



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

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

FÁBIO PEREIRA FELETTO

**TÉCNICAS PARA AUMENTO DE DISPONIBILIDADE DE CONVERSORES DE
FREQUÊNCIA DE MÉDIA TENSÃO TOPOLOGIA CHBI NO ACIONAMENTO DE
BCSS**

Itajubá
2017

**TÉCNICAS PARA AUMENTO DE DISPONIBILIDADE DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA DE MÉDIA TENSÃO TOPOLOGIA CHBI
NO ACIONAMENTO DE BCSS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

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

FÁBIO PEREIRA FELETTO

**TÉCNICAS PARA AUMENTO DE DISPONIBILIDADE DE CONVERSORES DE
FREQUÊNCIA DE MÉDIA TENSÃO TOPOLOGIA CHBI NO ACIONAMENTO DE
BCSS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre de ciências em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Coorientador: Prof. Dr. João Guilherme de Carvalho Costa

Área de Concentração: Petróleo e Gás Natural

Itajubá
2017

FÁBIO PEREIRA FELETTO

**TÉCNICAS PARA AUMENTO DE DISPONIBILIDADE DE CONVERSORES DE
FREQUÊNCIA DE MÉDIA TENSÃO TOPOLOGIA CHBI NO ACIONAMENTO DE
BCSS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre de ciências em Engenharia de Energia.

Aprovado em ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis

Prof. Dr. Eduardo Crestana Guardia

Prof. Dr. João Guilherme de Carvalho Costa

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Itajubá
Novembro, 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço antes de tudo a Deus, que deu-nos a vida, a inteligência e o Universo, para que possamos desbravá-lo. Ele esteve ao meu lado nos momentos de dificuldade.

Agradeço à pessoa que me fez ser quem sou hoje: Eduardo Feletto, meu pai. Pessoa a qual mais admiro por ser dotada de notável inteligência, criatividade, caráter e sobretudo: Bondade.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni, e ao meu coorientador, Prof. Dr. João Guilherme de Carvalho Costa, pelo auxílio e direcionamento na confecção deste trabalho.

Agradeço a Petrobras pela oportunidade de aprimoramento técnico obtido e por permitir a realização deste trabalho.

RESUMO

Métodos de elevação artificial são corriqueiramente empregados na indústria de petróleo com objetivo de fornecer a energia necessária para que o fluido seja transferido do reservatório até a superfície, de maneira a ser processado nas unidades de produção. O Sistema BCSS é um método de elevação artificial bastante utilizado na indústria do petróleo, aplicado principalmente em campos maduros e campos com óleo pesados (baixo grau API), onde a energia é fornecida ao fluido através do acionamento elétrico de um conjunto moto bomba submerso, realizado por um conversor de frequência de média tensão disposto na superfície.

Os sistemas elétricos presentes nas unidades de produção de petróleo de maneira geral priorizam a existência de redundância das cargas elétricas, essencialmente as relacionadas à segurança operacional e produção, de modo a aumentar a confiabilidade do sistema. Porém, no caso de sistemas BCSS, a alimentação de cada poço depende da operacionalidade de um conversor de frequência dedicado, sendo que a redundância fica praticamente impossibilitada devido às dimensões dos equipamentos dispostos nas plataformas de produção.

Devido ao alto custo das intervenções para substituição dos conjuntos BCSS, é esperado deste sistema o máximo de disponibilidade possível. Existe uma tendência pela construção de poços com vazões cada vez maiores, e que conseqüentemente demandam equipamentos de potências cada vez mais altas. Desta forma, a confiabilidade dos conversores de frequência aplicados para este fim torna-se essencialmente importante para a operação deste sistema, uma vez que uma falha no conversor se traduz diretamente em perda de produção daquele poço e parada do conjunto BCSS associado.

O objetivo deste trabalho é analisar os conversores de frequência de média tensão que utilizam a topologia PWM multinível no acionamento de conjuntos BCSS sob o ponto de vista de confiabilidade e disponibilidade, propondo técnicas para aumento da disponibilidade do conversor de frequência de média tensão na topologia multinível, com foco no aumento da disponibilidade do sistema BCSS ao longo da vida útil de um poço de petróleo, de modo a obter menores perdas de produção e um melhor retorno econômico sobre o investimento.

PALAVRAS-CHAVE: Bombeio Centrifugo Submerso Submarino, Conversor de frequência, sistema BCSS, VFD, VSD, Topologia Multinível PWM

ABSTRACT

Artificial Lift Methods are routinely employed in the petroleum industry in order to provide the energy needed for the fluid to be transferred from the reservoir to the surface, so being processed in the production units. The ESP system is a method of artificial lift widely used in industry, mainly applied in mature fields or fields with heavy oil (low API gravity), where energy is supplied to the electric drive fluid through a submerged motor pump set, performed by a medium voltage drive located on the platform.

Electrical systems present in oil production units generally prioritize the existence of redundancy of electrical charges, primarily related to operational and production safety, in order to increase system reliability. However, in the case of ESP systems, the power of each well is dependent on the operation of a dedicated frequency converter, and redundancy is practically impossible due to the dimensions of the equipment located in the production platforms.

Due to the high cost of interventions for joint replacement of ESP, this system is expected maximum availability possible. There is a tendency for the construction of wells with increasing flow rates, and consequently demand increasingly high power equipment. Thus, the reliability of applied frequency converters for this purpose becomes essentially important to the operation of this system, since a failure in the converter translates directly into lost production from that well and stopping the associated set ESP.

The objective of this dissertate is analyze the frequency converters using medium voltage multilevel PWM drive topology in ESP sets from the availability and reliability point of views and propose the implementation of technical resources to improve availability of medium voltage frequency drives, focusing on increased system availability ESP over the useful life of an oil well, in order to achieve lower production losses and a better economic return on investment.

KEY WORDS: Electrical Submersible Pump, Variable Frequency Drive, ESP System, VFD, VSD, Multilevel PWM Topology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Plataforma com poços com Bombeio Centrífugo Submerso Submarino;	3
Figura 2.1- Fluxograma da aplicação da engenharia de confiabilidade em processos industriais;	7
Figura 2.2- Estados de um componente reparável em função do tempo;	9
Figura 2.3- Exemplo de análise de falhas FTA Fonte: Norma IEC-61025/06;.....	12
Figura 2.4- Taxa de falhas de componentes eletrônicos ao longo da vida útil;	15
Figura 2.5- Efeito da manutenção preventiva na taxa de falha do equipamento;	18
Figura 2.6- Curva de Arrhenius para vida útil de capacitores eletrolíticos em função da temperatura de operação;.....	19
Figura 3.1- Fotografia de motores de BCS;	24
Figura 3.2- Vista interna em corte de Motor de Indução de BCSS, encapsulado em epóxi e rotores;.....	25
Figura 3.3- Principais componentes de um motor de indução de BCSS;.....	25
Figura 3.4- Principais componentes de um Protetor de BCSS;.....	27
Figura 3.5- Vista interna em corte de uma bomba centrífuga utilizada no conjunto BCSS; ...	28
Figura 3.6- Cabos elétricos utilizados em sistemas BCS e BCSS; Fonte : catalogo Schlumberger	30
Figura 3.7- Sistema elétrico submarino utilizado na alimentação da BCSS;.....	32
Figura 3.8- Conversor de frequência CHBI de MT - 2000 HP – tensão de saída 0 - 6,6 kV para testes de BCSS	34
Figura 3.9- Diagrama unifilar da alimentação elétrica do conversor de frequência de um BCSS;	36
Figura 4.1- Componentes internos de potência de um VFD Multinível (ZHOU et All, 2006);	38
Figura 4.2- Componentes de uma célula de potência (Fonte: Manual Siemens);.....	39
Figura 4.3- Células de potência de um conversor de frequência para BCSS.....	40
Figura 4.4- Componentes internos de um VFD Multinível;	44
Figura 4.5- Diagrama simplificado da arquitetura de rede de interface sala de controle e poço BCSS;	46
Figura 4.6- Tela de monitoramento de um poço BCSS pela sala de controle de uma plataforma;	46

