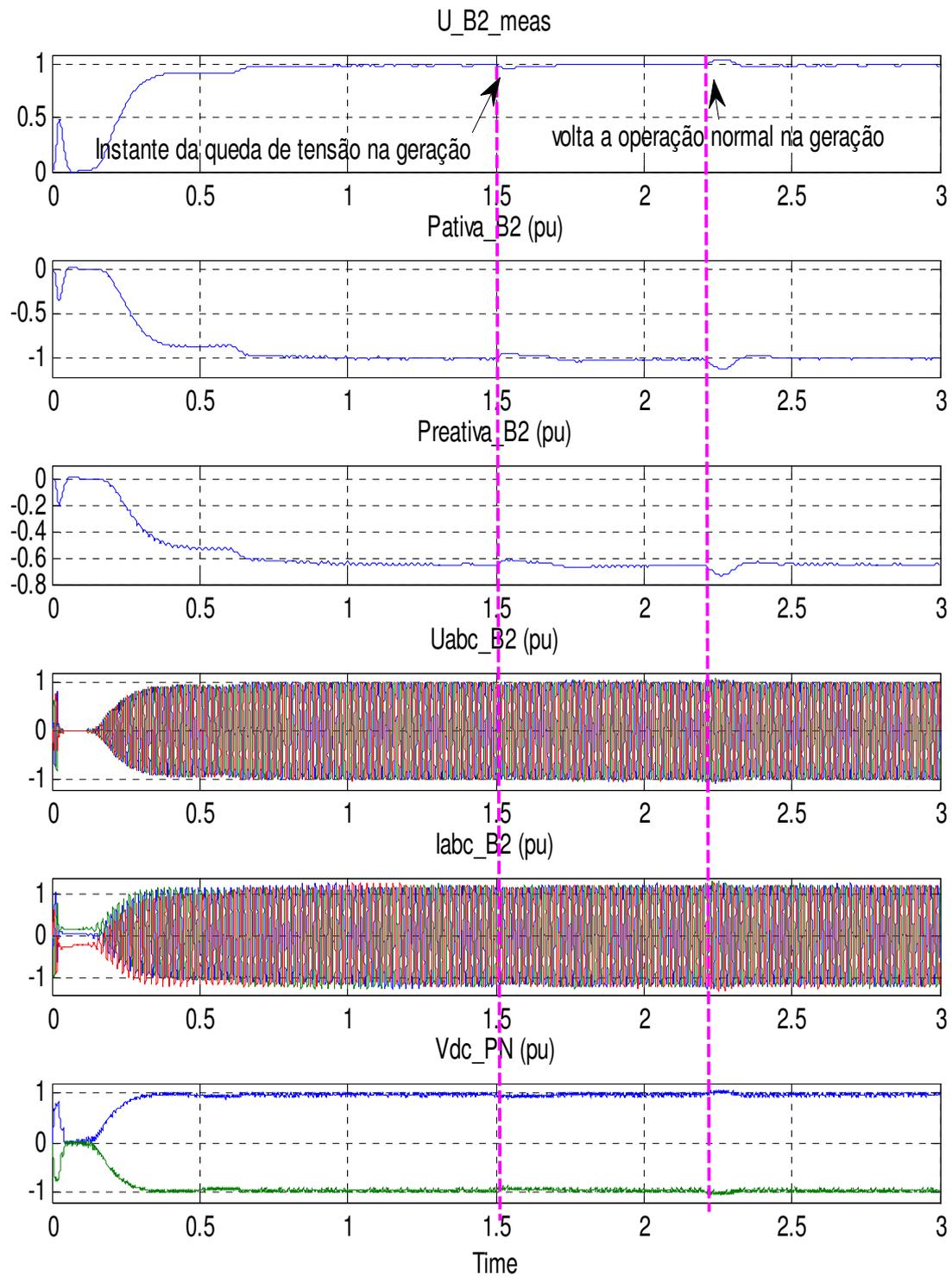


Figura 44 - Medições na Estação Inversora

4.4.2. Perda de duas plataformas de Petróleo

Nesse cenário, foi simulada a perda ou desligamento de duas plataformas de petróleo simultaneamente no instante $t = 1$ s. Após esse período, uma plataforma tem previsão de retorno após 1 segundo, e a segunda plataforma só entra novamente em operação 1,5 segundos depois.

Os resultados da Figura 45 e da Figura 46 mostram o comportamento do sistema para esse tipo de perturbação.

No instante $t = 1$ s, foi forçada uma queda de 40% na potência demandada, para analisar como o sistema se comporta com uma perturbação desse porte. Percebe-se que o erro medido pelos controladores é muito grande e aumentou de forma instantânea. Mesmo com um pequeno *overshoot* encontrado, pode-se dizer que o controle do inversor conseguiu levar o valor da tensão CA para 1 pu em 0,4 segundos, da mesma forma que o controle do retificador fez a tensão CC voltar ao valor desejado de 1 pu em 0,4 segundos.

No instante $t = 2$ s, uma plataforma volta a operar e o controle consegue controlar as tensões CA e CC constantes em 1pu (menos de 5% de perturbação).

No instante $t = 2,5$ s, a segunda plataforma volta a entrar em operação, e o controle mais uma vez atua para fazer as tensões CA e CC voltarem ao valor de referência desejado (1 pu). A perturbação parece ser um pouco maior do que no instante 1,5s, e isso se deve ao fato de que no instante 2,5s os controladores ainda estavam atuando para estabilizar o sistema da perturbação anterior.

Pode-se afirmar que o controlador agiu de forma rápida a estabilizar as tensões CA e CC nos níveis desejados, mesmo com uma perturbação dessa magnitude. Isso que dizer que as demais plataformas alimentadas por esse sistema não sofreram grandes alterações e mantiveram seu funcionamento em níveis normais de operação.

