



ANÁLISE DE VIABILIDADE DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO  
SUBMARINA EM CORRENTE CONTÍNUA PARA APLICAÇÃO EM  
PROJETOS DE PROCESSAMENTO SUBMARINO DE PETRÓLEO

Tiago César de Almeida Soares

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.

Orientadores: Antonio Carlos Siqueira de  
Lima  
Sebastião Ércules Melo de  
Oliveira

Rio de Janeiro  
Março de 2015

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO  
SUBMARINA EM CORRENTE CONTÍNUA PARA APLICAÇÃO EM  
PROJETOS DE PROCESSAMENTO SUBMARINO DE PETRÓLEO

Tiago César de Almeida Soares

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. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

---

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

---

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

---

Prof. Jose Antenor Pomilio, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2015

Soares, Tiago César de Almeida

Análise de viabilidade de uma rede de distribuição submarina em corrente contínua para aplicação em projetos de processamento submarino de petróleo/Tiago César de Almeida Soares. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XII, 85 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 75 – 78.

1. eletrônica de potência. 2. processamento submarino. 3. corrente contínua. 4. rede submarina. I. Lima, Antonio Carlos Siqueira de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Aos meus pais, Almir e Glória,  
que sempre acreditaram na  
importância da educação.*

# Agradecimentos

Dentre os que contribuíram diretamente para a criação deste trabalho, agradeço:

- Aos professores e orientadores Antonio Carlos Siqueira de Lima e Sebastião Ércules Melo de Oliveira, pela dedicação e apoio no desenvolvimento dessa dissertação;
- Ao professor Edson Hirokazu Watanabe pelo apoio e opiniões que me guiaram no desenvolvimento do trabalho;

Com respeito àqueles que não tiveram participação direta neste trabalho, mas que foram responsáveis indiretamente pela sua existência, agradeço:

- Aos meus pais pelo apoio dado ao longo desses anos;
- À FMC Technologies, por investir em meu desenvolvimento;
- Aos colegas de trabalho que contribuíram no desenvolvimento desse trabalho.

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 VIABILIDADE DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO  
SUBMARINA EM CORRENTE CONTÍNUA PARA APLICAÇÃO EM  
PROJETOS DE PROCESSAMENTO SUBMARINO DE PETRÓLEO

Tiago César de Almeida Soares

Março/2015

Orientadores: Antonio Carlos Siqueira de Lima  
Sebastião Êrcules Melo de Oliveira

Programa: Engenharia Elétrica

Devido ao aumento da demanda de energia e às dificuldades em acessar novas áreas de exploração de petróleo, as operadoras estão aumentando seus esforços no desenvolvimento de tecnologias para exploração nas chamadas novas fronteiras do petróleo, ou seja, reservatórios muito distantes da costa e localidades que apresentem condições severas de mar e/ou climáticas, como gelo na superfície e furacões. Além das dificuldades mencionadas, está se tornando muito atrativo economicamente o aumento do total de petróleo recuperado através da aplicação de técnicas de processamento submarino e programas de otimização de exploração. Processamento submarino também permite a antecipação da receita do projeto. A visão de várias operadoras é de eliminar totalmente as plataformas de petróleo, instalando seus equipamentos no fundo do mar, e assim, reduzir custos operacionais e problemas logísticos. Entretanto, suas pretensões poderão ser realizadas somente com o desenvolvimento de equipamentos de processamento submarino, controle e potência. Como consequência, muitas companhias estão desenvolvendo equipamentos de potência submarinos, como transformadores, variadores de frequência, disjuntores, conectores, etc. Atualmente, muitos artigos dividem a aplicabilidade de quando a corrente contínua ou alternada deve ser utilizada para transmissão de potência. Normalmente, corrente contínua é recomendada somente na transmissão de potência elevada a longas distâncias. Essa dissertação procura demonstrar a viabilidade técnica de uma rede submarina utilizando transmissão e distribuição em corrente contínua.

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

## FEASIBILITY ANALYSIS OF SUBSEA DC DISTRIBUTION GRID FOR SUBSEA PROCESSING PROJECTS

Tiago César de Almeida Soares

March/2015

Advisors: Antonio Carlos Siqueira de Lima  
Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Department: Electrical Engineering

Due to the increasing demand for energy and the difficulties to access new areas for oil exploration, the oil operators are increasing their efforts on developing the technologies to exploration on the so called new oil frontiers, i.e., reservoirs with great distance from the shore, with severe sea and/or weather conditions, like ice on the surface and hurricanes. In addition to the challenges on exploring the mentioned areas, it is becoming very economical the increase of the total amount of oil recovered by the application of subsea processing and enhanced oil recovery (EOR) programs. Subsea processing is also allowing the anticipation of projects revenues. The vision of several oil companies is to totally eliminate the offshore platforms, installing all of their equipment subsea, reducing operational costs and logistics problems. However, their vision can become true only by the developing of adequate subsea processing, controls and power equipment. As a consequence, there are a lot of companies developing subsea power equipment, like transformers, variable speed drives (VSDs), circuit breakers, connectors, etc. Currently, several papers make a division on whether AC or DC transmission must be used on offshore transmission. Usually, DC is only recommended when transmitting high power for very long step-outs. This dissertation shows the technical feasibility of a medium voltage offshore project using DC for both transmission and subsea distribution. The main components are presented, together with the controls strategy of the rectifier and the inverters.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos	1
1.2 Motivação	1
1.2.1 Campos de aplicação atuais das diversas redes elétricas para fornecimento de energia para as instalações submarinas	5
1.2.2 Cenário atual da exploração de petróleo no Brasil e aplicação da tecnologia	7
1.3 Revisão da literatura técnica	10
1.4 Organização do documento	12
<b>2 Modelagem e configuração do sistema</b>	<b>13</b>
2.1 Premissas e considerações	13
2.1.1 Uso de transmissão em corrente contínua em vez de alternada	13
2.1.2 Considerações gerais no desenvolvimento do trabalho	14
2.1.3 Escolha dos tipos de conversores da rede	15
2.2 Modelagem e configuração do sistema	17
2.3 Componentes do Sistema	19
2.3.1 Retificador	19
2.3.2 Umbilical	22
2.3.3 Disjuntor CC	27
2.3.4 Motor	30
2.3.5 Inversor	42
<b>3 Testes de simulação</b>	<b>46</b>
3.1 Caso 1 - regime permanente	47
3.1.1 Premissas da simulação	47
3.1.2 Resultados da simulação	47
3.2 Caso 2 - falta bifásica entre os cabos do umbilical (na metade do comprimento do cabo)	52



3.2.1	Premissas da simulação . . . . .	52
3.2.2	Resultados da simulação . . . . .	52
3.3	Caso 3 - falta na fase A do inversor (antes do motor) . . . . .	56
3.3.1	Premissas da simulação . . . . .	56
3.3.2	Resultados da simulação . . . . .	56
3.4	Caso 4 - falta trifásica no inversor (antes do motor) . . . . .	61
3.4.1	Premissas da simulação . . . . .	61
3.4.2	Resultados da simulação . . . . .	61
3.5	Caso 5 - falta na fase A do retificador . . . . .	66
3.5.1	Premissas da simulação . . . . .	66
3.5.2	Resultados da simulação . . . . .	66
3.6	Caso 6 - falta trifásica no retificador . . . . .	69
3.6.1	Premissas da simulação . . . . .	69
3.6.2	Resultados da simulação . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>73</b>
4.1	Principais conclusões . . . . .	73
4.2	Trabalhos futuros . . . . .	74
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>Modelos em Simulink e diagrama da rede utilizada nas simulações</b>	<b>79</b>
A.1	Rede completa . . . . .	80
A.2	Inversor . . . . .	82
A.3	Diagrama da rede . . . . .	84

# Lista de Figuras

1.1	Vantagens de utilização de métodos de elevação de petróleo em campos novos [2]. . . . .	4
1.2	Vantagens de utilização de métodos de elevação de petróleo em campos maduros [2]. . . . .	5
1.3	Divisão das alternativas para alimentação de campos de petróleo. . .	8
1.4	Esquema genérico mostrando diversas alternativas de processamento submarino. . . . .	9
1.5	Benefício do bombeamento submarino [2]. . . . .	10
2.1	Topologia de rede proposta para ser analisada. . . . .	18
2.2	Esquema dos componentes e sensores do controle do retificador. . . .	19
2.3	Diagrama de blocos do controle do retificador. . . . .	20
2.4	Esquema de um cabo submarino típico . . . . .	23
2.5	Esquema do disjuntor híbrido de corrente contínua. . . . .	28
2.6	Aspectos construtivos do disjuntor CC do fabricante ABB. . . . .	29
2.7	Detalhe construtivo da célula do disjuntor híbrido de corrente contínua. . . . .	30
2.8	Correlação dos eixos abc com os eixos direto e em quadratura. . . .	33
2.9	Circuito elétrico equivalente do eixo direto do motor síncrono com ímãs permanentes. . . . .	35
2.10	Circuito elétrico equivalente do eixo em quadratura do motor síncrono com ímãs permanentes. . . . .	35
2.11	Representação dos enlaces de fluxos de eixo direto do motor síncrono com ímãs permanentes. . . . .	36
2.12	Restrição operacional do motor síncrono com ímãs permanentes. . .	36
2.13	Diagrama de blocos da representação eletromecânica do motor síncrono com ímãs permanentes. . . . .	38
2.14	Representação em diagrama de blocos do cálculo das correntes de um motor síncrono com ímãs permanentes. . . . .	39
2.15	Representação em diagrama de blocos do cálculo dos fluxos de um motor síncrono com ímãs permanentes. . . . .	40

2.16	Representação em diagrama de blocos do cálculo do torque de um motor síncrono com ímãs permanentes. . . . .	40
2.17	Representação em diagrama de blocos do cálculo do equilíbrio mecânico de um motor síncrono com ímãs permanentes. . . . .	41
2.18	Curva característica do motor. . . . .	42
2.19	Representação em diagrama de blocos do controle do motor. . . . .	44
2.20	Representação em diagrama de blocos do controlador do inversor. . . . .	44
3.1	Tensão na saída do retificador, caso 1. . . . .	48
3.2	Corrente na saída do retificador, caso 1. . . . .	48
3.3	Tensão no barramento de alimentação dos inversores, caso 1. . . . .	49
3.4	Torque eletromagnético do motor 3, caso 1. . . . .	49
3.5	Velocidade do motor 3, caso 1 . . . . .	49
3.6	Corrente na saída do inversor do motor 3, caso 1. . . . .	50
3.7	Tensão de fase na saída do inversor do motor 3, caso 1. . . . .	50
3.8	Corrente na entrada do retificador, caso 1. . . . .	50
3.9	Tensão de fase na entrada do retificador, caso 1. . . . .	51
3.10	Potência ativa na entrada do retificador, caso 1. . . . .	51
3.11	Potência reativa na entrada do retificador, caso 1. . . . .	51
3.12	Tensão na saída do retificador, caso 2. . . . .	53
3.13	Tensão na saída do retificador (figura ampliada), caso 2. . . . .	53
3.14	Corrente na saída do retificador, caso 2. . . . .	54
3.15	Torque eletromagnético do motor 3, caso 2. . . . .	54
3.16	Corrente na saída do inversor do motor 3, caso 2. . . . .	54
3.17	Tensão de fase na saída do inversor do motor 3, caso 2. . . . .	55
3.18	Corrente na entrada do retificador, caso 2. . . . .	55
3.19	Tensão de fase na entrada do retificador, caso 2. . . . .	55
3.20	Tensão na entrada do retificador, caso 3. . . . .	57
3.21	Corrente na saída do retificador, caso 3. . . . .	57
3.22	Torque eletromagnético do motor 3, caso 3. . . . .	58
3.23	Corrente na saída do inversor 3, caso 3. . . . .	58
3.24	Corrente na saída do inversor 3 (figura ampliada), caso 3. . . . .	58
3.25	Tensão de fase na saída do inversor 3, caso 3. . . . .	59
3.26	Torque eletromagnético do motor 2, caso 3. . . . .	59
3.27	Corrente na saída do inversor 2, caso 3. . . . .	59
3.28	Tensão de fase na saída do inversor 2, caso 3. . . . .	60
3.29	Tensão de fase na saída do inversor 2 (figura ampliada), caso 3. . . . .	60
3.30	Corrente na entrada do retificador, caso 3. . . . .	60
3.31	Tensão de fase na entrada do retificador, caso 3. . . . .	61

3.32	Tensão na saída do retificador, caso 4 . . . . .	62
3.33	Corrente na saída do retificador, caso 4 . . . . .	63
3.34	Torque eletromagnético do motor 3, caso 4 . . . . .	63
3.35	Corrente na saída do inversor 3, caso 4 . . . . .	63
3.36	Corrente na saída do inversor 3 (figura ampliada), caso 4 . . . . .	64
3.37	Tensão de fase na saída do inversor 3, caso 4 . . . . .	64
3.38	Torque eletromagnético do motor 2, caso 4 . . . . .	64
3.39	Corrente na saída do inversor 2, caso 4 . . . . .	65
3.40	Tensão de fase na saída do inversor 2, caso 4 . . . . .	65
3.41	Corrente na entrada do retificador, caso 4 . . . . .	65
3.42	Tensão de fase na entrada do retificador, caso 4 . . . . .	66
3.43	Tensão na saída do retificador, caso 5 . . . . .	67
3.44	Corrente na saída do retificador, caso 5 . . . . .	67
3.45	Torque eletromagnético do motor 3, caso 5 . . . . .	67
3.46	Corrente na saída do inversor 3, caso 5 . . . . .	68
3.47	Tensão de fase na saída do inversor 3, caso 5 . . . . .	68
3.48	Corrente na entrada do retificador, caso 5 . . . . .	68
3.49	Tensão de fase na entrada do retificador, caso 5 . . . . .	69
3.50	Tensão na saída do retificador, caso 6 . . . . .	70
3.51	Corrente na saída do retificador, caso 6. . . . .	70
3.52	Torque eletromagnético do motor 3, caso 6. . . . .	70
3.53	Corrente na saída do inversor 3, caso 6. . . . .	71
3.54	Tensão de fase na saída do inversor 3, caso 6. . . . .	71
3.55	Corrente na entrada do retificador, caso 6. . . . .	71
3.56	Tensão de fase na entrada do retificador, caso 6. . . . .	72
A.1	Modelo da rede completa com os inversores em bloco. . . . .	81
A.2	Modelo dos inversores. . . . .	83
A.3	Diagrama da rede. . . . .	85

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Objetivos

Esse trabalho procura explorar o uso da transmissão de energia elétrica em corrente contínua utilizando conversores fontes de tensão em projetos de processamento submarino *offshore*, mostrando a viabilidade técnica da utilização de uma rede composta de componentes de baixa complexidade que não precisem de grandes desenvolvimentos tecnológicos e, dessa forma, mostrar a aplicabilidade e competitividade desse tipo de rede em relação às redes convencionais CA atualmente utilizadas e em desenvolvimento. Busca também analisar uma rede aplicável em projetos de exploração de petróleo, composta de três cargas submarinas (motores) controladas individualmente por inversores. Esses inversores serão alimentados por um cabo (umbilical) em corrente contínua, cujas tensão e potência serão controladas por um único retificador na superfície. O circuito e o seu controle serão detalhados ao longo do trabalho. Parte dessa dissertação foi retratada em artigo aprovado pela *International Conference on Power Systems Transients* (IPST), que ocorrerá no ano de 2015, na Croácia.

### 1.2 Motivação

Muitas operadoras de petróleo estão buscando explorar as chamadas novas fronteiras do petróleo, que consiste em explorar localidades de difícil acesso devido a condições adversas na superfície ou grande distância entre o campo e a costa. Exemplos de localidades com essas condições são: campos no Alaska, Estados Unidos, que em boa parte do ano está coberta por uma camada de gelo, localidades que apresentam condições de mar adversas, furacões, etc e, no caso do Brasil, muitos campos do pré-sal, que estão a mais de trezentos quilômetros distantes da costa.

Além do desafio em explorar petróleo nas localidades anteriormente citadas, muitos campos de petróleo explorados no mundo e, principalmente no Brasil, estão atin-

gindo a maturidade. O petróleo retirado dos campos é composto por óleo, gás, água, areia e outros contaminantes. O grau de maturidade de um campo é caracterizado pela quantidade de óleo e gás no petróleo produzido. Com o natural declínio do percentual de óleo e gás e aumento do percentual de água na composição do petróleo produzido, a produção se torna menos rentável pelos seguintes fatos:

- Perda de receita dos produtos comerciais (óleo e gás);
- Aumento dos custos com o tratamento da água retirada do campo antes do descarte dessa água no mar;
- Perda de capacidade de processamento de óleo devido ao gargalo da plataforma para o tratamento de água;

Diante desse cenário, as empresas petrolíferas estão investindo em novas técnicas tanto para aumentar a porcentagem de recuperação dos recursos naturais em cada reservatório (atualmente em torno de 32%) quanto para antecipar a produção e, em consequência, a receita do projeto, aumentando a probabilidade de torná-los viáveis.

Uma das visões mais completas de como será o futuro da exploração de petróleo, unindo desenvolvimentos em diversas áreas do conhecimento, foi denominada pela operadora norueguesa Statoil como fábrica submarina [1]. Esse conceito tem servido de inspiração também para outras operadoras, em diferentes graus de desenvolvimento.

O conceito da fábrica submarina combina produção, processamento e armazenamento de petróleo no fundo do mar, próximo aos poços, independente das condições de superfície. Esse conceito é baseado na adaptação dos equipamentos existentes nas plataformas para trabalharem nas condições de pressões e temperaturas submarinas. Dentro do conceito também está prevista a automatização desses equipamentos com operação remota (muitas vezes controladas a partir de instalações no continente) e interligação de diversos campos, buscando a otimização dos recursos.

Dentre os equipamentos que deverão ser desenvolvidos nos próximos anos para a aplicação do conceito de fábrica submarina, estão:

- Nova geração de manifold (equipamento que agrupa dutos ou linhas de fluido), que permitam interligação de um campo ao continente e/ou a outras instalações submarinas, otimizando o transporte do petróleo, o tratamento da água produzida, ou tornando possível o transporte de água tratada para injeção de um campo com excesso de água para outro que possa se beneficiar dessa água para balancear a pressão do campo.
- Tanques para armazenamento submarino de óleo e produtos químicos.

- Equipamentos mais sofisticados de separação, tratamento e processamento do petróleo.
- Motores, bombas monofásicas e multifásicas e compressores de alta confiabilidade.
- Nova geração de sistemas de controle para interligação de diversos campos de forma inteligente e de fácil gerenciamento.
- Equipamentos de potência confiáveis e com longa vida útil.

As principais vantagens no desenvolvimento dos equipamentos submarinos são:

- Aumento da taxa de recuperação de petróleo e aceleração da produção, antecipando a receita e diminuindo o tempo de retorno do projeto.
- Diminuição dos custos de implantação dos projetos.
- Diminuição dos custos operacionais.
- Aumento da vida útil dos campos de petróleo (economicamente viável por mais tempo devido a diminuição dos custos operacionais).
- Diminuição do consumo de energia.
- Redução do espaço e peso na plataforma.
- Diminuição das equipes de operadores nas plataformas, assim como os serviços de apoio ao trabalho na plataforma.
- Viabilização da exploração de campos marginais.
- Viabilização do desenvolvimento em campos cuja localização apresenta condições de superfície desfavoráveis.
- Melhorias na garantia de escoamento.

Os benefícios ficam mais evidentes em campos muito profundos e/ou mais distantes das instalações que receberá o petróleo produzido.

O desenvolvimento das áreas de bombeio e processamento submarinos de petróleo atingirá de forma diferente os diversos campos. Essa divisão pode ser feita da forma a seguir.

- Campos novos

Nos campos novos, há possibilidade de se utilizar uma gama maior dos equipamentos de uma nova geração de exploração. O planejamento desde o início da exploração desses campos permite o desenvolvimento de um campo com uma filosofia totalmente diferente da atual. Se ampliarmos ainda mais o horizonte de exploração dos campos novos, o esperado é que os equipamentos estejam evoluídos de tal forma que os produtos processados estejam dentro dos padrões de refino, podendo ser transportados diretamente para refinarias através de dutos ligando o campo ao continente ou enviados para navios tanque na própria localidade, a partir de tanques de armazenamento locais.

Do ponto de vista econômico, o bombeamento permite maior retorno financeiro, uma vez que a receita devido ao aumento da produção durante a exploração do campo é antecipada e também porque o tempo de exploração do campo pode ser encurtado. Logo, os custos de operação associados a essa diferença de tempo entre as vidas úteis do campo quando explorado com e sem auxílio de bombeamento são diminuídos consideravelmente.

A Figura 1.1 ilustra as potenciais vantagens econômicas descritas acima.

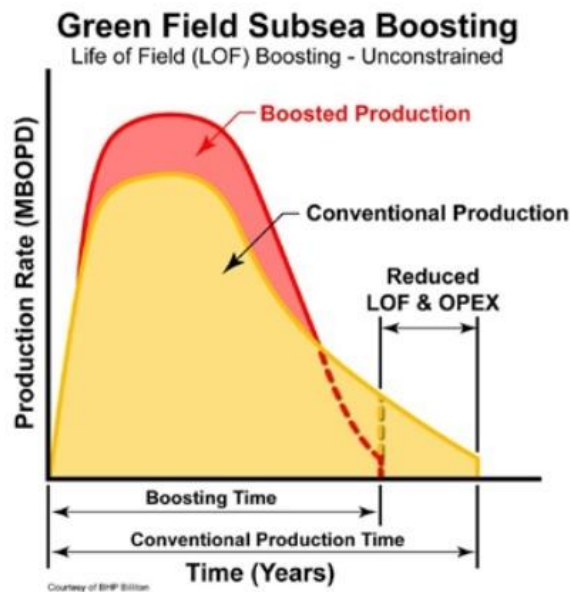


Figura 1.1: Vantagens de utilização de métodos de elevação de petróleo em campos novos [2].

- Campos maduros

Nesses campos, as modificações das instalações de superfície são na maioria das vezes complexas e custosas e os equipamentos voltados para processamento de petróleo já estão instalados para atender um cenário estabelecido na época da concepção original do projeto, o que nem sempre se realiza, pois a previsão da produção do campo dada pelos modelos existentes tem certo grau de incerteza e a produção pode



ficar comprometida por uma queda repentina da pressão do campo, aumento da fração de água no total da produção, entre outros fatores.

Portanto, o uso de equipamentos de processamento de petróleo submarinos, aliados a bombas e compressores submarinos podem ser a única forma de permitir a continuidade da viabilidade econômica da exploração do campo. É exatamente nesses campos que o uso de redes elétricas submarinas pode trazer o retorno mais imediato.

De forma análoga à Figura 1.1, a Figura 1.2 ilustra os potenciais benefícios econômicos quando utilizadas técnicas de elevação artificiais em campo maduros (brown fields). Importante notar que a figura retrata um problema frequente em campos maduros, que é a limitação da produção devido a alguma restrição operacional da plataforma (capacidade do tratamento de água produzida para descarte, por exemplo). Com o uso de equipamentos de processamento submarino de petróleo, essa restrição operacional pode ser diminuída e a operadora produzirá mais óleo.

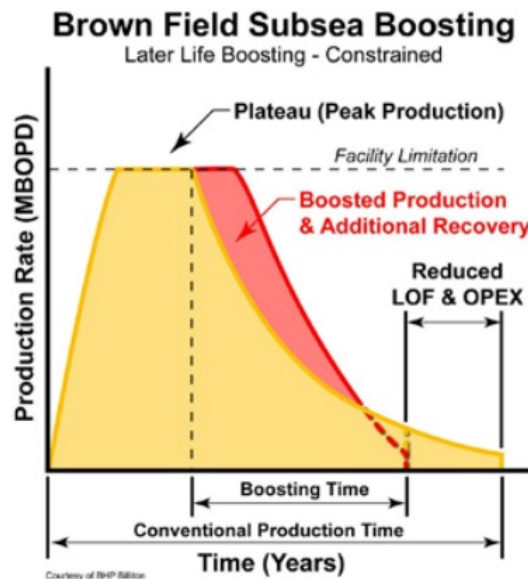


Figura 1.2: Vantagens de utilização de métodos de elevação de petróleo em campos maduros [2].

### 1.2.1 Campos de aplicação atuais das diversas redes elétricas para fornecimento de energia para as instalações submarinas

À medida que a demanda por energia elétrica aumentará consideravelmente para viabilizar o funcionamento dos projetos futuros de processamento submarino e bombeamento de petróleo, existem discussões de como seria a melhor forma de gerar e transmitir essa energia para diversos cenários.

A energia elétrica em plataformas geralmente é produzida através de turbinas à gás de ciclo simples devido à restrições de peso e espaço. Essas turbinas têm eficiências energéticas muito baixas (em torno de 25-30%) e se tornam ainda mais ineficientes quando operadas abaixo de seus valores nominais, o que geralmente ocorre. Além da baixa eficiência, essas turbinas demandam muita manutenção e geram muita poluição, o que pode representar um custo considerável, especialmente em países que taxam agressivamente a poluição gerada [3].

A transmissão é realizada através de cabos de cobre próprios para o ambiente marinho, conhecidos como umbilicais. Esses cabos são os elementos mais caros da rede. Como ainda não foi implementada uma rede submarina de distribuição de energia, os cabos são dedicados a cada carga, muitas vezes inviabilizando economicamente a utilização de bombeio.

Uma vez que os equipamentos necessários para a construção de uma rede elétrica sejam considerados confiáveis pelas operadoras para o funcionamento duradouro e contínuo de seus equipamentos de bombeamento e compressão, pode-se considerar que as redes existentes atualmente dificilmente serão reproduzidas em projetos futuros.

O primeiro cenário seria o desenvolvimento de uma rede elétrica extensa e ramificada para atender campos distantes da costa ou a interligação de diversos campos, reduzindo consideravelmente custos de transmissão e geração de energia. A geração seria feita em usinas mais eficientes na costa e, em muitas vezes, não seria de responsabilidade das operadoras. Elas somente comprariam a energia como uma indústria qualquer e não seriam responsáveis por atividades como manutenção e operação dessas facilidades. O modo de transmissão de energia (alternada ou contínua) seria determinado por questões econômicas e técnicas. Entretanto, para longas distâncias, a transmissão em corrente contínua provavelmente prevalecerá, principalmente devido à diminuição do custo dos conversores de frequência.

O segundo cenário seria a evolução das redes elétricas atuais, onde a energia seria gerada na plataforma ou próximo das cargas. Nesses casos, a transmissão em corrente alternada é considerada por muitas operadoras como a única solução a ser utilizada. Entretanto, em uma rede onde as cargas a serem alimentadas são basicamente motores para bombas e compressores, as mesmas já são alimentadas através de conversores de frequência, ou seja, o custo elevado desses conversores, que muitas vezes é considerado como a grande desvantagem de uma rede em corrente contínua, já está embutido em uma rede em corrente alternada. Logo, a utilização de redes de transmissão curtas em corrente contínua, com a utilização de um retificador na superfície alimentando os diversos inversores submarinos dedicados a controlar cada motor seria viável do ponto de vista econômico (menores custos com cabos, perdas energéticas, etc) e o operador se beneficiaria das diversas vantagens técnicas

da transmissão em corrente contínua em relação à alternada, principalmente em relação à estabilidade da rede, uma vez que a compensação de potência reativa, caso necessária, adiciona componentes de difícil implantação submarina.

Segundo LAMELL *et al.* [4], a transmissão de energia em corrente alternada se torna muito desvantajosa quando a distância da costa para a carga ultrapassa 50 km. A Figura 1.3 mostra uma comparação, em função da potência transmitida e da distância entre a geração e a carga, de como as operadoras entendem como seria a divisão das soluções mais utilizadas e/ou estudadas atualmente. Para distâncias curtas e potências maiores que 25 MW, a transmissão em corrente alternada a partir da geração no continente seria a melhor solução. Para potências pequenas, a solução mais atraente seria gerar a energia através de turbinas a gás em instalações em alto mar, o mais próximo possível do centro da carga. E para os demais casos, a transmissão em corrente contínua seria a melhor opção. É importante notar que a figura leva em consideração na comparação, a taxa do impacto ambiental devido a pior eficiência da geração de energia em alto mar via turbinas a gás. Também é importante salientar que as preferências pelas alternativas de transmissão de energia não é consenso entre as operadoras e a figura somente ilustra uma opinião generalizada sobre o que está sendo considerado no mercado em diferentes cenários. Esse trabalho, por outro lado, defende que a utilização de transmissão em corrente contínua, do ponto de vista técnico, é mais vantajosa que a transmissão em corrente alternada também para distâncias curtas e cargas pequenas e médias. Por último, os resultados mostrados nessa figura podem ser dinâmicos, uma vez que as tecnologias aplicadas em cada solução avançam em diferentes passos, dependendo do desenvolvimento financiado por um determinado projeto em andamento, o que futuramente influenciará na preferência por parte das operadoras em especificar algo que já foi desenvolvido anteriormente (menor tempo e custo do projeto).

## 1.2.2 Cenário atual da exploração de petróleo no Brasil e aplicação da tecnologia

Em um momento de crescimento do país e, conseqüentemente, da demanda por energia, torna-se muito claro que o Brasil se beneficiaria muito do desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias citadas anteriormente.

Se considerarmos o cenário atual do Brasil, a produção de óleo está estagnada há anos, pois o acréscimo devido aos primeiros campos do pré-sal é compensado pelo declínio do percentual de óleo proveniente dos campos localizados na Bacia de Campos, onde o problema de produção de água é gravíssimo. Em alguns casos, a quantidade de água atinge a magnitude de noventa por cento da produção total.

Outra característica marcante do óleo explorado na Bacia de Campos é a sua

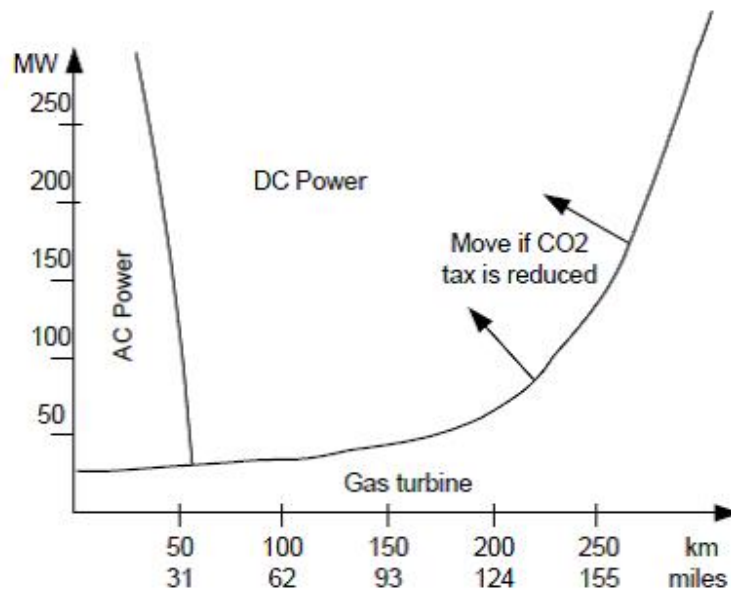


Figura 1.3: Divisão das alternativas para alimentação de campos de petróleo.

alta viscosidade (baixo grau API). A taxa de recuperação típica em campos cujos óleos são muito viscosos é menor que 20%. Em tais campos, a viabilidade econômica da exploração é muito dependente do auxílio de injeção de água.

Grandes distâncias entre poços e dos poços para o continente, alta viscosidade do óleo e percentual elevado de água no óleo são características muito favoráveis para utilização de bombeamento, compressão e processamento submarino de petróleo. Logo, tanto na Bacia de Campos, onde há muitos campos maduros, quanto na região do pré-sal, onde existem extensas reservas de petróleo, as técnicas de bombeamento, em conjunto com processamento submarino, se mostram muito promissoras. Grandes distâncias encarecem muito o custo operacional, inviabilizando a exploração de alguns campos localizados na região do pré-sal como é feito tradicionalmente, com plataformas habitadas.