Figura 5.1- Classificação das falhas e porcentagem por grupo de falha;.....	51
Figura 5.2- Porcentagem por tempo de indisponibilidade;	52
Figura 5.3- VFD CHBI acionamento de BCSS em plataforma falha placa microprocessora com parada de produção;	54
Figura 5.4- Partida e parada do poço BCS devido intermitência no comando do VFD;.....	55
Figura 5.5- Célula de potência A2 do conversor de frequência apresentou falha na fibra ótica;	56
Figura 5.6- Falha de curto-circuito na entrada do VFD;.....	57
Figura 6.1 Arquitetura de VFD com sistemas de controle e CLPs redundantes utilizado na indústria nuclear. Fonte: Exelon	63
Figura 6.2 Diagrama de blocos de confiabilidade de uma célula de potencia	64
Figura 6.3 Modelagem de confiabilidade de VFD CHBI através de diagrama de Blocos	64
Figura 6.4- Modelagem de confiabilidade de VFD com redundância total no acionamento de BCS	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Taxas de falhas de componentes de potência de uma célula (ZHOU, 2009);	49
Tabela 2-Indisponibilidade total registrada classificada de acordo com grupo de falha;	51
Tabela 3-MTTR por grupo de falhas;	53
Tabela 4-Disponibilidade calculada no simulador para os diversos equipamentos	67

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Taxa de falhas
$R(t)$	Função confiabilidade
μ	Tempo de reparo
β	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
α	Parâmetro de escala da distribuição de Weibull

LISTAS DE SIGLAS

ANC	Árvore de Natal Convencional
ANM	Árvore de Natal Molhada
BCS	Bombeamento Centrífugo Submerso
BCSS	Bombeamento Centrífugo Submerso Submarino
CCR	<i>Central Control Room;</i>
CDC	Centro de Distribuição de Cargas
CEP	Cabo Elétrico de Potência
CHBI	<i>Cascaded H Bridge Inverter</i>
ESP	<i>Electrical Submersible Pump</i>
FIT	<i>Failure in Time</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MLE	<i>Motor Lead Extension</i>
MTTR	<i>Mean time to Repair</i> (Tempo Médio para reparo)
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i> (Tempo Médio entre falhas)
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i> (Tempo Médio para falhar)
RBD	<i>Reliability Block Diagram</i>
TH	<i>Tubing Hanger</i>
UTU	<i>Umbilical Terminal Unit</i>
VFD	<i>Variable Frequency Drive</i> (Conversor de frequência)
VSD	<i>Variable Speed Drive</i> (Conversor de velocidade)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE E ANÁLISE DE FALHAS DE SISTEMAS.....	7
2.1	TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHAS QUALITATIVAS	8
2.1.1	GRAFICO DE PARETO.....	8
2.1.2	Análise do histórico de falhas	9
2.1.3	FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)	11
2.2	TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHAS QUANTITATIVAS.....	12
2.2.1	ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS (FTA)	12
2.2.2	DIAGRAMA DE BLOCOS (RBD).....	13
2.3	ESTRATÉGIA TOLERANTE A FALHAS.....	13
2.4	CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELETRÔNICOS.....	15
2.5	MANUTENÇÃO PREVENTIVA.....	17
3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO	19
3.1	CONJUNTO BCS/BCSS	23
3.1.1	Motores elétricos trifásicos	23
3.1.2	Protetores (Selos).....	26
3.1.3	Bombas Centrífugas Multi-estágios.....	28
3.1.4	Sensor de fundo	29
3.2	INTERLIGAÇÃO ELÉTRICA SUBMARINA.....	30
3.2.1	Cabos Elétricos de Potência (CEP).....	30
3.2.2	Conectores do sistema elétrico submarino.....	31
3.3	EQUIPAMENTOS DE SUPERFÍCIE.....	32

3.3.1	Centro de Distribuição de Cargas.....	32
3.3.2	Caixas de junção	33
3.3.3	Conversor de frequência de Média Tensão.....	33
3.4	ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DO SISTEMA BCSS	35
4	DETALHAMENTO INTERNO DOS COMPONENTES DE UM VFD MULTINÍVEL DE MÉDIA TENSÃO TOPOLOGIA CHBI APLICADO NO SISTEMA BCS/BCSS.....	37
4.1	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	38
4.1.1	Circuitos de potência	38
4.1.2	Filtro Senoidal de saída	42
4.1.3	Sistema de Controle Principal	42
4.1.4	Alimentações Externas	45
4.1.5	Interface de automação com sala de controle (CCR).....	45
5	ANÁLISE DE FALHAS E DISPONIBILIDADE DE CONVERSORES DE FREQUENCIA MULTINIVEL TOPOLOGIA CHBI NO SISTEMA BCSS	47
5.1	A CONFIABILIDADE DE UM CONVERSOR CASCADED H BRIDGE POR CÁLCULO ATRAVÉS DE DADOS DE TAXAS DE FALHAS	48
5.2	ANÁLISE DE FALHAS REAIS DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA NO ACIONAMENTO DE BCSS.....	50
5.2.1	Exemplo 1: Falha em placa Microprocessora do sistema de controle do VFD... ..	53
5.2.2	Exemplo 2: Falha intermitente em cartão DO do CLP de interface com sala de controle	54
5.2.3	Exemplo 3: Falha em célula de potência com parada de produção	55
5.2.4	Exemplo 4: Falha de curto-circuito na entrada de 13,8 kV de um VFD de poço	56
5.3	AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE E TEMPO DE REPARO.....	58
6	TÉCNICAS PARA AUMENTO DA DISPONIBILIDADE DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA PWM MULTINÍVEL (CHBI) APLICADOS AO SISTEMA BCSS	60

6.1	TÉCNICAS DE PROJETO PARA O CONVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA BCSS	60
6.1.1	AUMENTO DA CONFIABILIDADE DAS ALIMENTAÇÕES EXTERNAS	60
6.1.2	A REDUNDÂNCIA DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	61
6.1.3	REDUNDÂNCIA DA ETAPA DE CONTROLE DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA CHBI	62
6.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DIAGRAMA DE BLOCOS (RBD)	63
6.2.1	SIMULAÇÃO DE REDUNDÂNCIA TOTAL DE VFD.....	65
6.2.2	SIMULAÇÃO DE REDUNDÂNCIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DO VFD.	66
6.3	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA.....	67
6.3.1	IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA POR OPORTUNIDADE	67
6.3.2	GESTÃO DE SOBRESSALENTES	68
6.4	ESTUDO DE CASO COM ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	69
6.4.1	COMPARAÇÃO DE CUSTO DE PROJETO	69
7	CONCLUSÃO	71
8	REFERÊNCIAS.....	74
9	ANEXO I.....	746

1 INTRODUÇÃO

A contínua evolução da eletrônica de potência e a consolidação do mercado de inversores ocorrida no final do século XX e também no início dos anos 2000 possibilitou um grande desenvolvimento de projetos e aplicações de conversores de frequência no acionamento de motores elétricos de média tensão.

A aplicação de conversores de frequência na indústria de petróleo tem crescido significativamente também desde esta época, aproveitando as diversas vantagens que o conversor de frequência proporciona ao processo frente à possibilidade de variação de rotação de motores de indução. O acionamento através de conversores de frequência pode ser encontrado em plataformas de petróleo desde motores de potência inferiores a 1 HP até potências elevadas da ordem de 20.000 HP, por exemplo, conversores aplicados a grandes compressores (MOURENTE, 2003).

Ao longo do tempo, os conversores de frequência foram ganhando diversas topologias distintas em grande parte devido à evolução dos componentes eletrônicos de potência. A técnica para construção da tensão de saída na etapa inversora através da modulação por largura de pulsos (PWM) se tornou preponderante nos conversores de frequência. No final da década de 90, os IGBT's disponíveis no mercado eram exclusivamente de baixa tensão. Mesmo assim, a necessidade da aplicação em motores de tensão mais elevada era latente. Nesta fase foi criado o conceito de construção do sinal de saída através da topologia multinível, ou seja, utilizando inversores com IGBT's de baixa tensão em série cujas saídas somadas permitem construir uma maior tensão de saída do conversor de frequência, com possibilidade de alimentar motores com classes de tensão acima de 1 kV.

Desta forma, a topologia PWM Multinível em cascata com células em baixa tensão também conhecido pelo termo em inglês *Cascaded H-Bridge*, praticamente dominou o mercado de conversores de frequência de média tensão ao longo de décadas, tendo seu projeto evoluído ao longo do tempo, culminando em equipamentos mais compactos e com maior potência nominal. Apesar da evolução trazida pelo desenvolvimento e fabricação de IGBT's de média tensão, que possibilitaram a elaboração de projetos de conversores de frequência de média tensão com topologias multiníveis diversas como o *Neutral Point Clamp* (NPC), o mercado de conversores de

média tensão ainda continua sendo majoritariamente dominado por conversores com topologia *Cascaded H-Bridge* (CHBI).