- Estação 1

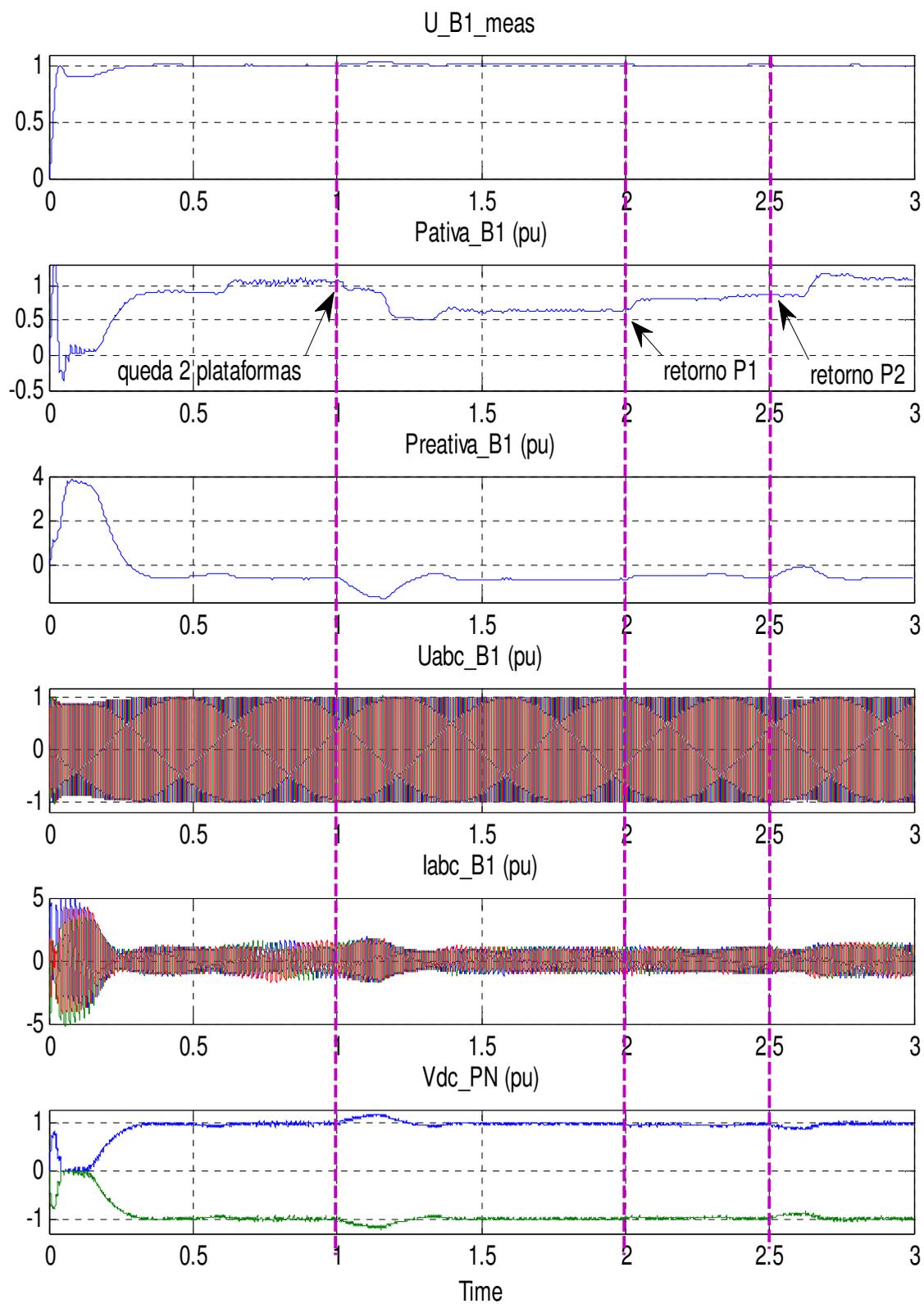


Figura 45 - Medições na Estação Retificadora

- Estação 2

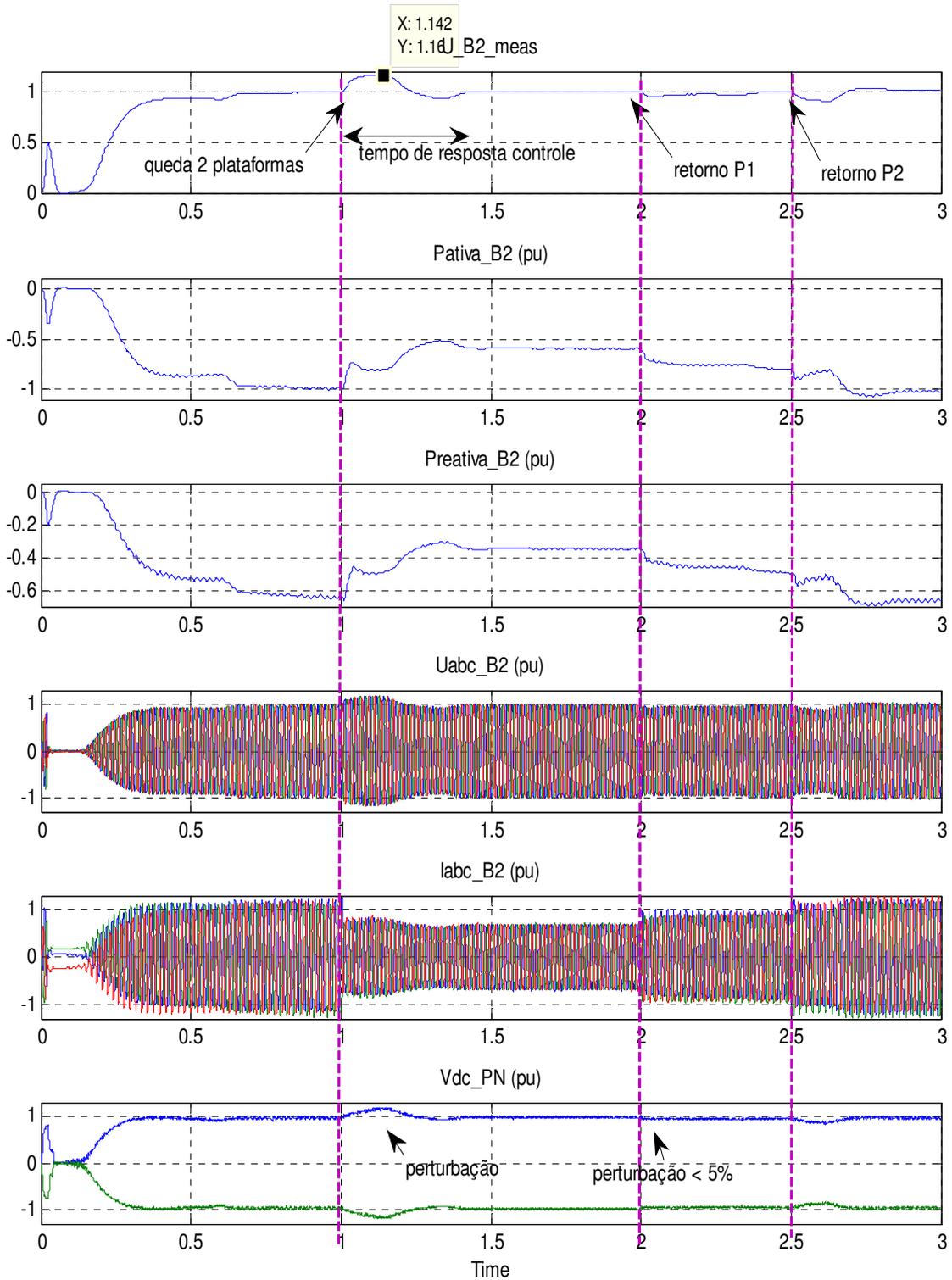


Figura 46 - Medições na Estação Inversora

4.4.3. Partida de um grande motor

Conforme apresentada a modelagem da carga no item 4.2.1, no instante $t = 1,5$ s será dada a partida de um grande motor da plataforma P1, de potência 15MW, com fator de potência de partida de 0,2. A Figura 47 e a Figura 48 mostram o comportamento do sistema para essa perturbação, cuja duração é de 1 segundo. A modelagem como carga RL foi feita para estudar o efeito inicial da partida do motor, e quais são suas consequências no sistema CA de entrada.

No instante de início da perturbação ocorre afundamento de tensão de 0,1 pu nos terminais da carga, mas em menos de 0,6 segundos o controle atua de forma a levar a tensão a 1pu. No instante $t = 2,5$ segundos, a tensão CA era 1pu e sofre mais uma variação na tensão, visto que o controle já tinha estabilizado e volta novamente a trabalhar para fazer a tensão voltar a 1 pu. Mais uma vez, pode-se afirmar que o controle de tensão CA está atuando de uma forma satisfatória.

A potência ativa sofre uma variação de 20% devido a pequena queda na tensão, mas retorna ao seu valor inicial depois de 1 segundo. A potência reativa é que sofre a maior alteração, conforme já era esperado. Com a partida de um grande motor, a corrente de partida desse eleva bastante e o fator de potência diminui significativamente. Pode-se perceber na simulação que a potência reativa aumentou significativamente (aumento de 30%) e a corrente demandada pela carga também aumentou (60% acima), ambos voltando ao normal após a normalização do sistema (fim da partida e funcionamento em regime do motor).

Nota-se que a potência reativa da estação retificadora praticamente não altera de valor, comprovando que os controles de potência reativa em cada estação são independentes. A tensão CC praticamente não sofreu variações. Seu controle manteve o nível CC desejado em todo o tempo simulado.