O arranjo genérico dos equipamentos nesses campos é mostrado na Figura 1.4, onde poderão ser utilizadas estações separadoras de componentes do petróleo produzido e diversos tipos de bombas para aplicações específicas, como bombeamento monofásico, multifásico, injeção de água ou gás, etc.

O benefício generalizado desse bombeamento pode ser facilmente visto na Figura 1.5, onde é mostrado que o acréscimo de pressão devido a uma bomba é proporcional ao aumento de produção. Importante salientar que o aumento de produção pode estar condicionado a uma restrição operacional e da característica do poço. Essas restrições não serão abordadas nesse trabalho.

Se por um lado os benefícios do bombeamento estão claros para as operadoras, por outro lado, ainda não está totalmente consolidado qual seria a melhor forma de alimentar essas novas cargas. Na indústria do petróleo é muito comum haver

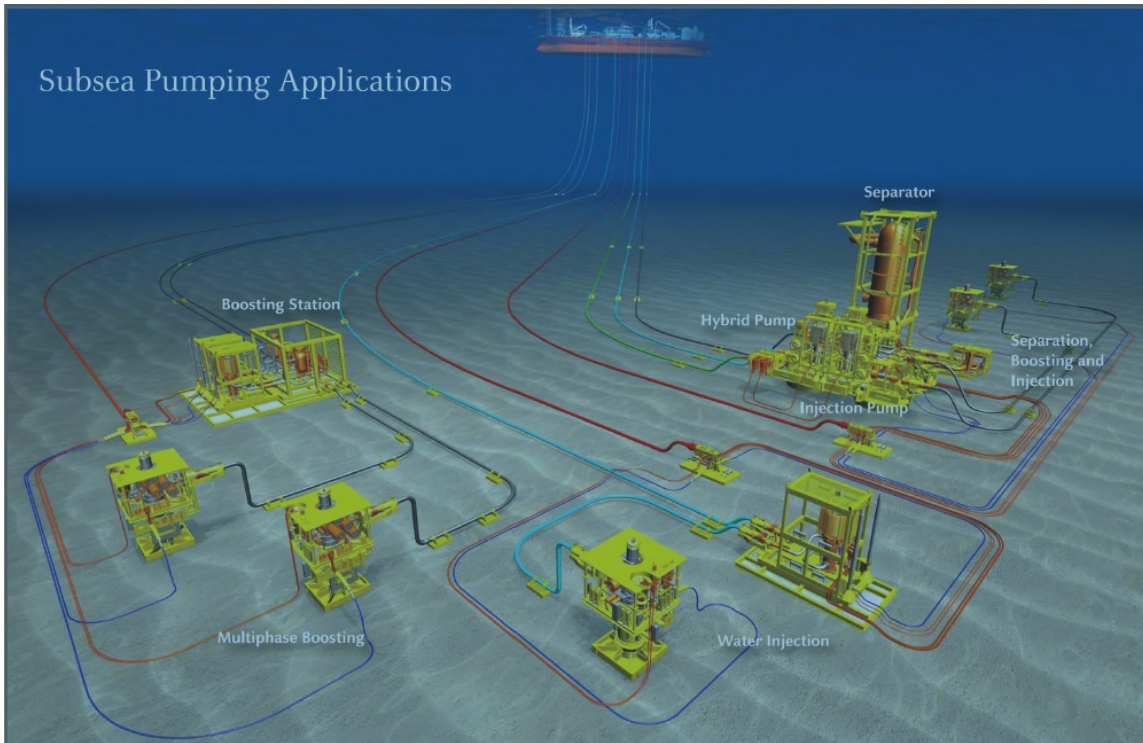


Figura 1.4: Esquema genérico mostrando diversas alternativas de processamento submarino.

conservadorismo no desenvolvimento de novos produtos e soluções e também pouca cooperação entre as empresas no desenvolvimento conjunto da tecnologia. Outra característica muito comum é o desenvolvimento marcado por uma grande influência de uma empresa irmã, ou seja, uma empresa começa um desenvolvimento baseado no desenvolvimento de outra empresa.

Apesar das operadoras entenderem atualmente que o futuro das redes elétricas submarinas será em corrente contínua, muitas operadoras começaram há algum tempo a desenvolver redes elétricas submarinas com transmissão em corrente alternada. Isso pode ser um fato que irá retardar o desenvolvimento por parte das operadoras de redes em corrente contínua.

Atualmente, encontram-se em processo de testes de qualificação alguns protótipos que irão compor o conceito da solução de uma rede submarina em corrente alternada de alta tensão. A rede almejada no final de todo o desenvolvimento terá os equipamentos instalados em uma profundidade de até 3000 metros, alimentados por cabos de transmissão de até 200 km. A potência máxima transmitida será de 100 MW. Não está muito claro como problemas de compensação de reativos serão tratados pelos desenvolvedores. Os equipamentos que estão sendo testados são os transformadores, o conversor de frequência e os disjuntores, sendo os dois primeiros hidrostáticamente compensados e o último construído em um vaso com pressão interna de 1 atm. Os passos seguintes serão desenvolver e testar os equipamentos em

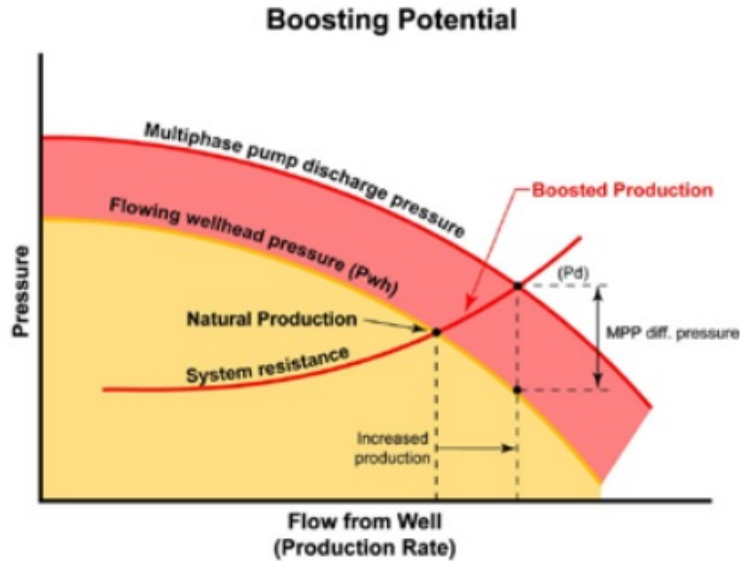


Figura 1.5: Benefício do bombeamento submarino [2].

tamanho real, e instalá-los em campo para tornar a solução totalmente desenvolvida. Utilizando corrente contínua na transmissão e distribuição de energia elétrica, a compensação de reativos passa a não ser mais um problema. Os passos para o desenvolvimento dessa rede serão muito parecidos com o do desenvolvimento da rede em corrente alternada, sendo que uma das maiores preocupações será o compromisso entre a máxima tensão e corrente suportada pelos IGBTs dos conversores e disjuntores e a confiabilidade e dimensões desses equipamentos. Outro ponto preocupante é a confiabilidade dos capacitores utilizados nos inversores e retificadores. Em relação a tensão e corrente máximas suportadas pelos IGBTs, essa preocupação será acentuada caso os testes dos conceitos com eletrônica de potência pressurizada não forem bem sucedidos e a solução for instalar os conversores submarinos em vasos de pressão. Nesse caso, a questão da dissipação térmica dos equipamentos, que já é crítica, será uma questão mais difícil de ser contornada. Os estudos de marinização não fazem parte desse trabalho, dificultando precisar a limitação atual da rede proposta. Entretanto, a idéia que se deseja provar nesse trabalho é que a rede em corrente contínua é muito interessante também para pequenas e médias potências, o que não é defendido atualmente. Mas com a devida evidência que a rede em corrente contínua é muito vantajosa, entende-se que a consequência seria o começo do desenvolvimento de tais redes no médio prazo.

### 1.3 Revisão da literatura técnica

ALBUQUERQUE *et al.* [5] descrevem vários projetos de processamento submarino de petróleo e bombeamento existentes, assim como oportunidades futuras. MO-

RAES *et al.* [6] apresentam algumas tecnologias existentes para processamento submarino de petróleo e comparam essas tecnologias com as atuais, utilizadas na superfície. Em [7] são descritas algumas tecnologias sendo pesquisadas e utilizadas para a otimização da produção de petróleo. O trabalho [8] retrata a importância de se utilizar métodos de elevação submarina para aumentar a produção de petróleo em poços novos e maduros. VOIGHT [2] ressalta a importância e apresenta desafios de transmissão de energia para projetos de exploração de petróleo, mostrando também os benefícios do processamento, bombeamento e compressão submarinos dos fluidos produzidos em poços de petróleo. Os artigos de MÆLAND e CHOKHAWALA [3] e LAMELL *et al.* [4] abordam as dificuldades e aspectos técnicos e econômicos da geração de energia distante das instalações *offshore*. Em [9] é avaliada a necessidade de desenvolvimento e/ou utilização de novas tecnologias para exploração de campos de petróleo, entre elas o desenvolvimento de redes submarinas em corrente contínua. OKLAND *et al.* [10] apresentam o conceito de fábrica submarina para exploração de petróleo, idealizada pela empresa Statoil. Nesse artigo, a transmissão e distribuição em corrente contínua de energia é considerada uma das disciplinas que vai tornar possível a concepção dos projetos. OLIVEIRA *et al.* [11] fazem uma comparação entre a viabilidade de transmissão e distribuição de potência para campos de petróleo utilizando redes em CA e em CC, considerando a melhor aplicabilidade da rede CC, inclusive para distâncias médias (até 5 km). Em SHAO e AGELIDIS [12], são apontados requisitos para redes em corrente contínua, e apresentadas questões associadas aos componentes da rede. Também são indicados nesse trabalho problemas com a reversão de polaridade da transmissão em CC (como ocorre quando usado CSC) para o material de isolamento de alguns cabos. LIANG e JACKSON [13] indicam a ocorrência de problemas com a circulação de harmônicos em cabos submarinos em redes de distribuição *offshore* em corrente alternada. ALVES *et al.* [14] mencionam alguns problemas relacionados aos processos de retificação e inversão de corrente por conversores fonte de tensão e fonte de corrente. ABB [15] descreve alguns tipos de redes CCAT, abordando aspectos operacionais, de projeto, controle, proteção, seus componentes e aplicações. O trabalho de LUDOIS e VENKATARAMANAN [16] faz uma comparação de redes em corrente contínua formadas por conversores fontes de tensão e corrente, mostrando as vantagens e desvantagens desses conversores e a aplicabilidade dos mesmos em algumas situações. Em [17] também é discutido o uso de diferentes tipos de conversores para utilização em redes em corrente contínua. B4.37 [18] e ANDERSEN [19] fazem uma comparação entre conversores fonte de tensão e corrente e ressaltam as características operacionais do conversor VSC, de seu controle e de seu projeto conjugada à rede CCAT. ANDERSEN [19] também apresenta uma análise da operação do VSC e da melhor aplicabilidade desses conversores para redes *offshore*. WANG *et al.* [20] retratam pesquisas e avanços de

VSC-CCAT, mostrando diversas topologias, modelamento, técnicas de controle relacionadas e aplicações em sistemas de potência. Também apresentam alguns projetos multiterminais de VSC-CCAT e redes híbridas utilizando conversores CSC e VSC, além de listar alguns projetos de VSC-CCAT. Os trabalhos de HYTTINEN *et al.* [1] e GILJE *et al.* [21] discutem a aplicabilidade de sistemas em CC em redes *offshore* utilizando VSC ao invés de CSC, assim como apontam alguns ganhos com a utilização de tal rede. Em [22] é descrita a primeira instalação de transmissão em corrente contínua com tensão elevada utilizando conversores fonte de tensão (VSC), ocorrida na Suécia em 1997. Apresenta ainda vantagens de utilização de VSCs e aplicação dessa tecnologia para redes de menor potência. JOHANSSON *et al.* [23] e ERIKSSON *et al.* [24] também discutem os benefícios da utilização de VSC na transmissão em corrente contínua. CALLAVIK *et al.* [25] discutem a evolução das redes que utilizam VSC, ressaltando que as perdas elétricas diminuíram consideravelmente, passando de 3% para menos que 1%, graças a três fatores principais: primeiro, a evolução tecnológica dos IGBTs, que passaram a ter menores perdas de condução e chaveamento e terem maior robustez (maior tensão por IGBT, diminuindo o número de chaves conectadas em série). Segundo, as novas topologias dos conversores, que também reduziram as perdas e a necessidade de filtros CA. Por último, novos esquemas de chaveamento que diminuíram as perdas e melhoraram a performance dinâmica. Os autores também discutem a aplicabilidade de redes multi terminais com conversores VSC. O controle utilizado no retificador é apresentado em [23]. Em [26] é discutido a oportunidade de se utilizar ligas de alumínio ao invés de cobre em cabos submarinos. Essa solução começa a ser viável com o aumento da tensão de transmissão, trazendo uma economia adicional ao projeto. CALLAVIK *et al.* [27] detalha o funcionamento de disjuntores CC, que viabilizariam a rede multiterminal CCAT proposta no trabalho. Em [28], [29], [30] e [31] são discutidas a modelagem do motor síncrono de ímãs permanentes e as estratégias de controle, entre elas a vetorial, utilizada nessa dissertação.

## 1.4 Organização do documento

No capítulo 2 são descritos os componentes da rede estudada, o que foi considerado no modelo dos componentes das simulações realizadas e a modelagem do controle da rede.

No capítulo 3 as simulações e seus resultados são apresentados, permitindo a análise do comportamento do sistema para os seis casos estudados: regime permanente, faltas monofásica e trifásica na entrada do retificador, faltas monofásica e trifásica em um inversor da rede submarina e falta no meio do cabo de transmissão.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.



# Capítulo 2

## Modelagem e configuração do sistema

### 2.1 Premissas e considerações

#### 2.1.1 Uso de transmissão em corrente contínua em vez de alternada

A eletrificação submarina traz desafios que já foram superados em redes convencionais. Um desses desafios é o acréscimo no sistema de compensadores usados em reguladores de tensão. Adicionar esse equipamento na rede acarretaria na instalação de módulos submarinos adicionais e conexões extras de média tensão, conferindo ao sistema maior complexidade na instalação, aumento dos custos e diminuição da confiabilidade do sistema.

Com o objetivo de obter maior eficiência energética na transmissão e conversão da energia provenientes dos geradores, existem propostas de utilização de tensões nominais superiores às atuais, majoritariamente entre 4,16 kV e 6,6 kV (tensões nominais da maioria dos motores submarinos atuais).

A utilização de tensões tão baixas nos projetos atuais foram baseadas na falta de espaço para acomodar os penetradores (conectores elétricos que têm como uma de suas principais funções resistir às altas pressões e temperaturas provenientes do poço e garantir que o petróleo não vaze para o mar) que ficam logo acima do motor em modelos específicos de bombas que são instaladas dentro do poço.

Entretanto, atualmente essas bombas estão sendo substituídas por modelos que ficam instaladas em equipamentos chamados Módulos de Bombeio (MoBo). Esses módulos são instalados no leito marinho, o que traz flexibilidade nas intervenções e aumentam a disponibilidade do sistema. Essa substituição também diminui de forma considerável as restrições dimensionais desses conectores.

A tensão nominal de geração nas plataformas geralmente é 13,8kV. Atualmente, essa tensão é reduzida para aproximadamente 4,2kV (tensão de entrada dos inversores de frequência) e transmitida individualmente para cada motor através de um cabo dedicado (denominado umbilical) com uma tensão de saída pouco superior à nominal do motor. À medida que mais motores são utilizados no mesmo campo, se torna impraticável não se pensar em transmitir energia para as bombas submarinas através de um umbilical compartilhado por vários motivos, entre eles:

- As plataformas antigas e em operação não foram projetadas para abrigar os inversores de frequência, exigindo muitas obras na plataforma para adaptação das mesmas;
- Nos casos em que muitos inversores são necessários, não há espaço na plataforma para a instalação dos mesmos;
- O custo de todos os itens necessários para a implementação das redes de transmissão dedicadas na maioria das vezes é muito menos atrativo que a rede utilizando o umbilical compartilhado.

Nesse novo cenário, uma solução prática e atraente seria uma rede com o umbilical compartilhado, onde a transmissão teria a potência e a tensão controlados por um retificador comum para todos os motores submarinos. E com o intuito de eliminar o transformador submarino, a tensão de entrada dos inversores submarinos seria adequada tanto para seus componentes quanto para uma transmissão eficiente.

Um dos pontos necessários para garantir a adequação da rede e o devido funcionamento dos conversores de frequência é a correta regulação da tensão de entrada dos inversores submarinos. Em uma rede em corrente contínua, essa regulação seria mais simples e robusta.

A discussão em torno do retificador ativo compartilhado, dos inversores dedicados e do controle desses componentes de forma adequada para a rede proposta são os temas centrais dessa dissertação.

## **2.1.2 Considerações gerais no desenvolvimento do trabalho**

Não estão cobertos nas análises desse trabalho:

- Dimensionamento da geração elétrica e da rede de distribuição da plataforma.
- Adequação do modelo para atendimento da norma de nível harmônico permitível em plataforma.
- Análise das características elétricas de um umbilical real de potência e eventuais erros de medição por parte dos fornecedores.

- Aspectos da energização do umbilical
- Aspectos operacionais e de instalação de equipamentos
- Dimensionamento de todos os componentes usados em uma rede real, como os IGBTs utilizados no retificador e inversores.
- Maturidade tecnológica dos componentes usados nas simulações
- A representação da dinâmica do conjunto motor e bomba é retratada de forma simplificada.
- Os níveis de distorção harmônica e  $dV/dt$  permissíveis nos motores.
- O controle operacional dos disjuntores de corrente contínua, como controle da corrente antes da interrupção, etc.

### 2.1.3 Escolha dos tipos de conversores da rede

O tipo de conversor que será utilizado no futuro das redes submarinas dependerá de vários fatores, como confiabilidade, robustez, eficiência, qualidade da rede onde serão conectados, disponibilidade e maturidade das tecnologias no mercado, custos envolvidos com os conversores e equipamentos auxiliares, facilidade de compactação (para marinização de equipamentos submarinos), etc.

Entretanto, uma comparação preliminar pode ser realizada baseada em alguns aspectos básicos dos dois tipos de conversores mais comuns atualmente (fonte de corrente e fonte de tensão) com o intuito de justificar a escolha do conversor utilizado no trabalho.

Abaixo pode-se encontrar uma comparação entre os tipos de conversores.

- Conversores fonte de tensão:
  - + Conversores baseados em IGBT;
  - + Controle por modulação de largura de pulso (PWM);
  - + Maior controle de tensão no lado CC e corrente no lado CA;
  - + Robustez contra curtos no lado CA;
  - + A rede CA pode ser fraca;
  - + Capacidade de controle das potências ativa e reativa independentemente;
  - + Rápida resposta dinâmica;
  - + A polaridade da tensão nos cabos nunca é invertida, o que diminui os custos com os cabos, pois alguns isolantes comumente utilizados nos cabos CC não toleram inversão de polaridade; [18]

- + Os conversores fonte de tensão são consideravelmente mais compactos que os fonte de corrente devido ao menor tamanho dos filtros de harmônicos e que esse filtros não precisam ser chaveados; [18]
  - Filtro de harmônico necessário;
  - Os capacitores da rede alimentam a falta de forma descontrolada;
  - Nível de tensão e corrente menores que os possíveis em conversores fonte de corrente;
- Conversores fonte de corrente:
    - + Conversores baseado em tiristores;
    - + Controle de ângulo de disparo;
    - + Maior controle da corrente no lado CC;
    - Suscetível a falhas de comutação;
    - Necessita de rede CA forte;
    - Filtro de harmônico necessário;
    - A potência reativa tem que ser controlada através de equipamentos adicionais;
    - + Melhor controle quando a rede está sujeita a falta;
    - + Maior capacidade de tensão e corrente que os conversores fonte de tensão;

Em relação às características da rede utilizada em plataformas:

- Quando utilizados conversores fonte de corrente, existe a necessidade de grandes filtros de harmônicos e capacitores no lado CA para prover potência reativa para o conversor. Isso reduz a estabilidade da rede CA devido à redução da potência reativa disponível quando há redução da tensão CA. A recomendação é que esse tipo de conversor seja utilizado em redes onde a relação das potências de falta e a nominal seja pelo menos maior que três [19], o que não é o caso de plataformas de petróleo, suscetíveis a distúrbios devido a acionamentos de motores de maior potência. Se o fornecimento de potência for a partir do continente, esse argumento pode não ser válido.
- Há um requisito de qualidade da rede nas plataformas e a instalação de equipamentos adicionais para compensação de reativos deve ser evitada.
- As características das faltas no cabo de transmissão de potência não são importantes, pois seria considerada uma falha permanente que acarretaria a falha total do sistema. Caso ocorra uma falha no lado CC, o retificador simplesmente poderia bloquear a alimentação ou o disjuntor do lado CA poderia atuar.

- A velocidade da resposta dinâmica do sistema não é considerada um requisito importante. A aceleração e desaceleração dos motores podem ser feitas de forma lenta e controlada. Não é esperada uma solicitação de carga brusca no sistema.
- Os níveis de tensão e corrente das redes submarinas para exploração de petróleo são muito menores que os disponíveis no mercado.

Analisando as características acima, os conversores fonte de tensão parecem ser mais adequados para a rede proposta no trabalho. Foram considerados conversores de dois níveis utilizando IGBTs, devido à simplicidade e robustez do controle. Não foram considerados aspectos para diminuição da distorção harmônica no trabalho.

Importante salientar que existem vários tipos de topologias de conversores de tensão, procurando aumentar as vantagens e eliminar as deficiências. Logo, a comparação acima é muito dinâmica. Entre as topologias existentes, a multinível modular está evoluindo rapidamente e é considerada muito promissora, por apresentar diversas vantagens em relação aos conversores mais utilizados atualmente. Mais detalhes das características e comparações entre as topologias podem ser encontrados em [16].

## 2.2 Modelagem e configuração do sistema

Em campos de petróleo, a distribuição dos poços e a necessidade de bombeamento depende de estudos seguidos de testes antes da especificação dos equipamentos que irão compor o sistema de exploração. Dentre os inúmeros casos possíveis de configuração do sistema, o que demonstrar melhor relação entre retorno financeiro e risco é escolhido para ser executado. Portanto, muitas configurações são possíveis de serem estudadas. Nesse trabalho, foi escolhida uma das distribuições mais factíveis para provar o conceito da rede proposta, sendo constituída pelo primeiro módulo de bombeio situado muito próximo do barramento principal e os demais módulos de bombeio a um e dois quilômetros do barramento principal. Outras configurações poderão ser exploradas em trabalhos futuros.

A rede que foi analisada, com seus principais componentes pode ser vista na Figura 2.1, enquanto o modelo mostrando a interligação dos blocos no Simulink e o diagrama da rede podem ser vistos nos anexos da dissertação. A rede é dividida em equipamentos utilizados em instalações de superfície (plataforma, embarcação, instalação na costa, etc) e submarinas.

As instalações de superfície são compostas pela unidade geradora, representada por uma fonte de tensão, e pelo retificador ativo (conversor fonte de tensão), responsável pelo fornecimento de potência em corrente contínua e em tensão controlada

para as cargas submarinas. A jusante do retificador foram instalados reatores em série com o umbilical para diminuir a oscilação da corrente e capacitores em paralelo com o objetivo de estabilizar a tensão no umbilical. Os valores dos reatores e capacitores no modelo são especificados ao longo do trabalho. As instalações submarinas são compostas de três conjuntos, sendo cada conjunto formado por um disjuntor de corrente contínua, um inversor e um conjunto motor-bomba. Cada conjunto funciona de forma independente do outro com suas necessidades de potência e controles próprios, representando três módulos de bombeio distintos espalhados pelo campo de petróleo. Apesar de serem independentes, cada motor está fornecendo ao eixo de sua respectiva bomba, a não ser que seja dito ao contrário em uma análise específica, um torque mecânico de 2500 N.m a uma velocidade de 4000 rpm, totalizado aproximadamente 1,05 MW de potência constante.

O umbilical compartilhado é responsável pela transmissão de potência entre as instalações de superfície e submarinas. Na rede estudada, um umbilical de 30 km foi considerado. As instalações submarinas são alimentadas por uma barra interligando os módulos de bombeio ao umbilical compartilhado. A interligação dos componentes do módulo de bombeio às instalações submarinas é feita através de conectores que permitem a conexão dos mesmos no leito marinho. A barra e os conectores submarinos não são considerados no modelo.

Apesar de todos os componentes elétricos necessários para o funcionamento do sistema estarem disponíveis comercialmente para os níveis de tensão e potência requeridos, não está sendo considerado nesse trabalho uma análise de adaptação desses componentes para o ambiente submarino, devido a alta complexidade das análises mecânicas, térmicas, etc necessárias e por não fazer parte do objetivo do trabalho.

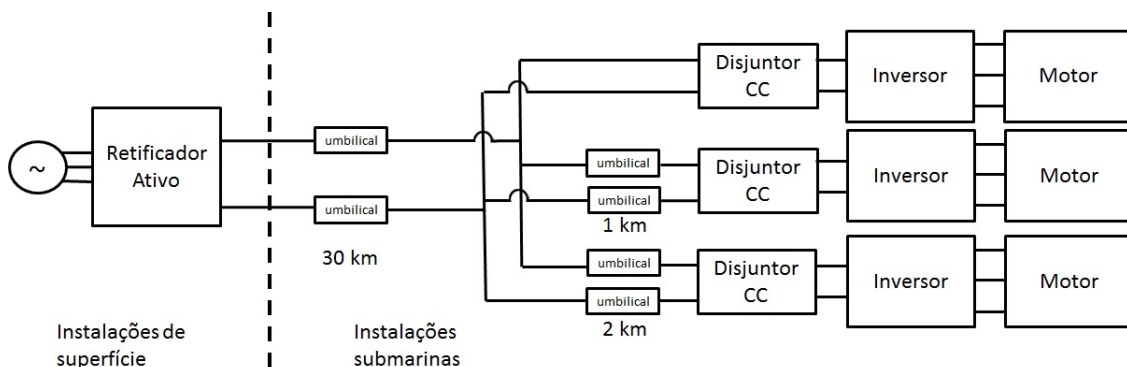


Figura 2.1: Topologia de rede proposta para ser analisada.

Os conectores submarinos molhados (que podem ser conectados/desconectados no leito marinho) para corrente contínua trazem alguns desafios no seu projeto, principalmente em relação ao estresse constante no dielétrico do conector e também no gerenciamento da contaminação do fluido dielétrico, que ocorre durante a conexão

submarina. O campo elétrico constante entre os contatos do conector alinha os agentes contaminantes, diminuindo a efetividade dielétrica do fluido. Entretanto, alguns modelos desses conectores já são comercializados e pode-se considerar que o desenvolvimento de um conector adequado para as características da rede proposta é dependente somente da necessidade do mercado, envolvendo baixo risco tecnológico.

O disjuntor em corrente contínua está disponível no mercado através do fabricante ABB e será apresentado em uma seção futura do trabalho. [27]

A consequência de uma falta no sistema é uma grande preocupação para a rede proposta, principalmente devido à rede ser considerada fraca. As consequências das faltas em diversas partes da rede foram estudadas através de simulações computacionais e foram descritas em um capítulo dedicado ao comportamento do sistema em diversas situações.

## 2.3 Componentes do Sistema

### 2.3.1 Retificador

O retificador trifásico (fonte de tensão) é formado basicamente por uma ponte retificadora composta de seis IGBTs com diodos em antiparalelo. A retificação é ativa e busca controlar o nível da tensão no cabo utilizado na transmissão (umbilical). Na entrada de cada fase do retificador, há um indutor ( $L_{abc}$ ) e, na saída, capacitor e indutores para estabilizar a tensão e diminuir o “ripple” no umbilical. O retificador utilizado nesse trabalho ajusta a potência entregue para o umbilical, que por sua vez transmite essa potência em tensão contínua para até três conjuntos de inversor e motor. Cada inversor recebe aproximadamente 1,38 MVA, e fornece parte dessa potência ao seu respectivo motor, cuja velocidade pode atingir até 6000 rpm, equivalente a uma frequência de saída de 100 Hz. O controle foi baseado em [32].

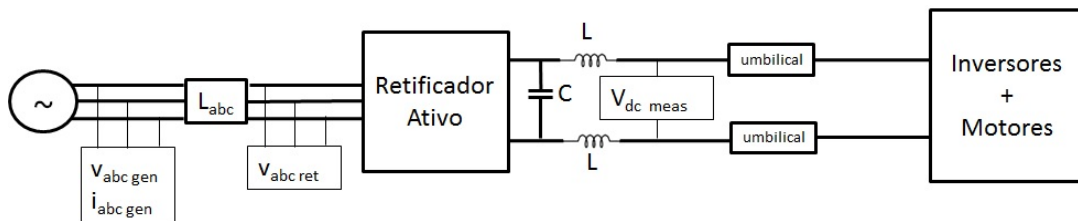


Figura 2.2: Esquema dos componentes e sensores do controle do retificador.

Para o funcionamento do controle, são necessárias as seguintes medições:

- Tensão das três fases de entrada do retificador ( $v_{abc\ gen}$ ).
- Corrente das três fases de entrada do retificador ( $i_{abc\ gen}$ ).

- Tensão na saída do retificador ( $V_{dc\ meas}$ ).

O controle é baseado no controle de corrente, onde a corrente de entrada em cada fase é controlada através de uma corrente de referência. Esse tipo de controle é capaz de garantir excelentes fatores de potência do retificador. Em regime permanente com a potência nominal, o fator de potência na entrada do retificador é aproximadamente 0,964. O diagrama de blocos do controle é mostrado na Figura 2.3.

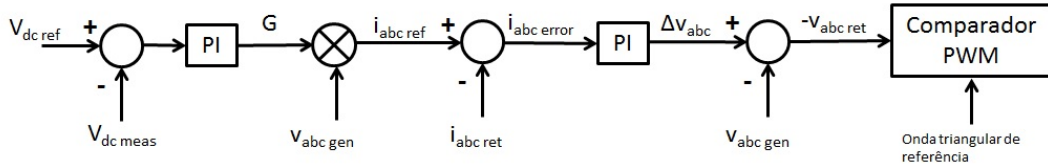


Figura 2.3: Diagrama de blocos do controle do retificador.

O objetivo principal do controlador do retificador é manter a tensão de saída do retificador igual à tensão de referência, especificada em 13,8 kV.

De forma geral, o controle do retificador é especificado para que as fases das correntes de entrada do retificador estejam alinhadas com as fases das tensões fase-neutro de entrada do mesmo, mantendo alto fator de potência, e a magnitude das correntes de entrada do retificador sejam proporcionais à condutância da carga, mantendo a tensão de saída constante em regime permanente.

Para tanto, a tensão medida na saída do mesmo ( $V_{dc\ meas}$ ) é comparada com a tensão de referência ( $V_{dc\ ref}$ ).

A diferença entre esses dois valores passa por um controlador proporcional-integral, resultando na condutância da carga vista pelo retificador (umbilical, os condutores da rede de distribuição submarina e os três conjuntos inversor-motor). O valor da condutância da carga ( $G$ ) é então multiplicado pelas três tensões fase-neutro a montante da indutância de entrada do retificador ( $v_{abc\ gen}$ ), gerando as três correntes de fase de referência do controlador ( $i_{abc\ ref}$ ).

As correntes de referência geradas anteriormente são então comparadas com as correntes de entrada do retificador ( $i_{abc\ ret}$ ) gerando um erro que será a entrada do segundo bloco proporcional-integral.