Paralelamente a essa evolução da eletrônica, a indústria mundial de petróleo realizara um esforço contínuo pela evolução dos sistemas de bombeio centrífugo submerso, principalmente nos aspectos que dizem respeito à confiabilidade e aumento da vida útil do sistema. Este esforço é decorrente dos altos custos de intervenção envolvidos em caso de falha destes equipamentos. O conjunto de bombeio centrífugo submerso, BCS ou também chamado pela sigla em inglês ESP (*Electrical Submersible Pump*), basicamente é constituído por uma bomba centrífuga acionada por motor elétrico de diâmetros suficientemente reduzidos de modo a permitirem serem instalados dentro do poço.

O primeiro conjunto de bombeio centrífugo submerso acionado através de motor elétrico foi instalado em 1916 para bombeio de água. No ano de 1926, através do seu inventor Armais Arutunoff e em parceria com a Phillips Petroleum foi realizada a instalação do primeiro BCS para utilização em poços de petróleo nos EUA iniciando sua aplicação de forma comercial (SANTOS, 2005). Desde então, sua aplicação vem sendo expandida em campos terrestres e posteriormente também em campos *offshore*.

Normalmente é realizada uma diferenciação referente ao tipo de completação¹ do poço em que é instalado, sendo BCS o termo empregado ao poço com completação convencional (Árvore de Natal Seca) e sendo BCSS o termo empregado para poços com completação molhada, onde a Árvore de Natal é instalada no leito submarino, também denominada como ANM.

O conjunto BCS/BCSS ao falhar necessita ser substituído com intervenção no poço, envolvendo a retirada da coluna de produção com a necessidade de utilização de sondas com alto custo de afretamento, além do lucro cessante envolvendo a parada do poço durante o período de intervenção. Estes custos podem chegar a dezenas de milhões de dólares em poços com BCSS, ou seja, que possuem completação molhada.

Um bom exemplo da importância e do esforço da indústria de petróleo para melhoria da confiabilidade dos sistemas de bombeio centrífugo submerso é o projeto

¹Instalação dos equipamentos necessários para conduzir controladamente os fluidos à superfície através do poço.

ESP *Rifts*, cujo objetivo é a criação de uma base de dados conjunta de confiabilidade e disponibilidade de principais equipamentos, sendo formado por diversas empresas do ramo de *upstream* que utilizam equipamentos BCS. As informações compartilhadas envolvem dados de confiabilidade, disponibilidade e tempo de vida útil de componentes utilizados em sistemas de bombeio centrífugo submerso, como o ilustrado na Figura 1.1.

Os primeiros conjuntos BCS do Brasil em plataformas *offshore* foram instalados na Bacia de Campos na década de 1980. Através da contínua atuação do corpo técnico da Petrobras foram sendo realizadas especificações técnicas cada vez mais detalhadas e melhores, acarretando a evolução dos equipamentos e no aumento do tempo médio de vida ao longo dos anos. O primeiro conjunto BCSS (completação Molhada) no Brasil e no mundo foi instalado no poço RJS-211 cuja partida foi realizada em Outubro de 1994 no campo de Carapeba na Bacia de Campos (AGUIAR, 2011). O sistema foi instalado em lâmina d'água de 86m e a 500 metros de distância da plataforma de Carapeba-1 (PCP-1).

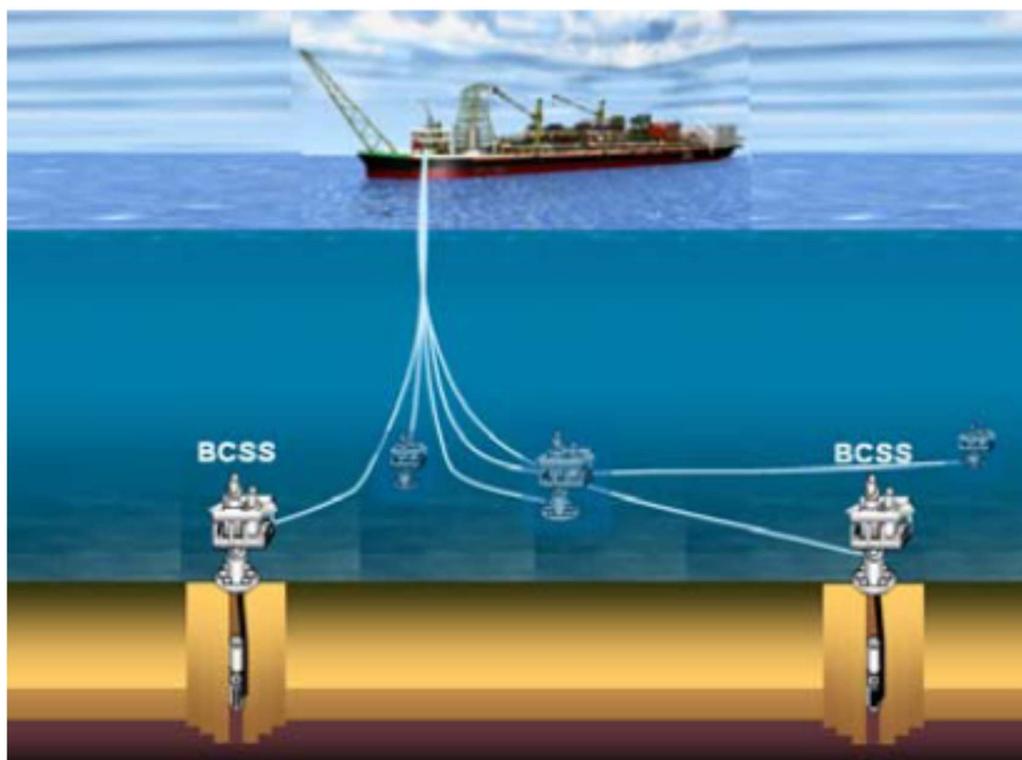


Figura 1.1- Plataforma com poços com Bombeio Centrífugo Submerso Submarino;

Apesar dos altos custos envolvidos, o bombeio centrífugo submerso geralmente apresenta produtividade consideravelmente superior em comparação a outras técnicas de elevação artificial de petróleo, como o *gas lift*. Devido a este fator, existem projetos em que é possível verificar que o BCS/BCSS apresenta viabilidade econômica mesmo tendo um tempo médio de intervenção menor comparativamente ao gás lift. Porém, sua aplicação depende de outros fatores técnicos da engenharia de petróleo, como exemplo uma baixa razão gás-líquido (RGL) no poço. A viabilidade econômica é bastante impactada pelo preço do petróleo, custo de intervenção, tempo de parada do poço e vida média do conjunto BCS/BCSS.

Especialmente no Brasil, a aplicação em poços de altas vazões e também em águas profundas estava acompanhada por desafios adicionais, pois representava também o aumento das potências dos conjuntos BCSS e longas distâncias de cabo submarino na saída do conversor de frequência. O modelamento do cabo elétrico submarino e necessidade de filtros de saída nos conversores de frequência foram algumas das técnicas necessárias para viabilizar a utilização. Além disso, o aumento da potência dos motores BCS/BCSS está associado também ao aumento da tensão nominal dos motores.

Frente ao cenário apresentado, a aplicação de conversores de média tensão aos conjuntos BCS/BCSS aconteceu de maneira natural e conveniente. O encontro das duas tecnologias foi inevitável: O conversor de frequência fornece ao conjunto BCS/ BCSS flexibilidade operacional, possibilidade de partida e parada em rampa além de isolar o conjunto do sistema elétrico, protegendo-o de eventuais eventos transitórios. Naturalmente, devido à forma de evolução dos projetos das empresas fabricantes de conversores, a grande maioria dos conversores de frequência de média tensão utilizados na aplicação de BCS/BCSS no Brasil utiliza a topologia PMW multi-nível em cascata CHBI.