- Estação 1

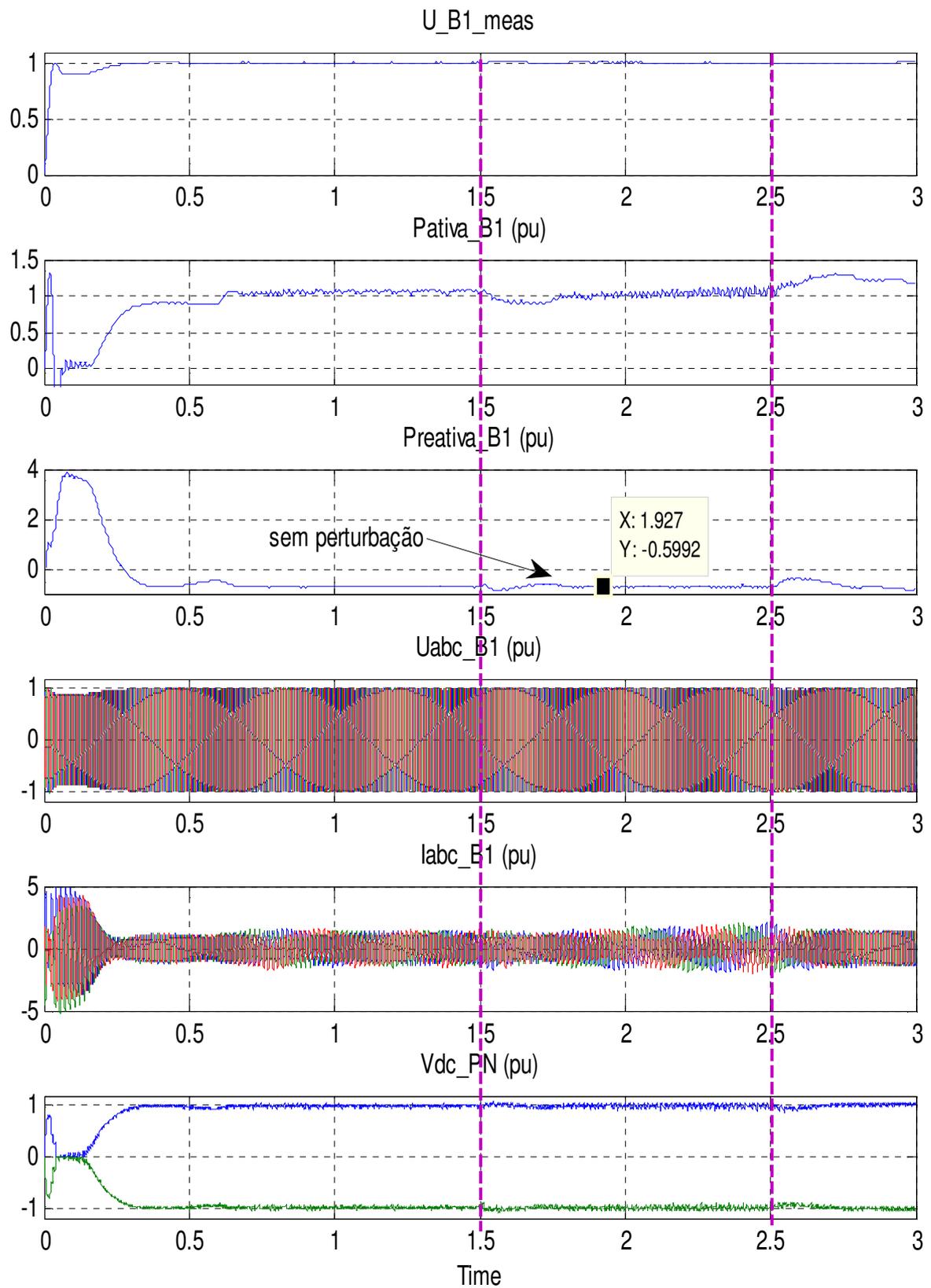


Figura 47 - Medições na Estação Retificadora

- Estação 2

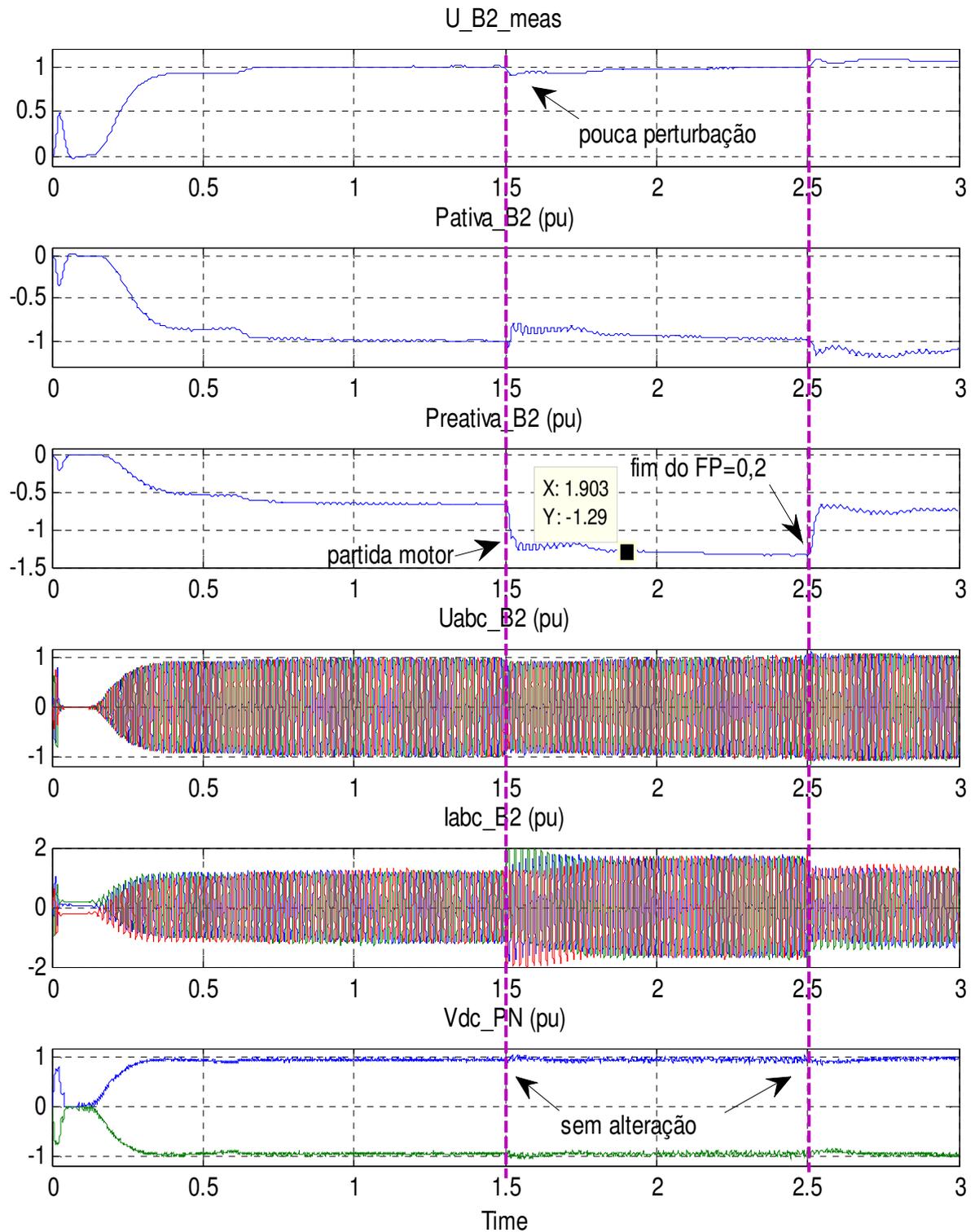


Figura 48 - Medições na Estação Inversora

4.4.4. Curto-Circuito Trifásico na carga

Nesse cenário de perturbação será simulado um curto-circuito trifásico nos terminais da carga no instante de tempo de $t = 1,5$ segundos, com duração de 100ms.

A Figura 49 e a Figura 50 mostram o comportamento do sistema após aplicação do defeito.

Após o período de extinção do curto-circuito, pode-se perceber que em menos de 1 segundo o sistema volta às suas condições normais de operação.

A corrente de curto nos terminais da carga não passou de 10 pu (aproximadamente 20kA), e a estação retificadora sentiu essa perturbação de forma mais amenizada (em torno de 2 pu da corrente).

O que mais chama atenção nesse cenário é a interação entre o evento de curto circuito do lado inversor e a perturbação sentida do lado do retificador. A tensão CC sofre apenas pequenas variações de tensão, fazendo com que o sistema tenha um tempo de resposta rápido no momento em que o defeito é eliminado.

O reator do conversor contribui para a limitação do curto e conseqüentemente deixa o sistema mais tolerante a esses tipos de falhas.

No momento do curto, pode-se perceber na Figura 49 que a estação retificadora continua fornecendo potência ativa ao sistema. Como os controles das estações forçam as tensões para se manter em 1pu, o sistema CA de entrada mantém o fluxo de potência alimentando o curto. Em um sistema real, dispositivos de proteção (ou bloqueio das chaves dos conversores) seriam atuados para eliminar esse defeito, protegendo os dispositivos eletrônicos e equipamentos. Nesse trabalho, não foram modelados os dispositivos de proteção ou o controle para o bloqueio das chaves dos conversores.