A equação que rege as tensões a montante da ponte retificadora é relativa a queda de tensão nos indutores de entrada ( $L_{abc}$ ) em cada fase do retificador. Ela pode ser descrita como:

$$v_{abc\ gen} - v_{abc\ ret} = L_{abc} \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Onde:



- $v_{abc\ gen}$  - tensão fase-neutro a montante dos indutores do retificador.
- $v_{abc\ ret}$  - tensão fase-neutro a jusante dos indutores de entrada do retificador.
- $L_{abc}$  - indutância de entrada do retificador.
- $\Delta i$  - erro entre as correntes de entrada do retificador  $i_{abc\ ret}$  e as de referência gerada pelo controle  $i_{abc\ ref}$ .
- $\Delta t$  - intervalo de passo da simulação.

Comparando (2.1) com o esquema da Figura 2.2, a saída do segundo bloco proporcional-integral retrata o valor da queda de tensão nos indutores  $L_{abc} \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$ . Esse valor é então subtraído da tensão a montante dos indutores, resultando no valor em módulo da tensão desejada na entrada da ponte retificadora ( $v_{abc\ ret}$ ). Importante notar que o controle fornece a tensão de referência para o comparador PWM com sinal oposto ao real, pois:

$$-v_{abc\ ret} = L_{abc} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} - v_{abc\ gen} \quad (2.2)$$

Para corrigir o sinal oposto ao usual em um comparador PWM, a lógica de comparação foi alterada para disparar os sinais que comandarão os IGBTs quando a onda triangular de referência for maior que o sinal de controle ( $-v_{abc\ ret}$ ).

No trabalho, uma frequência de chaveamento de 2340 Hz foi utilizada e os resultados das simulações foram considerados satisfatórios. A frequência de chaveamento deve ser considerada no projeto como um compromisso entre as perdas nos IGBTs e o nível de harmônicos no sistema e controlabilidade do lado CA. Frequências altas de chaveamento geram harmônicos de maior frequência, que são mais fáceis de filtrar e geram menor ripple na corrente contínua no umbilical (permitindo um capacitor menor). [19]

Quando se trata de instalações offshore, é desejável que elas sejam as mais compactas possíveis. Portanto, menores perdas de potência tornam mais fáceis a compactação e resfriamento dos conversores.

Os reatores de entrada do retificador desempenham importante papel para o controle da potência ativa e reativa do retificador, além de limitar a corrente de falta e filtrar os harmônicos de alta frequência para a rede CA. Eles também devem ser especificados de acordo com o a relação de compromisso entre resposta do controle e sobretensão permissível na saída do retificador. Valores pequenos de indutores permitem respostas mais rápidas do retificador, mas a sobretensão em regime transitório é mais elevada quando comparada com valores de indutores de maior valor. Tipicamente, o reator tem impedância de curto-circuito de 0,15 pu. [19]

### Dados considerados no modelo:

Tensão eficaz de saída do gerador (fase-fase)	-	6600 V
Potência ativa de entrada de cada inversor	-	$\sim 1,38$ MW
$L_{abc}$ - indutância na entrada do retificador	-	0,005 H
Tensão média de saída do retificador	-	13800 V
Indutância na saída do retificador ( $L$ )	-	0,01 H
Capacitância na saída do retificador ( $C$ )	-	1000 $\mu$ F
Frequência de chaveamento	-	2340 Hz

### 2.3.2 Umbilical

O umbilical, onde ficam os cabos usados na transmissão de energia, geralmente é o elemento mais caro de um sistema de bombeio submarino. Logo, o umbilical é um excelente candidato para se procurar diminuir os custos e, assim, viabilizar um projeto de bombeamento submarino. O objeto dessa parte do trabalho não é analisar todos os detalhes construtivos, mas sim apresentar de forma generalista os elementos do cabo elétrico, alguns componentes que podem existir no umbilical e que podem influenciar no sistema de transmissão, e os ganhos operacionais principais que se podem atingir ao se adotar o modelo de transmissão de energia proposto nesse trabalho ao invés do que é atualmente praticado.

#### Elementos construtivos do cabo elétrico submarino

De forma geral, o cabo para aplicação submarina usado na transmissão de energia é constituído de vários elementos que procuram prover as características elétricas e mecânicas necessárias para a instalação, operação e recuperação do mesmo em caso de falha prematura. A Figura 2.4 apresenta um exemplo de um cabo submarino com seus elementos construtivos destacados.

- Condutor

O condutor é o elemento responsável pela condução da corrente. O condutor é formado por um conjunto de vários fios cujos formatos dependem do tamanho da seção transversal do condutor. O tamanho da seção transversal, o material (geralmente cobre ou alumínio), a máxima temperatura ambiente onde o umbilical será instalado e a configuração do cabo e do umbilical (que pode ter também linhas hidráulicas, cabos ópticos e elétricos em sua composição) são os principais fatores que determinam a ampacidade do cabo. Além dos materiais tradicionais, algumas iniciativas da indústria estão buscando o uso de nano tecnologia para diminuir as perdas elétricas dos condutores, diminuindo o peso e a seção transversal do cabo.

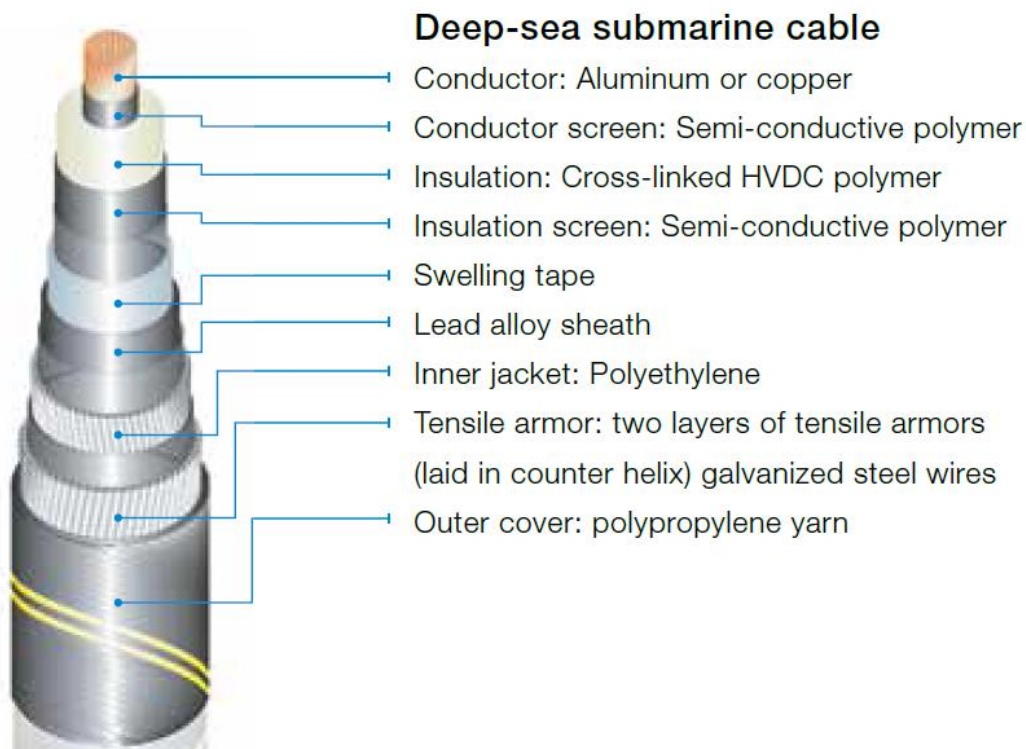


Figura 2.4: Esquema de um cabo submarino típico .

- Camada semicondutora interna

Camada com o objetivo de tornar circular a seção transversal do condutor e diminuir a distorção no campo elétrico sobre o isolamento.

- Isolamento

Material que proporciona o isolamento elétrico do cabo. Esse material deve ser de excelente qualidade, livre de impurezas, para evitar problemas que podem causar falha prematura do isolamento, como descargas parciais.

- Camada semicondutora externa

Essa última camada, junto com as duas anteriores, completa o sistema de isolamento elétrico do cabo. Ela é responsável pela correção da distorção do campo elétrico que eventualmente não foi corrigida pelas camadas isolante e semicondutora anteriores, principalmente quando o cabo é aproximado de pontos com potencial elétrico diferente.

- Blindagem metálica

Camada de liga de chumbo para tratamento das correntes de falta.

- Jaqueta interna

Camada cujo objetivo é prover proteção mecânica e contra corrosão à camada de liga de chumbo.

- Armadura tensionadora

Camada composta de fios de aço galvanizados e instalados em volta da jaqueta interna para dar suporte mecânico ao cabo e proteção contra impactos. A armadura tensionadora recebe também um tratamento contra corrosão.

- Camada protetora externa

Camada que protege as camadas internas contra inundação e danos mecânicos.

### **Comparação da rede proposta com as redes atualmente instaladas**

As comparações efetuadas nessa seção são entre as duas redes a seguir:

- a Rede proposta nesse trabalho, composta de retificador na superfície e transmissão em corrente contínua a 13800 V, através de umbilical compartilhado, para um barramento submarino, de onde a distribuição elétrica para cada carga é realizada.
  - b Rede atualmente utilizada em projetos de bombeamento submarino, composta de variador de frequência na superfície e transmissão em corrente alternada a 6000 V através de umbilical. Tanto o variador de frequência quanto o umbilical são dedicados para cada carga a ser alimentada.
- Redução do comprimento total do umbilical a ser utilizado no sistema.

Em praticamente todos os projetos de bombeamento submarino existentes no mundo são utilizados umbilicais dedicados para energizar as cargas. Como o umbilical é geralmente o componente mais caro do sistema, o uso de um umbilical compartilhado para todas as cargas pode diminuir sensivelmente o comprimento total do umbilical a ser adquirido. Além dessa economia, o fato de utilizar dois cabos com tensão maior podendo transmitir a mesma potência que três cabos com tensão menor, pode trazer grande redução dos custos de aquisição do projeto, tornando essa alternativa muito atrativa economicamente.

- Perdas elétricas menores.

A transmissão em corrente contínua apresenta perdas ôhmicas, enquanto em corrente alternada as perdas eletromagnéticas também estão presentes. Como consequência, a transmissão em corrente alternada resulta em maiores custos com geração de energia e maior aquecimento do umbilical (ou maior seção transversal do umbilical), elevando os custos operacionais e de aquisição do sistema e trazem maiores restrições operacionais ao sistema.

- Compensação de potência reativa.

Em alguns casos, a necessidade de compensação de potência reativa típica em transmissão em corrente alternada restringe o comprimento do umbilical, inviabilizando o seu uso em projetos com longa distância entre a geração e as cargas. A compensação da potência reativa também eleva a complexidade dos sistemas submarinos. Na rede proposta, a compensação de potência reativa não é necessária.

- Possibilidade de utilizar umbilical com cabo de liga de alumínio.

Como as perdas na transmissão em corrente contínua e em 13800 V são menores do que em corrente alternada a 6000 V, pode-se cogitar a troca do material do condutor de cobre para uma liga de alumínio, novamente tornando o projeto mais atrativo economicamente. [26]

- Aumento da complexidade da rede e diminuição da confiabilidade do sistema.

Os projetos com sistemas elétricos totalmente dedicados são mais simples de operar e oferecem maior confiabilidade e disponibilidade, principalmente pela maior redundância e simplicidade na coordenação da proteção.

- Blindagem metálica mais barata.

Os cabos submarinos utilizados em corrente alternada possuem blindagem metálica feita de cobre, liga de alumínio ou aço inoxidável não magnético devido aos fenômenos ferromagnéticos. Em cabos para corrente contínua, fios de aço galvanizados podem ser utilizados, gerando diminuição do custo do cabo. Além do custo, o aço galvanizado oferece melhores propriedades mecânicas que a maioria dos materiais não magnéticos.

- Peso total do cabo.

O aumento da tensão e o uso de corrente contínua permite o uso de cabos mais leves, diminuindo os esforços mecânicos sobre o umbilical e sobre as instalações de superfície.

- Disponibilidade e custo com embarcações para instalação e intervenção.

Uma parcela importante dos custos de instalação e intervenção em sistemas submarinos é devida a complexidade dos barcos necessários nas operações (barcos para operações complexas possuem disponibilidade restrita e taxas de aluguel muito elevadas). O uso de cabos menores e mais leves aumenta consideravelmente a quantidade de barcos disponíveis com capacidade para realizar essas operações, diminuindo os custos para a operação de instalação e

eventual intervenção no sistema. O uso de um comprimento menor de umbilical também diminui os gastos e o tempo de instalação.

- Maior facilidade de roteamento do cabo na plataforma.

Cabos menores oferecem maior flexibilidade, o que facilita a instalação do cabo na plataforma.

- Necessidade e complexidade de emendas no cabo.

Cabos menores ocupam menos espaço nos carretéis de instalação. Logo, cada carretel pode transportar um comprimento maior de umbilical. Isso é diretamente proporcional ao número de emendas necessárias ao longo do cabo e também ao número de emendas que precisam ser realizadas em alto mar, muito menos confiáveis que as realizadas em terra devido à dificuldade de ter um ambiente controlado em alto mar, aumentando a probabilidade de contaminação das emendas por agentes prejudiciais aos materiais do cabo.

Nas simulações realizadas nesse trabalho, as características dos cabos elétricos utilizados na transmissão foram retiradas de folhas de dados de umbilicais trifásicos reais utilizados em projetos submarinos existentes e parametrizadas no programa PowerSys. Nos cabos elétricos reais, os parâmetros variantes com a frequência respondem por um maior amortecimento tanto das tensões quanto das variações bruscas na frequência das oscilações de tensão encontradas nos terminais dos cabos elétricos [33]. A existência da blindagem nesses cabos afeta a velocidade de propagação dos modos mais rápidos, como pode ser visto em [34]. Entretanto, no presente trabalho, o cabo foi representado por um equivalente monofásico apesar de que, em cabos reais, a sua armadura e blindagem o torna um dispositivo multifásico e variante na frequência.

Foi utilizado o modelo de parâmetros distribuídos nas simulações.

Dados considerados no modelo:

- Umbilical entre instalações de superfície e barramento submarino (referência de  $240\text{mm}^2$ ).

Número de fases	- 2.
Frequência usada nas especificações elétricas	- 60 Hz.
Resistência por unidade de comprimento	- $0,09875 \Omega/\text{km}$ .
Indutância por unidade de comprimento	- $0,408 \text{ mH}/\text{km}$ .
Capacitância por unidade de comprimento	- $0,383 \mu\text{F}/\text{km}$ .
Comprimento do umbilical principal	- 30 km.

- Umbilical entre barramento submarino e inversores-motores (referência de  $120\text{mm}^2$ ).

Número de fases	- 2.
Frequência usada nas especificações elétricas	- 60 Hz.
Resistência por unidade de comprimento	- 0,199 $\Omega$ /km.
Indutância por unidade de comprimento	- 0,343 mH/km.
Capacitância por unidade de comprimento	- 0,430 $\mu$ F/km.
Comprimento entre barramento principal e inversor 1	- 0 km.
Comprimento entre barramento principal e inversor 2	- 1 km.
Comprimento entre barramento principal e inversor 3	- 2 km.

### 2.3.3 Disjuntor CC

Os disjuntores mecânicos de alta tensão em corrente contínua atuais são capazes de interromper curtos-circuitos em algumas dezenas de milissegundos, muitas vezes tempo insuficiente para os requisitos de confiabilidade de uma rede CC. Eles utilizam componentes passivos para criar um circuito ressonante e gerar uma corrente contrária à do curto-circuito, atingindo a anulação da corrente no disjuntor para a abertura segura do circuito.

A evolução desses disjuntores seria utilizar semicondutores, o que traria maior velocidade na interrupção do circuito e não teria grandes limitações do nível de tensão. Entretanto, um disjuntor baseado somente em semicondutores geraria grandes perdas nos mesmos, da ordem de cerca de 30% da potência de uma estação conversora fonte de tensão.

Uma solução que traria os benefícios de velocidade de interrupção com baixas perdas é o uso de um disjuntor híbrido, combinando chaves semicondutoras e mecânicas, que foi implementado e testado pelo fabricante ABB.

#### Visão geral da funcionalidade do disjuntor CC do fabricante ABB

O disjuntor de corrente contínua desenvolvido pela ABB tem em sua construção os seguintes elementos: reator de entrada, disjuntor de isolamento e desconexão de corrente residual e disjuntor híbrido. Este último é composto de dois circuitos ligados em paralelo, como mostra a Figura 2.5.

Um dos circuitos do disjuntor híbrido é utilizado para a condução da corrente em condições normais, usado como um by-pass do disjuntor principal, garantindo perdas baixas. Esse circuito é composto de uma chave mecânica ultrarrápida em série com uma chave semicondutora comutadora de carga.

Quando detectada uma falta, a chave semicondutora comutadora transfere a corrente para o outro circuito em paralelo (disjuntor principal) e a chave mecânica ultrarrápida abre. Após a abertura, o disjuntor principal interrompe a corrente. O disjuntor principal é composto por vários circuitos ligados em série dimensionados

para a tensão total e para a corrente de interrupção. Esses circuitos ligados em série são compostos de IGBTs ligados em paralelo com bancos de supressores de surto.

Um disjuntor adicional a montante do disjuntor híbrido completa a solução, sendo o responsável por interromper a corrente residual e isolar o circuito onde a falta foi detectada. Esse isolamento também tem como função a proteção dos bancos de supressores de surto contra sobreaquecimento.

O comportamento do sistema se dá da seguinte forma: imediatamente após a falta, a corrente começa a subir. Quando a chave do circuito de by-pass é aberta, a corrente de falta começa a passar pelo banco de supressores de surto, estabelecendo uma tensão contrária no disjuntor, e como consequência, reduzindo a corrente de falta para zero e dissipando a energia da rede. Quando a corrente passa a ser muito pequena, a chave mecânica a montante do disjuntor principal é aberta. Essa chave sofre uma tensão muito pequena sobre ela, diminuindo a necessidade de especificação de uma chave muito robusta.

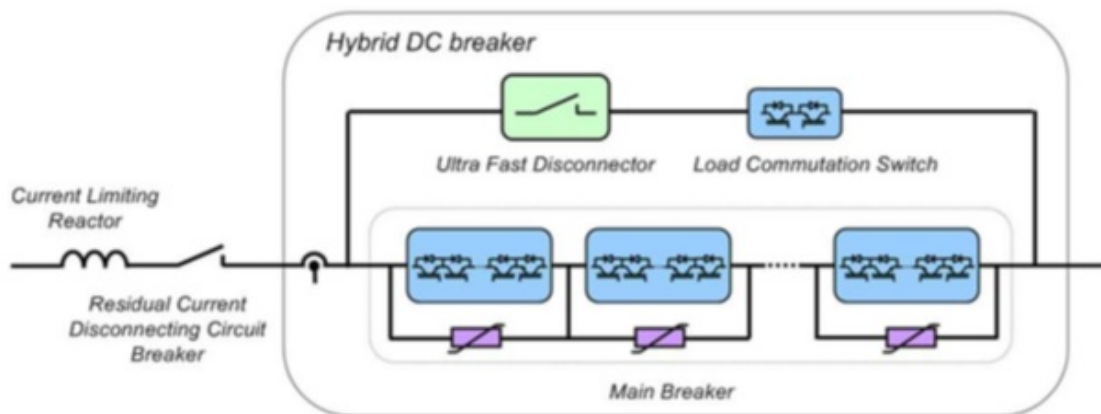


Figura 2.5: Esquema do disjuntor híbrido de corrente contínua.

O tempo total de atuação do disjuntor híbrido pode ser dividido em duas partes, como mostrado na Figura 2.6. O primeiro período, denominado tempo de interrupção, é caracterizado pelo aumento da corrente. Esse tempo é a soma do tempo de resposta do esquema de proteção e do tempo de atuação da chave comutadora. O segundo período, quando a corrente é efetivamente interrompida no disjuntor principal, é denominado como extinção da falta.

A especificação do disjuntor principal deve ser de acordo com a corrente máxima que pode ser atingida no disjuntor, fruto do tempo de aumento da corrente (tempo de interrupção) e da taxa de aumento da corrente, que pode ser limitada pelo reator de entrada. O nível máximo da corrente a ser extinta deve estar de acordo com a capacidade de dissipação de energia dos supressores de surto.

Logo, a especificação do tempo de interrupção do disjuntor muitas vezes é um compromisso entre menor custo do disjuntor, dado por um tempo de interrupção



menor (menor energia a ser dissipada), e maior flexibilidade para coordenação da proteção do sistema, que se beneficia de tempo de interrupção maior. Para a topologia de rede proposta no trabalho, o tempo de interrupção não precisaria ser flexibilizado, pois os disjuntores CC são instalados somente próximos das cargas e não há interligação entre sistemas de diferentes áreas.

Na ocorrência de uma falta, o disjuntor híbrido é parametrizado para começar a interromper a corrente em três situações distintas:

- Quando atinge a máxima corrente capaz de ser dissipada pelos supressores de surto;
- Quando recebe um sinal de trip da proteção do sistema, garantindo a seletividade da proteção;
- Quando atinge o tempo máximo capaz de suportar sobrecorrente;

No caso das duas últimas situações, o disjuntor híbrido é capaz de estender o tempo máximo de sobrecorrente no equipamento ao operar no modo limitador de corrente, anulando a queda de tensão sobre o reator e prevenindo o aumento da corrente sobre o mesmo. O tempo máximo de operação nesse modo depende da capacidade de dissipação de energia dos supressores de surto.

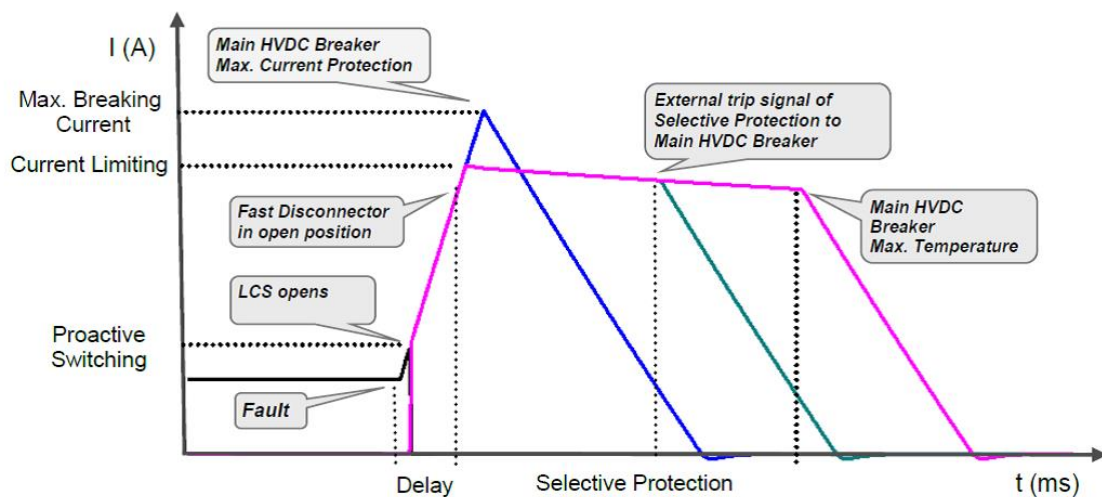


Figura 2.6: Aspectos construtivos do disjuntor CC do fabricante ABB.

O disjuntor principal é composto de vários módulos, cada um com um banco de supressores de surto, limitando a tensão máxima sobre cada módulo durante a operação de interrupção da corrente. Cada módulo é composto de quatro placas arranjadas em camadas, sendo que duas placas são necessárias para interromper a corrente em ambas as direções.

O projeto das camadas prevê uma indutância baixa nos circuitos para limitar o estresse elétrico durante a interrupção de corrente, assim como circuitos snubbers para garantir a distribuição igualitária da tensão sobre os IGBTs. Cada camada é composta de até vinte módulos ligados em série, onde cada módulo é composto de IGBTs com circuitos individuais de snubbers. IGBTs com tensão nominal de 4,5 kV são utilizados para tornar a camada mais compacta e permitir um modo de falha seguro em caso de falha de um IGBT. A Figura 2.7 apresenta um esquema de arranjo mecânico de um módulo do disjuntor híbrido.

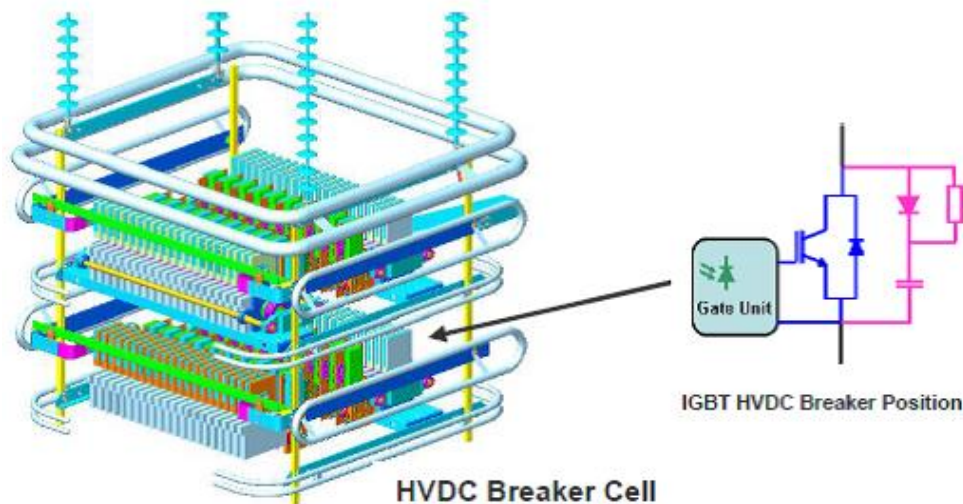


Figura 2.7: Detalhe construtivo da célula do disjuntor híbrido de corrente contínua.

A capacidade atual de interrupção de corrente do disjuntor híbrido é da magnitude de 9kA, com tempo de operação de 2ms. A tensão e a corrente nominais são 320kV e 2kA, respectivamente. A capacidade de interrupção de corrente é dependente da especificação do disjuntor principal e independe da capacidade de corrente nominal. A chave de desconexão rápida e o disjuntor principal são especificados para chaveamento de tensão superior a 1,5 p.u. devido aos transitórios de tensão durante a interrupção da corrente.

No modelo utilizado nas simulações desse trabalho, o disjuntor CC está sendo considerado como uma chave ideal, sem o controle embutido no equipamento original. Como as tensões e correntes nominais da rede são muito inferiores ao de projeto, considera-se que a adequação desse projeto para a rede proposta é uma questão de adaptação de projeto, com riscos tecnológicos muito baixos.

### 2.3.4 Motor

Nesse trabalho, motores de ímã permanente são utilizados nos circuitos propostos. Os motores de ímã permanente têm grande potencial para competir diretamente

com os motores de indução nos projetos de bombeamento submarino.

Após décadas de pesquisa, os ímãs de terras-raras, feitos de compostos de diversos minerais, evoluíram significativamente e atingiram as características desejáveis para a utilização dos mesmos em máquinas rotativas. O desenvolvimento de tais ímãs foi o grande responsável pelo grande aumento da densidade de energia disponível nos motores que utilizam esses ímãs.

Para aplicações de bombeio submarino, os motores de ímãs permanentes se mostram promissores devido aos seguintes pontos:

- Motores de ímã permanente possuem melhor relação potência/peso e potência/diâmetro do rotor;
- Motores de ímã permanente permitem maior espaço entre o rotor e o estator que os de indução (aproximadamente 3 vezes maior). Como os motores submarinos são refrigerados por líquido refrigerante, maiores espaços entre rotor e estator se refletem em menores perdas por arraste, permitindo eficiência superior. A possibilidade de utilizar menores diâmetros do rotor também diminui as perdas por arraste;
- Os motores de ímã permanente permitem atingir maiores velocidades que os de indução. A velocidade em motores de ímã permanente é constante, enquanto em motores de indução, a velocidade é levemente reduzida com o aumento da carga;
- Motores de alta velocidade se refletem em maior eficiência hidráulica das bombas, permitindo maior flexibilidade operacional, com a possibilidade de se atingir maiores cargas ou maiores vazões;
- O conjugado de motores de ímã permanente é diretamente proporcional à tensão de entrada enquanto em motores de indução essa relação é diretamente proporcional ao quadrado da tensão de entrada. Essa característica garante um desempenho superior dos motores de ímã permanente na partida;
- Os líquidos refrigerantes utilizados nos motores de indução são obrigatoriamente dielétricos e devem ter controle contra ingresso de água. Isso também obriga a instalação desses motores em conjunto com um umbilical que forneça constantemente esse fluido de barreira. O motor de ímã permanente pode utilizar fluido refrigerante a base de água, não precisa de controle de umidade (menor custo do fluido, menor restrição operacional e maior confiabilidade do sistema) e pode ser instalado com um tanque de fluido de barreira em vez de umbilical, trazendo simplicidade e flexibilidade na instalação.

Uma desvantagem dos motores de ímã permanente é o custo superior em relação aos motores de indução. Entretanto, em um projeto de exploração de petróleo, o custo do motor reflete uma pequena parcela em relação ao custo total dos equipamentos e de uma possível intervenção no campo, não desqualificando a competitividade para essa aplicação.

### Modelo elétrico do motor síncrono com ímãs permanentes

O modelo elétrico do motor será desenvolvido a partir da projeção das correntes e tensões de fase “abc” nos eixos direto e em quadratura. O objetivo dessa transformação é a transferência da representação da potência de entrada do estator para o rotor, tornando mais fácil de representar o enlace dos fluxos magnéticos do estator e do rotor.

A utilização dessa representação tem as seguintes características:

- Todas as variáveis são expressas na forma ortogonal sobre os eixos d e q.
- O modelo dinâmico dos eixos d e q do motor são referenciados ao rotor pela sua velocidade angular  $\theta$ .
- O eixo direto está referenciado e alinhado com a direção e sentido do campo magnético dos ímãs permanentes instalados no rotor.
- O ângulo relacionando as representações abc e dq é entre a tensão da fase “a” no estator (grandeza fixa) e o eixo direto no rotor (grandeza girante).
- Os parâmetros variantes no tempo são eliminados.
- O modelo do controle é simplificado com a representação de todo sistema nos eixos d e q.

Graficamente, a relação das grandezas do modelo entre o formato considerando os eixos “abc” e “d-q” pode ser visualizado na Figura 2.8.

O modelo do motor utilizado nesse trabalho não possui bobinas de amortecimento. Logo, esses componentes não serão considerados no desenvolvimento das equações do modelo elétrico do motor.