Assim, dentro de um esforço realizado para aumento da confiabilidade deste sistema, verifica-se que existe um foco bastante concentrado dos engenheiros de petróleo sobre conjunto BCS, fato justificável devido aos altos custos envolvidos em caso de falha. A qualidade durante o processo de fabricação dos componentes e da montagem dos equipamentos BCS/BCSS deve ser garantida, bem como durante todo o

processo de transporte e instalação do conjunto de fundo no poço, pois uma vez finalizada a instalação do equipamento e da respectiva coluna de produção no poço, é esperado realizar uma nova intervenção apenas em caso de falha. Os poços geralmente são completados também com a possibilidade da utilização do *gas lift*, porém nunca podem ser utilizados os dois métodos de elevação juntos, ou seja, a decisão de operar com *gas lift* sela o fim da utilização com BCS/BCSS, pois culmina em dano ao equipamento.

O processo de evolução dos conjuntos BCSS continua até a atualidade, tanto por parte dos fabricantes de BCS quanto por parte das empresas operadoras, devido as suas maiores exigências e melhoria contínua das especificações técnicas, utilização de novos materiais, desenvolvimento e proposição de novos ensaios de fábrica, acompanhamento dos testes de fábrica por parte das empresas envolvidas e elaborações de normas técnicas (como exemplo a série API11SX – maioria com revisão 2013 e a norma ISO 15551-1/2015). Porém em todo este processo nota-se pouca atenção dispensada para o conversor de frequência, sendo um equipamento vital para este sistema.

Existem unidades que são projetadas e construídas prevendo a utilização do sistema BCS/BCSS como método principal de elevação. Nestas unidades é normal existir uma grande quantidade de conversores de frequência para acionamento de BCSS. Em outra situação, existe também possibilidade de aplicação do sistema BCS/BCSS em plataformas existentes e em operação, com a conversão de um ou mais poços para este método de elevação. Nestas unidades esta alteração passa pela necessidade de modificações tanto na parte de superfície quanto na parte submarina.

Apesar da vida útil média de um conjunto BCSS de alta potência ser aproximadamente 2 anos e meio (AGUIAR, 2011), a prática mostra que muitas vezes a intervenção é viável em caso de falha da BCS, culminando na retirada do conjunto defeituoso e instalação de uma nova moto bomba no mesmo poço. O conversor de frequência existente é utilizado para o acionamento do novo conjunto instalado, demandando apenas algum tipo de comissionamento ou modificação em seus parâmetros. Assim, a vida útil do projeto BCS/BCSS não está diretamente associada à vida útil do VFD, sendo este utilizado por diversos anos. Nas especificações e normas vigentes geralmente são instituídas uma vida útil mínima de projeto da ordem de 20 anos.

Os conversores de frequência fabricados na atualidade são de maneira geral equipamentos confiáveis quando operam dentro das características especificadas, porém possuem diversos modos de falha possíveis, e por vezes demandam serviços de mão-de-obra com alto grau de especialização, geralmente indisponível em plataformas de petróleo ou locais remotos. Assim, tal característica acarreta indisponibilidade do poço para produção durante o período de reparo do conversor de frequência e transporte do profissional especialista até a unidade, causando prejuízos consideráveis às companhias operadoras devido ao lucro cessante.

Além disso, existem projetos que são aplicados tanto em plataformas existentes quanto em plataformas novas. Os projetos atuais de sistemas BCSS não consideram redundância dos equipamentos de superfície. Desta forma, não é possível a realização de manutenção preventiva durante os períodos de operação, sendo que as manutenções acabam por ser programadas para serem realizadas apenas em paradas programadas de produção ou por oportunidade.

O objetivo desta dissertação é avaliar o conversor de frequência de média tensão da topologia multinível em cascata CHBI na aplicação do sistema BCS/BCSS sob o ponto de vista de confiabilidade e disponibilidade, apresentando assim técnicas de projeto e alternativas que possam aumentar a disponibilidade global do sistema de bombeio centrífugo submerso (BCS/BCSS).

A presente dissertação é dividida em 7 capítulos, abordando os diversos assuntos da seguinte forma: O Capítulo 1 apresenta a introdução e os objetivos deste trabalho. No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica em confiabilidade, disponibilidade e análise de falhas de sistemas. O Capítulo 3 introduz o sistema de bombeio centrífugo submerso, apresentando seus principais equipamentos. O Capítulo 4 faz o detalhamento da topologia *Cascaded H-Bridge* (CHBI) do conversor de frequência de média tensão e seus principais componentes internos. O Capítulo 5 apresenta os resultados de análise de falhas ocorridas em equipamentos. O Capítulo 6 aborda as técnicas que podem ser utilizadas para minimizar os efeitos das falhas em conversores de frequência para aumentar a disponibilidade dos sistemas BCS, e apresenta uma avaliação do impacto econômico da utilização de técnicas em comparação ao equipamento convencional. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas durante o estudo.

2 CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE E ANÁLISE DE FALHAS DE SISTEMAS.

A confiabilidade de um equipamento corresponde à probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, considerando um determinado período de tempo ou número de operações, sob condições de operação pré-determinadas. A medição de confiabilidade $R(t)$ é uma avaliação probabilística do risco de falha de um determinado equipamento ou sistema.

O cálculo da confiabilidade pode ser aplicado para um sistema, equipamento ou componente, como ilustra a figura 2.1. O cálculo representa a probabilidade do sistema objeto da análise não apresentar falhas e cumprir sua função dentro de um regime especificado em um pré-determinado período de tempo.

A engenharia de confiabilidade tem como foco a otimização de produtos ou processos que proporcionem o melhor resultado com o menor custo.

Confiabilidade



Figura2.1- Fluxograma da aplicação da engenharia de confiabilidade em processos industriais;

Durante a realização do estudo de confiabilidade de um determinado sistema, as principais etapas que devem ser realizadas são:

- Definição dos objetivos do estudo: parâmetros de interesse, confiabilidade, disponibilidade;
- Definição do sistema: fronteiras, limites de resolução;
- Conhecimento das características físicas e operacionais do sistema;
- Realização de análise qualitativa: Pareto, FMEA/FMECA, Análise de falhas;
- Realização de Análise quantitativa: RBD, FTA, Análise Markoviana;
- Realização de análise econômica: Análise Custo Benefício (CBA), Análise de custo do ciclo de vida (LCCA);

2.1 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHAS QUALITATIVAS

2.1.1 GRAFICO DE PARETO

O termo Gráfico de Pareto se originou no trabalho de Vilfredo Pareto, durante seus estudos na área de economia sobre distribuição de renda, e descobriu que 80% da riqueza estavam concentrados em cerca de 20% da população. No ambiente empresarial, este tipo de análise encontra a sua aplicação verificando-se que 80% (ou um percentual alto) dos problemas são causados por 20% (ou um percentual baixo) das causas. Nesta linha, conclui-se que poucas causas são responsáveis pela maioria dos problemas, levando um bom gestor a atacar essas causas prioritariamente, pois assim, resolvem-se grande parte de problemas. O Princípio de Pareto é também conhecido como a regra dos 80/20.

Para a construção de um Gráfico de Pareto é preciso seguir os seguintes passos:

- Primeiro Passo: projetar a coleta de dados;
- Segundo Passo: coletar os dados;
- Terceiro Passo: tabelamento e cálculo do percentual;
- Quarto Passo: gráfico de pareto;

Em uma breve análise, é inteligente prover soluções e alternativas técnicas para as causas que prioritariamente geram a grande maior parte do tempo de indisponibilidade.

2.1.2 Análise do histórico de falhas

Os parâmetros associados à avaliação de confiabilidade (e.g., TTF, falhas de um componente por unidade de tempo) podem ser representados por distribuições de probabilidade, que podem ser conhecidas ou não. No caso negativo, a identificação da distribuição de probabilidade adequada deverá ser feita mediante a análise de um histórico de operação dos componentes ou sistema em questão.

A distribuição exponencial é a mais conhecida e utilizada em sistemas de potência e também é a mais adequada para componentes eletrônicos, pois geralmente os tempos de distribuição entre falhas se distribuem exponencialmente.

Os componentes de sistemas industriais podem ser reparados na maioria dos casos. Isto significa que durante a vida operativa de um componente, pode-se encontrá-lo em dois estados: o estado de funcionamento e o estado de falha. Depois de ocorrida uma falha, o componente sofreria uma ação de reparo e transitaria do estado de falha para o estado de funcionamento. Esta é a situação que acontece com conversores de frequência, muitas vezes através da substituição de células, placas, sensores e outros componentes eletrônicos, o equipamento retorna para condição de operação.