- Estação 1

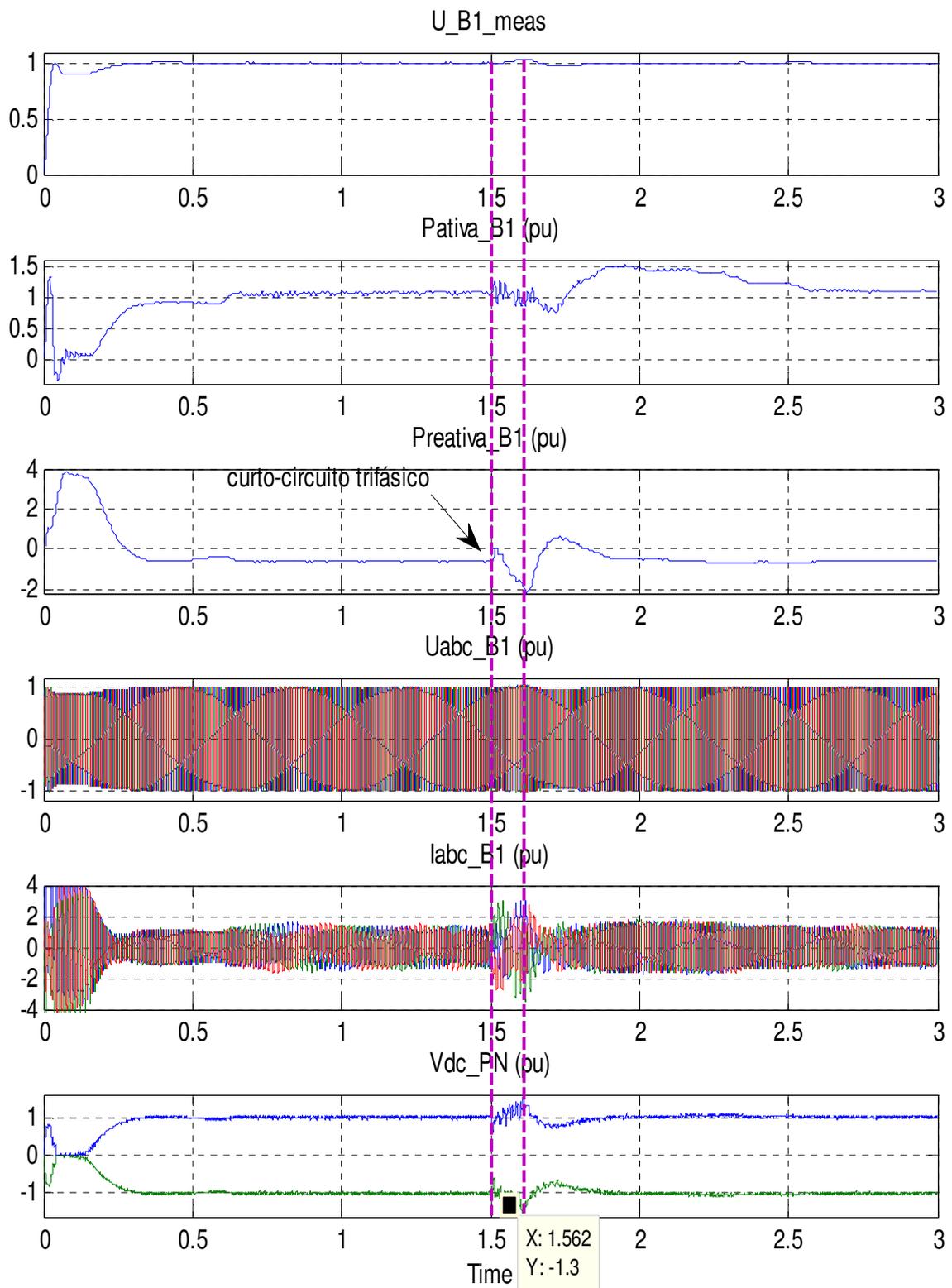


Figura 49 - Medições na Estação Retificadora

- Estação 2

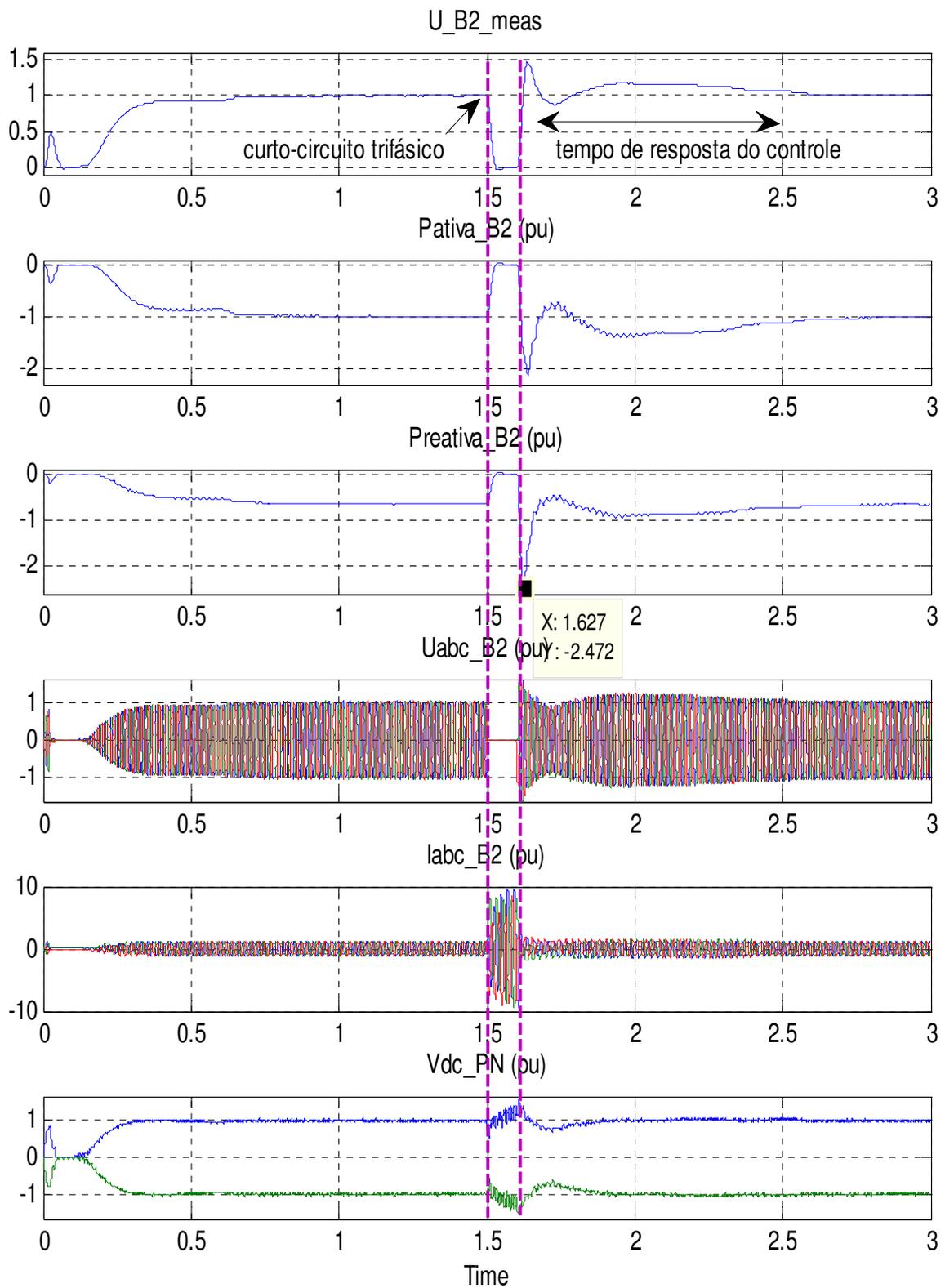


Figura 50 - Medições na Estação Inversora

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Com o novo cenário de descobertas de poços de petróleo cada vez mais distantes da costa marítima, a necessidade de novas soluções e tecnologias para a produção do petróleo se tornou tema ênfase de muitas pesquisas em diversas áreas da engenharia, inclusive na área de suprimento de energia elétrica.

De forma a explorar esse tema e apresentar uma solução, que, entre outras vantagens, pode minimizar os problemas de espaços nas plataformas para geração de energia, este trabalho analisa a geração de energia em terra e transmissão através de um sistema confiável e estável através do VSC HVDC.

Esse sistema apresentou uma operação em perfeito funcionamento, atendendo aos requisitos propostos de alimentação de cinco plataformas de petróleo com uma distância considerável da costa marítima.

De forma a avaliar a estabilidade do sistema e se seu controle atuaria de forma satisfatória, o sistema de transmissão desse trabalho foi testado para as seguintes perturbações:

- Queda de tensão na fonte alimentadora
- Parada de operação de algumas plataformas
- Partida de um grande motor e as conseqüências no sistema
- Curto-circuito trifásico na carga

De uma forma geral, pôde-se observar que o sistema de transmissão em corrente contínua possui uma rápida resposta a essas perturbações e seu funcionamento em regime permanente atende aos requisitos propostos nesse trabalho.

Dessa forma, a solução proposta para alimentação de centro de cargas distantes da rede elétrica atende e é teoricamente viável.

A partir dessa análise, pode-se abrir oportunidades de análises técnico-econômicas e dificuldades tecnológicas que precisam ser superadas para avaliar a viabilidade da aplicação dessa solução em um futuro próximo.