Utilizando a representação d-q, as equações do modelo do motor podem ser descritas como abaixo:

$$\begin{aligned}
 v_d &= R \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \cdot \psi_q \\
 &= R \cdot i_d + L_{sd} \cdot \frac{di_d}{dt} - L_{sq} \cdot p \cdot \omega \cdot i_q
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

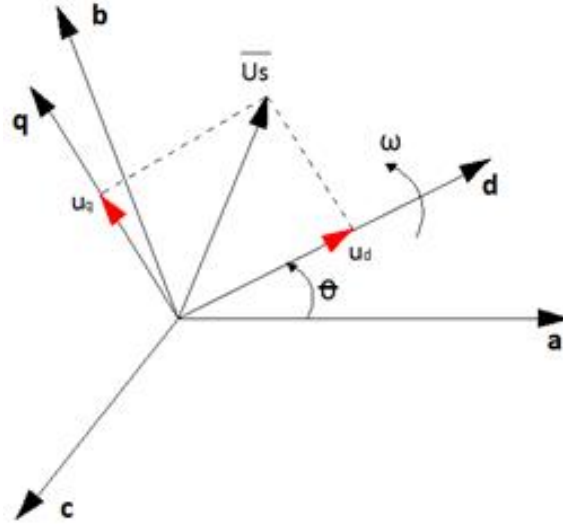


Figura 2.8: Correlação dos eixos abc com os eixos direto e em quadratura.

$$\begin{aligned}
 v_q &= R \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \cdot \psi_d \\
 &= R \cdot i_q + L_{sq} \cdot \frac{di_q}{dt} + L_{sd} \cdot p \cdot \omega \cdot i_d + p \cdot \omega \cdot \psi_f
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Os enlaces de fluxo são definidos pelas equações:

$$\begin{aligned}
 \psi_d &= (L_{md} + L_{\sigma d}) \cdot i_d + \psi_f \\
 &= L_{sd} \cdot i_d + \psi_f
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}
 \psi_q &= (L_{mq} + L_{\sigma q}) \cdot i_q \\
 &= L_{sq} \cdot I_q
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\psi_f = L_{md} \cdot i_f \tag{2.7}$$

$$i_f = H_c \cdot h_M \tag{2.8}$$

Onde:

- $v_d$  - tensão de eixo direto no terminal do motor.
- $v_q$  - tensão de eixo em quadratura no terminal do motor.
- $\psi_f$  - enlace de fluxo devido aos ímãs permanentes.
- $R$  - resistência das bobinas da armadura.
- $L_{md}$  - indutância de magnetização de eixo direto da armadura.
- $L_{mq}$  - indutância de magnetização de eixo em quadratura da armadura.
- $L_{\sigma d}$  - indutância de dispersão de eixo direto da armadura.
- $L_{\sigma q}$  - indutância de dispersão de eixo em quadratura da armadura.
- $\omega$  - velocidade angular do motor.
- $i_d$  - corrente de eixo direto da armadura.
- $i_q$  - corrente de eixo em quadratura da armadura.
- $L_{sd}$  - indutância total de eixo direto da armadura.
- $L_{sq}$  - indutância total de eixo em quadratura da armadura.
- $i_f$  - corrente fictícia de campo relacionado a  $\psi_f$ .
- $H_c$  - coercitividade dos ímãs do rotor.
- $h_M$  - comprimento dos ímãs do rotor.

Seguindo com a representação do circuito do motor síncrono com ímãs permanentes nos eixos d-q, o circuito elétrico do motor pode ser separado por eixo, como representado nas Figuras 2.9 e 2.10.

Importante notar que o campo magnético gerado pelos ímãs permanentes é representado por uma fonte de corrente fictícia atuando diretamente na indutância de magnetização do eixo direto.

Outra característica importante desse modelo é a influência da velocidade do motor nas tensões de eixos direto e em quadratura. À medida que a velocidade do rotor aumenta, a reação da armadura se intensifica e diminui a tensão disponível no rotor. Para compensar a queda de tensão pela reação da armadura, a tensão do estator é aumentada. Entretanto, existe uma restrição operacional da velocidade máxima que o motor pode atingir sem danificar o isolamento do estator. Essa velocidade é conhecida como velocidade base. Para poder operar com velocidade acima da velocidade base (porém com torque menor), deve-se diminuir a influência do campo magnético dos ímãs permanentes no entreferro, aumentando o  $i_d$  de tal forma que seja criado um campo magnético no sentido oposto ao do fluxo dos ímãs permanentes. Este artifício de controle é conhecido como enfraquecimento de campo. A figura 2.11 ilustra vetorialmente esse artifício de controle.

Para melhor entender os limites operacionais do motor, pode-se colocar todos esses limites no plano d-q. A corrente do estator é formada pela composição quadrática das correntes de eixo direto e em quadratura e a tensão tem o formato de uma elipse cujo formato é dado pela equação 2.9.

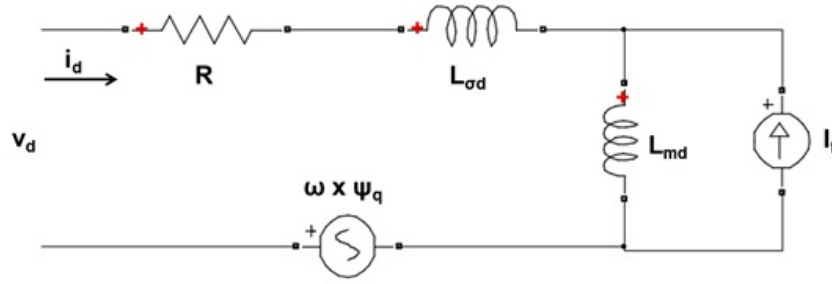


Figura 2.9: Circuito elétrico equivalente do eixo direto do motor síncrono com ímãs permanentes.

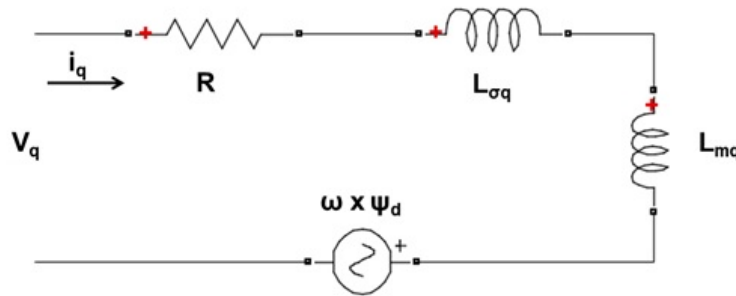


Figura 2.10: Circuito elétrico equivalente do eixo em quadratura do motor síncrono com ímãs permanentes.

$$\left(\frac{V_{max}}{\omega}\right) \geq L_{sd}^2 \left(\frac{\psi_f}{L_{sd}} + I_d\right)^2 + (L_{sq} \cdot i_q)^2 \quad (2.9)$$

Ao aumentar a velocidade do motor, a elipse representando o limite da tensão diminui. Modificando a composição da corrente do estator, através do aumento da corrente de eixo direto no sentido oposto ao fluxo dos ímãs permanentes e da diminuição da corrente de eixo em quadratura, é possível postergar o alcance do limite da tensão de isolamento do estator e, conseqüentemente, da velocidade máxima do motor.

Devido a essas características operacionais, o motor tem dois tipos de operação: com torque constante, limitada à velocidade base e sem necessidade de enfraquecer o campo, e com potência constante, limitada à tensão e corrente máximas suportadas pelo motor.

Nesse trabalho, as simulações serão realizadas com torque constante, sem a utilização de enfraquecimento do campo pelo inversor.

A potência de entrada é dada pela soma da multiplicação das tensões e correntes de fase do motor.

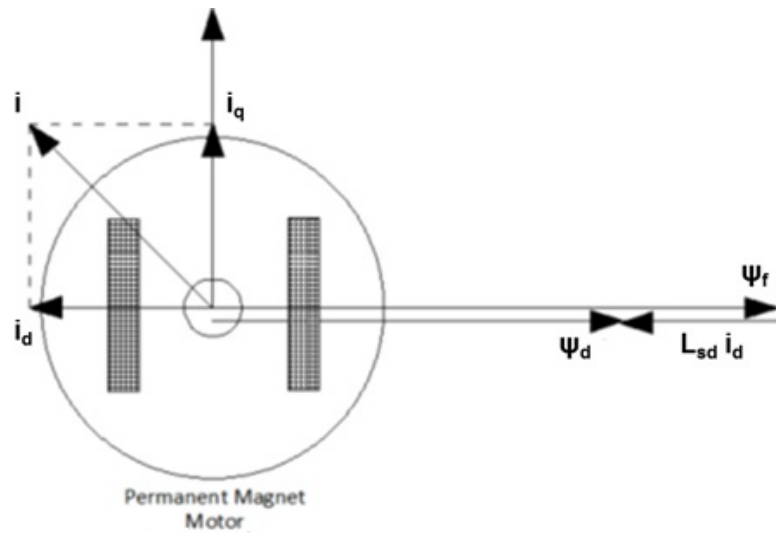


Figura 2.11: Representação dos enlaces de fluxos de eixo direto do motor síncrono com ímãs permanentes.

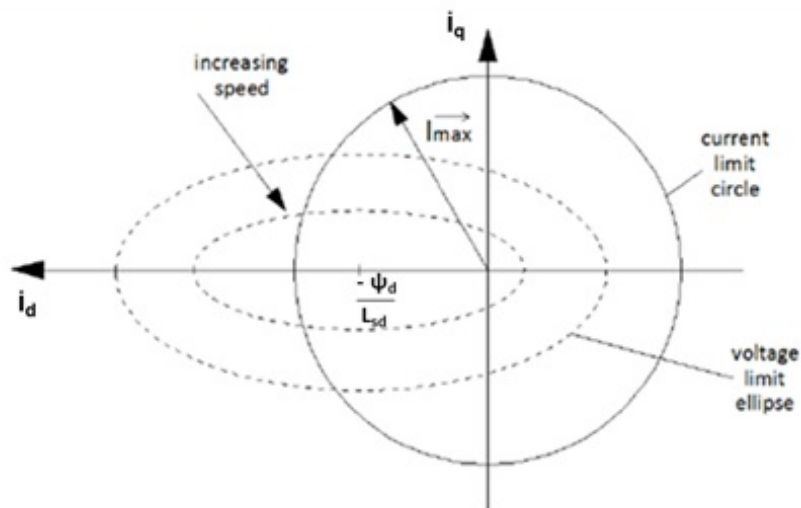


Figura 2.12: Restrição operacional do motor síncrono com ímãs permanentes.

$$\begin{aligned}
 p_{in} &= v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \\
 &= \frac{3}{2}(v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q)
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Desenvolvendo (2.10) a partir de (2.3) e (2.4):



$$\begin{aligned}
& \frac{3}{2}(v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \\
&= \frac{3}{2}(R \cdot i_d^2 + L_{sd} \cdot \frac{di_d}{dt} \cdot i_d - L_{sq} \cdot p \cdot \omega \cdot i_q \cdot i_d \\
&+ R \cdot i_q^2 + L_{sq} \cdot \frac{di_q}{dt} \cdot i_q + L_{sd} \cdot p \cdot \omega \cdot i_d \cdot i_q \\
&+ p \cdot \omega \cdot \psi_f \cdot i_q) \\
&= \frac{3}{2} \cdot \{R \cdot i_d^2 + R \cdot i_q^2 + L_{sd} \cdot \frac{di_d}{dt} \cdot i_d \\
&+ L_{sq} \cdot \frac{di_q}{dt} \cdot i_q + p \cdot \omega [\psi_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_d] i_q\} \quad (2.11)
\end{aligned}$$

O termo  $\frac{3}{2} \cdot p \cdot \omega [\psi_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_d] i_q$  corresponde à potência eletromagnética de uma máquina síncrona trifásica de dois polos:

$$p_{elm} = \frac{3}{2} \{p \cdot \omega [\psi_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_d] i_q\} \quad (2.12)$$

O conjugado eletromagnético do motor é dado por (2.13):

$$\begin{aligned}
T_e &= \frac{p_{elm}}{\omega} \\
&= \frac{3}{2} p [\psi_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_d] i_q \quad (2.13)
\end{aligned}$$

## Modelo dinâmico do motor síncrono com ímãs permanentes

A modelagem dinâmica do motor é baseada na seguinte equação de equilíbrio:

$$T_e - T_l - T_d - B \cdot \omega_m = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.14)$$

Onde:

- $T_e$  - torque eletromagnético do motor.
- $T_l$  - carga aplicada no eixo do motor.
- $T_d$  - torque devido ao atrito no motor.
- $B$  - coeficiente de atrito viscoso.
- $\omega_m$  - velocidade angular do eixo do motor.
- $J$  - momento de inércia.

Quando se deseja acelerar o motor, o inversor deve aumentar a potência elétrica fornecida para o motor até chegar ao novo equilíbrio dinâmico. O controle do motor se baseia exatamente nesse equilíbrio, aumentando a corrente fornecida pelo inversor

ao motor e, assim, fornecendo o torque mecânico e a velocidade no eixo da bomba requeridos pelo sistema.

### Modelo eletromecânico do motor síncrono com ímãs permanentes em diagrama de blocos

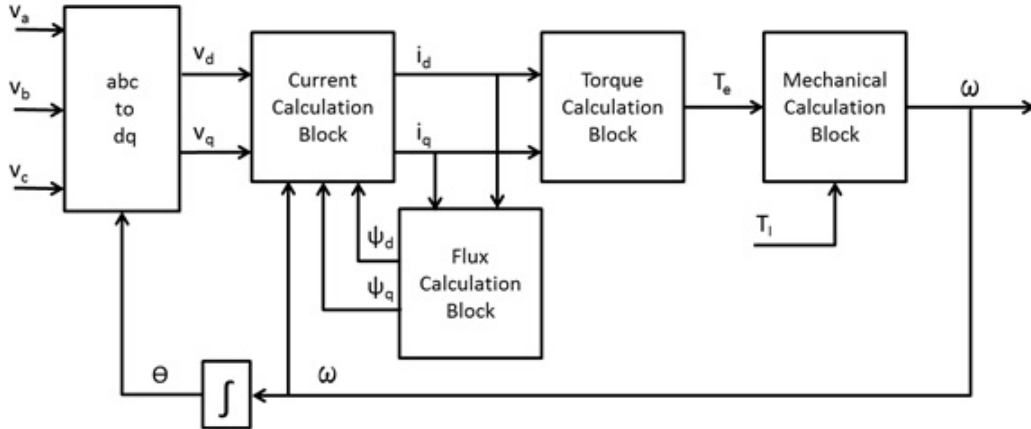


Figura 2.13: Diagrama de blocos da representação eletromecânica do motor síncrono com ímãs permanentes.

A Figura 2.13 mostra através do diagrama de blocos como funciona o modelo do motor considerado nesse trabalho. O inversor interage com o motor fornecendo as tensões de entrada do motor e recebe a informação de retorno do ângulo  $\theta$  da posição do rotor.

A explicação a seguir mostrará detalhadamente para cada bloco da Figura 2.13 quais são suas grandezas de parametrização e de entrada, os cálculos realizados por cada bloco e, por fim, suas grandezas de saída.

No final do capítulo se encontra uma lista com todos os dados usados na parametrização do modelo.

#### Bloco de transformação abc para dq

Nesse bloco, o motor recebe do inversor as tensões de fase  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$ . De um sensor no motor, a posição do rotor, representado pelo ângulo  $\theta$ , completam as informações necessárias para o cálculo das tensões de eixo direto e em quadratura,  $v_d$  e  $v_q$ , respectivamente.

A relação entre as tensões nos eixos abc e dq pode ser vista na equação 2.15:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

## Bloco do cálculo das correntes do motor

Nesse bloco, as correntes de eixos direto e em quadratura são calculadas, como mostram as equações 2.16 e 2.17. As grandezas de entrada desse bloco são as tensões  $v_d$  e  $v_q$ , os enlaces de fluxo  $\psi_d$  e  $\psi_q$ , provenientes de um bloco próprio, e a velocidade do motor. Também são utilizados para o cálculo das correntes  $i_d$  e  $i_q$  os valores das mesmas correntes calculados em um momento anterior e armazenados na memória. As variáveis de parametrização utilizadas nesse bloco são:

$R$	- resistência de fase do estator	-	$0,07\Omega$
$p$	- número de par de polos	-	$1$
$L_{sd}$	- indutância da armadura de eixo direto	-	$15 \text{ mH}$
$L_{sq}$	- indutância da armadura de eixo em quadratura	-	$15 \text{ mH}$

A estrutura desse bloco é mostrada na Figura 2.14 e é baseada em (2.16) e (2.17).

$$i_d = \frac{1}{L_{sd}} \left( \int (v_d - R \cdot i_d + \omega_m \cdot p \cdot \psi_q) dt - \psi_f \right) \quad (2.16)$$

$$i_q = \frac{1}{L_{sq}} \int (v_q - R \cdot i_q + \omega_m \cdot p \cdot \psi_d) dt \quad (2.17)$$

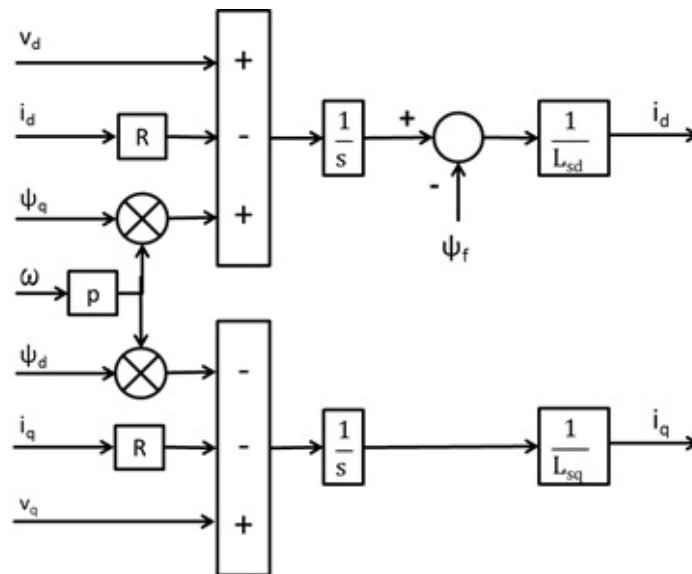


Figura 2.14: Representação em diagrama de blocos do cálculo das correntes de um motor síncrono com ímãs permanentes.

## Bloco do cálculo dos enlaces de fluxo

No bloco utilizado para o cálculo dos enlaces de fluxo, as correntes  $i_q$  e  $i_d$  são as variáveis de entrada. As variáveis de saída são os enlaces de fluxo  $\psi_d$  e  $\psi_q$ , que

são calculados de acordo com as equações 2.18 e 2.19 e pelo diagrama de blocos mostrado na Figura 2.15.

As variáveis de parametrização são:

- $L_{sd}$  - indutância da armadura de eixo direto - 15 mH
- $L_{sq}$  - indutância da armadura de eixo em quadratura - 15 mH
- $\Psi_f$  - enlace de fluxo devido aos ímãs permanentes - 9,6 V.s

$$\psi_d = L_{sd} \cdot i_d + \psi_f \quad (2.18)$$

$$\psi_q = L_{sq} \cdot i_q \quad (2.19)$$

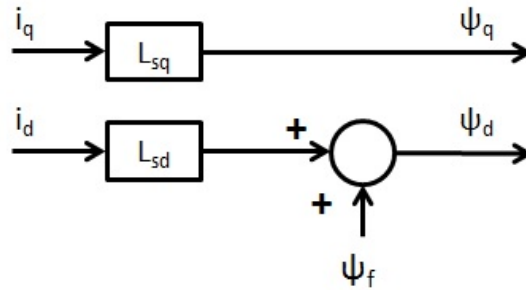


Figura 2.15: Representação em diagrama de blocos do cálculo dos fluxos de um motor síncrono com ímãs permanentes.

### Bloco do cálculo do conjugado elétrico do motor

Esse bloco tem como entrada as correntes  $i_q$  e  $i_d$  e como saída o conjugado elétrico  $T_e$ . A variável de parametrização  $\Psi_f$ , já definida anteriormente, também é utilizada no cálculo, como pode ser visto no diagrama da Figura 2.16 e em (2.20).

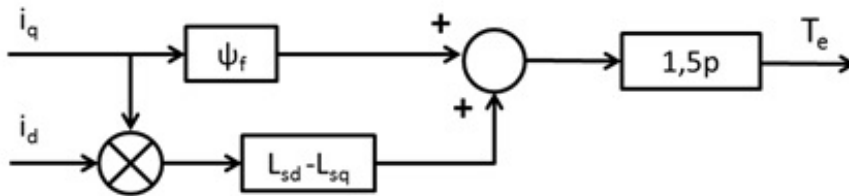


Figura 2.16: Representação em diagrama de blocos do cálculo do torque de um motor síncrono com ímãs permanentes.

$$T_e = \frac{3}{2}p[(L_{sd} - L_{sq}) \cdot i_d \cdot i_q + \psi_f \cdot i_q] \quad (2.20)$$

## Bloco de cálculo do equilíbrio mecânico do motor

Esse bloco é onde é feito o balanço dos conjugados e é basicamente um bloco de variáveis mecânicas. A grandeza de entrada é o conjugado elétrico, proveniente do bloco já descrito e a grandeza de saída é a velocidade do motor e a posição do rotor.

As grandezas de parametrização são o número de par de polos, o coeficiente de atrito estático, o coeficiente de atrito viscoso, a inércia do motor e o conjugado mecânico no eixo:

$T_l$	- conjugado mecânico fornecido pelo motor no eixo	- 2500 N.m
$T_d$	- conjugado devido ao atrito estático	- 0
$B$	- coeficiente de atrito viscoso	- 0,3 N.m.s
$J$	- momento de inércia	- 3,5 kg.m <sup>2</sup>

O bloco de cálculo do equilíbrio mecânico do motor retrata a equação 2.21.

$$\omega_m = \frac{1}{J} \int (T_e - T_l - T_d - B \cdot \omega_m) dt \quad (2.21)$$

A Figura 2.17 detalha a estrutura interna desse bloco de cálculo.

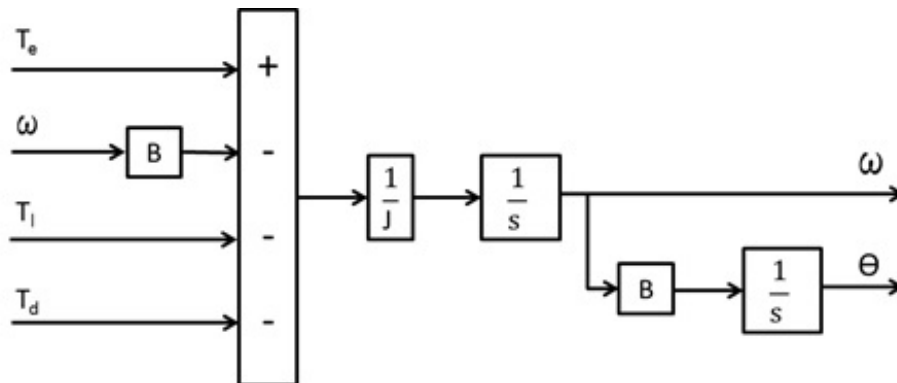


Figura 2.17: Representação em diagrama de blocos do cálculo do equilíbrio mecânico de um motor síncrono com ímãs permanentes.

Resumo das grandezas de parametrização utilizadas no modelo:

$R$	- resistência de fase do estator	- 0,07Ω
$P$	- número de par de polos	- 1
$L_{sd}$	- indutância da armadura de eixo direto	- 15 mH
$L_{sq}$	- indutância da armadura de eixo em quadratura	- 15 mH
$\Psi_f$	- enlace de fluxo devido aos ímãs permanentes	- 9,6 V.s
$T_l$	- conjugado mecânico fornecido pelo motor no eixo	- 2500 N.m
$T_d$	- conjugado devido ao atrito estático	- 0
$B$	- coeficiente de atrito viscoso	- 0,3 N.m.s
$J$	- momento de inércia	- 3,5 kg.m <sup>2</sup>

## Curva característica do motor

A curva característica do motor considerado no trabalho está representada na Figura 2.18. A velocidade base do motor é de 4000 rpm.

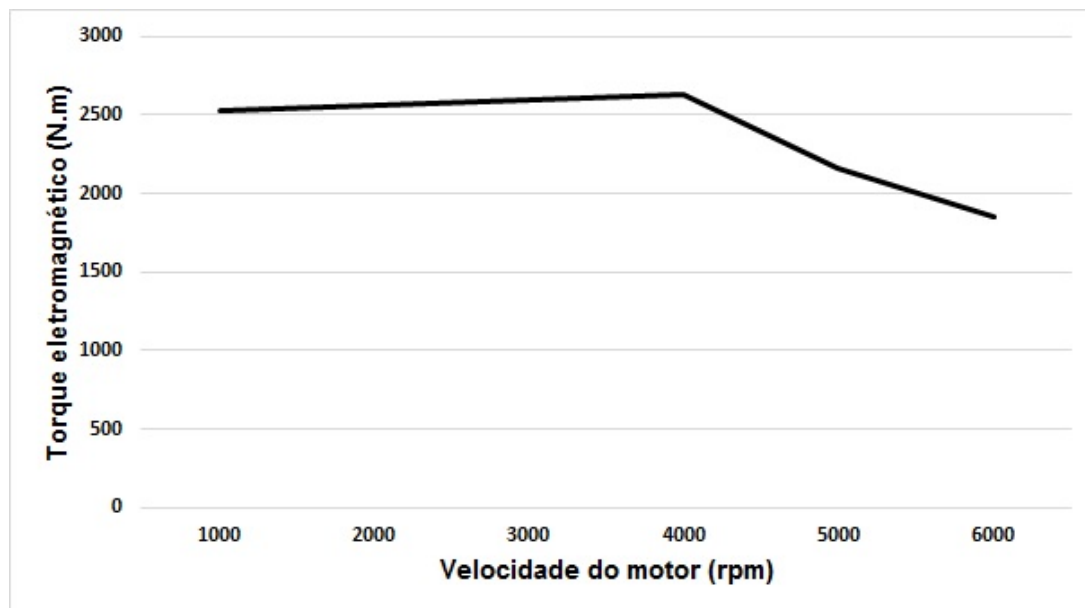


Figura 2.18: Curva característica do motor.

### 2.3.5 Inversor

Nessa parte do trabalho será detalhado o inversor considerado no modelo e seu controle.

O inversor é composto por uma ponte de seis chaves IGBTs. A entrada do inversor é ligada aos polos positivo e negativo do lado em corrente contínua, enquanto a saída é ligada aos terminais do motor. Cada uma das três fases da saída do inversor é conectada e controlada independentemente por duas chaves IGBT.

Na entrada do inversor, um capacitor com capacitância total de  $750 \mu\text{F}$ , é responsável pela estabilização da tensão CC de entrada. O controle das chaves é feito através de modulação PWM, onde o sinal de controle é gerado por um controlador dedicado para cada inversor.

Para o funcionamento adequado do inversor e menor conteúdo harmônico das correntes de saída do inversor, é necessário que o nível da tensão esteja dentro de uma faixa de tolerância e que não haja grandes oscilações na tensão de entrada do inversor. A garantia da qualidade da tensão na entrada dos inversores é de responsabilidade do retificador e dos bancos de capacitores instalados na saída do retificador e na entrada de cada inversor.

Correntes com conteúdo harmônico elevado causam oscilações excessivas no conjugado fornecido pelo motor e também estresse no isolamento devido a sobreaque-

cimento. O trabalho não leva em consideração o conteúdo harmônico máximo permitido em normas de motores. Somente é levada em consideração a robustez do controle e a convergência e estabilização das variáveis de interesse, como torque, correntes, tensões e velocidade.

A premissa na escolha do tipo de controle implementado foi conseguir, de forma robusta e precisa, que o motor entregue para a bomba as duas variáveis de maior importância na sua operação: conjugado e velocidade. Dessa forma, o operador do campo pode se certificar que a bomba está operando dentro da sua curva de operação ótima para um determinado poço ou conjunto de poços que estão sendo bombeados. Portanto, o controle vetorial se mostrou adequado para atingir o objetivo.

A Figura 2.19 mostra como o inversor, seu controlador e o motor estão interconectados. Para a implementação do controle proposto, são necessários sensores em dois pontos do sistema:

- Medidores de corrente na saída de cada fase do inversor (alternativamente, pode-se medir somente em duas fases distintas e inferir a corrente na fase não medida), fornecendo a realimentação para o controle das correntes que chegam ao motor e que corrigirão o balanço dos conjugados do motor, fornecendo o conjugado eletromagnético necessário para atingir a velocidade desejada e ter disponível o conjugado mecânico no eixo do motor parametrizado pelo operador.
- No eixo do motor, fornecendo a posição dos ímãs instalados no rotor. Essa informação é útil para o cálculo das transformadas das tensões e correntes entre as representações nos eixos “abc” e “dq” e também como realimentação do controle da velocidade do motor.

O diagrama de blocos detalhado do modelo do controlador do inversor é mostrado na Figura 2.20.

Existem três malhas fechadas no controlador: uma malha para controle da corrente do eixo direto, uma para controle da velocidade e a terceira para controle da corrente do eixo em quadratura, sendo que essa última malha é controlada dentro da malha de controle da velocidade.

A primeira ação do controlador é coletar as informações das correntes da saída do inversor e transformá-las para as equivalentes no eixo direto e em quadratura, pois essas correntes tornam o controle mais fácil e serão usadas na comparação com as correntes de referência pelo controlador. A transformação das correntes de fase da referência abc para os eixos direto e em quadratura é realizada de forma análoga a das tensões e pode ser calculadas a partir da matriz de equações 2.22.

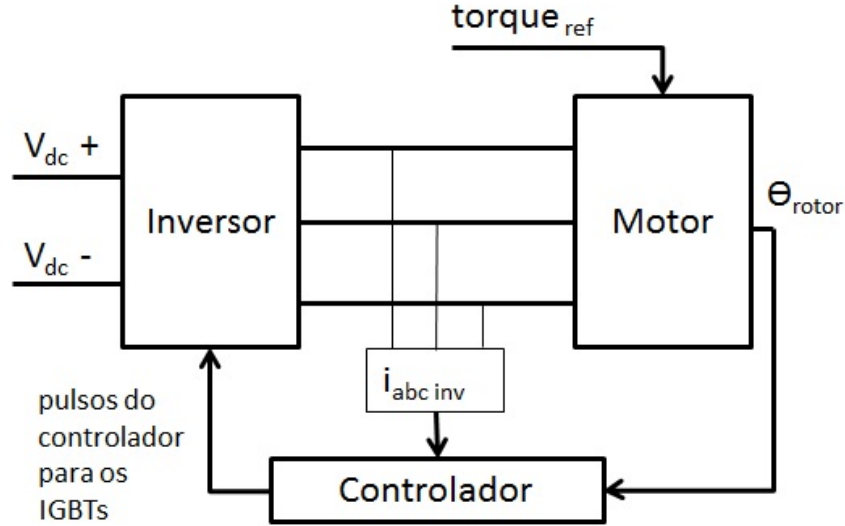


Figura 2.19: Representação em diagrama de blocos do controle do motor.

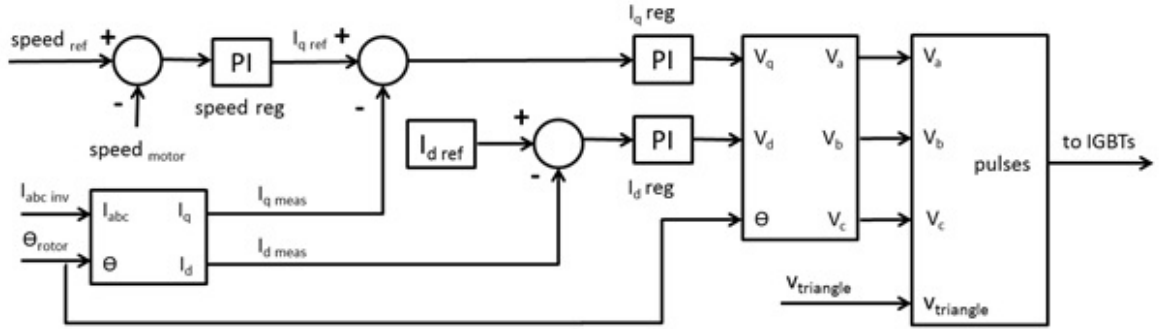


Figura 2.20: Representação em diagrama de blocos do controlador do inversor.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

As malhas responsáveis pelos controles da velocidade e do torque do motor são compostas por dois comparadores e dois controladores proporcionais-integrais.

Na malha que controla a velocidade, a velocidade real do motor ( $speed_{motor}$ ), obtida através da informação da posição do rotor ao longo do tempo é comparada com a velocidade desejada ( $speed_{ref}$ ). A diferença desses valores, ou seja, o erro da velocidade é então tratado em um controlador proporcional-integral ( $speed_{reg}$ ), fornecendo para a malha de regulação da corrente do eixo em quadratura ( $I_{q_{reg}}$ ) o valor de referência dessa corrente ( $I_{q_{ref}}$ ).