Ao analisar a vida operativa do componente em relação ao tempo, pode-se encontrar tempos de operação e tempos de reparos distintos entre si, conforme a figura 2.2:

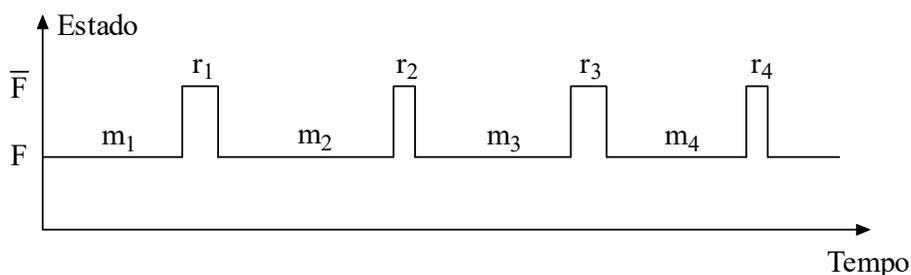


Figura 2.2- Estados de um componente reparável em função do tempo;

Com isto pode-se identificar a existência de duas variáveis aleatórias, sendo TF - tempo de funcionamento e TR - tempo de reparo. Ao considerar apenas o período de vida útil do componente, pode-se admitir que as taxas de falha e reparo sejam constantes. Portanto, o tempo de funcionamento e o tempo de reparo podem ser modelados pela distribuição exponencial. A determinação das taxas constantes se dá por:

$$\lambda = \frac{1}{E(T_F)} = \frac{N_{falhas}}{\sum T_{funcionamento}} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1}{E(T_R)} = \frac{N_{reparos}}{\sum T_{reparo}} \quad (2)$$

Para calcular as probabilidades de funcionamento ou falha do componente a cada instante t pode-se utilizar a teoria de processos estocásticos (Cadeias de Markov), onde apenas o estado atual do componente é utilizado para determinar as probabilidades do próximo estado.

Como o componente se apresenta em apenas dois estados, funcionamento ou falha, a formulação matemática consistirá em calcular essas duas probabilidades. Deve-se atentar ao fato de que um período regular de tempo, dado por Δt , deve ser considerado suficientemente pequeno, para que durante Δt não haja mais de uma transição de estado.

Considere-se que um componente está em funcionamento (1) atualmente. A probabilidade de este componente continuar neste estado (P_{11}) após um período Δt pode ser representada por:

$$P_{11}(\Delta t) = 1 - \lambda \cdot \Delta t \quad (3)$$

A probabilidade P_{12} representa a probabilidade de mudança do estado de funcionamento (1) para o estado de falha (2) após um período Δt , e é dada por:

$$(4)$$

$$P_{12}(\Delta t) = \lambda \cdot \Delta t$$

De maneira análoga, se considera que o componente está em estado de falha (2) e após um período regular de tempo permanece nesse estado, esta probabilidade será representada por P_{22} . Caso o componente venha sair do estado de falha (2) para o estado de funcionamento (1), a probabilidade desta situação será dada por P_{21} . Ambas as equações são dadas em função da taxa de reparo μ e do período de tempo Δt , conforme mostrado abaixo:

$$P_{22}(\Delta t) = 1 - \mu \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$P_{21}(\Delta t) = \mu \cdot \Delta t \quad (6)$$

O uso de técnicas de frequência e duração permite calcular índices de confiabilidade para sistemas que alternam estados de funcionamento e reparo. Tais índices são compostos pela frequência com que se encontra um determinado estado do sistema e pelo tempo médio de residência em tal estado.

2.1.3 FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)

O FMEA/FMECA é uma técnica indutiva estruturada para identificar modos de falha de sistemas, equipamentos ou componentes e avaliar, qualitativamente, suas respectivas criticidades. Foi desenvolvida na década de 1960 pela indústria militar para avaliar os sistemas de controle de armas.

A FMEA é uma ferramenta de projeto para analisar os sistemas de engenharia, e pode simplesmente ser descrito como um levantamento detalhado de cada modo de falha no sistema, com seus respectivos resultados e efeitos. Quando cada modo de falha é classificado com relação a sua criticidade, considerado para isso a severidade e probabilidade, a análise recebe o nome FMECA. A criticidade de determinada falha é obtida a partir da conjugação da probabilidade de ocorrência como a severidade da consequência da mesma.

A FMECA também aponta as causas e meios de detecção de falhas, bem como as providências compensatórias.

2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHAS QUANTITATIVAS

2.2.1 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS (FTA)

A utilização da análise de árvore de falhas é bastante comum na área industrial para avaliação de problemas técnicos. Algumas normas técnicas, por exemplo, a IEC 61025 –*Fault Tree analysis* (FTA), abordam os aspectos desta metodologia de análise para os equipamentos da área elétrica.

Trata-se de uma metodologia para identificação da causa raiz da falha de um determinado sistema através da avaliação de seus componentes. Sua forma gráfica pode ser realizada através da utilização de portas lógicas ou portas retangulares.

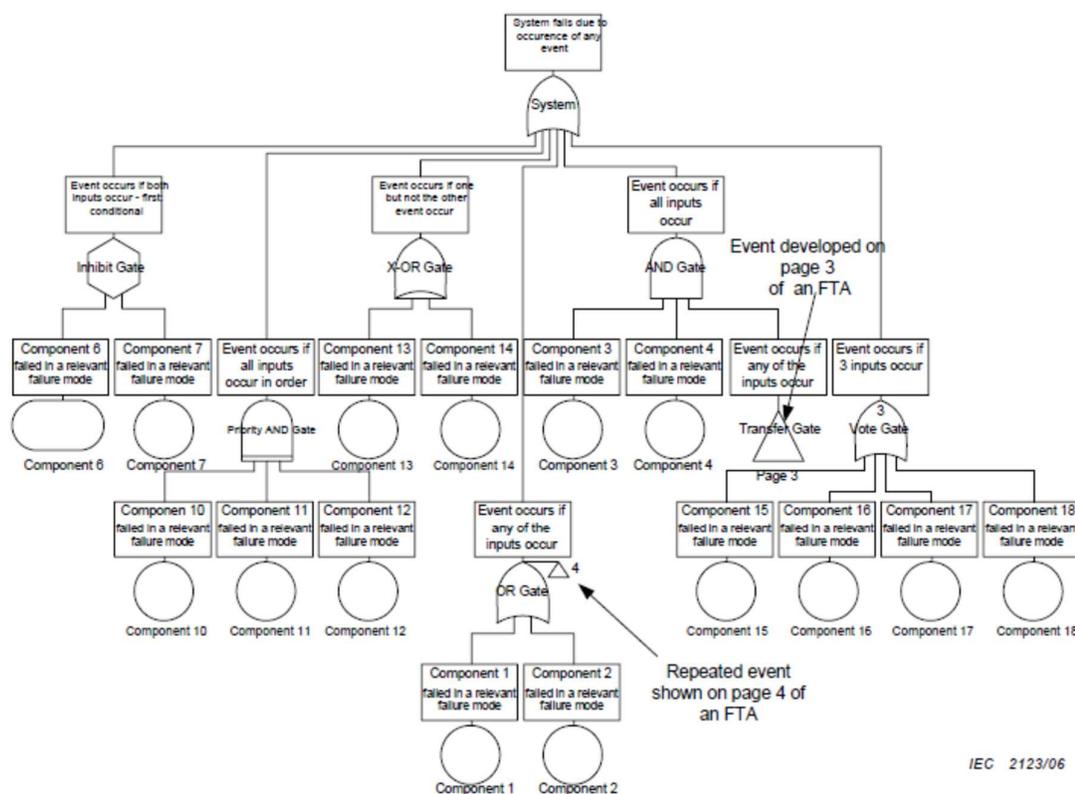


Figura 2.3- Exemplo de análise de falhas FTA Fonte: Norma IEC-61025/06;

A identificação da causa raiz das falhas e dos modos de falhas de sistemas é muito importante no processo de melhoria contínua, possibilitando implementar soluções para eliminar, mitigar ou minimizar os efeitos do impacto da falha.

2.2.2 DIAGRAMA DE BLOCOS (RBD)

A análise através de diagramas de blocos é amplamente utilizada em análises de confiabilidade. O RBD é uma análise dedutiva e gráfica, usado para simular graficamente as funções dos componentes no sistema.

Os blocos podem representar eventos de falha ou funções de elemento dentro um sistema, embora a maioria dos RBDs descreva somente as funções de elemento do sistema. Um bloco pode ser um subsistema, componente ou parte. Os Blocos são conectados através de ligações de séries, paralelas ou combinações de séries e paralelos, conforme o sistema em análise.