A solução apresentada nessa dissertação ainda pode ser modificada ou combinada com outras soluções elétricas, a fim de melhorar a eficiência e minimizar os custos de um sistema de produção de petróleo. O uso do gás excedente das plataformas para geração de energia a ser transmitida para terra é um exemplo de uma outra solução para o uso do sistema proposto.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Como um tema que está em relevância nos dias de hoje, a transmissão em corrente contínua em alta tensão possui muitas áreas novas e que precisam aprofundar mais os conhecimentos teóricos e desenvolvimento de novos produtos. Como sugestão de estudos que não foram abordados nessa dissertação, pode-se citar:

1. Análise de esforços mecânicos e exequibilidade de lançamento de cabos HVDC submarino a profundidades de 2000m.
2. Análise de viabilidade econômica do sistema proposto nessa dissertação.
3. Análise de confiabilidade para um sistema HVDC submarino que alimente mais do que 5 plataformas de petróleo.
4. Proposição de novos controles e tecnologias dos VSCs a fim de melhorar o desempenho do sistema de transmissão, como por exemplo o VSC CMM (Conversor Multinível Modular)

5. Análises de perturbações com o esquema inverso de alimentação proposto: geração em mar e transmissão para terra, analisando o comportamento dinâmico e transitório dos diversos geradores. O objetivo principal desse trabalho poderia ser a análise técnico-econômica para solução de consumo do gás descartado das plataformas e transformação destes em fonte de energia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABB, *East West Interconnector - The grids of Ireland and Wales will be connected by a 500 MW ±200 kV HVDC Light® transmission system*. Disponível em:
<<http://www.abb.com.mx/industries/ap/db0003db004333/a60fb5e59414e817c125774a002f365b.aspx>> Acesso em: 3 jul 2011
- [2] East West Interconnector. Disponível em
<<http://www.eirgrideastwestinterconnector.ie>>. Acesso em 3 jul 2011.
- [3] ABB, *BorWin1*. Disponível em:
<<http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/a8e328849ac67b66c125774a00243367.aspx>>. Acesso em 3 jul 2011.
- [4] ABB, *Estlink*. Disponível em:
<<http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/ce9eeddef52ff677c125774a002e109b.aspx>>. Acesso em 3 jul 2011.
- [5] Fingrid, *EstLink 2 – second high-voltage direct current link between Finland and Estonia*. Disponível em:
http://www.fingrid.fi/portal/in_english/transmission_lines_and_maintenance/international_projects/estlink_2/>. Acesso em 4 jul 2011
- [6] ABB, *Power from shore: ABB technologies at Troll A platform*. Disponível em:
<<http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/8c3aa401373d6f9cc125774a0049a015.aspx>>. Acesso em 4 jul 2011
- [7] SIEMENS, *HVDC PLUS (VSC Technology) - References*. Disponível em
<<http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/hvdc/hvdc-plus/references.htm>>. Acesso em 4 jul 2011.
- [8] TENNET, *Projekt SylWin1: 160 Kilometer langes Seekabel zum Anschluss von Windparks vor Sylt*. Disponível em:
<http://www.tennetso.de/pages/tennetso_de/Aufgaben/Offshore/Unsere_Projekte/Sylwin1/index.htm>. Acesso em 4 jul 2011.
- [9] CIGRE - Working Group B4.37, *VSC Transmission*. Seção 269. International Conference of Large High-Voltage Electric Systems, 2005.
- [10] EKSTRÖM, A., *High Power Electronics HVDC and SVC*. Stockholm, The Royal Institute of Technology, 1990. Disponível em:

- <[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/bcd2f0a98218a66bc1257472004b83a8/\\$file/pow0038%20rev5.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/bcd2f0a98218a66bc1257472004b83a8/$file/pow0038%20rev5.pdf)> . Acesso em: 20 mar. 2011.
- [11] MOHAN, UNDELAND, ROBBINS. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 2 ed. New York, 1995.
- [12] ABB, It's time to connect - Technical description of HVDC Light technology. Disponível em:
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/bcd2f0a98218a66bc1257472004b83a8/\\$file/pow0038%20rev5.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/bcd2f0a98218a66bc1257472004b83a8/$file/pow0038%20rev5.pdf)> . Acesso em 25 jul 2011
- [13] SimPowerSystems™, *VSC-Based HVDC Link*. Disponível através do software Matlab®.
- [14] E-FISICA, *Variação da resistência com a temperatura* .Disponível em:
<http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/corrente/var_resist_temperatura>.
Acesso em 28 jul 2011.
- [15] ABB, “HVDC Light” Para transmissão de energia elétrica num mercado desregulamentado. *XV EXPO-SNPTEE Conference*. Foz do Iguaçu-PN, Brasil, 1999.
- [16] CARVALHAL, R. P., *Análise De Sistemas De Transmissão Em Tensão Contínua Para Alimentação De Cargas Isoladas*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [17] HÖRLE, N., MAELAND, A., “Electrical supply for offshore installations made possible by use of VSC technology”. *Cigré 2002 Conference*, Paris, France, Aug 2002.
- [18] JOHANSSON, S.G., CARLSSON, L. and RUSSBERG, G., “Explore the power of HVDC Light – a web based system interaction tutorial”, *Proc. IEEE Power Systems Conference and Exposition*, 2004, n 2, p. 839-842.
- [19] JONES, P., STENDIUS, L., “The Challenges of Offshore Power System Construction - Troll A, Electrical Power Delivered Successfully to an Oil and Gas Platform in the North Sea”. *EWEC*, Athens, Greece, 2006.
- [20] SIEMENS, “Power Electronics in Transmission Systems (HVDC, FACTS) and Wind Power”. Siemens PTI. Schenectady, New York, 2009
- [21] RASHID, M. H., “Power Electronics Handbook”, Academic Press. London, UK, 2001.

ANEXO 1 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE UM CONDUTOR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Um condutor não possui resistência constante, pois ela varia de acordo com a temperatura. Para condutores metálicos, quando a temperatura aumenta, a resistência também aumenta, portanto é um fator que deve ser levado em consideração para cálculo de dimensionamento dos cabos elétricos [14].

A variação da resistência em função da temperatura pode ser representada através da Figura 51.

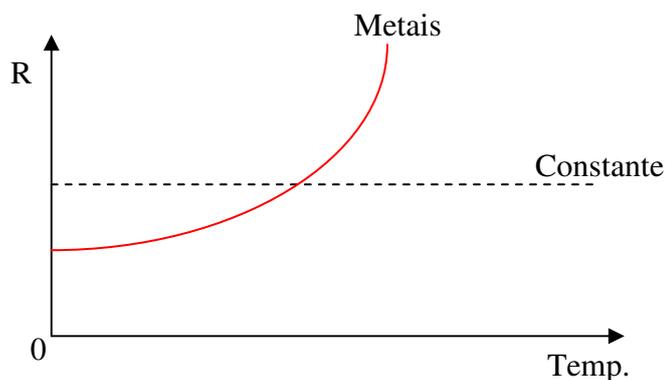


Figura 51 - Variação da resistência em função da temperatura

Apesar da variação ser não linear, para o estudo algébrico da variação, uma linearização é feita de forma que a equação que rege esse comportamento, obtida de forma empírica, e é dada por:

$$R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

Onde:

R_0 é a resistência do condutor à temperatura t_0

R é a resistência do condutor à temperatura t

O coeficiente α depende do material.

Obs.: de forma análoga, pode-se obter essa mesma equação para a resistividade em função da temperatura, sabendo-se que:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Alguns exemplos de valores da resistividade e do coeficiente de temperatura são dados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resistividade a 20°C

Material	$\rho(\text{Ohms.m})$	$\rho(\text{Ohms.mm}^2/\text{m})$	α
Alumínio	$2,8 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-2}$	0,0036
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-2}$	0,0040
Prata	$1,6 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-2}$	0,0040

Exemplos de dados de resistência de um condutor de cobre a dadas temperaturas:

Em um condutor de 400mm², tem-se que para $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $R_0 = 0,0470 \Omega/\text{Km}$. E sabe-se que $\alpha = 0,0040$

- Para $t = 28^\circ\text{C}$

$$R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

$$R = 0,0470[1 + 0,0040(28 - 20)] = 0,0485 \Omega/\text{Km}$$

- Para $t = 45^\circ\text{C}$

$$R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

$$R = 0,0470[1 + 0,0040(40 - 20)] = 0,0508 \Omega/\text{Km}$$

- Para $t = 10^\circ\text{C}$

$$R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

$$R = 0,0470[1 + 0,0040(10 - 20)] = 0,04512 \Omega/\text{Km}$$

- Para $t = 70^\circ\text{C}$

$$R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

$$R = 0,0470[1 + 0,0040(70 - 20)] = 0,0562 \Omega/\text{Km}$$

ANEXO 2 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

Neste anexo serão apresentados os parâmetros que foram ajustados no programa simulado.