A corrente  $I_{q_{ref}}$  fornece a corrente necessária para conseguir o torque eletromagnético que vai corrigir a velocidade do motor a velocidade e, indiretamente, fornecer o conjugado mecânico desejado no eixo do motor. Logo, esse modelo é capaz de



controlar tanto o conjugado mecânico no eixo do motor quanto a velocidade do mesmo.

Na malha interna do controle de velocidade, encontra-se a malha de regulação da corrente do eixo em quadratura. Essa malha recebe como valor de referência o sinal da malha externa ( $I_{q\ ref}$ ) e compara com a corrente do eixo em quadratura medida na saída do inversor ( $I_{q\ meas}$ ). O erro dessa comparação passa por um controlador proporcional-integral ( $I_{q\ reg}$ ), que fornece a tensão do eixo em quadratura ( $v_q$ ) de controle.

A terceira malha de controle, que regula a corrente do eixo direto, funciona de forma análoga à malha de regulação da corrente do eixo em quadratura. Nesse caso a corrente de referência ( $I_{d\ ref}$ ) é igual a zero. Ela é comparada com a corrente de eixo direto medida na saída do inversor ( $I_{d\ meas}$ ), gerando um erro que será a entrada de um controlador proporcional-integral ( $I_{d\ reg}$ ). A sua saída será a tensão de eixo direto de controle ( $v_d$ ).

Uma vez calculados os valores das tensões de controle  $v_d$  e  $v_q$ , esses valores são então transformados para os eixos abc, através da equação 2.23, que pode ser obtida a partir da equação 2.15 e da relação  $v_a + v_b + v_c = 0$ .

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Por último, as tensões trifásicas de controle são comparadas com uma onda triangular de referência em um bloco responsável por fazer a modulação PWM. Essa modulação se dá por uma simples comparação dos valores instantâneos da tensão de cada fase de controle com o valor da onda triangular.

Cada fase da saída do inversor é controlada por dois IGBTs, um conectado diretamente a  $+V_{dc}$  e o outro a  $-V_{dc}$ . Analisando isoladamente uma das fases da saída do inversor, caso o valor instantâneo da tensão dessa fase seja maior que o da onda triangular, um pulso é disparado para permitir a condução de corrente pelo IGBT conectado ao  $+V_{dc}$ . Caso contrário, um pulso é disparado para a condução do IGBT ligado a  $-V_{dc}$ . Estendendo a mesma ação para as demais fases do inversor, todos os IGBTs são controlados e fornecem a tensão apropriada para o motor.

Dados considerados no modelo do inversor:

Tensão CC de entrada do inversor	-	13800 V
Capacitor na entrada do inversor	-	750 $\mu$ F
Frequência da onda triangular de referência PWM	-	3 kHz
Tensão do motor	-	6000 V

# Capítulo 3

## Testes de simulação

O objetivo desse capítulo é simular e analisar diversos casos para entender a reação do sistema e testar a robustez do controle. Os casos escolhidos foram baseados na maior probabilidade de ocorrer e/ou que podem trazer maior severidade para a estabilidade do sistema.

Apesar do torque no eixo da bomba ser variável com a velocidade da bomba em casos reais, nesse trabalho um torque constante de 2500 N.m foi considerado em todas as simulações.

Apesar de existir tecnologia no mercado qualificada para funcionar como disjuntor de corrente contínua, os casos foram baseados na simulação de ocorrência e retirada da falta do sistema, testando a capacidade do controle em estabilizar e manter a estabilidade do sistema. A retirada do equipamento defeituoso com o auxílio do disjuntor não é feita, com o intuito de tornar mais difícil a retomada da estabilidade.

Os casos que serão apresentados são os abaixo:

- Inicialização de todo o sistema até o regime permanente.
- Falta bifásica entre os cabos do umbilical (na metade do comprimento do cabo).
- Falta na fase A do inversor (no terminal do motor 3, o mais próximo do barramento que alimenta todos os motores).
- Falta trifásica no inversor (no mesmo ponto do caso anterior).
- Falta na fase A do retificador.
- Falta trifásica no retificador.

O modelo é composto por um grande retificador compartilhado por todas as cargas e um inversor dedicado para cada motor do sistema. Os controles do retificador e de cada inversor são independentes.

O objetivo do controle dos inversores é:

- Conduzir os eixos dos motores para a velocidade e torque previamente parametrizados em um período de tempo considerado aceitável;

Os objetivos do controle do retificador são:

- Levar o nível da tensão na linha de transmissão para o valor nominal de forma rápida e sem estresse excessivo para os cabos de potência.
- Manter a tensão nominal na linha de transmissão dentro de um intervalo de valores que não instabilize o sistema a jusante.

## 3.1 Caso 1 - regime permanente

O primeiro caso a ser analisado é o comportamento do sistema ao ter que suportar a partida dos três motores simultaneamente.

### 3.1.1 Premissas da simulação

- Ao iniciar a simulação, os capacitores na saída do retificador e na entrada de cada inversor se encontram desenergizados e estão com tensão igual a zero.
- Todos os motores estão parados e seus eixos estão sujeitos a um torque mecânico constante de 2500 N.m.

### 3.1.2 Resultados da simulação

Durante a simulação, foram colhidos dados utilizados para a geração dos gráficos que servirão de base para a análise a seguir. Esses gráficos estão retratados no intervalo entre as figuras 3.1 e 3.11.

No começo da simulação, todos os componentes do sistema estão desenergizados. No primeiro momento, o retificador fornece uma corrente de aproximadamente 1100 A para energizar o umbilical e os capacitores do sistema na tentativa de alcançar a tensão de operação da saída do retificador (13800 V). Nesse momento, o controle causa uma sobretensão de 20%. Considerando uma margem de 5% em torno da tensão de operação para considerar o controle do retificador estável, esse valor é atingido em menos de 0,2s.

A partir do instante 0,2s, os motores começam a acelerar de forma controlada, até o instante 0,5s, quando atingem a velocidade de operação (4000 rpm). Durante esse intervalo, o retificador fornece uma corrente que aumenta gradativamente até atingir o pico de 600 A.

No instante 0,5s, o controle dos inversores provocam uma perturbação momentânea no sistema, afundando a corrente de saída do retificador de 550A para aproximadamente 250A em 0,025s. Essa variação causa uma sobretensão na saída do retificador de quase 10%, corrigida em menos de 0,1s.

No instante 0,6s, todo o sistema se encontra em equilíbrio estável.

No final do umbilical, onde os sistemas submarinos são conectados a um barramento que distribui a potência para os três motores, a tensão se estabiliza em 0,88 pu, resultando em uma queda de tensão no umbilical de 12%, o que pode ser considerável aceitável.

As potências ativa e reativa na entrada do retificador em regime permanente são de aproximadamente de 4MW e 1,1Mvar, respectivamente. O fator de potência resultante é de 0,964.

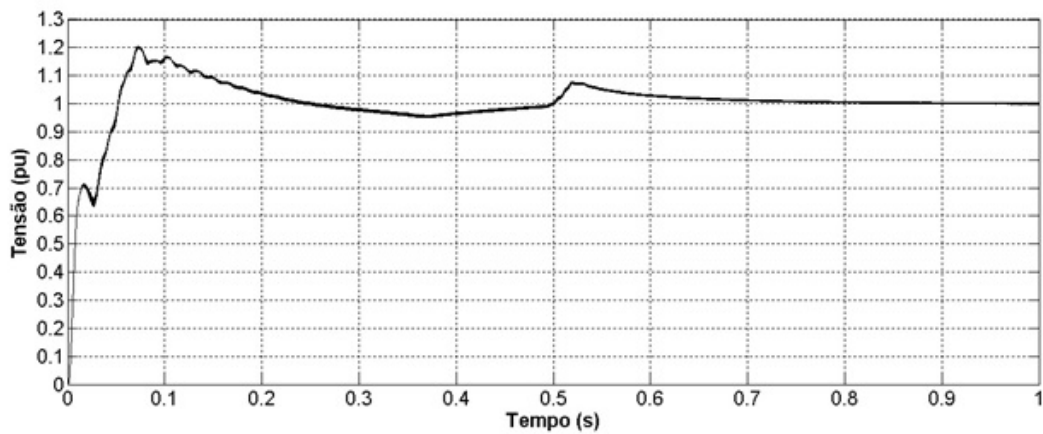


Figura 3.1: Tensão na saída do retificador, caso 1.

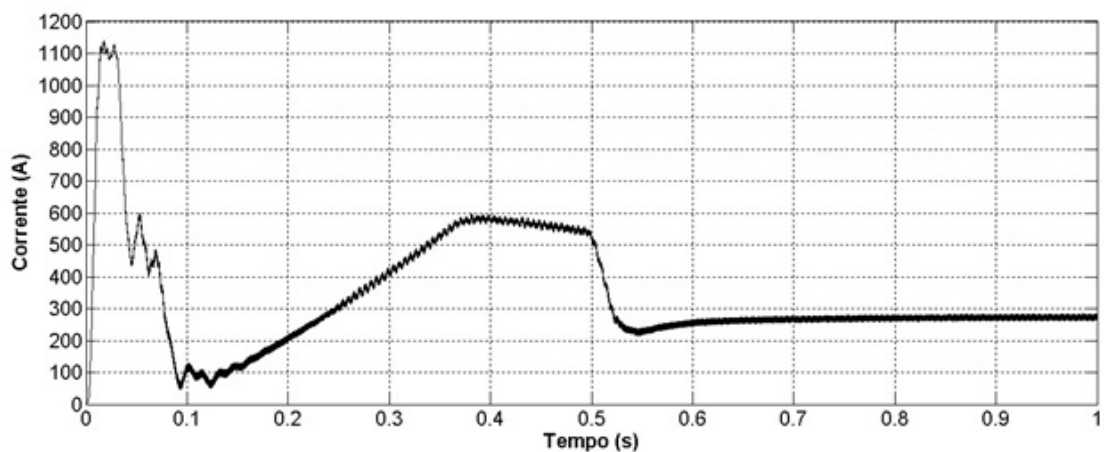


Figura 3.2: Corrente na saída do retificador, caso 1.

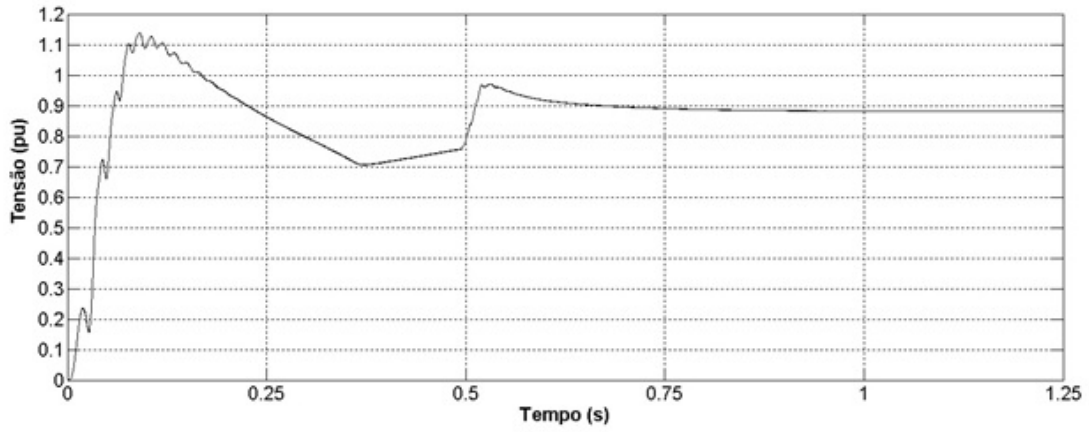


Figura 3.3: Tensão no barramento de alimentação dos inversores, caso 1.

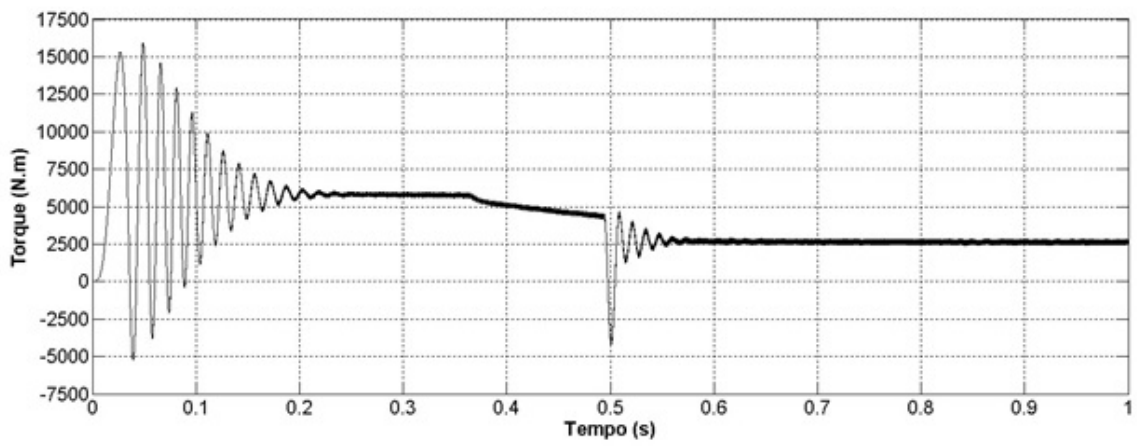


Figura 3.4: Torque eletromagnético do motor 3, caso 1.

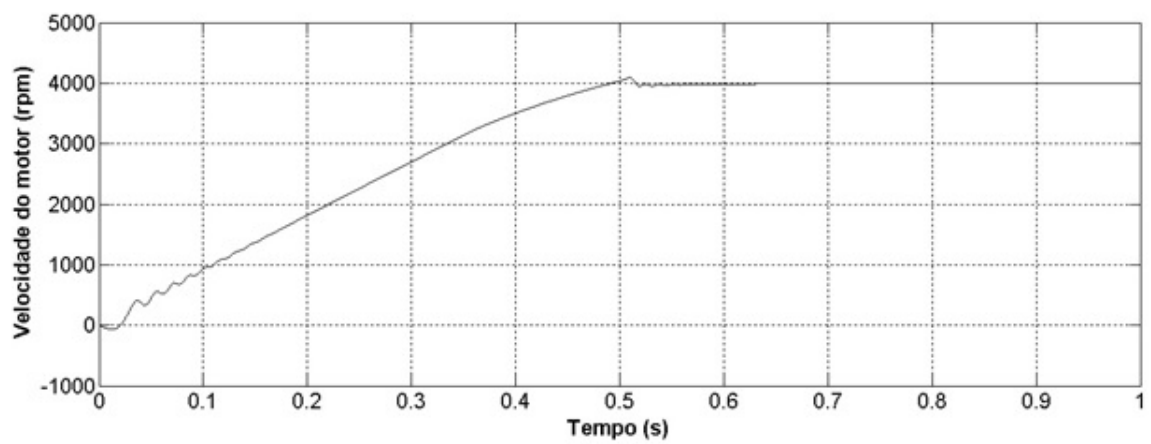


Figura 3.5: Velocidade do motor 3, caso 1 .

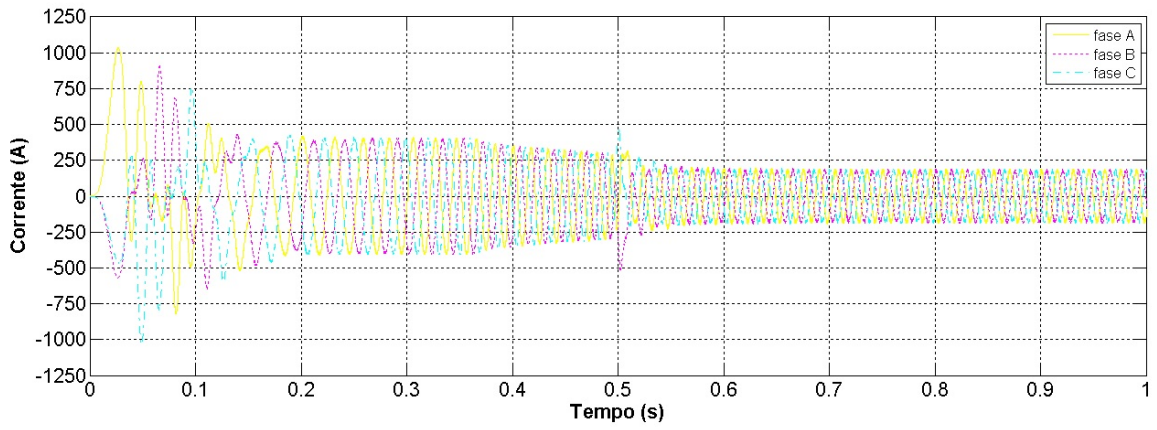


Figura 3.6: Corrente na saída do inversor do motor 3, caso 1.

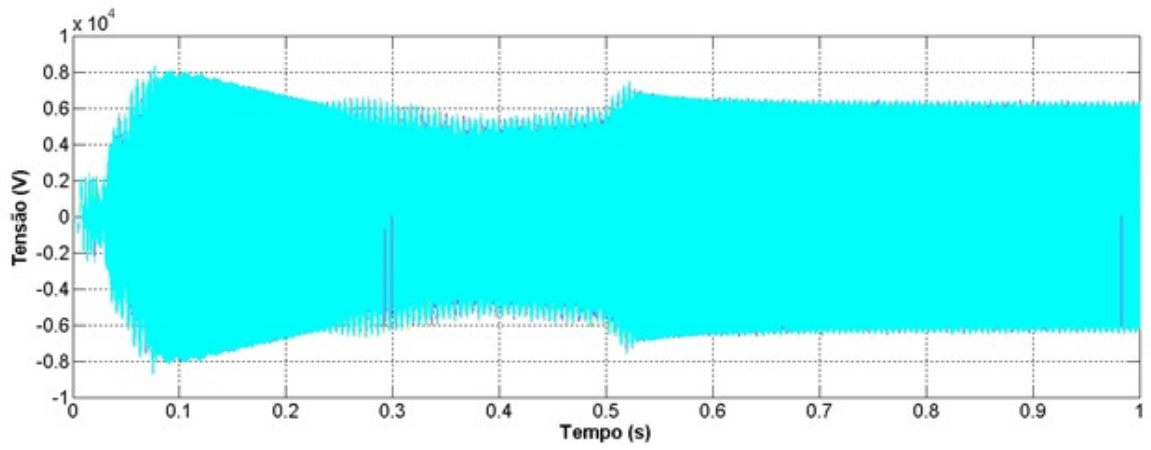


Figura 3.7: Tensão de fase na saída do inversor do motor 3, caso 1.

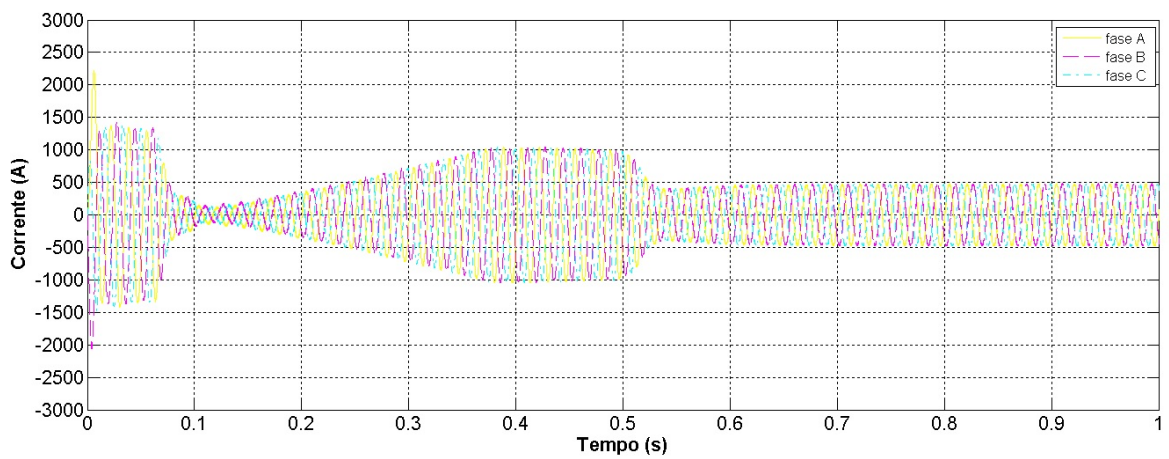


Figura 3.8: Corrente na entrada do retificador, caso 1.

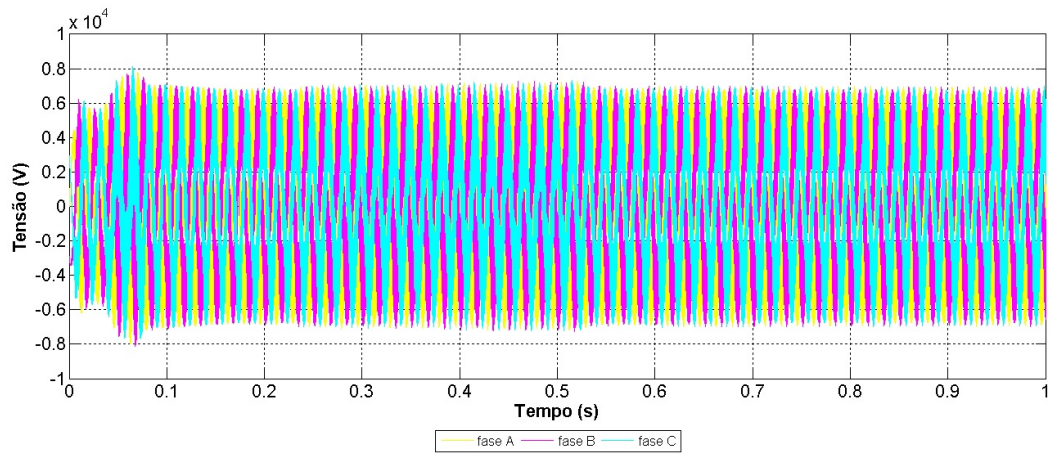


Figura 3.9: Tensão de fase na entrada do retificador, caso 1.

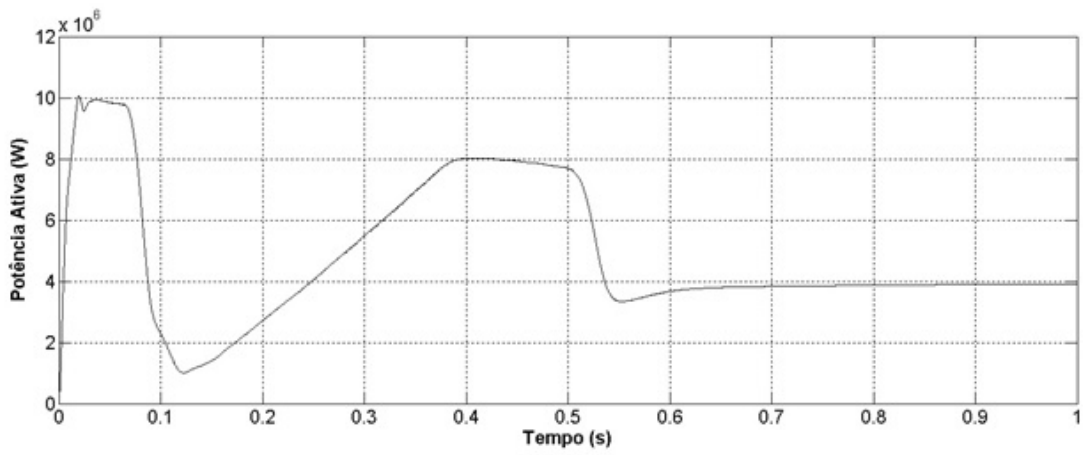


Figura 3.10: Potência ativa na entrada do retificador, caso 1.

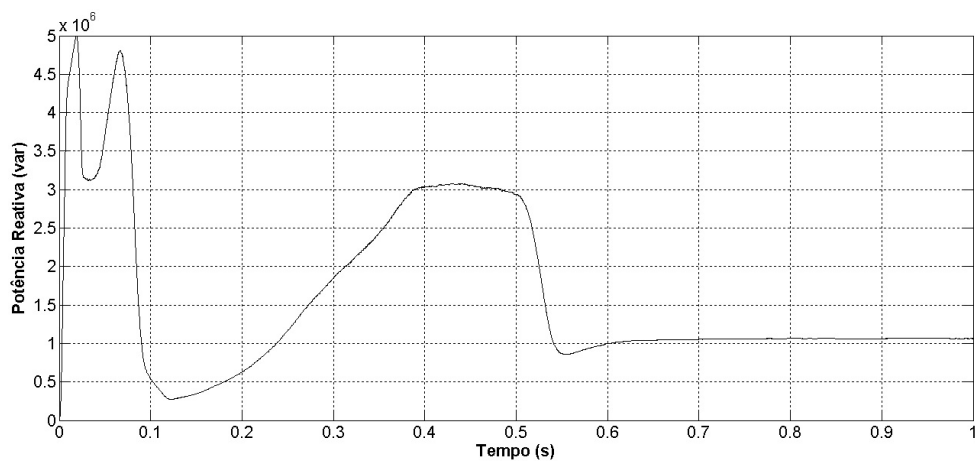


Figura 3.11: Potência reativa na entrada do retificador, caso 1.

## 3.2 Caso 2 - falta bifásica entre os cabos do umbilical (na metade do comprimento do cabo)

Como o sistema é composto por cabo de transmissão submarino e não é interligado com outra fonte de geração, uma falta em qualquer ponto do mesmo seria considerada catastrófica para o sistema, independente de o controle ser capaz ou não de estabilizar o sistema após a sua ocorrência. Entretanto, para fins acadêmicos, foi analisada a robustez do controle na estabilização do sistema após a ocorrência da falta.

Os gráficos relativos ao caso 2 estão retratados no intervalo entre as figuras 3.12 e 3.19.

### 3.2.1 Premissas da simulação

- Antes da ocorrência da falta, o sistema se encontra em regime permanente, no mesmo ponto de operação do caso 1.
- A falta ocorre no instante 1s e possui duração de 0,15 segundo, quando a falta é retirada.
- A falta ocorre com o fechamento do circuito entre os dois cabos do umbilical, através de uma resistência de  $0.2\Omega$ .

### 3.2.2 Resultados da simulação

Durante a ocorrência da falta, ocorre um afundamento da tensão e uma elevação da corrente ao longo do sistema. Uma parte responsável pela elevação da corrente é a contribuição dos motores durante a falta, que passaram a operar como geradores. A corrente chega a atingir em um primeiro momento 2100A, mas em 0.05s ela passa a ser constante em aproximadamente 1520 A.

Ao término da falta, no instante 1,15 segundo, o controle do retificador começa a tentar estabilizar o sistema. A corrente se sustenta em 600 A por aproximadamente 0,28s devido ao alto torque requerido pelos motores para acelerar até a velocidade especificada. A súbita queda da corrente após a falta causa uma elevação da tensão por parte do retificador para 1,15 pu.

Em aproximadamente 1,47s, os motores passam a operar por um curtíssimo tempo como gerador, causando o aumento da corrente no sistema. Nesse momento o controlador do retificador reage, diminuindo bruscamente a corrente fornecida para o sistema.



Novamente, essa queda brusca da corrente causa uma elevação da tensão na saída do retificador, que atinge 1,68 pu, mas volta à tensão anterior a esse momento em aproximadamente 0,18s. Sem nenhuma perturbação adicional, o sistema se estabiliza totalmente no instante 1,76s. Os conjuntos dos motores se estabilizam aproximadamente no instante 1,63s.

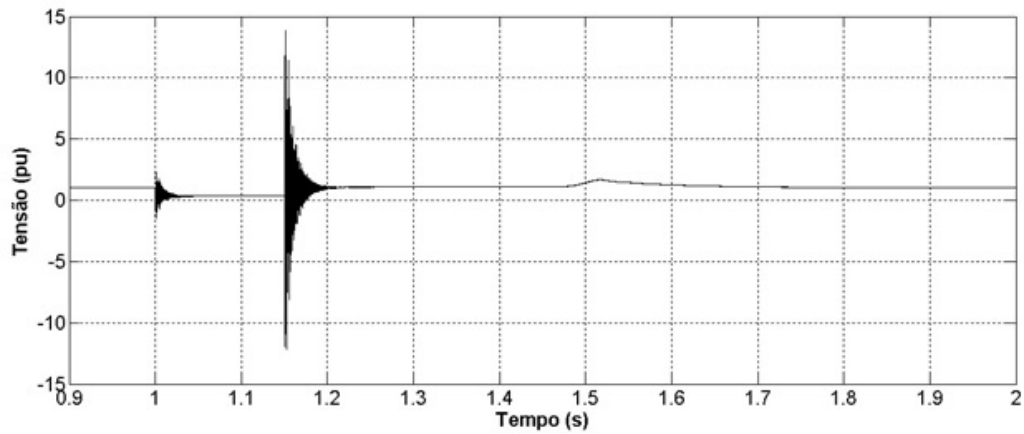


Figura 3.12: Tensão na saída do retificador, caso 2.

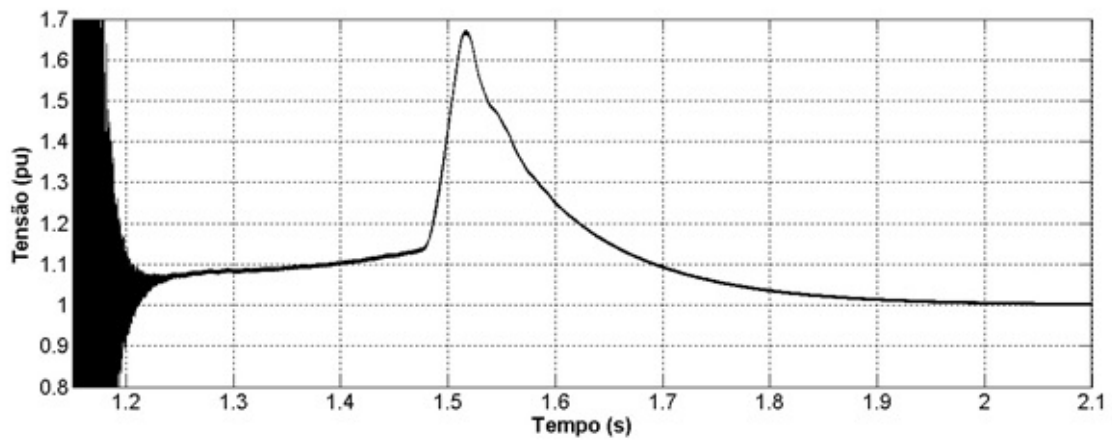


Figura 3.13: Tensão na saída do retificador (figura ampliada), caso 2.

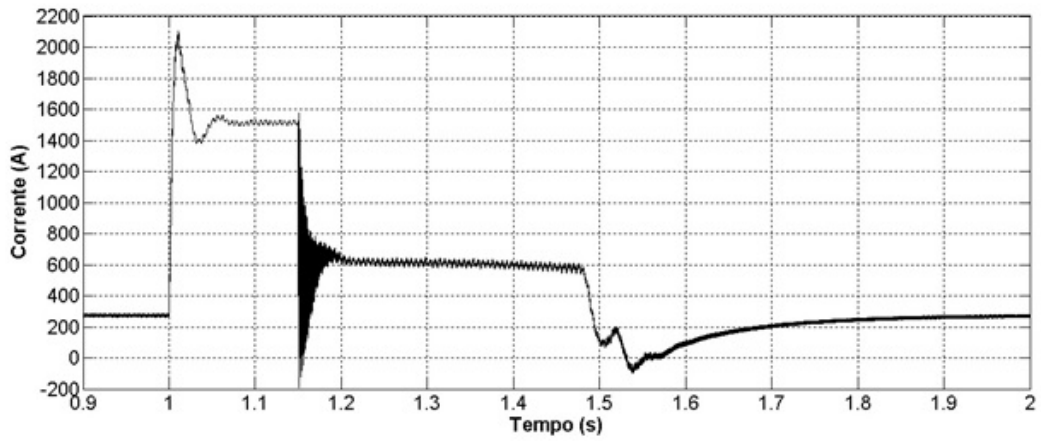


Figura 3.14: Corrente na saída do retificador, caso 2.