Torna-se possível simular e calcular a confiabilidade de sistemas com componentes redundantes, componentes únicos e subsistemas (BILLINTON 1996).

$$R_s = R_i = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \Rightarrow (\text{serie}) \quad (7)$$

$$R_s = 1 - (1 - R_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \Rightarrow (\text{paralelo}) \quad (8)$$

Onde:

R_s = Confiabilidade do sistema

R_i = Confiabilidade do elemento i

n = número dos elementos do sistema

2.3 ESTRATÉGIA TOLERANTE A FALHAS

O objetivo principal da adoção de uma estratégia de tolerância a falhas é alcançar uma alta disponibilidade de um determinado sistema.

Quando o sistema exige alta disponibilidade e confiabilidade, as técnicas de prevenção e remoção de falhas não são suficientes (WEBER, 2001). Em casos assim, o sistema deve ser construído usando técnicas de tolerância a falhas. Tais técnicas garantem funcionamento correto do sistema mesmo na ocorrência de falhas e são baseadas em redundância, exigindo componentes adicionais ou algoritmos especiais. A tolerância a falhas não dispensa as técnicas de prevenção e remoção. Sistemas construídos com componentes frágeis e técnicas inadequadas de projeto não conseguem ser confiáveis pela simples aplicação de tolerância a falhas.

As técnicas de tolerância a falhas podem ser classificadas como:

- Mascaramento;
- Detecção, localização e reconfiguração;

No emprego de técnicas baseadas no mascaramento, as falhas não se manifestam como erros, pois são escondidas na origem. O mascaramento geralmente emprega mais redundância que a segunda e, por não envolver os tempos gastos para as tarefas de detecção, localização e reconfiguração, é a preferida para sistemas de tempo real críticos. Porém, as técnicas de mascaramento dependem da utilização de votadores (WEBER, 2001).

Outro conceito relevante é o conceito de dependabilidade, tradução literal do termo em inglês *dependability*, que tem sido bastante aplicado na atualidade em sistemas computacionais. A dependabilidade de um determinado sistema vem a ser uma medida da confiança depositada em seu bom funcionamento e também da qualidade do serviço fornecido por este sistema, transcendendo o conceito de confiabilidade. Fazem parte do conceito de dependabilidade (WEBER, 2001):

- Confiabilidade: associada à baixa taxa de falhas – alto MTTF;
- Disponibilidade: associada à manutenibilidade - baixo MTTR;
- Segurança às pessoas e instalações;
- Segurança da informação;

Assim, devido às semelhanças existentes entre os sistemas computacionais e os sistemas de controle empregados em conversores de frequência, existem determinadas técnicas para aumento da dependabilidade de sistemas computacionais que podem ser aplicadas aos VFD's de Média Tensão.

2.4 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELETRÔNICOS

A vida útil de um determinado componente eletrônico possui três fases distintas, ilustradas na figura 2.4:

- Mortalidade infantil: componentes frágeis e mal fabricados;
- Período de Vida útil: taxa de defeitos constante;
- Fase de envelhecimento: taxa de defeito crescente;

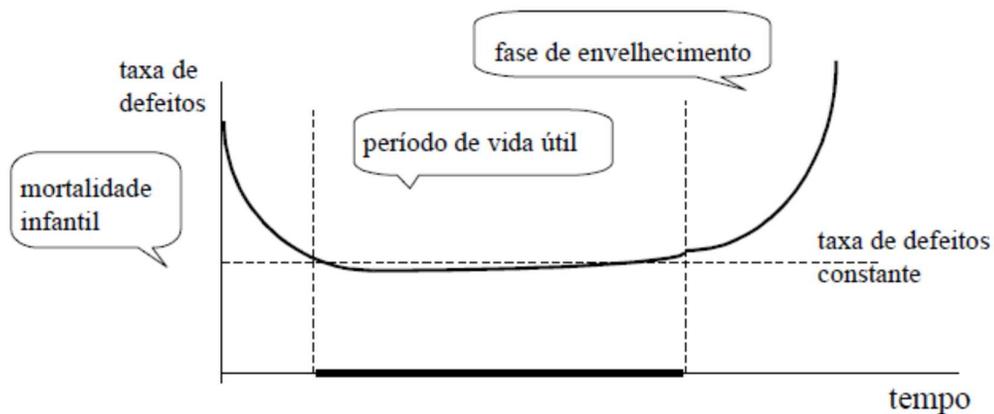


Figura 2.4- Taxa de falhas de componentes eletrônicos ao longo da vida útil;

As taxas de falha de equipamentos em geral normalmente apresentam características referentes à distribuição de *Weibull*, cuja função densidade de probabilidade é representada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} t^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad t > 0$$

(9)

Especificamente para equipamentos eletrônicos, para acelerar a fase de mortalidade infantil os fabricantes utilizam as técnicas de *burn-in* (envelhecimento acelerado) como forma de remoção de componentes que pudessem vir a falhar em campo antes de colocá-los no mercado ou no produto final. Os ensaios de *burn-in* em geral são definidos por normas técnicas. Muitos equipamentos eletrônicos utilizados na indústria possuem o ensaio de *burn-in* como um pré-requisito para fornecimento, como forma de eliminar os componentes que poderiam falhar prematuramente durante a aplicação.

Assim sendo, a taxa de falhas para componentes eletrônicos industriais em operação corresponde à distribuição exponencial, portanto para sua vida útil a função densidade de probabilidade se apresenta como:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad t > 0 \quad (10)$$

O tempo médio para falhar ou MTTF pode ser representado por:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

O Conceito de disponibilidade representa a porcentagem de tempo que determinado equipamento encontra-se disponível para operação. A disponibilidade pode ser representada por:

$$DISP = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (12)$$

Componentes críticos em circuitos eletrônicos com relação à confiabilidade são:

- Semicondutores e resistores de potência (sujeitos a ciclos térmicos, altas tensões, temperaturas e correntes);
- Capacitores eletrolíticos;

- Conectores, contatos (sujeitos a desgaste mecânico, corrosão).

Em sistemas com grande quantidade de componentes eletrônicos torna-se muito difícil o cálculo teórico da confiabilidade e disponibilidade, podendo ser possível apenas através simulação computacional, mesmo assim dependendo de uma base bastante confiável de taxas de falhas dos componentes internos.

Para definição das taxas de falhas da distribuição exponencial para os diversos componentes é necessária uma imensa base de dados de falhas muitas vezes não disponível. Portanto, muitas vezes torna-se necessário agrupar os diversos componentes em conjuntos maiores formando subsistemas de forma a utilizar os dados de falhas disponíveis de maneira estratificada e mais representativa.

2.5 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

A manutenção preventiva deve ser feita periodicamente para prevenir os equipamentos de falhas forçadas no futuro, visando controlar o aumento de suas taxas de falha ao longo do tempo, o que poderia comprometer o nível de confiabilidade dos sistemas. Por outro lado, a necessidade de se retirar os equipamentos de serviço para a realização dessa atividade faz com que, momentaneamente, os sistemas fiquem mais vulneráveis à falha, o que por sua vez, também se reflete nos índices de confiabilidade. Dessa forma, a política de manutenção deverá ponderar adequadamente as duas situações para que o sistema apresente o melhor desempenho possível.

Substituição de componentes em fase de desgaste, mesmo que ainda não apresentem falhas podem diminuir significativamente a taxa de falha do sistema. Desta forma, a manutenção preventiva caso bem realizada pode representar um ganho de disponibilidade para conversores de frequência, conforme vista na figura 2.5.