A2.1. Sistema CA de Entrada

Sistema CA 1

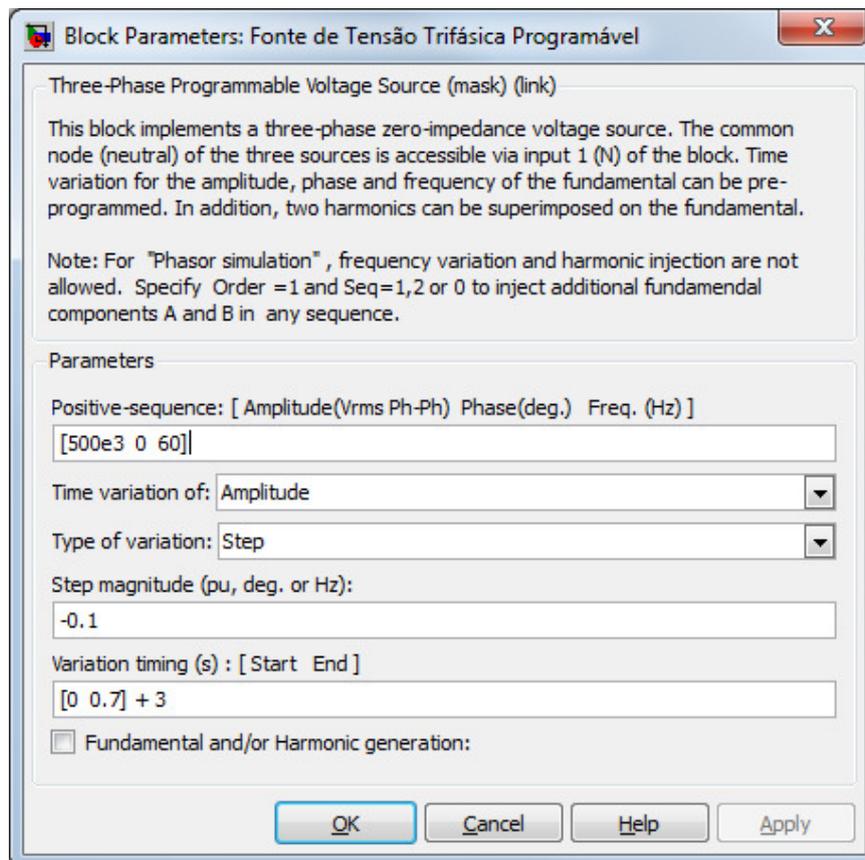
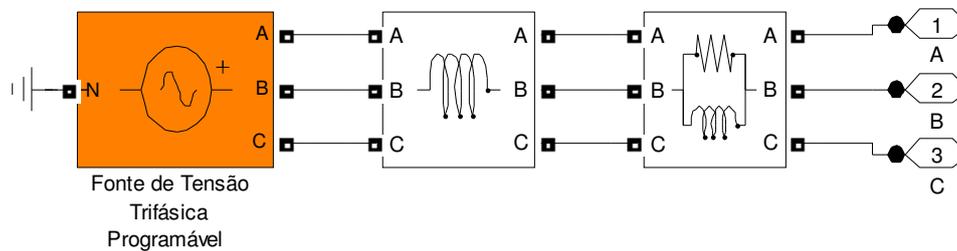