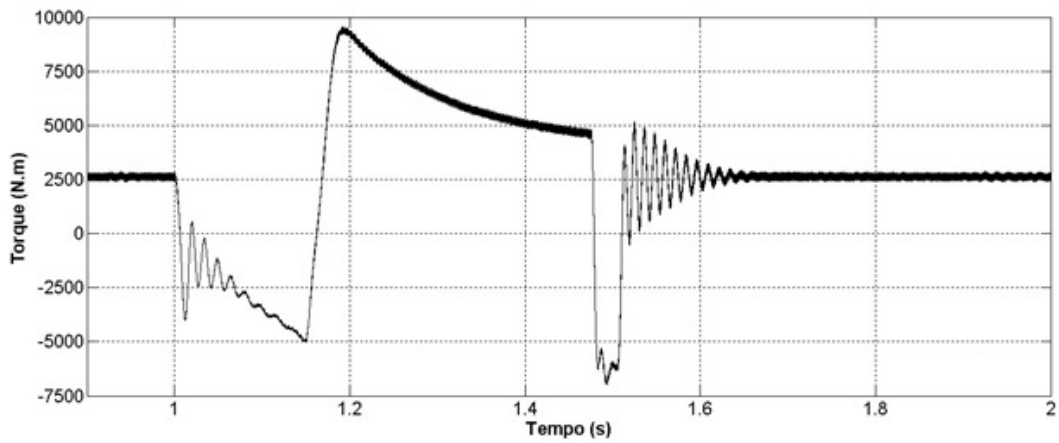


Figura 3.15: Torque eletromagnético do motor 3, caso 2.

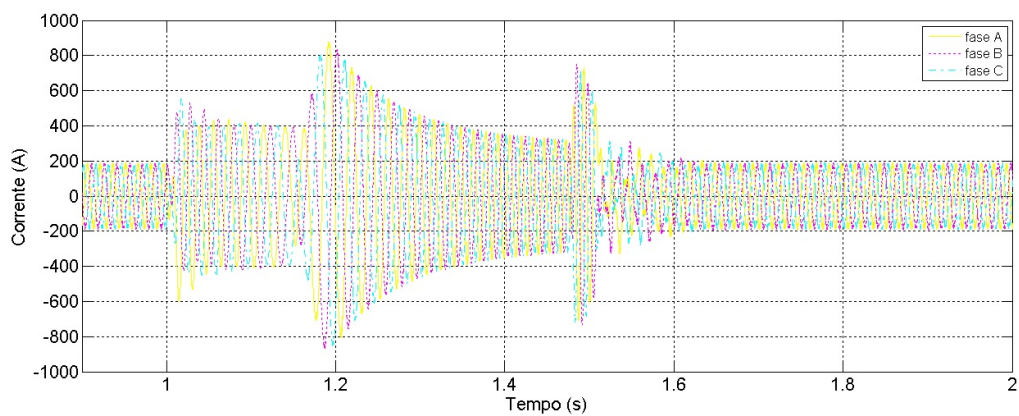


Figura 3.16: Corrente na saída do inversor do motor 3, caso 2.

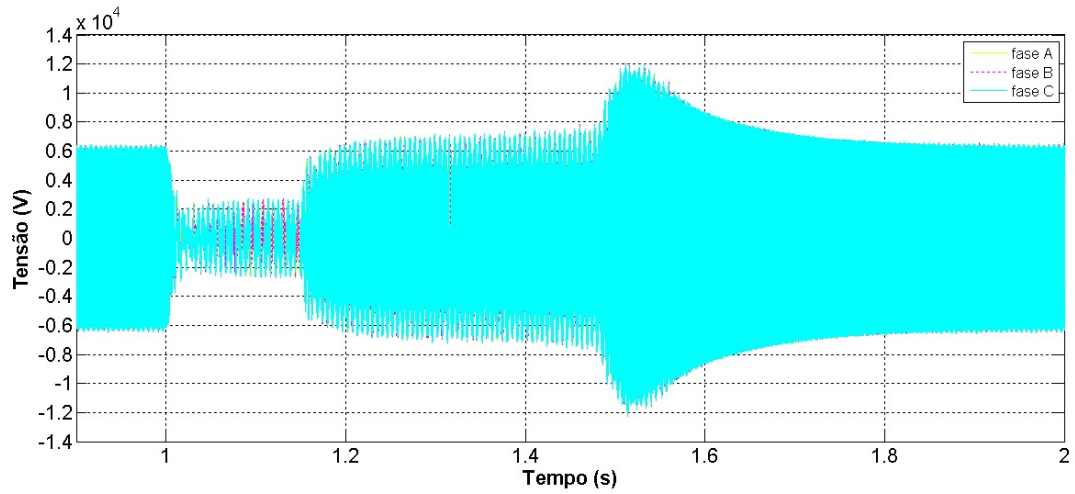


Figura 3.17: Tensão de fase na saída do inversor do motor 3, caso 2.

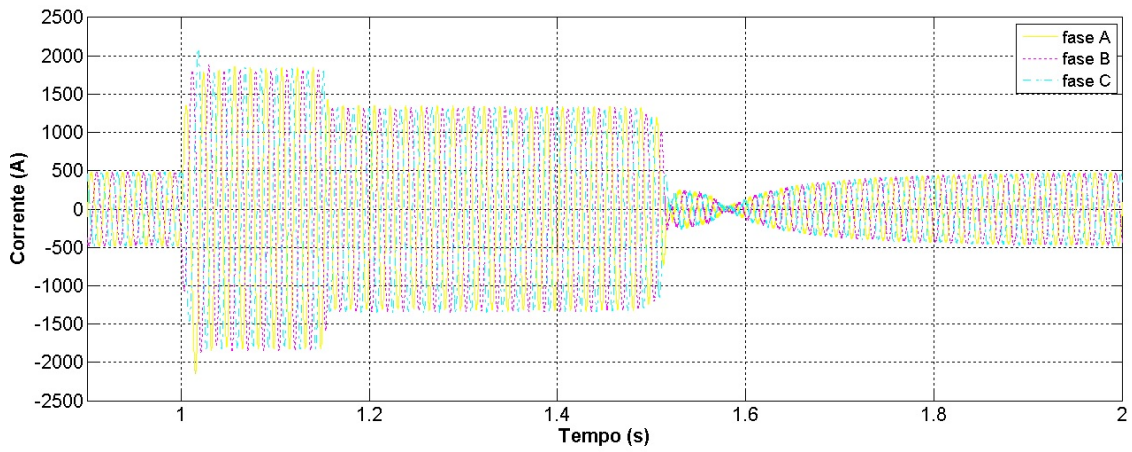


Figura 3.18: Corrente na entrada do retificador, caso 2.

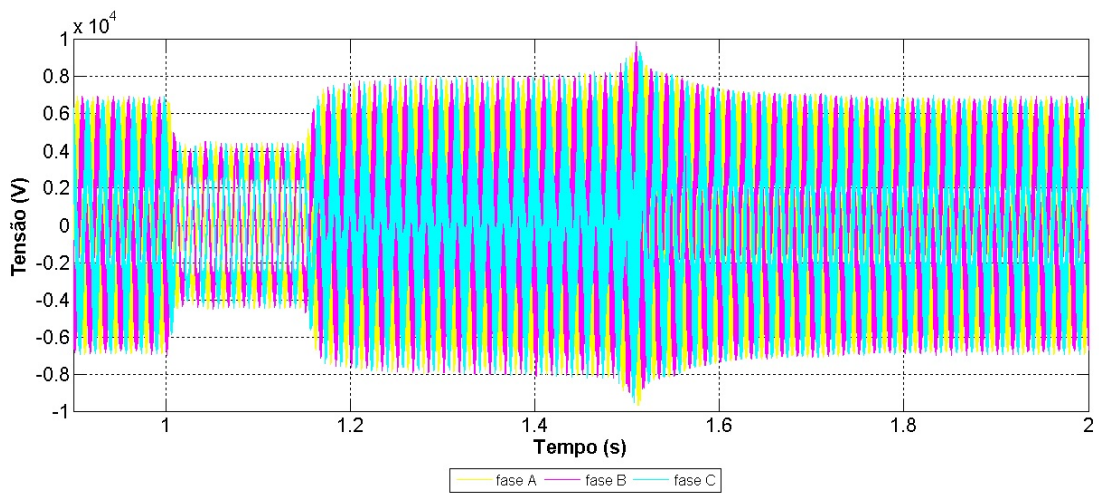


Figura 3.19: Tensão de fase na entrada do retificador, caso 2.

### 3.3 Caso 3 - falta na fase A do inversor (antes do motor)

O objetivo dessa simulação é analisar o comportamento do sistema em caso de ocorrência de uma falta para terra na fase A de um dos três conjuntos inversor-motor ligados ao umbilical. O conjunto inversor-motor escolhido foi o de número três, por ser o conjunto mais próximo da fonte.

#### 3.3.1 Premissas da simulação

- Antes da ocorrência da falta, o sistema se encontra em regime permanente, no mesmo ponto de operação do caso 1.
- A falta ocorre no instante 1s e possui duração de 0,15 segundo, quando a falta é retirada.
- O ponto de ocorrência de falta é a fase A de saída do inversor de número 3, que é o mais próximo do ponto de interligação entre o umbilical e as cargas. A falta ocorre com o fechamento do circuito entre o ponto anteriormente citado e o terra através de uma resistência de falta de  $0,1\Omega$ .

#### 3.3.2 Resultados da simulação

No instante da falta, a corrente na saída do retificador se mostra muito oscilatória e crescente, chegando a atingir o pico de 950 A. Conseqüentemente, a tensão de saída sofre queda. Entretanto, a queda é pequena, não ficando abaixo de 0,9 pu. Na saída do inversor de número 3, onde ocorre a falta, a corrente é elevada de forma considerável, atingindo picos de 4500 A durante a falta. A tensão das fases B e C no mesmo ponto também é elevada, passando de 6000 V para 9500 V.

Também foram feitas medições no conjunto inversor-motor de número 2, conectado a esse ponto através do inversor de número 3, do barramento principal e por um quilômetro de cabo de  $120\text{ mm}^2$ . Durante a falta, na saída do inversor de número 2 ocorre uma queda na corrente de 50% e elevação da tensão para 30 kV nas fases A e B e 45 kV na fase C. Essa elevação excessiva pode ser explicada pelo modelo simplificado do cabo utilizado. Em casos reais, as tensões seriam amortecidas pelos parâmetros dependentes da frequência, como explicado em 2.3.2.

Após a eliminação da falta, ocorrem mais duas perturbações na rede: uma no instante 1,23s devido ao inversor de número 3 e outra no instante 1,33s devido aos inversores 1 e 2. O primeiro distúrbio causa uma elevação da tensão no retificador

menor que 5%, não afetando sua estabilidade. O segundo causa uma elevação maior, em torno de 1,13pu, retirando a tensão da sua faixa de estabilidade por 0,5s.

Em relação aos demais pontos da rede, a primeira perturbação pós falta causa pouco distúrbio, enquanto a segunda causa um distúrbio maior, mas também sem grandes danos para o sistema, que sofre uma elevação de tensão momentânea e de curtíssima duração.

O sistema se encontra totalmente estabilizado no instante aproximado de 1,38s, após 0,23s a eliminação da falta no sistema.

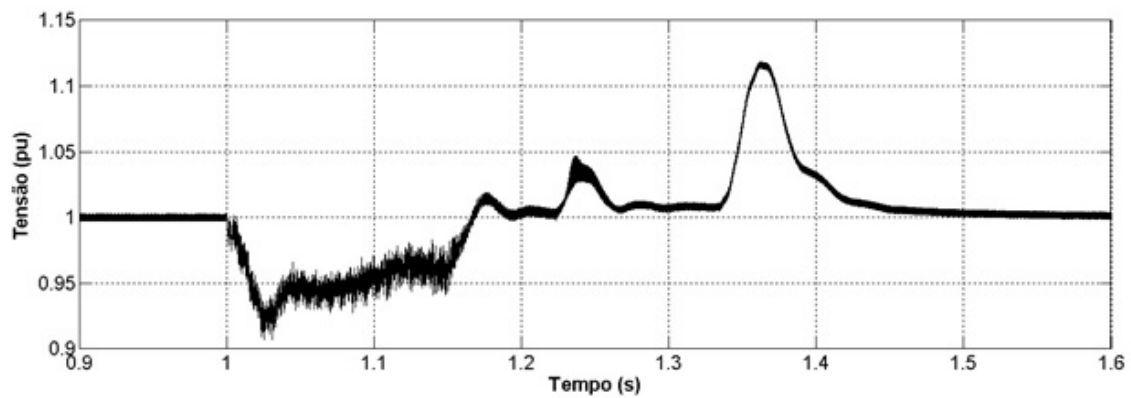


Figura 3.20: Tensão na entrada do retificador, caso 3.

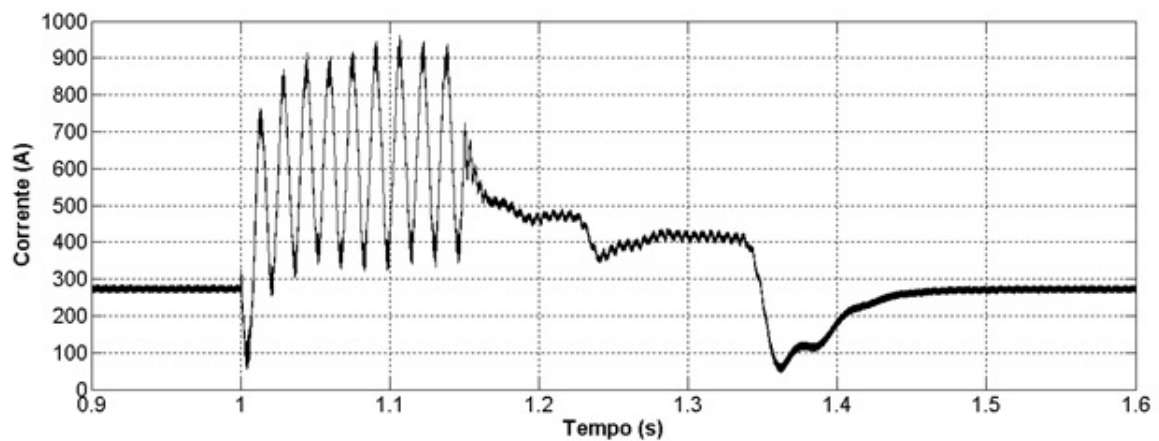


Figura 3.21: Corrente na saída do retificador, caso 3.

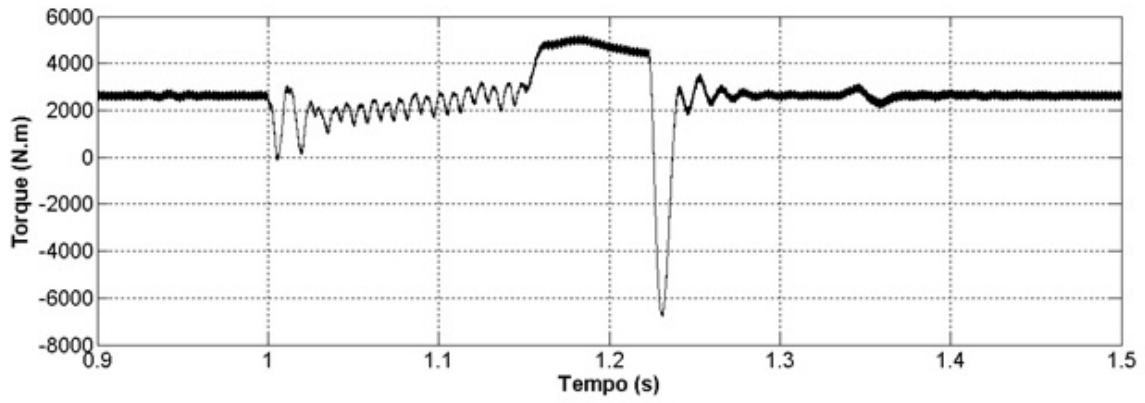


Figura 3.22: Torque eletromagnético do motor 3, caso 3.

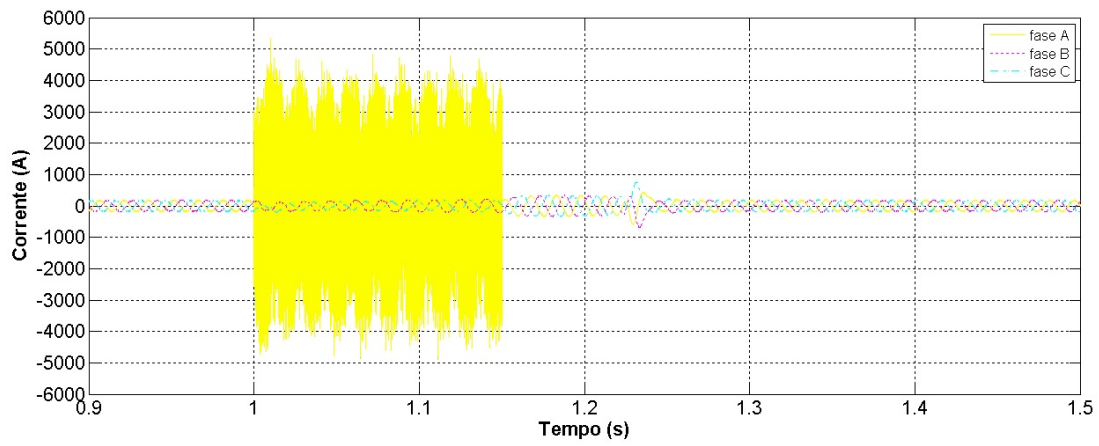


Figura 3.23: Corrente na saída do inversor 3, caso 3.

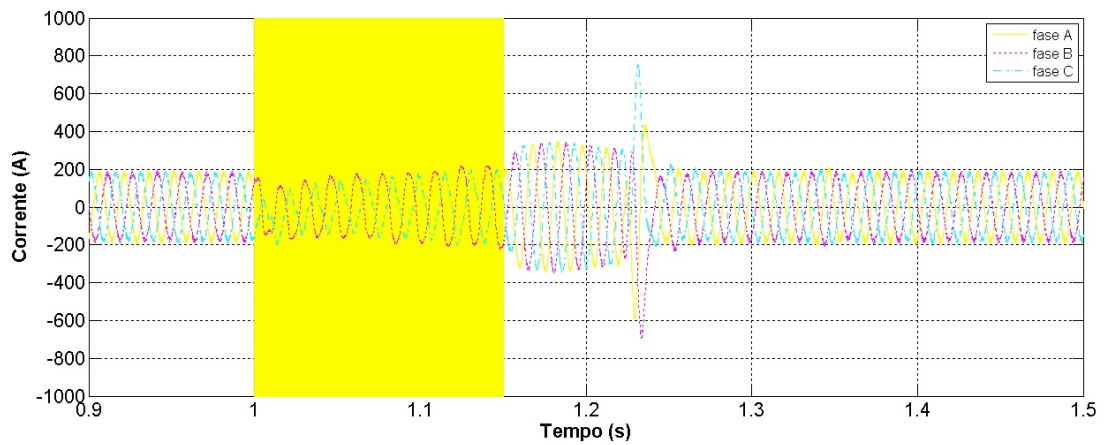


Figura 3.24: Corrente na saída do inversor 3 (figura ampliada), caso 3.

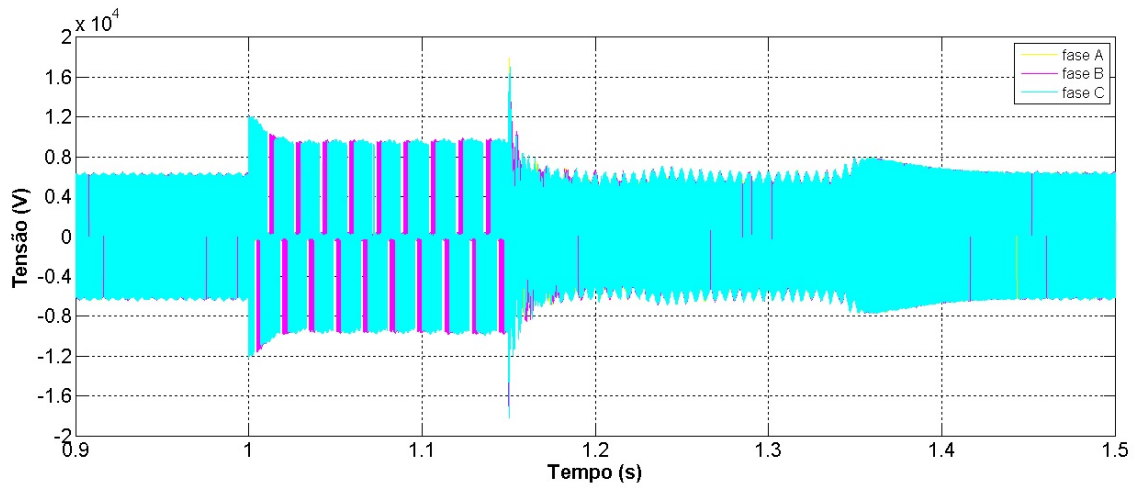


Figura 3.25: Tensão de fase na saída do inversor 3, caso 3.

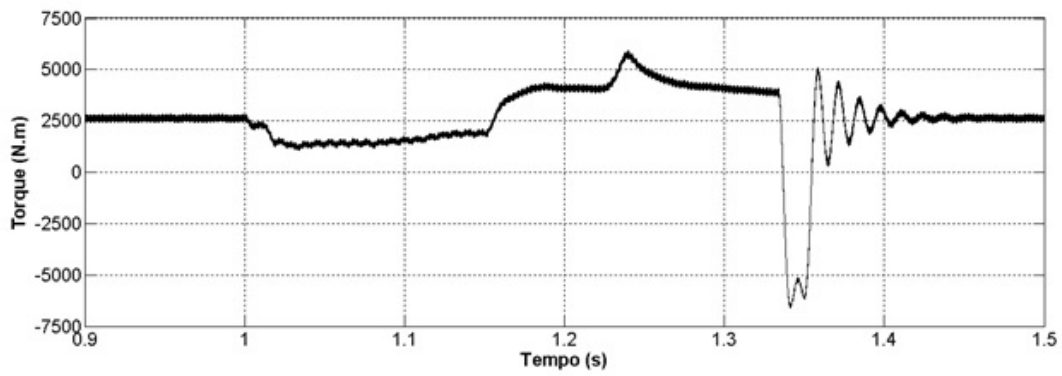


Figura 3.26: Torque eletromagnético do motor 2, caso 3.

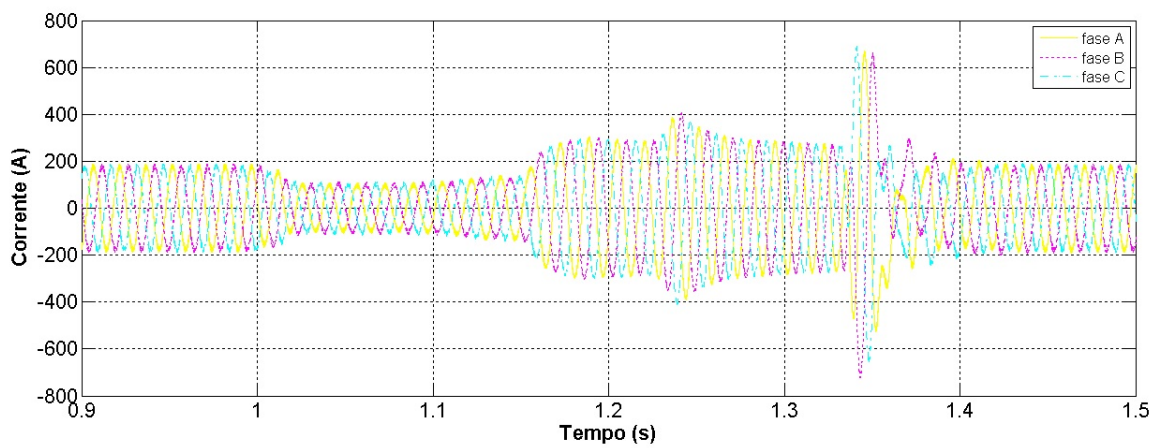


Figura 3.27: Corrente na saída do inversor 2, caso 3.

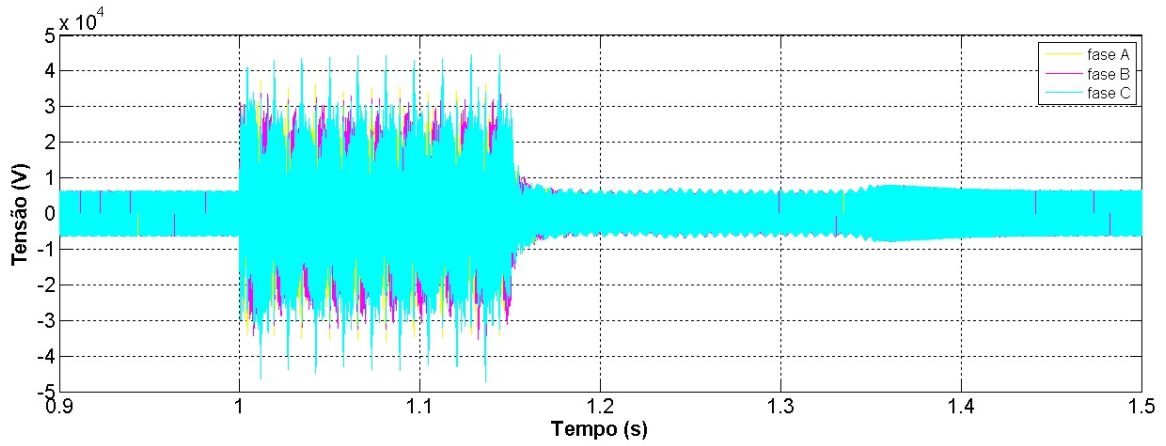


Figura 3.28: Tensão de fase na saída do inversor 2, caso 3.

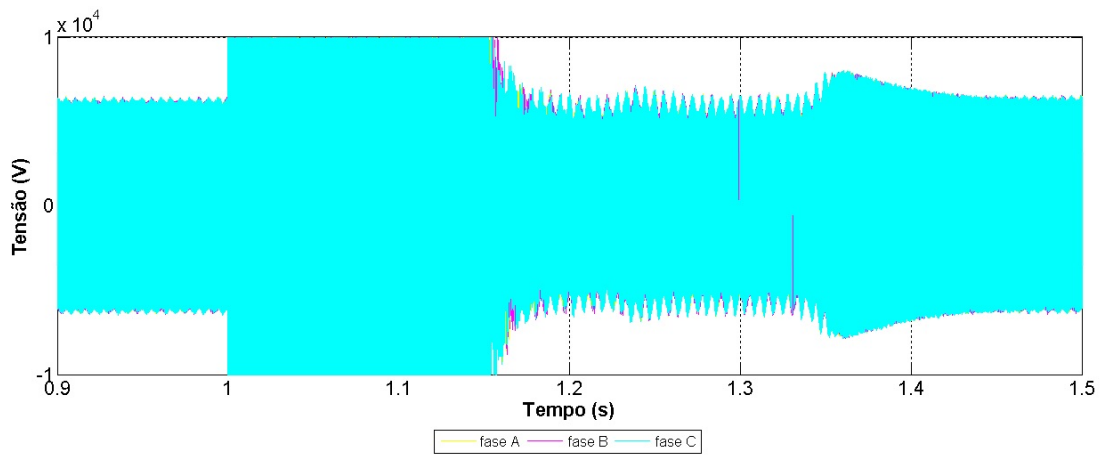


Figura 3.29: Tensão de fase na saída do inversor 2 (figura ampliada), caso 3.

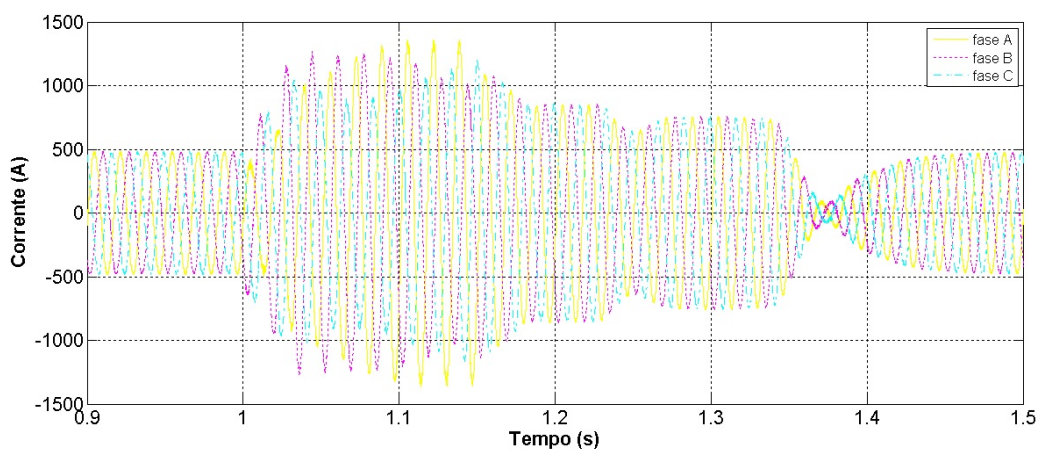


Figura 3.30: Corrente na entrada do retificador, caso 3.



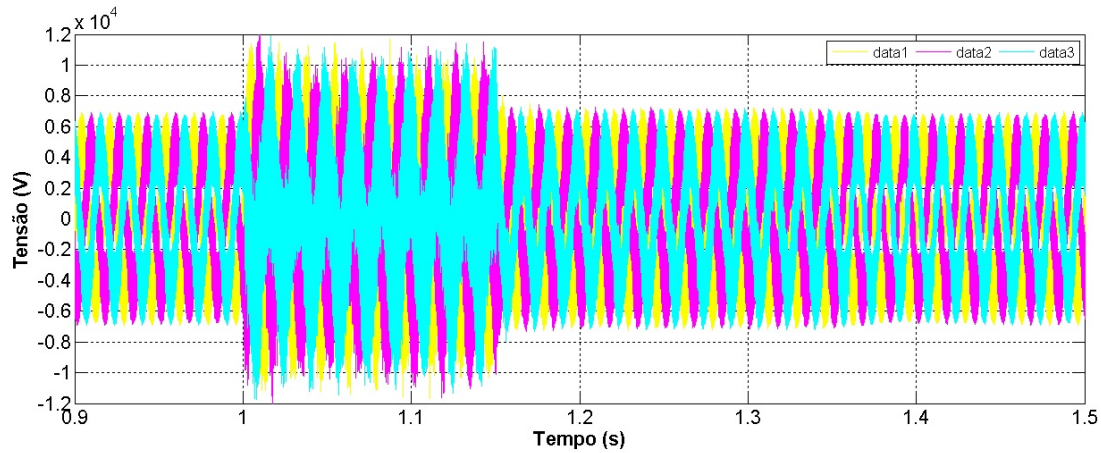


Figura 3.31: Tensão de fase na entrada do retificador, caso 3.

### 3.4 Caso 4 - falta trifásica no inversor (antes do motor)

O objetivo dessa simulação é analisar o comportamento do sistema em caso de ocorrência de uma falta trifásica em um dos três conjuntos inversor-motor ligados ao umbilical. Novamente, o conjunto inversor-motor de número 3 foi escolhido por ser o conjunto mais próximo da fonte.

#### 3.4.1 Premissas da simulação

- Antes da ocorrência da falta, o sistema se encontra em regime permanente, no mesmo ponto de operação do caso 1.
- A falta ocorre no instante 1s e possui duração de 0,15 segundo, quando a falta é retirada.
- O ponto de ocorrência de falta é na saída do inversor de número 3, que é o mais próximo do ponto de interligação entre o umbilical e as cargas. A falta ocorre com o fechamento do circuito entre as três fases através de uma resistência de falta de  $0,2\Omega$  entre fases.