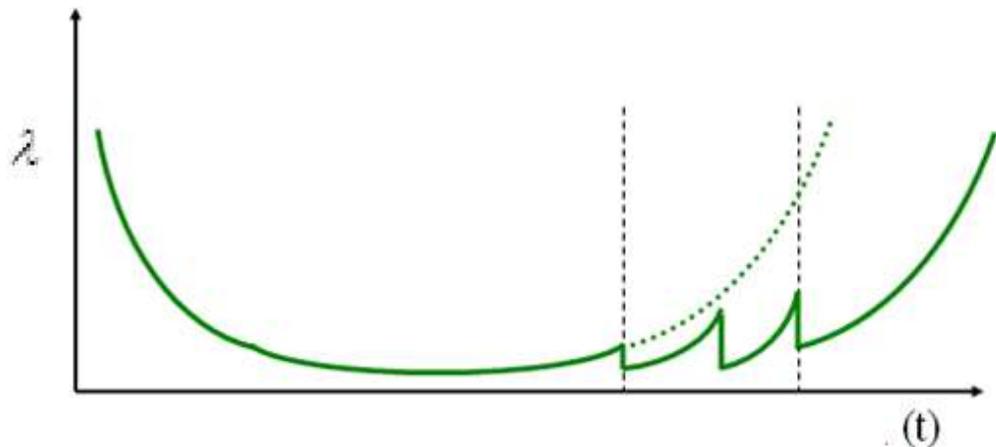


Figura 2.5- Efeito da manutenção preventiva na taxa de falha do equipamento;

Principalmente para elementos dinâmicos e rotativos, por exemplo, ventiladores e exaustores, é bastante recomendado a substituição preventiva baseado na estimativa de vida útil.

Com relação aos contatos elétricos, geralmente a inspeção visual em busca de pontos de oxidação e limpeza com material apropriado é o suficiente. Em casos mais severos de oxidação e corrosão, pode ser necessário a substituição de placas eletrônicas e conectores.

Adicionalmente, os conversores de frequência devem ser instalados sempre que possível em ambiente refrigerado, pois a temperatura impacta diretamente a vida útil dos componentes eletrônicos. Desta forma, deve ser dada uma especial atenção aos aparelhos de ar condicionado das salas as quais estão instalados os conversores de frequência quanto à manutenção preventiva, de forma a permanecerem operacionais.

Também deve se dar uma atenção especial para os capacitores eletrolíticos internos a conversor, pois são componentes eletrônicos bastante susceptíveis a falha, sendo que sua vida útil decresce com o incremento da temperatura de operação, conforme ilustrado na figura 2.6.

Constitui uma boa prática substituir os capacitores eletrolíticos preventivamente antes do fim de sua vida útil de modo evitar danos maiores aos equipamentos em caso de falha.

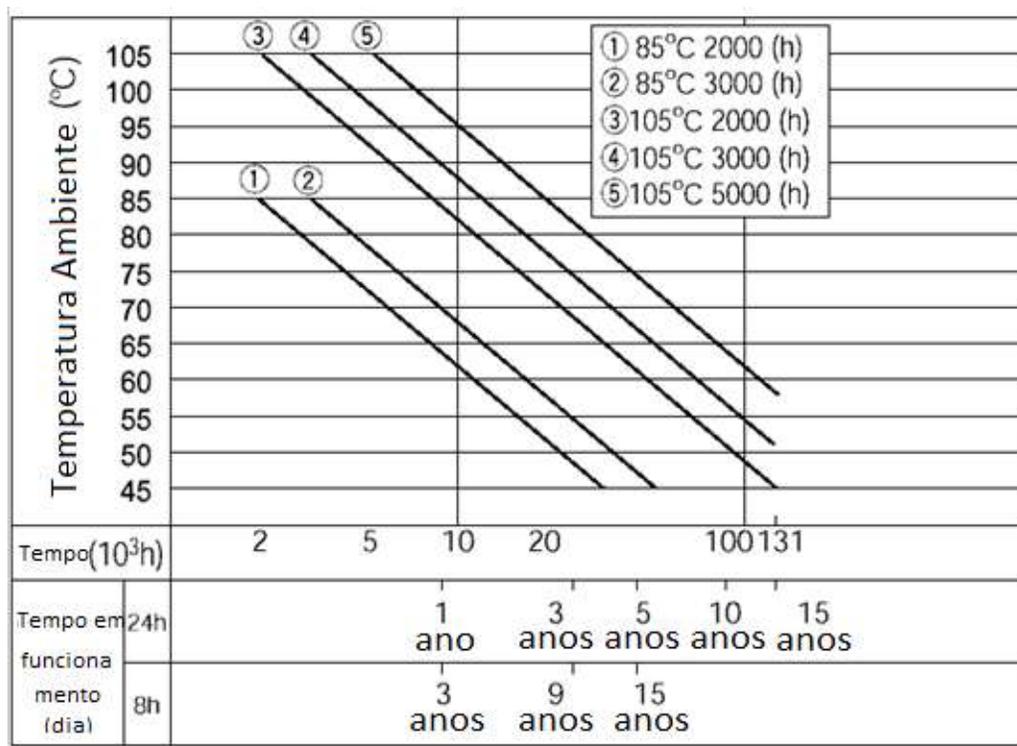


Figura 2.6- Curva de Arrhenius para vida útil de capacitores eletrolíticos em função da temperatura de operação;

Os filtros de ar das portas também devem ser substituídos de acordo com o plano de manutenção, pois a restrição de entrada de ar devido a saturação dos filtros pode acarretar em uma má troca térmica com respectiva elevação da temperatura interna de operação do conversor.

Em casos especiais, pode ser aplicável a execução de termografia como técnica de avaliação periódica das conexões elétricas internas e componentes, em busca de eventuais pontos quentes ou condição anormal de operação que possam ser corrigidos preventivamente antes de falhar.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO

Durante o período de produção de um determinado reservatório existe uma tendência natural de queda de sua pressão estática. Manter a produtividade dos campos com o passar dos anos devido a essa queda de pressão natural é um dos grandes

desafios da indústria de petróleo mundial. Para isso, técnicas de recuperação secundárias e métodos de elevação artificial são corriqueiramente empregados na indústria de petróleo. Enquanto os métodos de recuperação secundária têm como objetivo fornecer energia ao reservatório e minimizar a queda de pressão estática de modo que permaneça produzindo, os métodos de elevação artificial possuem como objetivo fornecer energia necessária para que o fluido possa chegar à superfície até as unidades de produção.

Os métodos mais comuns de elevação artificial utilizados na indústria de petróleo são:

- *Gas Lift* Contínuo ou intermitente;
- Bombeio mecânico com hastes;
- Bombeio por cavidades progressivas;
- Bombeio Centrífugo Submerso.

A seleção do melhor método de elevação de petróleo para um determinado campo ou poço depende de diversos fatores. Os principais fatores que devem ser levados em consideração são: número de poços, diâmetro do revestimento, vazão, razão gás-líquido, produção de areia, profundidade do reservatório, viscosidade do fluido, mecanismo de produção do reservatório, disponibilidade de energia, acesso aos poços, distâncias dos poços às plataformas de produção, equipamentos disponíveis, pessoal com treinamento e especialização adequada, investimento, custo operacional, segurança e outros. Cada método apresenta vantagens e desvantagens e deve ser realizada uma análise global e estudo de viabilidade técnica e econômica para escolha do mais adequado em cada caso (THOMAS, 2004).

O sistema de Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) é um método de elevação artificial de petróleo empregado geralmente em poços que não possuam mais características de “surgência”, ou seja, não possuem pressão suficiente para chegar até a superfície. A bomba tem objetivo de fornecer energia complementar para trazer o fluido até a superfície com a vazão requerida. (SILVA, 2002). Existem campos de petróleo em que o BCS/BCSS é o método de elevação artificial exclusivo devido à baixa disponibilidade de gás ou alta viscosidade do petróleo.

A utilização de sistemas BCS/BCSS em instalações marítimas vem sendo empregadas com frequência em campos de petróleo, principalmente devido à crescente evolução e aumento da potência dos equipamentos que compõem o sistema. Além disso, o sistema BCS proporciona vazões mais altas e uma maior capacidade final de recuperação de petróleo comparativamente às outras metodologias de elevação de petróleo, em especial ao *gas lift*. Estas características conferem vantagens ao sistema BCSS comparativamente ao *gas lift*, especialmente em aplicações em campos maduros ou de óleo extremamente pesados, com baixo grau API.

Neste cenário, existe um esforço da indústria do petróleo como um todo na tentativa de elevar o tempo médio entre falhas e o tempo de reparo para sistemas BCS/BCSS, devido ao alto custo das intervenções e substituição dos equipamentos em caso de falha. Adicionalmente, em cada operação de intervenção realizada em um sistema submarino são despendidas grandes quantidades de energia e emissões de gases, devido à necessidade de deslocamento da sonda para a localização bem como a retirada e reinstalação de toda a coluna de produção.