Figura 52 - Parâmetros – fonte de tensão trifásica

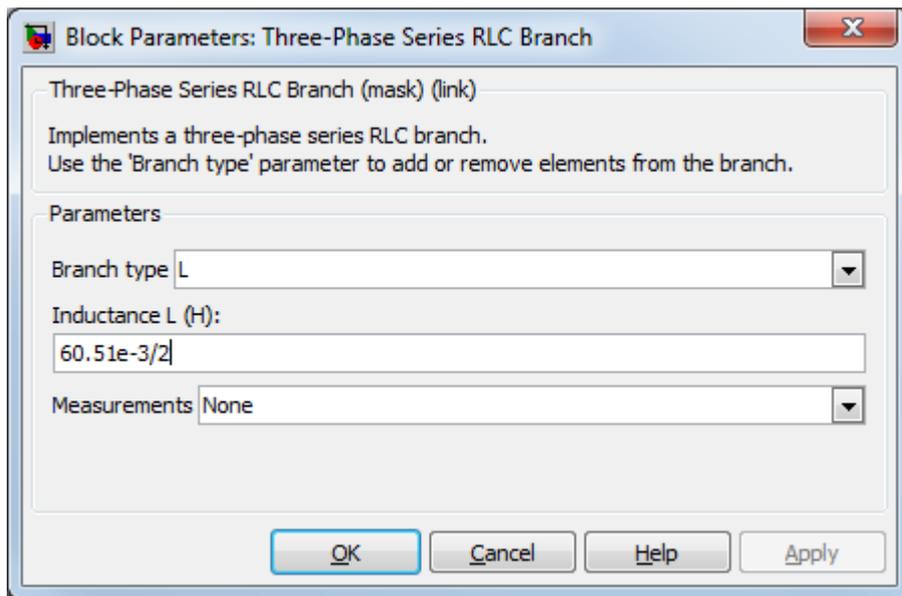


Figura 53 - Parâmetros – Indutor da fonte de tensão

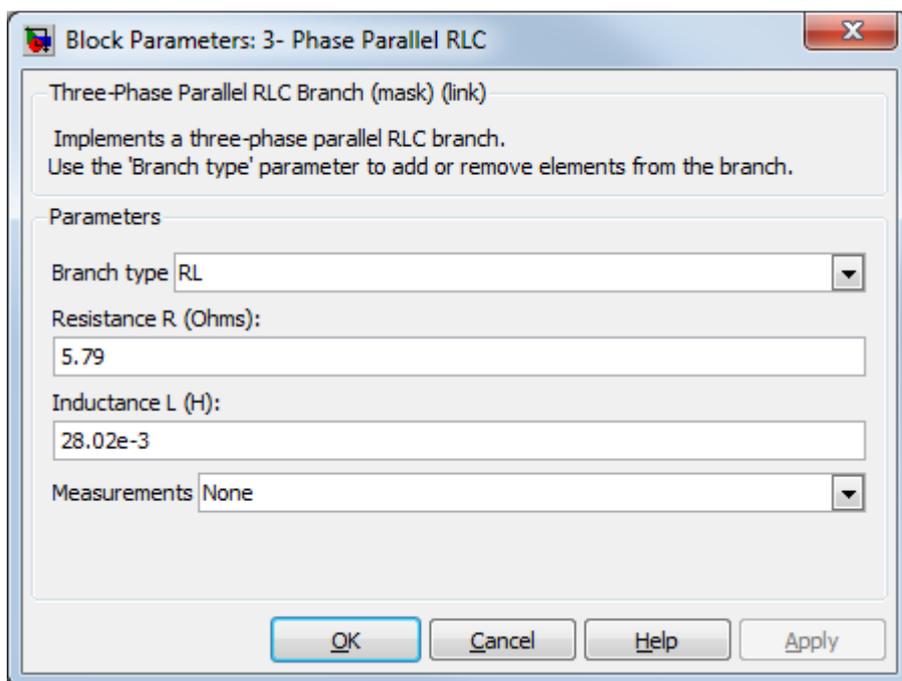


Figura 54 - Parâmetros – circuito RL da fonte de tensão

A2.2. Estação Retificadora

A2.2.1. Transformador

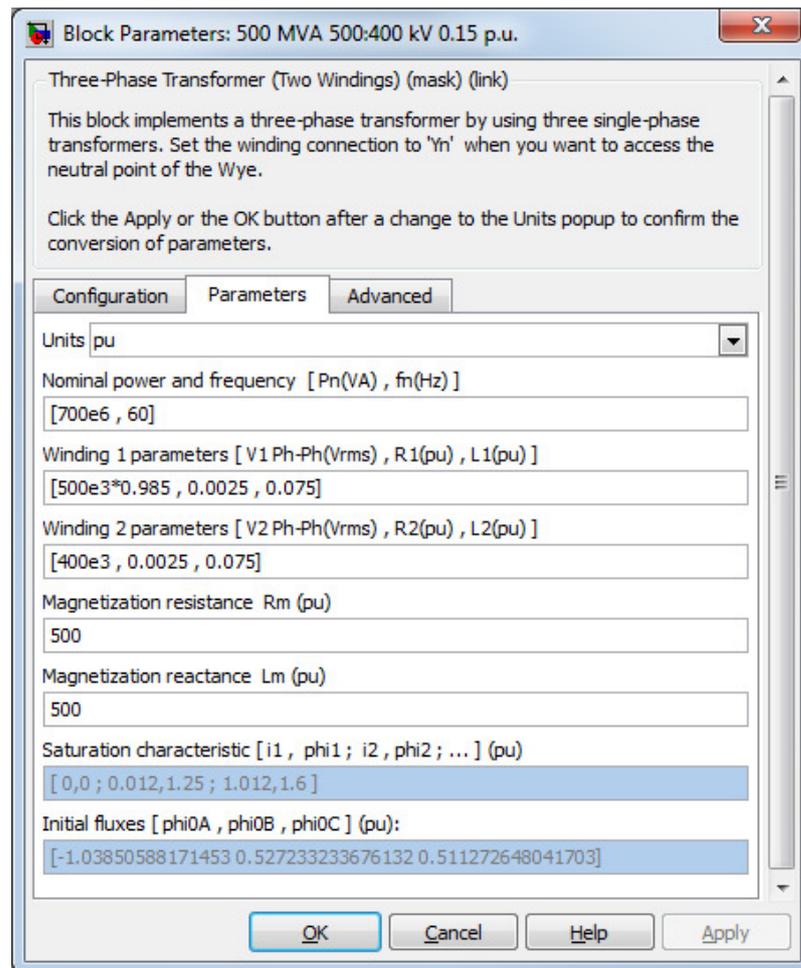


Figura 55 - Parâmetros – Transformador abaixador

A2.2.2. Reator de alisamento

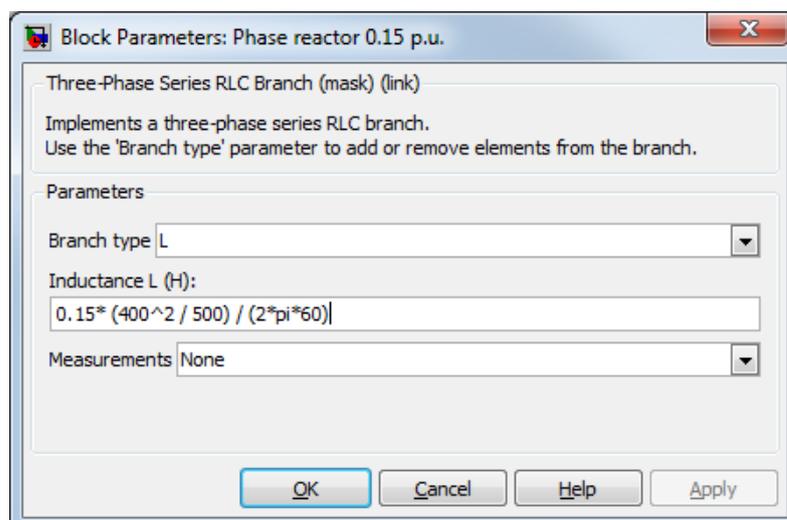


Figura 56 - Parâmetros – Reator de alisamento

A2.2.3. Ponte trifásica de três níveis

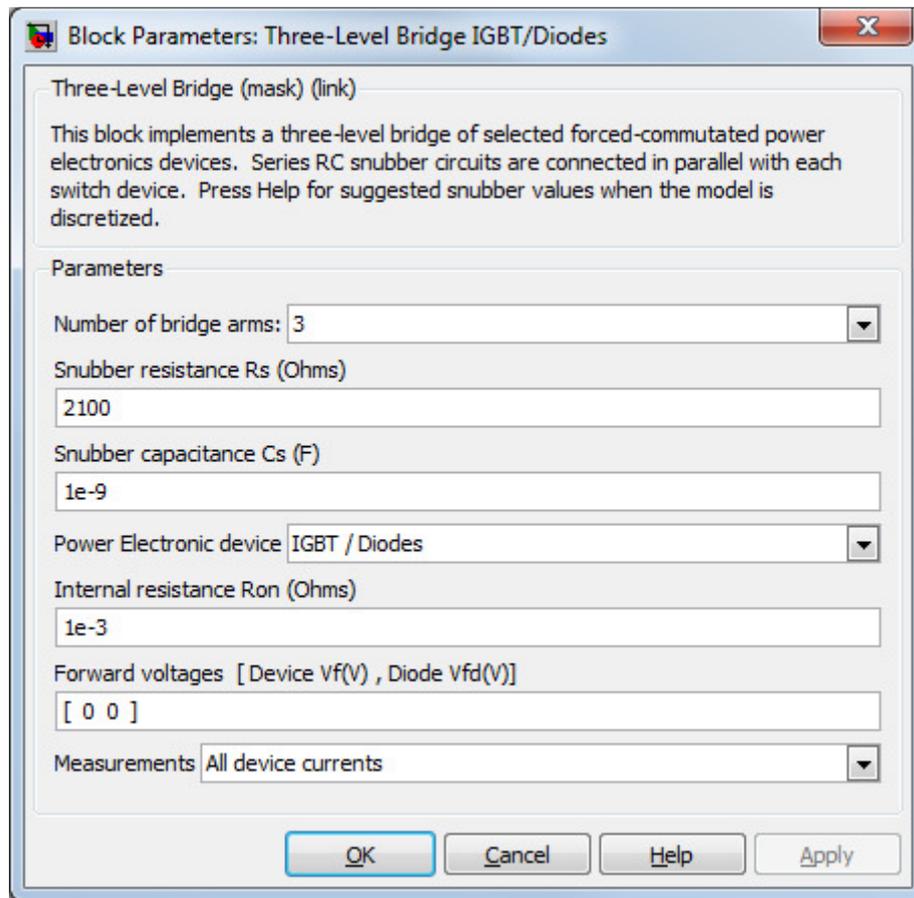


Figura 57 - Parâmetros – Ponte trifásica de três níveis

A2.2.4. Capacitor CC

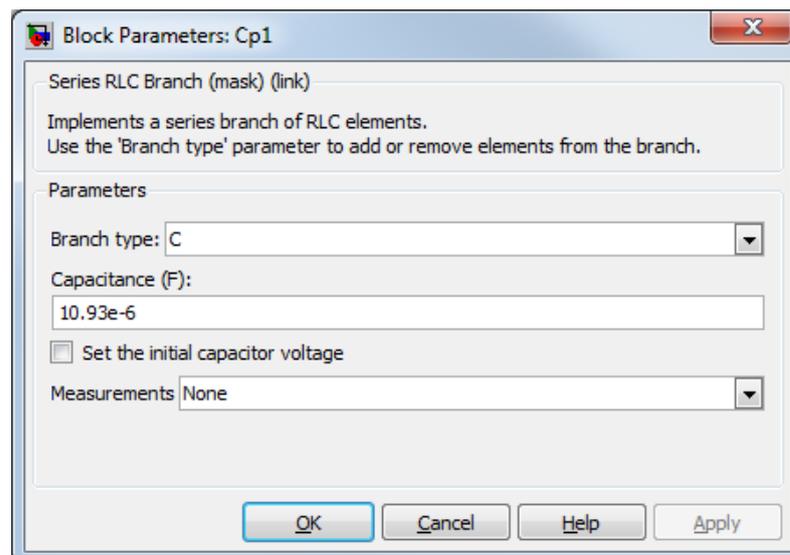


Figura 58 - Parâmetros – Capacitor CC

A2.2.5. Filtro CC – 3º harmônico

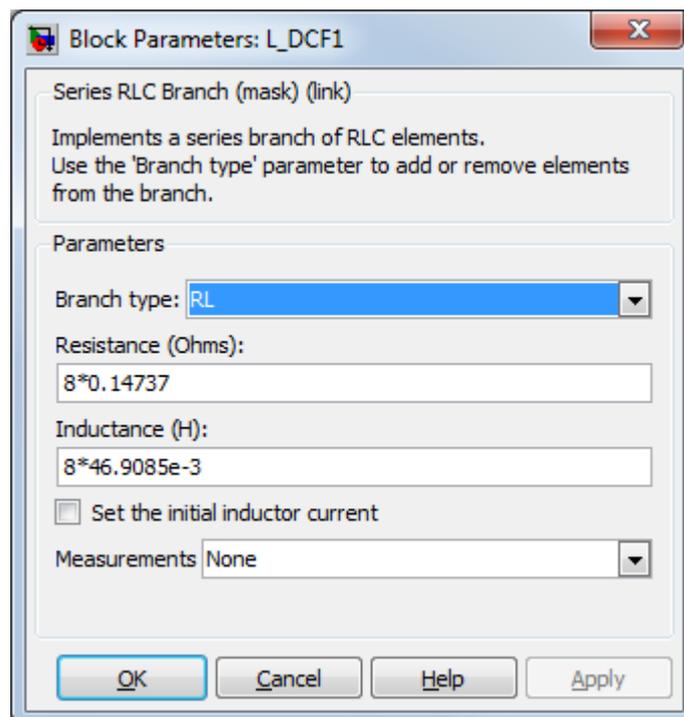
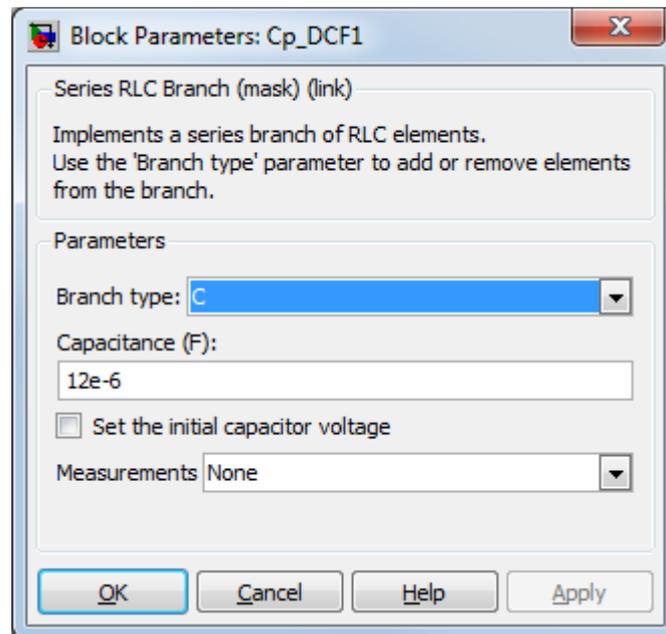