#### 3.4.2 Resultados da simulação

Durante a ocorrência da falta, a tensão na saída do retificador se estabiliza em 0,6pu, enquanto a corrente atinge o pico de 1400 A, mas se estabiliza em 1250 A. Após a falta, a corrente CC sofre uma queda brusca atingindo 250 A, mas se estabiliza em 500 A para suprir a corrente adicional requerida pelo aumento do torque dos motores, que estão acelerando até atingir 4000 rpm, a velocidade final especificada.

A queda na corrente provoca um aumento da tensão, que chega a atingir 1,25pu e começa a cair de forma suave até alcançar 1pu em regime permanente no instante aproximado 1,55s.

Na saída do inversor de número 3, onde ocorre a falta, a corrente sofre uma grande elevação, atingindo o valor de pico de 80 kA e se estabilizando em 4000 A, enquanto a tensão sofre uma queda considerável, estabilizando em 1800 V.

Na saída do inversor 2, o sistema se comporta de forma semelhante ao da saída do inversor 3, mas com magnitudes diferentes. A tensão apresenta o mesmo comportamento e valores, enquanto a corrente atinge o pico de 900 A no começo da falta, apresentando tendência exponencial de queda e atingindo o valor de 500 A no final da falta.

Como nos casos anteriores, o sistema sofre duas perturbações posteriores ao final da falta. A primeira ocorre no instante 1,33 s, devido ao inversor 3. Essa perturbação não causa grandes variações no sistema. Por outro lado, a segunda perturbação, que ocorre no momento 1,43s devido aos inversores 1 e 2, eleva a tensão na saída do retificador de 1,1pu para 1,25pu, mas é logo estabilizada para o valor nominal após 0,1s.

Essa perturbação também causa uma elevação momentânea e rapidamente corrigida da tensão nos terminais dos motores. O conjuntos inversor-motor 1 e 2 também sofrem uma elevação momentânea da corrente com duração aproximada de 0,05s. O motor 3 não sofre perturbação em sua corrente de entrada.

O sistema pode ser considerado totalmente estabilizado no instante 1,55s, 0,4s após a eliminação da falta.

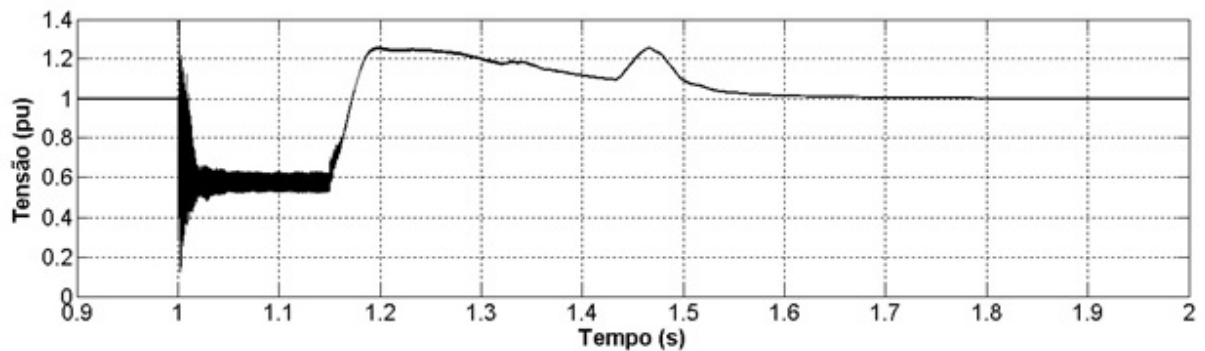


Figura 3.32: Tensão na saída do retificador, caso 4

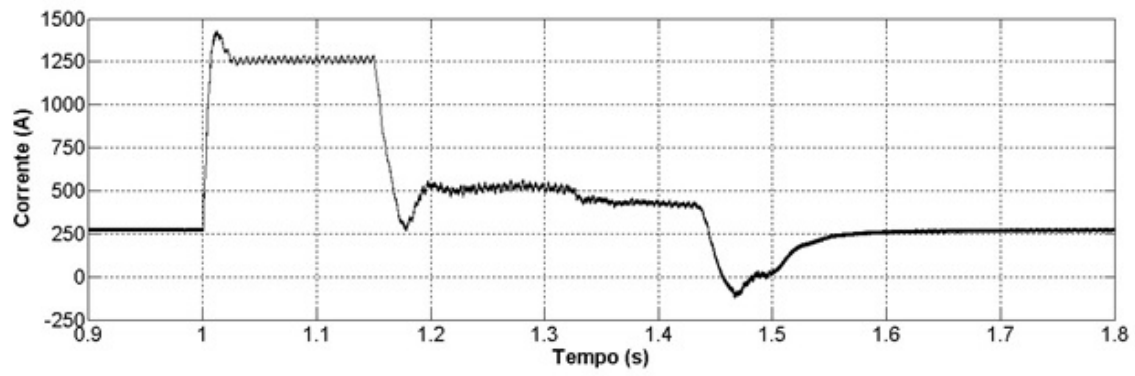


Figura 3.33: Corrente na saída do retificador, caso 4

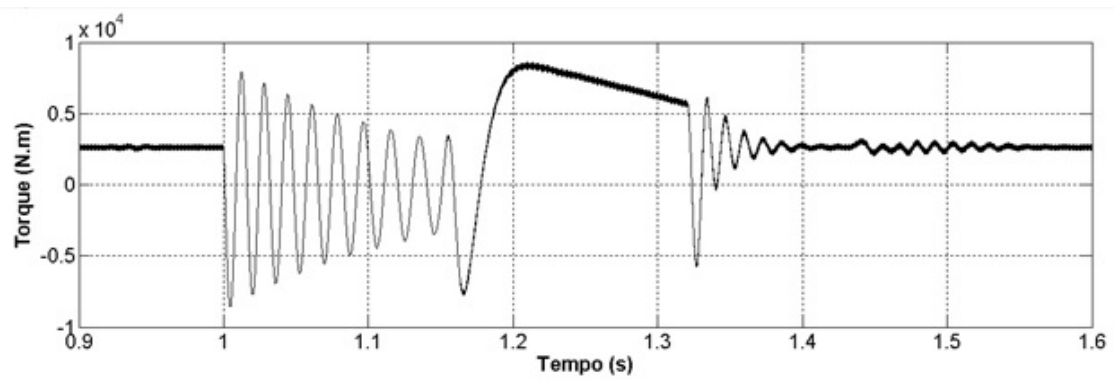


Figura 3.34: Torque eletromagnético do motor 3, caso 4

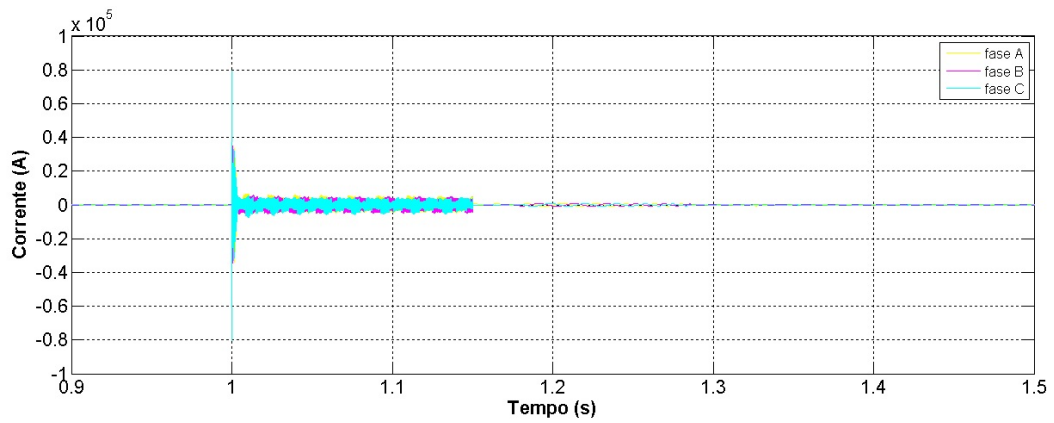


Figura 3.35: Corrente na saída do inversor 3, caso 4

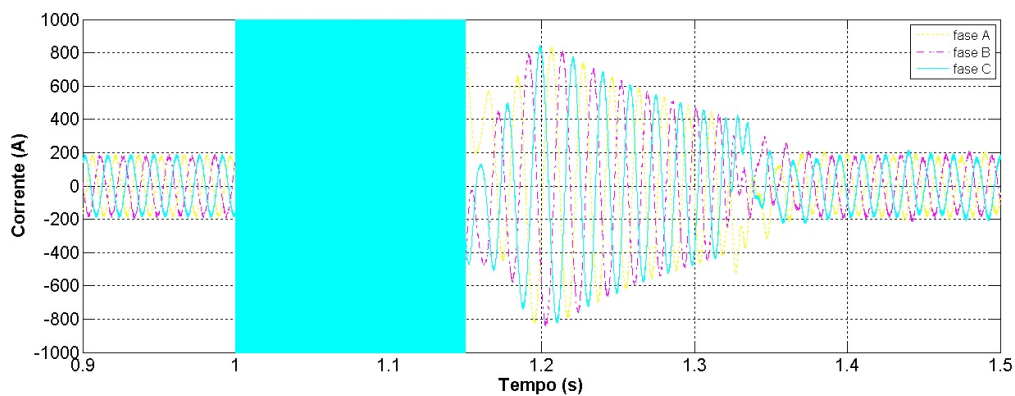


Figura 3.36: Corrente na saída do inversor 3 (figura ampliada), caso 4

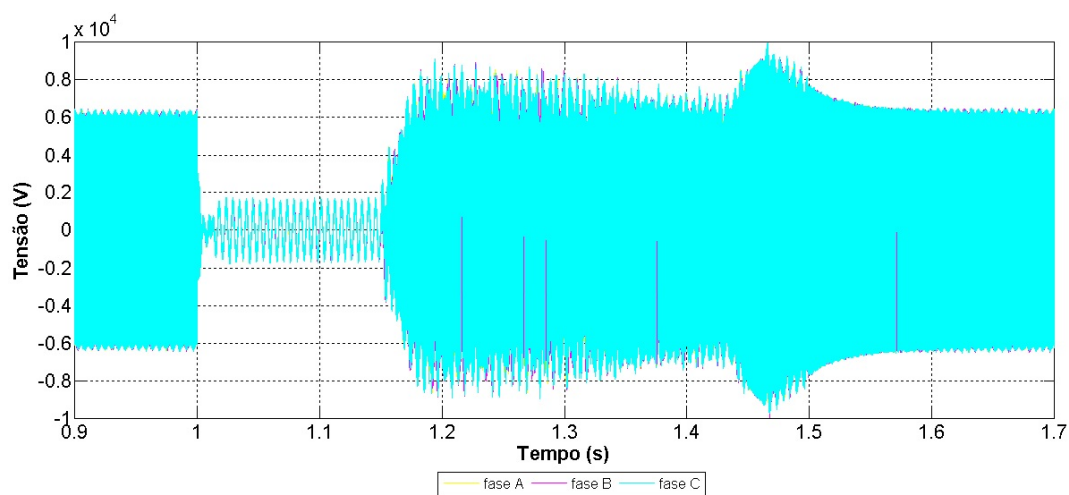


Figura 3.37: Tensão de fase na saída do inversor 3, caso 4

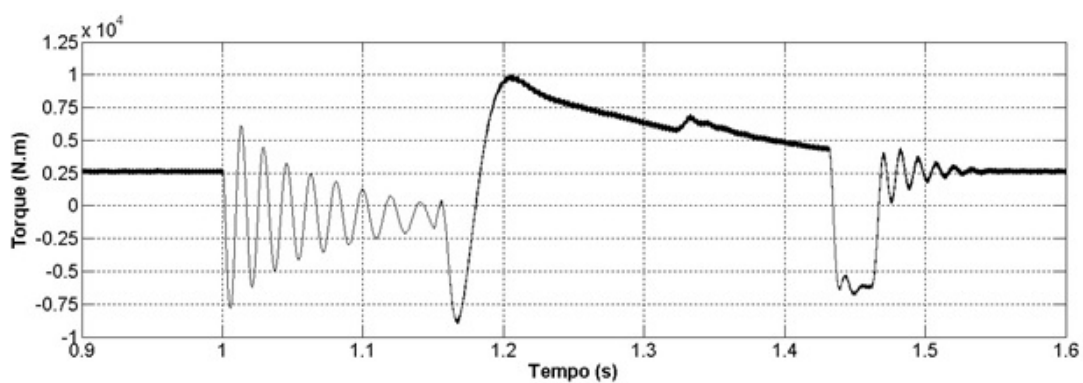


Figura 3.38: Torque eletromagnético do motor 2, caso 4

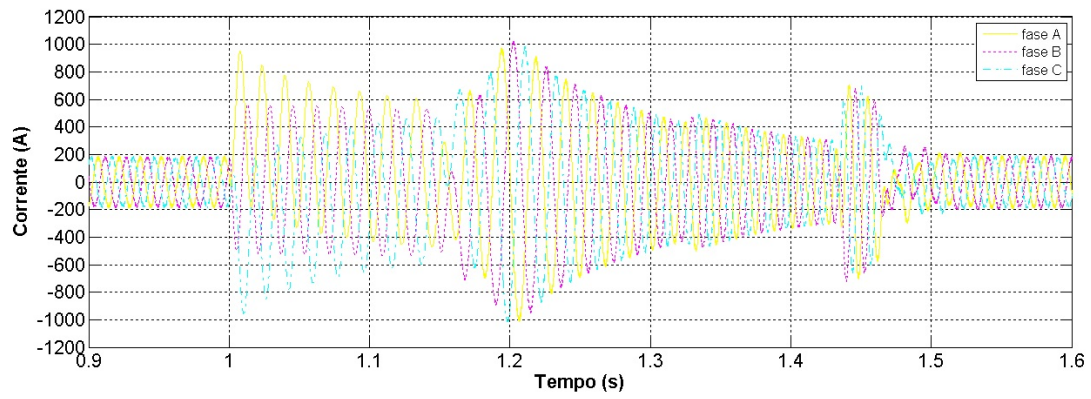


Figura 3.39: Corrente na saída do inversor 2, caso 4

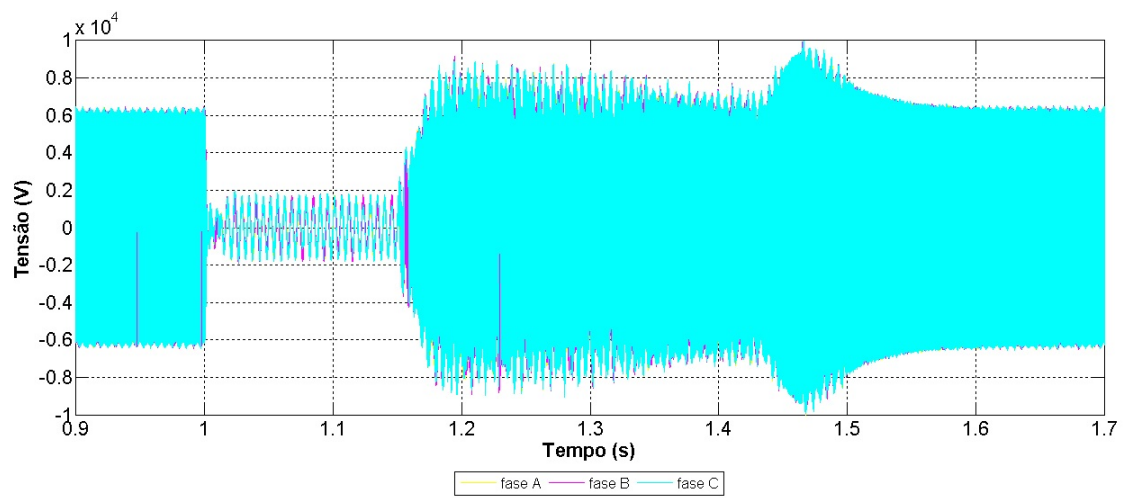


Figura 3.40: Tensão de fase na saída do inversor 2, caso 4

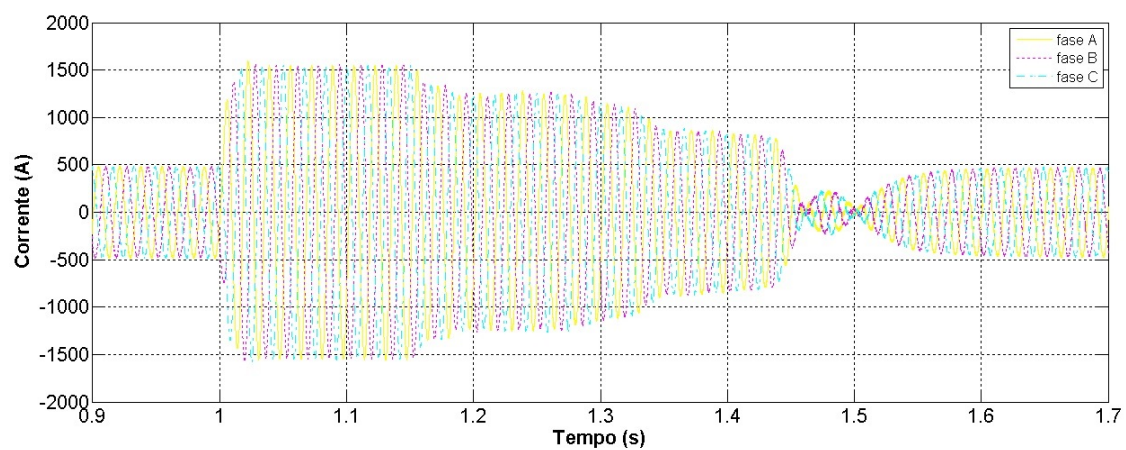


Figura 3.41: Corrente na entrada do retificador, caso 4

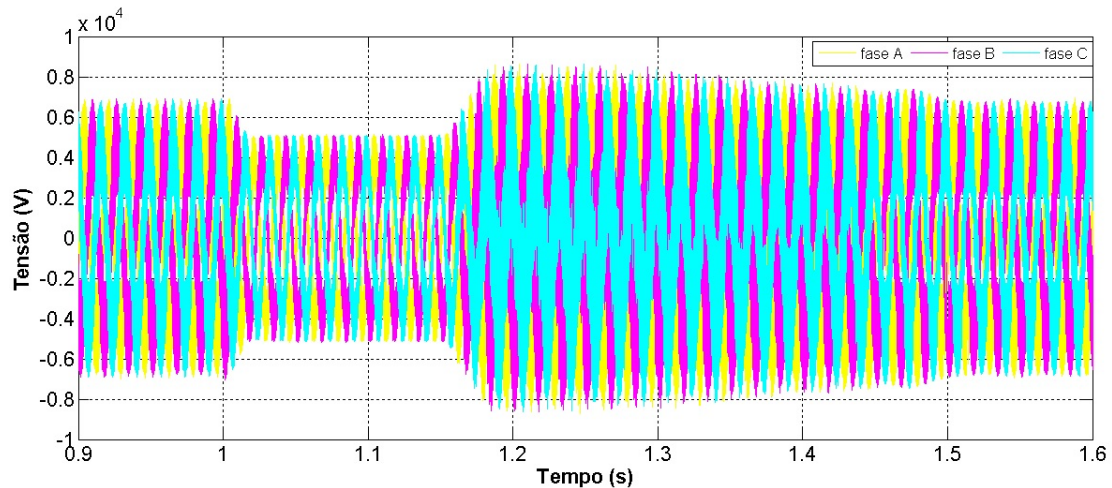


Figura 3.42: Tensão de fase na entrada do retificador, caso 4

## 3.5 Caso 5 - falta na fase A do retificador

O objetivo dessa simulação é analisar o comportamento do sistema em caso de ocorrência de uma falta para terra na fase A do retificador.

### 3.5.1 Premissas da simulação

- Antes da ocorrência da falta, o sistema se encontra em regime permanente, no mesmo ponto de operação do caso 1.
- A falta ocorre no instante 1s e possui duração de 0,15 segundo, quando a falta é retirada.
- O ponto de ocorrência de falta é a fase A de entrada do retificador que alimenta as cargas do sistema submarino. A falta ocorre com o fechamento do circuito entre o ponto anteriormente citado e o terra através de uma resistência de falta de  $0,1\Omega$ .

### 3.5.2 Resultados da simulação

A ocorrência de um curto na fase A do circuito alimentador de todo o sistema parece afetar muito pouco o mesmo. A tensão CC praticamente não saiu da faixa de estabilidade estipulada em mais ou menos 5% em torno da tensão nominal.

A tensão nos terminais do motor sofre elevação em duas fases e queda na fase defeituosa, refletindo o que acontece na entrada do retificador. As correntes das fases B e C na entrada do retificador aumentam de 500 A para 900 A, retornando instantaneamente ao final da falta. Essa elevação da corrente não se reflete na

saída dos inversores. O torque e a velocidade dos motores sofrem perturbações desprezíveis.

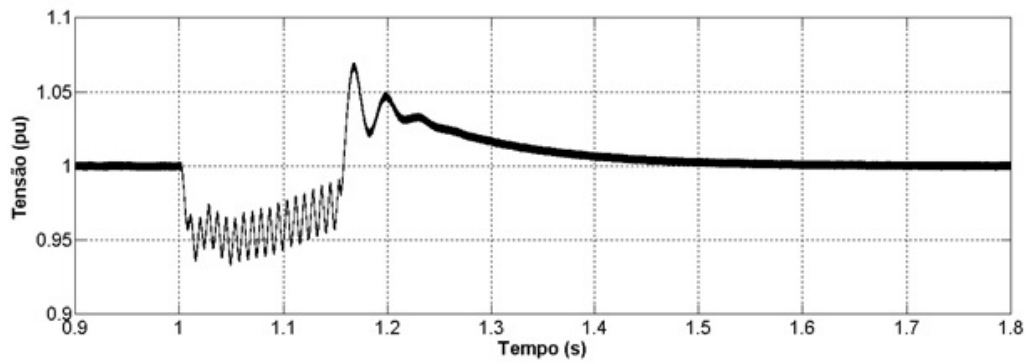


Figura 3.43: Tensão na saída do retificador, caso 5

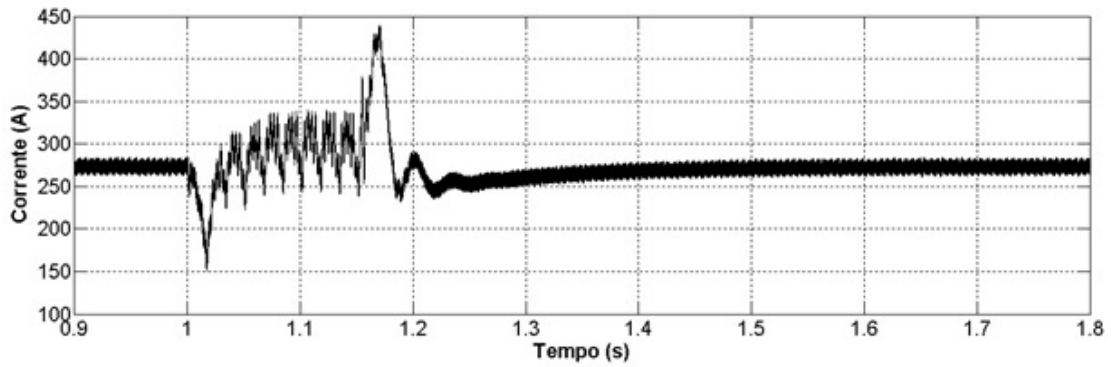


Figura 3.44: Corrente na saída do retificador, caso 5

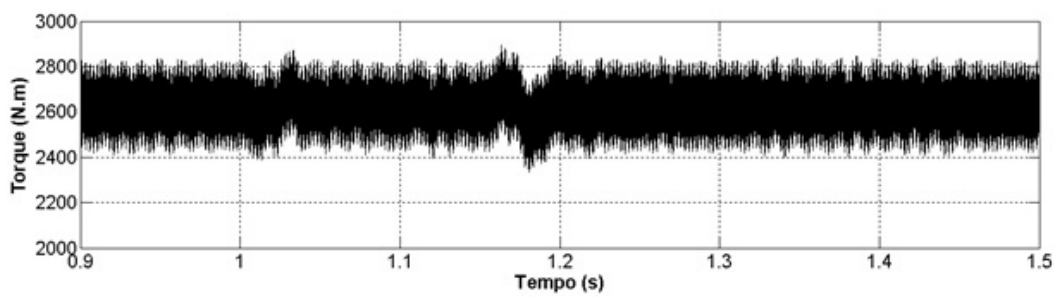


Figura 3.45: Torque eletromagnético do motor 3, caso 5

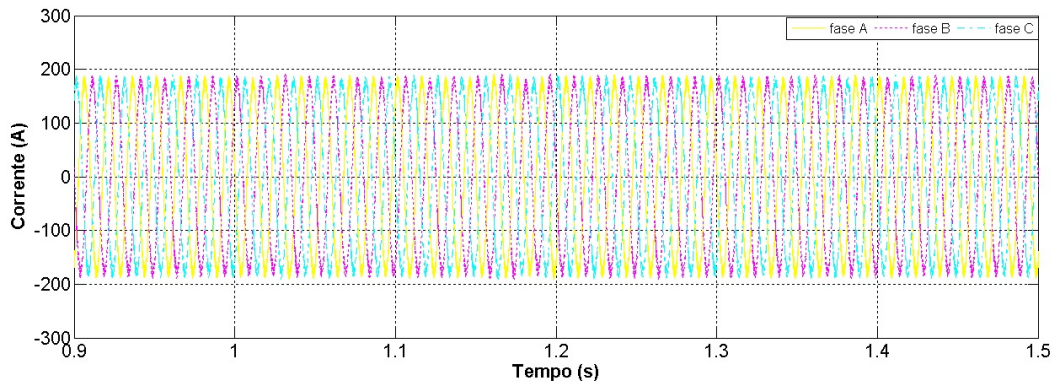


Figura 3.46: Corrente na saída do inversor 3, caso 5

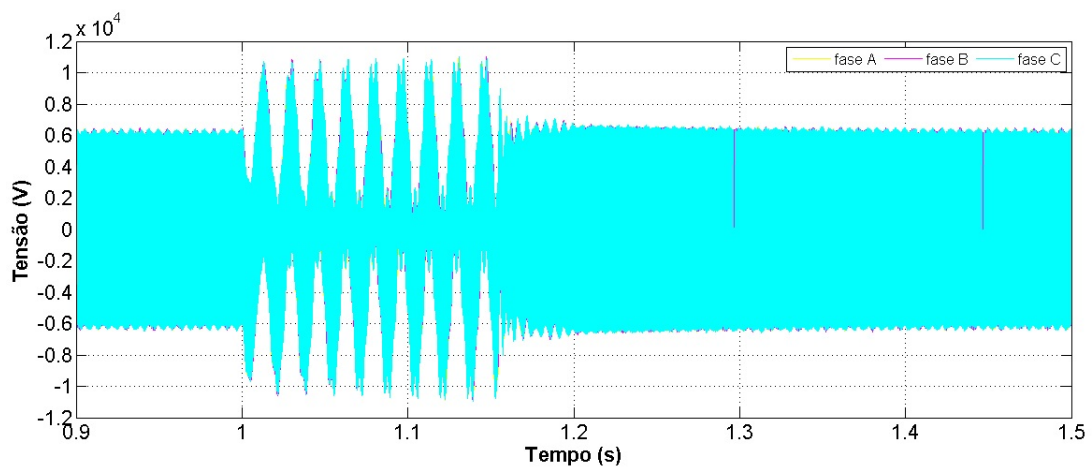


Figura 3.47: Tensão de fase na saída do inversor 3, caso 5

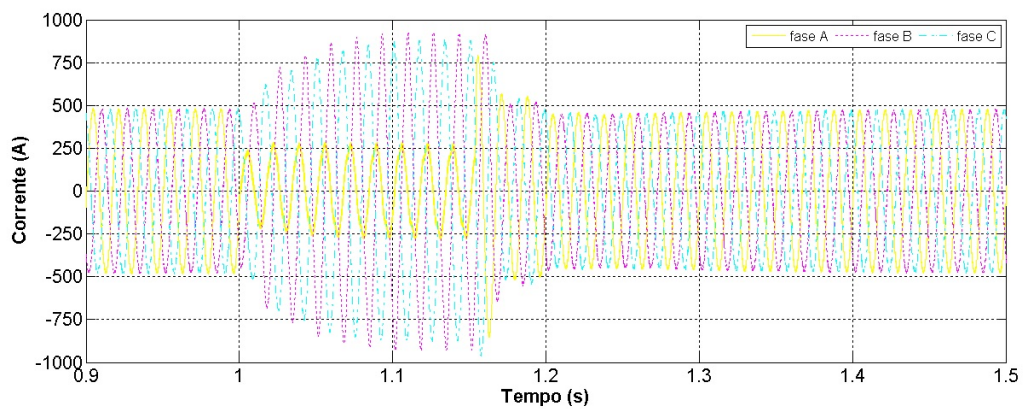


Figura 3.48: Corrente na entrada do retificador, caso 5



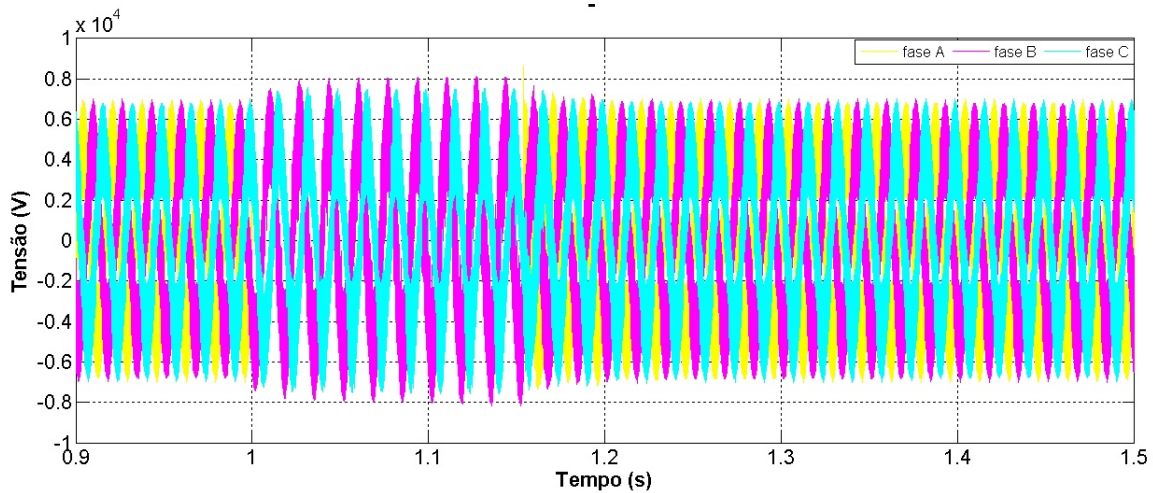


Figura 3.49: Tensão de fase na entrada do retificador, caso 5

## 3.6 Caso 6 - falta trifásica no retificador

O objetivo dessa simulação é analisar o comportamento do sistema em caso de ocorrência de uma falta trifásica na entrada do retificador.

### 3.6.1 Premissas da simulação

- Antes da ocorrência da falta, o sistema se encontra em regime permanente, no mesmo ponto de operação do caso 1.
- A falta ocorre no instante 1s e possui duração de 0,15 segundo, quando a falta é retirada.
- O ponto de ocorrência de falta é a entrada do retificador que alimenta as cargas do sistema submarino. A falta ocorre com o fechamento do circuito entre as três fases através de uma resistência de falta de  $0.2\Omega$  entre as fases.

### 3.6.2 Resultados da simulação

O curto trifásico no retificador causou uma pequena elevação da tensão CC logo após a falta, não ultrapassando 1,1 pu. Entretanto, no instante 1,31 s ocorreu uma grande elevação na tensão CC devido a contribuição dos três motores simultaneamente, que por um curto período operaram como geradores. Essa perturbação elevou a tensão CC na saída do retificador para um pouco mais de 1,5 pu.

A corrente CC durante a falta foi quase zero, causando desaceleração dos motores. Após a interrupção da falta, a corrente CC chegou a atingir o pico de 800A, mas foi estabilizada em aproximadamente 620A, muito acima da corrente de regime permanente, para suprir o torque adicional e necessário para que todos os motores

voltassem à velocidade nominal. Esse fato também causou uma grande elevação da corrente na entrada do retificador.

A corrente e a tensão na saída dos inversores também sofreram uma elevação por um curto período pelo mesmo motivo. O sistema voltou a ser totalmente estável no instante aproximado de 1,55s, 0,4s após a interrupção da falta.

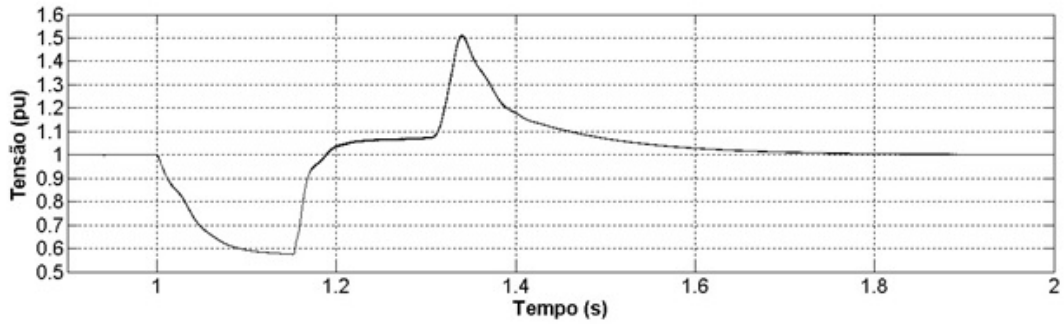


Figura 3.50: Tensão na saída do retificador, caso 6

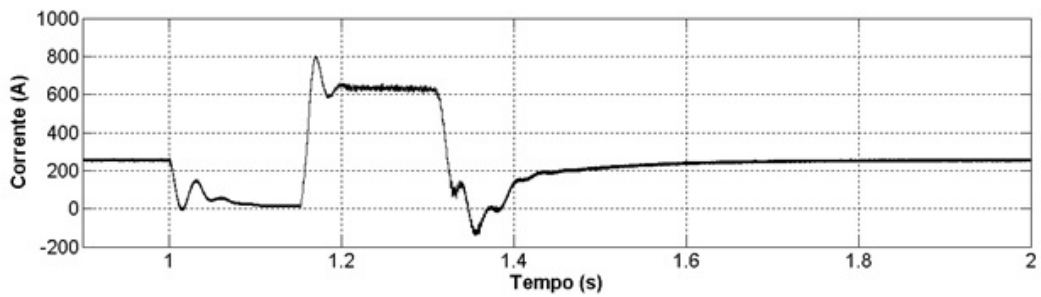


Figura 3.51: Corrente na saída do retificador, caso 6.

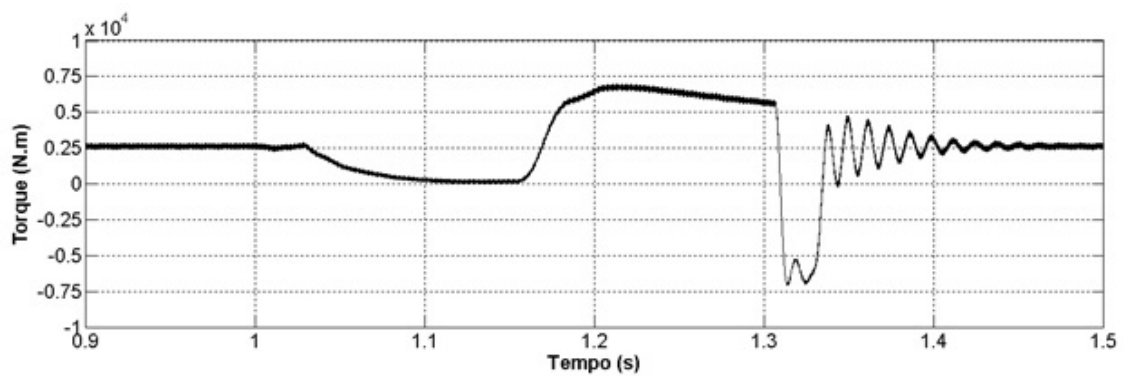


Figura 3.52: Torque eletromagnético do motor 3, caso 6.

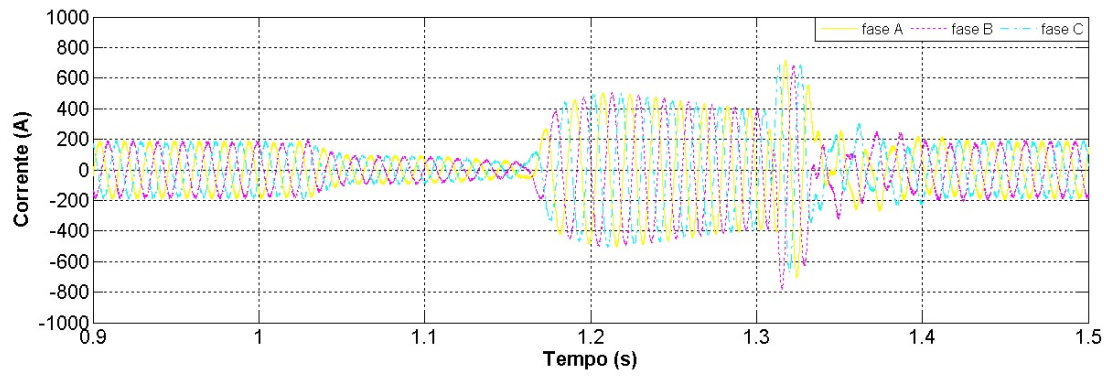


Figura 3.53: Corrente na saída do inversor 3, caso 6.

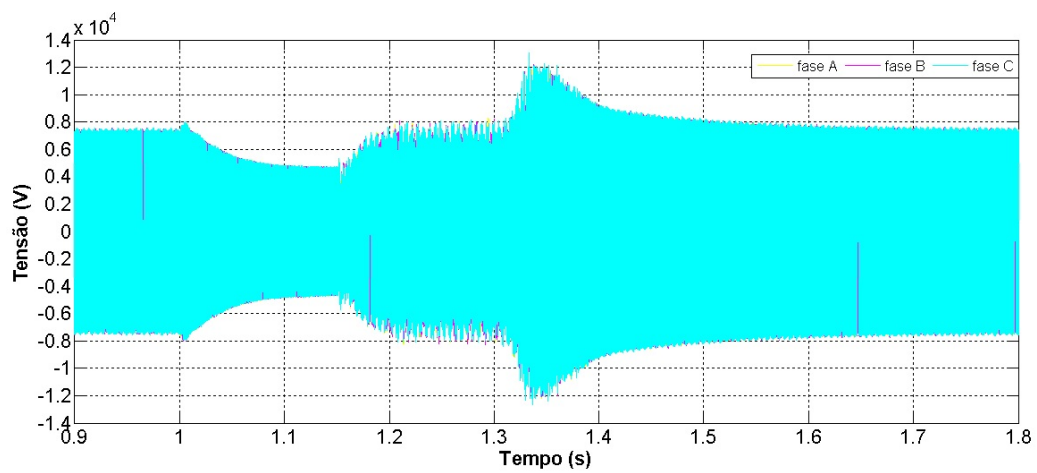


Figura 3.54: Tensão de fase na saída do inversor 3, caso 6.

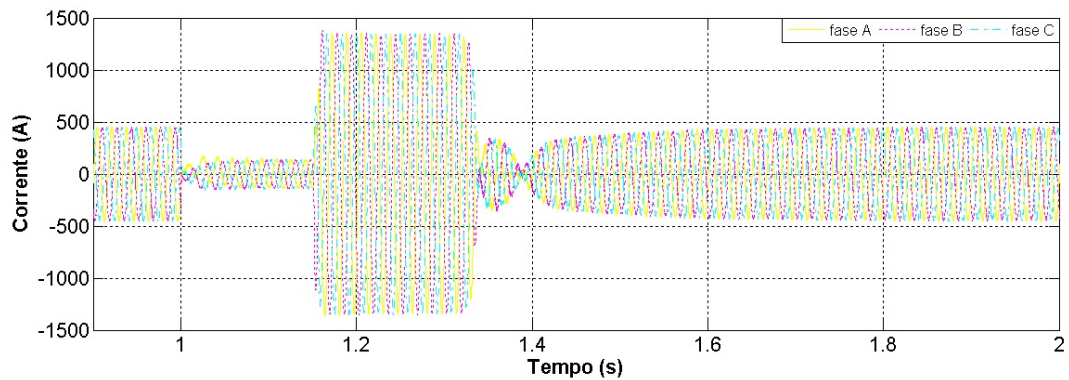


Figura 3.55: Corrente na entrada do retificador, caso 6.

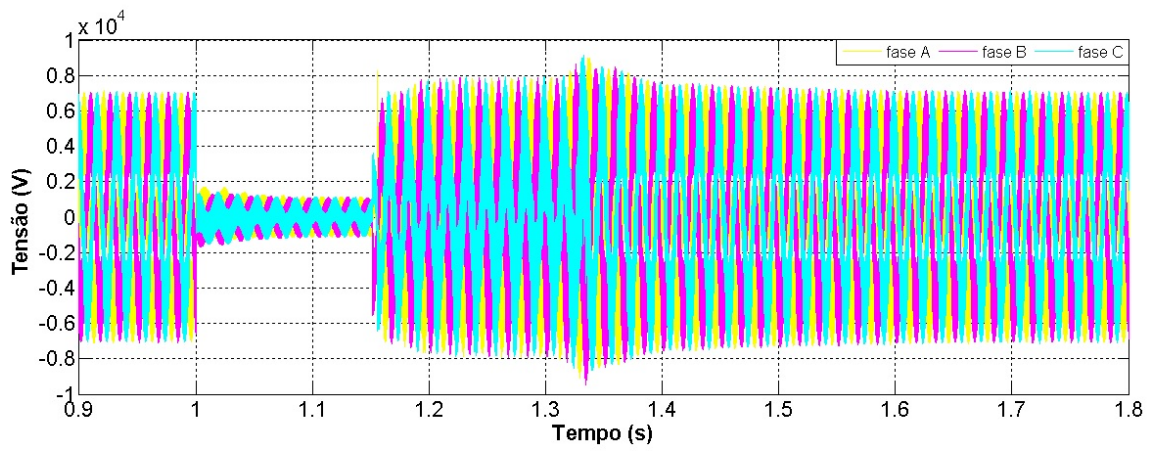


Figura 3.56: Tensão de fase na entrada do retificador, caso 6.

# Capítulo 4

## Conclusões e trabalhos futuros

### 4.1 Principais conclusões

Nesse trabalho foi investigada uma topologia de rede para transmissão e distribuição de potência para cargas submarinas em projetos de exploração de petróleo. Atualmente, a utilização de corrente contínua só é considerada para transmissão de grande potência para longas distâncias, o que o autor desse trabalho considera um erro, visto que um dos elementos mais caros do sistema, os conversores, são utilizados em todas as topologias existentes, pois são aplicados para controlar as máquinas rotativas submarinas (motores e compressores).

Esse trabalho propôs uma rede elétrica que utiliza tanto equipamentos de baixa complexidade quanto equipamentos que precisam ser adaptados para o ambiente submarino, mas que apresentam baixo risco tecnológico para seu desenvolvimento.

Para estudar e comprovar a aplicabilidade da rede sugerida, a mesma foi modelada no ambiente Simulink/Matlab e diversas situações de operação foram simuladas, como a inicialização de todas as cargas até o regime permanente e a ocorrência de faltas em pontos relevantes da rede. Os resultados das simulações mostraram que a solução com transmissão, distribuição e controle das máquinas utilizando uma rede em corrente contínua controlada por conversores fonte de tensão é adequada e apresenta grandes vantagens como:

- Aplicabilidade em redes fracas, que é o caso de plataformas.
- A compensação de potência reativa não é necessária, o que é uma grande vantagem em projetos submarinos e/ou offshore.
- A solução permite a utilização de topologias simples e robustas.
- Os conversores fonte de tensão são consideravelmente mais compactos que os conversores fonte de corrente.

- A não inversão da polarização da tensão nos cabos permite o uso de umbilical com isolamento elétrico mais simples e barato.

## 4.2 Trabalhos futuros

A partir desse trabalho, muitos outros podem ser desenvolvidos no futuro. Dentre eles:

- (i) Aprimoramento dos modelos dos componentes da rede, principalmente dos cabos utilizados na transmissão de energia.
- (ii) Uso de outras topologias de conversores, observando critérios importantes como robustez, complexidade do circuito e controle, custos, compactação, etc.
- (iii) Estudo de redes mais complexas e interligadas, avaliando se a solução proposta é interessante do ponto de vista de maior disponibilidade da rede, custos envolvidos, aplicabilidade técnica, etc.
- (iv) Análise entre a relação da capacidade de transmissão do sistema elétrico e o dimensionamento do sistema de superfície, procurando responder qual o limite viável de potência/distância de transmissão levando em consideração as limitações de espaço em plataformas.
- (v) Estudo da interligação das redes submarinas com geração de energia renovável offshore, como a eólica, diminuindo a necessidade de queima de combustíveis fósseis e aumentando a rentabilidade do projeto com possível venda da potência excedente para o mercado.
- (vi) Estudo da melhor topologia e controle de conversores submarinos focando na diminuição das perdas ôhmicas e diminuindo a necessidade de dissipação térmica do ambiente (vasos de pressão) onde esses equipamentos são instalados.
- (vii) Estudo de reaproveitamento do calor dissipado nos componentes do sistema para aquecimentos dos tubos de escoamento de petróleo.

Importante frisar que as análises apresentadas nesse trabalho são preliminares e o aprimoramento dos modelos e do controle dos componentes do sistema é necessário para prever com maior precisão o comportamento do sistema durante sua operação.

# Referências Bibliográficas

- [1] HYTTINEN, M., LAMELL, J., NESTLI, T. F. “New Application Of Voltage Source Converter (VSC) HVDC To Be Installed On The Gas Platform Troll A”, *CIGRÉ Session*, 2004.
- [2] VOIGHT, R. “Submarine High Voltage Power Transmission: Challenges and Opportunities”, *Offshore Technology Conference 24448*, 2013.
- [3] MÆLAND, A., CHOKHAWALA, R. S. “Powering Oil and Gas Offshore Operations from Mainland Electrical Grid”, *IEEE International Conference on e-Business Engineering*, 2010.
- [4] LAMELL, J. O., TRUMBO, T., NESTLI, T. F. “Offshore Platform Powered With New Electrical Motor Drive System”, *Fifty-Second Annual Technical Conference of the Petroleum*, 2005.
- [5] ALBUQUERQUE, F. A., MORAIS, M. G., EUPHEMIO, M. L., ET AL. “Subsea Processing and Boosting in Brazil: Status and Future Vision”, *Offshore Technology Conference 24498*, 2013.
- [6] MORAES, C., SILVA, F., MONTEIRO, A., ET AL. “Subsea versus Topside Processing - Conventional and New Technologies”, *Offshore Technology Conference 24519*, 2013.
- [7] TOTAL. “EOR maximizing recovery factors”. 2009. Disponível em: <[http://www.geoscopie.fr/images/upload/geoscopie/espace\\_pedagogique/total-eorbis-gb2.pdf](http://www.geoscopie.fr/images/upload/geoscopie/espace_pedagogique/total-eorbis-gb2.pdf)>. Acesso em: 03 mar 2014.
- [8] RESERVOIR, K. “MMS Enhanced Recovery Study”. 2010. Disponível em: <[http://www.bsee.gov/uploadedfiles/bsee/research\\_and\\_training/technology\\_assessment\\_and\\_research/665aa.pdf](http://www.bsee.gov/uploadedfiles/bsee/research_and_training/technology_assessment_and_research/665aa.pdf)>. Acesso em: 03 mar 2014.
- [9] BAGGERUD, E., STEN-HALVORSEN, V., FANTOFT, R. “Technical Status and Development for Subsea Gas Compression”, *Offshore Technology Conference 18952*, 2007.

- [10] OKLAND, O., DAVIES, S., RAMBERG, R. M., ET AL. “Steps to the Subsea Factory”, *Offshore Technology Conference 24307*, 2013.
- [11] OLIVEIRA, A. M., BARROS, L. O., LIMA, S. T. S., ET AL. “A Methodology for the Development of a Subsea Electrical Power Transmission and Distribution System”, *Offshore Technology Conference 24129*, 2013.
- [12] SHAO, S. J., AGELIDIS, V. G. “Review of DC System Technologies for Large Scale Integration of Wind Energy Systems with Electricity Grids”, *Energies*, , n. ISSN 1996-1073, pp. 1303–1319, 2010.
- [13] LIANG, X., JACKSON, M. “Influence of Subsea Cables on Offshore Power Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, v. 45, n. 6, pp. 2136–2144, 2009.
- [14] ALVES, J. A., CUNHA, G., TORRI, P. “Medium Voltage Industrial Variable Speed Drives”. 2010. Disponível em: <[http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-medium-voltage-industrial-variable\\_speed-drives-technical-article-english.pdf](http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-medium-voltage-industrial-variable_speed-drives-technical-article-english.pdf)>. Acesso em: 03 mar 2014.
- [15] ABB. “Its time to connect - Technical description of HVDC Light technology”. Disponível em: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/2742b98db321b5bfc1257b26003e7835/\\$file/Pow0038%20R7%20LR.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/2742b98db321b5bfc1257b26003e7835/$file/Pow0038%20R7%20LR.pdf)>. Acesso em: 03 mar 2014.
- [16] LUDOIS, D., VENKATARAMANAN, G. “An Examination of AC/HVDC Power Circuits for Interconnecting Bulk Wind Generation with the Electric Grid”, *Energies*, , n. ISSN 1996-1073, pp. 1263–1289, 2010.
- [17] CARRASCO, J. M., FRANQUELO, L. G., BIALASIEWICZ, J. T., ET AL. “Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, v. 53, n. 4, pp. 1002–1016, 2006.
- [18] B4.37, C. W. G. “VSC Transmission”, *technical brochure number 269*, 2005.
- [19] ANDERSEN, B. R. “VSC Transmission Tutorial”, *CIGRÉ B4 meeting*, 2005.
- [20] WANG, F., BERTLING, L., LE, T., ET AL. “An Overview Introduction of VSC-HVDC: State-of-art and Potential Applications in Electric Power Systems”, *CIGRÉ Session*, 2011.
- [21] GILJE, S., HYTTINEN, M., WESTMAN, B. “Valhall Re-Development Project, Power from Shore”, *Cigré SC B4 2009 Bergen Colloquium*, 2009.



- [22] ASPLUND, G., ERIKSSON, K., JIANG, H., ET AL. “DC Transmission Based On Voltage Source Converters”, *CIGRÉ SC14 Colloquium*, 1997.
- [23] JOHANSSON, S. G., ASPLUND, G., JANSSON, E., ET AL. “Power System Stability Benefits With VSC DC-Transmission Systems”, *CIGRÉ Session*, 2004.
- [24] ERIKSSON, K., HALVARSSON, P., WENSKY, D., ET AL. “System Approach On Designing An Offshore Wind Power Grid Connection”. 2008. Disponível em: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/34ec041beda66334c1256fda004c8cc0/\\$file/03mc0132%20rev.%2000.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/34ec041beda66334c1256fda004c8cc0/$file/03mc0132%20rev.%2000.pdf)>. Acesso em: 03 mar 2014.
- [25] CALLAVIK, E., LUNDBERG, P., BAHRMAN, M., ET AL. “HVDC Technologies For The Future Onshore And Offshore Grid”, *CIGRÉ Grid of the Future Symposium*, 2012.
- [26] FOGG, D., DOBSON, A., DEIGHTON, A. “New Power Umbilical Technology”, *Deep Offshore Technology International*, 2011.
- [27] CALLAVIK, M., BLOMBERG, A., HÄFNER, J., ET AL. “The Hybrid HVDC Breaker, An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids”, *ABB Grid Systems Technical Paper*, 2012.
- [28] QINGHUA, L. *Analysis, Design And Control Of Permanent Magnet Synchronous Motors For Wide-Speed Operation*. Tese de D.Sc., National University of Singapore, Singapore, 2005.
- [29] STULRAJTER, M., HRABOVCOVÁ, V., FRANKO, M. “Permanent Magnets Synchronous Motor Control Theory”, *Journal of Electrical Engineering*, v. 58, n. 2, pp. 79–84, 2007.
- [30] PED4-1038C, G. *Torque Control in Field Weakening Mode*. Tese de M.Sc., Aalborg University, Copenhagen, 2009.
- [31] GIERAS, J. F., WING, M. *Permanent Magnet Motor, Technology - Design and Applications*. 2 ed. New York, MARCEL DEKKER, inc, 2002.
- [32] CHEN, C., LEE, C., TU, R., ET AL. “A Novel Simplified Space-Vector-Modulated Control Scheme for Three-Phase Switch-Mode Rectifier”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 46, n. 3, pp. 512–516, 1999.

- [33] LIMA, A. C. S., DOMMEL, H. W., STEPHAN, R. M. “Modeling Adjustable-Speed Drives with Long Feeders”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, v. 47, n. 3, pp. 549–556, 2000.
- [34] WEDEPOHL, L. M., WILCOX, D. J. “Transient analysis of underground power-transmission systems”, *PROC. IEE*, v. 120, n. 2, pp. 253–260, 1973.

## Apêndice A

Modelos em Simulink e diagrama da rede utilizada nas simulações

## A.1 Rede completa

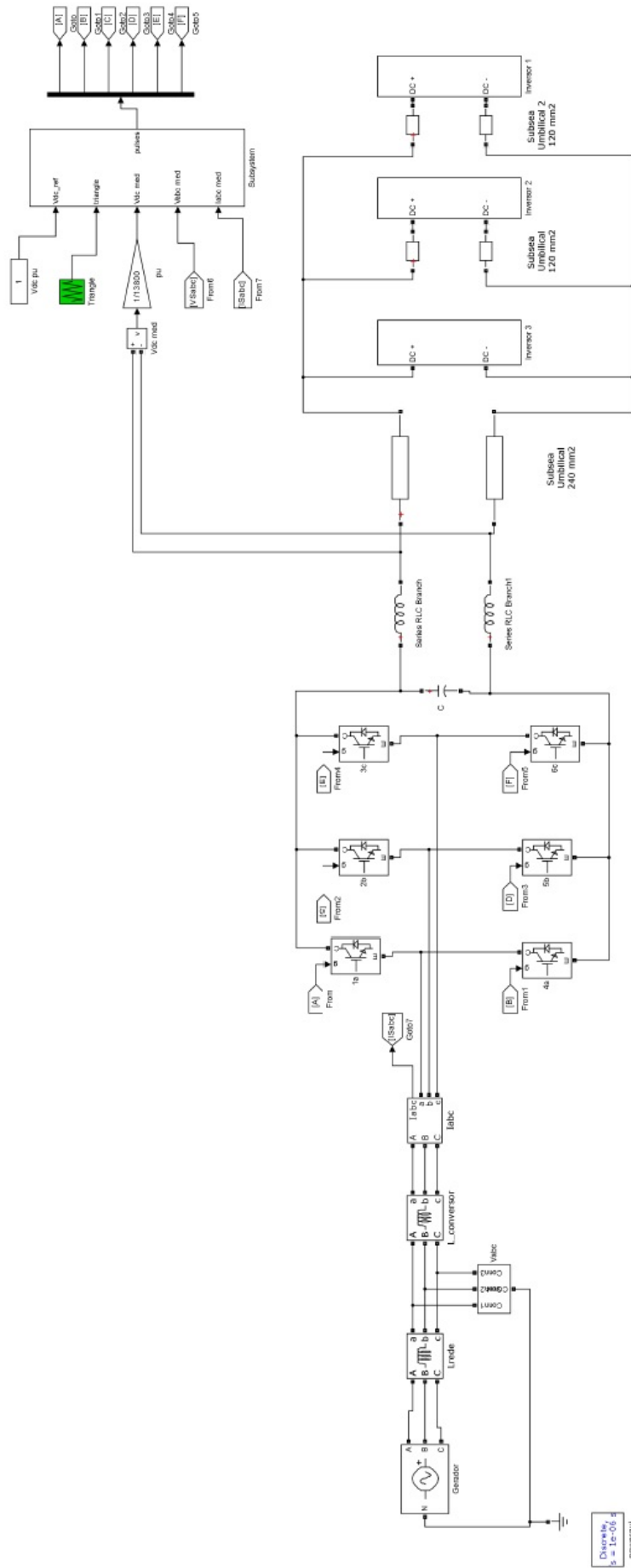


Figura A.1: Modelo da rede completa com os inversores em bloco.

## A.2 Inversor

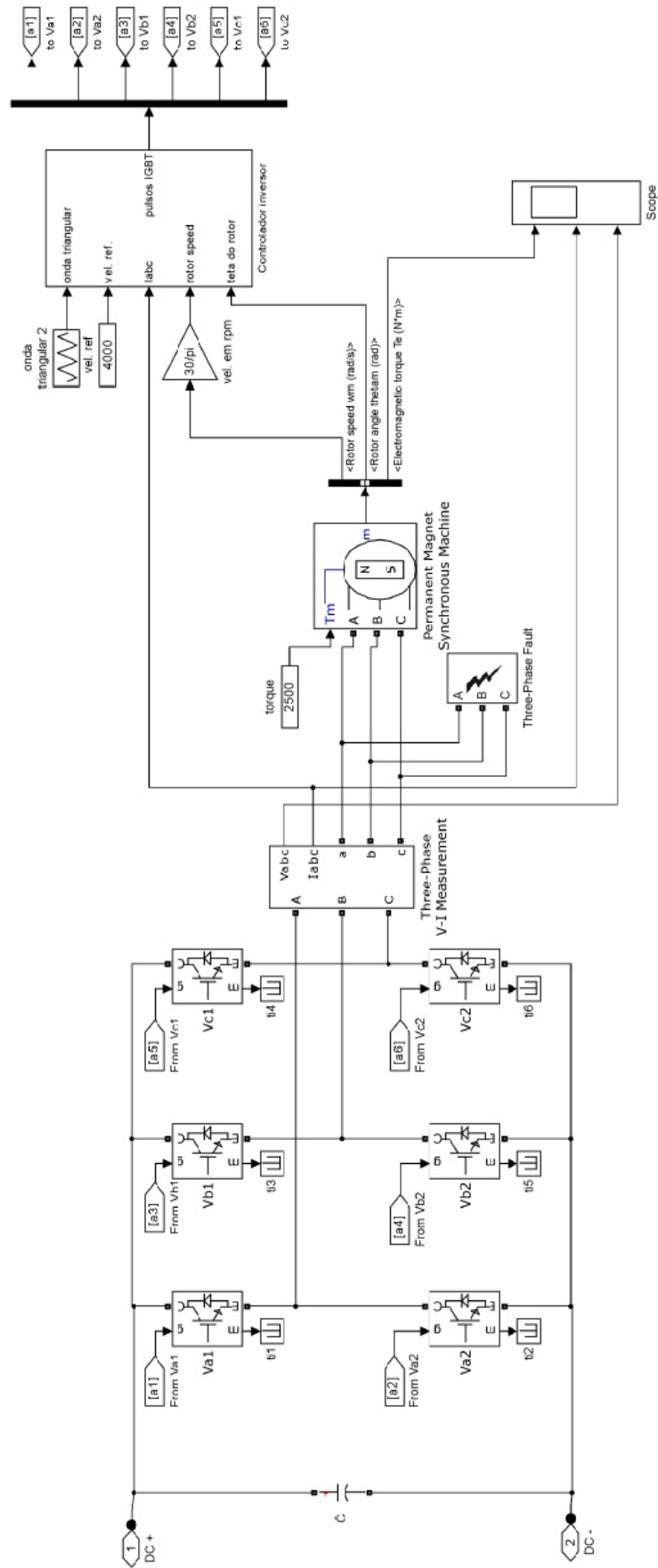


Figura A.2: Modelo dos inversores.

### A.3 Diagrama da rede



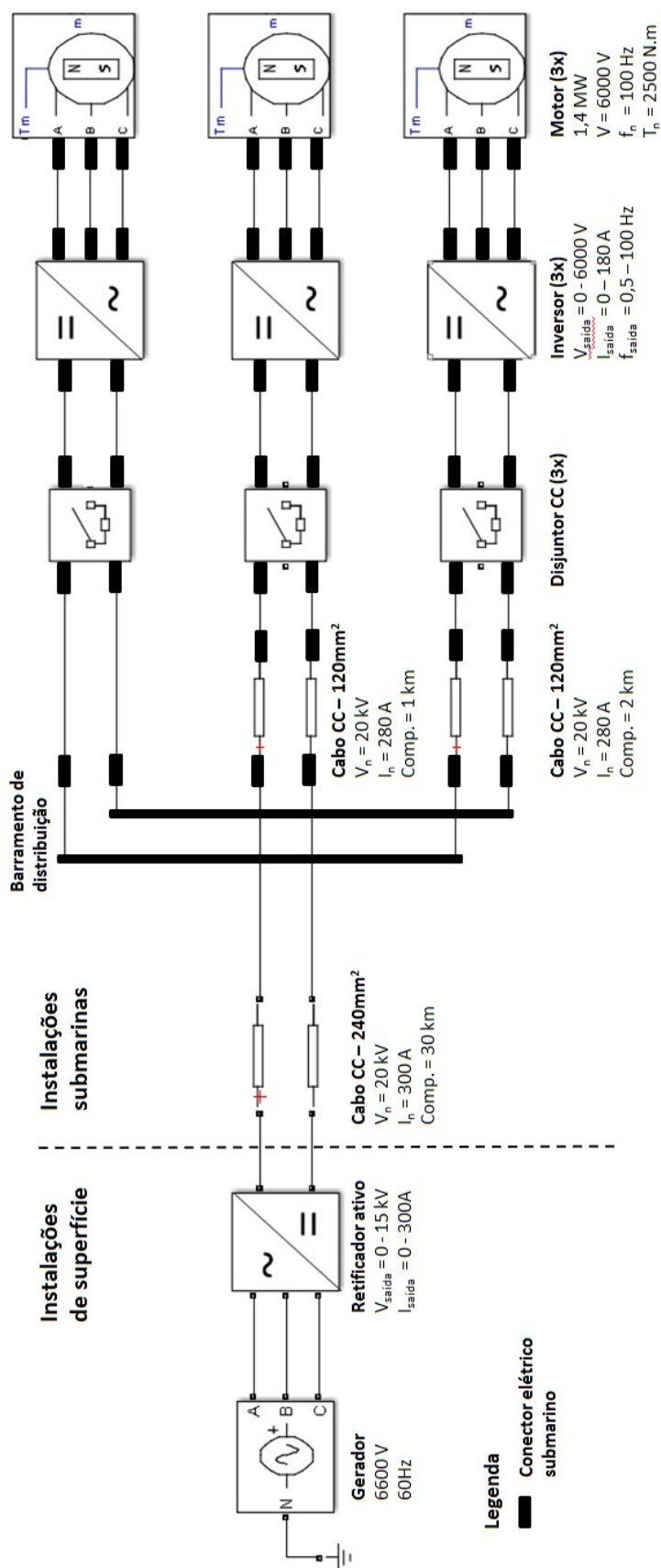


Figura A.3: Diagrama da rede.