Figura 59 - Parâmetros – Filtro CC – 3º harmônico

A2.2.6. Reator de Alisamento CC

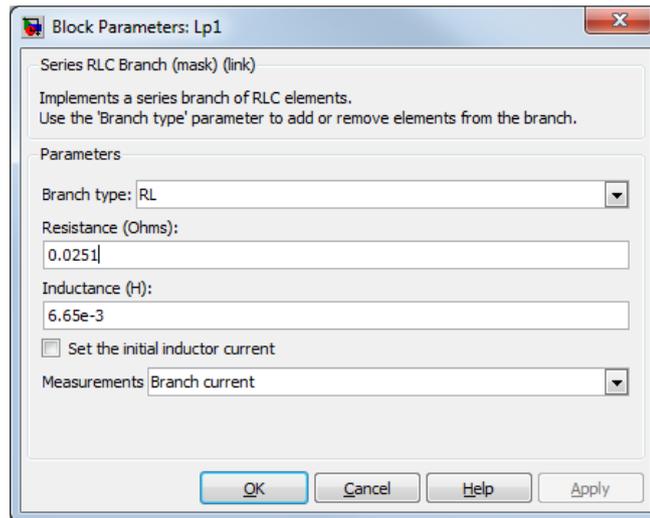


Figura 60 - Parâmetros – Reator de Alisamento CC

A2.3. Estação Inversora

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

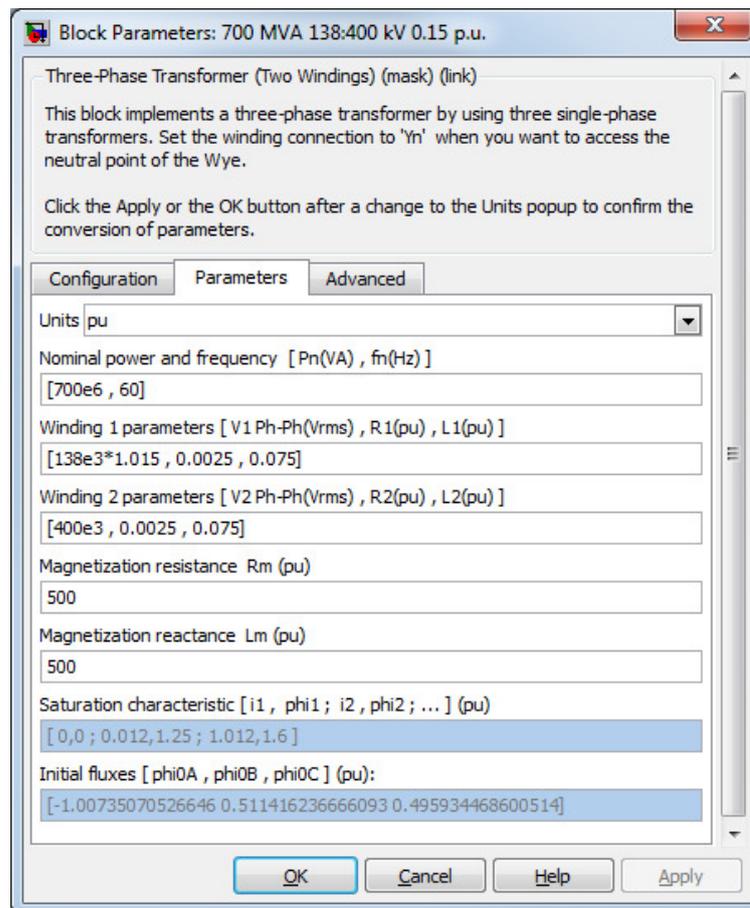


Figura 61 - Parâmetros – Transformador da estação inversora

A2.4. Cargas

A2.4.1. Carga de 100MW

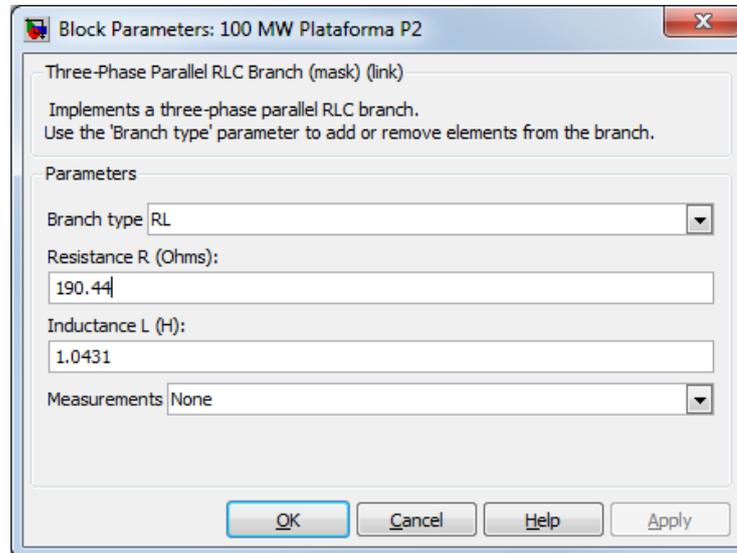


Figura 62 - Parâmetros – Carga modelada de 100MW

A2.5. Controladores

A2.5.1. Controle de Tensão CC

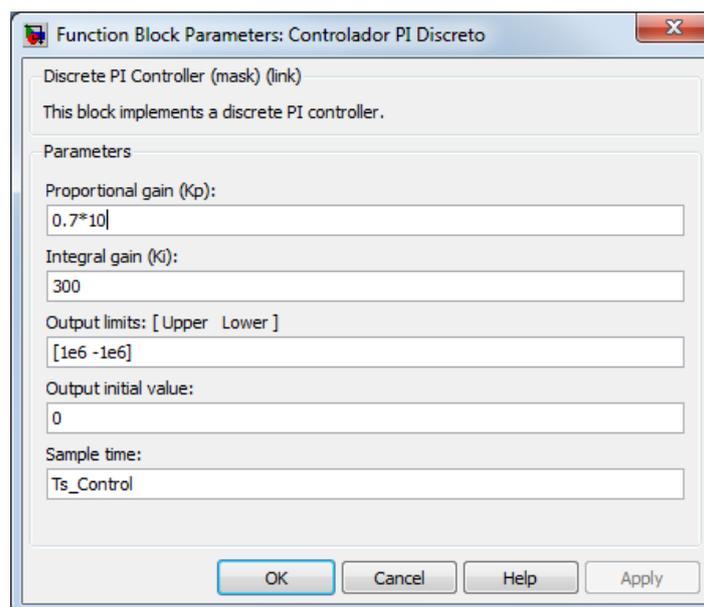


Figura 63 - Parâmetros – Controlador PI

A2.5.2. Controle de Tensão AC

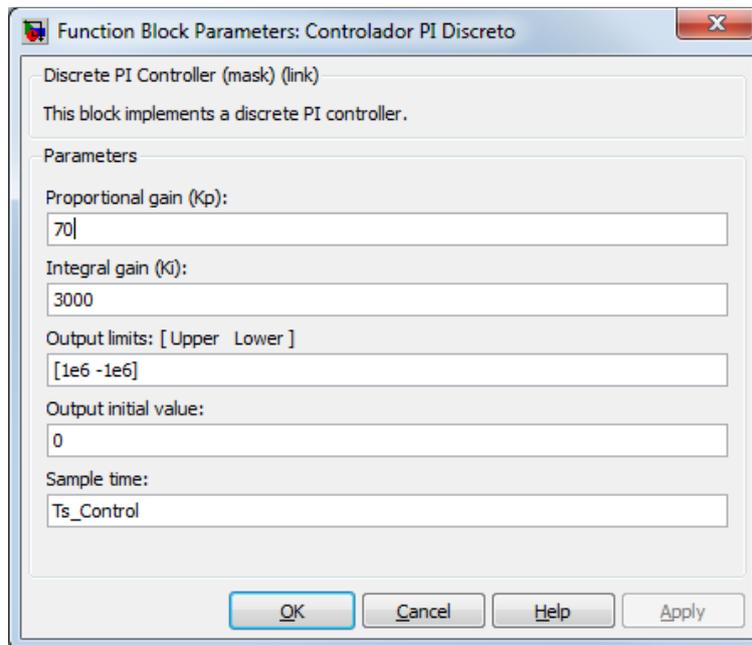


Figura 64 - Parâmetros – Controlador PI