Basicamente o sistema BCS/BCSS é composto por equipamentos que podem ser classificados em dois grupos: Os equipamentos submarinos e os equipamentos de superfície. Estes últimos também são chamados equipamentos de *top-side*. Os equipamentos submarinos são basicamente compostos pelo conjunto BCS/BCSS, o cabo elétrico de potência submarino ou umbilical, unidade de conexão submarina denominada UTU e a Árvore de Natal Molhada (ANM). Os equipamentos de superfície por sua vez são compostos pelo centro de distribuição de carga, cabos elétricos de superfície e o conversor de frequência de média tensão.

O conjunto de fundo é composto por bombas centrífugas de múltiplos estágios com seu acionamento sendo realizado através de motores elétricos. Este conjunto moto bomba é instalado no ambiente submarino, e projetado de forma a ser disposto na coluna de produção internamente ao poço de petróleo. Desta forma, o conjunto permanece em contato com o fluido do reservatório, fornecendo o incremento de pressão necessária (*Head*) para possibilitar que o fluido seja entregue na superfície com a vazão desejada. Entre os motores e as bombas existem um ou mais selos protetores, que permitem a equalização da pressão interna do conjunto com a pressão do poço e

proveem a proteção de modo a impedir a contaminação do óleo dielétrico dos motores elétricos pelo fluido proveniente do poço.

A energia para alimentação do Conjunto BCS/BCSS é realizada através de um Cabo Elétrico submarino de Potência (CEP), que percorre o caminho da unidade marítima de produção até o conjunto internamente à coluna de produção. As conexões elétricas existentes dependem do tipo da aplicação, porém diferentemente do sistema BCS convencional usado em poços de completação seca, onde existem conectores solidários a Árvore de Natal Convencional (ANC), no sistema BCSS a completação é do tipo molhada, e existem conectores submarinos na Árvore de Natal Molhada (SILVA, 2002).

A bordo da unidade marítima, existe o sistema superfície ou *top side*, composto pelo sistema de alimentação elétrica e o sistema de coleta de fluido. Não serão abordados aspectos referentes ao sistema de coleta e processamento de fluídos neste trabalho.

Cada poço possui características particulares que demandam uma especificação criteriosa do sistema BCS/BCSS para cada aplicação. Poços com vazões menores demandam geralmente a utilização de conjuntos de fundo menores e consequentemente equipamentos de *top side* de potências menores.

Dentro do sistema de alimentação elétrica de superfície, o conversor de frequência de média tensão é aplicado, pois permite controlar a rotação do conjunto BCSS promovendo flexibilidade operacional. Desta forma, este equipamento se tornou extremamente importante para o bom funcionamento deste sistema, pois uma falha leva diretamente a uma parada do conjunto de fundo e consequentemente a uma perda de produção de petróleo. Além disso, a parada não programada do conjunto BCS/BCSS após ser colocado em funcionamento é bastante indesejada, pois será necessária uma nova partida, o que vem a ser nocivo à sua vida útil. Devido ao alto custo das intervenções, devido à necessidade de afretamento de sondas específicas chegando a somar milhões de dólares, e do alto lucro cessante devido à parada de produção em poços de alta vazão, pode-se constatar a relevância do estudo de confiabilidade do sistema e da minimização do tempo de reparo em caso de falha.

3.1 CONJUNTO BCS/BCSS

3.1.1 Motores elétricos trifásicos

Os motores são responsáveis por transformar a energia elétrica em energia mecânica. Os sistemas de BCS (ou BCSS) utilizam motores elétricos de indução, trifásicos e com dois polos. Estes motores são alimentados com corrente alternada e à frequência nominal de 60 Hz giram a aproximadamente 3.500 RPM em plena carga, devido ao escorregamento.

Os motores elétricos para utilização em conjuntos BCS/BCSS possuem uma série de particularidades que os diferem de motores convencionais. Como visto nas figuras 3.1 e 3.2, tais motores são projetados com diâmetro suficientemente reduzido de modo a possibilitar sua instalação dentro da coluna de produção. Trata-se basicamente de um motor de indução trifásico cujo aspecto construtivo devido às restrições de diâmetro no projeto resulta na necessidade de confecção de um longo núcleo estatórico.

Devido ao longo comprimento do eixo torna-se necessário o fracionamento do rotor em vários rotores menores. Portanto, são necessários diversos rotores internos solidários ao mesmo eixo contendo mancais intermediários de modo a promover a sustentação mecânica necessária e permitindo que o motor apresente níveis de vibração adequados.

Como citado anteriormente, devido à tendência do aumento das potências envolvidas neste sistema, existe uma crescente evolução da classe de tensão destes motores. Existem aplicações em campos brasileiros na atualidade de motores de BCSS com classe de tensão da ordem de 5.000 volts e encontra-se em desenvolvimento motores com classe de tensão de 7 kV (SHAVER, 2011).

Os motores são projetados para operar com seu interior repleto de óleo dielétrico, que possui função de lubrificação dos mancais internos, isolamento elétrica (devido às dimensões reduzidas, o óleo faz parte do isolamento) e resfriamento interno do motor.



Figura 3.1- Fotografia de motores de BCS;

A refrigeração do motor depende basicamente dos seguintes parâmetros:

- Circulação interna do óleo do motor;
- Vazão (velocidade) de fluido de poço pelo exterior do motor;
- Temperatura do fluido.

Em conjuntos BCSS de alta potência (nos dias de hoje da ordem 1.500 HP), geralmente são empregados dois ou mais motores elétricos na configuração *tandem* (em série) de modo a permitir atingir a potência requerida para a aplicação. As conexões elétricas com o CEP ocorrem através do *Motor Lead Extension* (MLE) e são realizadas através de conectores (*pot head*) existentes na cabeça do motor superior (*Upper tandem*), e dependendo do modelo do motor podem ser conectores trifásicos ou monofásicos (um para cada fase).

O motor inferior (*Lower Tandem*) possui em sua base o fechamento do motor na configuração estrela. O sistema elétrico possui o neutro isolado, de modo a permitir

a continuidade operacional em caso de uma falta fase para a terra. A Figura 3.3 apresenta os principais componentes de um motor de indução de BCSS.



Figura 3.2- Vista interna em corte de Motor de Indução de BCSS, encapsulado em epóxi e rotores;
 Fonte: Material divulgação Baker Hugues



Figura 3.3- Principais componentes de um motor de indução de BCSS;
 Fonte: Material divulgação Baker Hugues

O sensor de fundo possui a função de enviar as medições coletadas do conjunto de fundo para a superfície. É instalado abaixo do motor inferior (*Lower tandem*) de modo a estar conectado eletricamente ao ponto de neutro. Basicamente os sinais são enviados através do próprio cabo elétrico utilizando técnicas de modulação de

sinais, porém existem modelos que podem utilizar fibras óticas, dependendo da filosofia de utilização e do umbilical. Assim, variáveis como pressão de descarga, pressão na sucção e temperatura do motor podem ser monitoradas da superfície.

3.1.2 Protetores (Selos)

Os protetores, também chamados de selos, são os equipamentos que promovem o acoplamento entre as bombas e os motores elétricos no conjunto BCSS. Possuem a função de confinar o óleo interno das bombas e dos motores elétricos e impedir a contaminação do óleo dielétrico do motor pelo fluido proveniente do poço. Podem ser empregados um ou mais protetores em série. Normalmente em conjuntos BCSS são empregados dois protetores, que podem ser do tipo labirinto e bolsa.

O selo tipo bolsa é composto por compartimentos em forma de bolsa fabricado com elastômero com alta resistência mecânica e também alta resistência a temperatura, com capacidade de absorver as contrações e expansões do óleo do motor. Neste tipo de selo o fluido dielétrico não entra em contato direto com os fluidos produzidos de modo que o lado interno da bolsa permanece preenchido com o fluido dielétrico e o lado externo da bolsa com fluido produzido. O principal problema que pode ocorrer no selo tipo bolsa é o rompimento da bolsa devido à perda de sua capacidade elástica ao longo do tempo, devido à variação térmica e ataques químicos. No caso de rompimento da bolsa, os fluidos produzidos entram em contato com o fluido dielétrico, sendo contaminado e podendo causar um curto-circuito no motor. O fluido da formação possui geralmente um alto teor de salinidade e em contato com o óleo dielétrico do motor pode promover uma baixa isolação entre fases ou fase para terra, acarretando em curto-circuito interno e levando o motor elétrico a condição de falha, necessitando realizar uma intervenção para retirada do conjunto. Mais recentemente foram desenvolvidos também selos tipo bolsa com fole de metal, ou *metal bellows*, cuja princípio de confinamento dos fluidos é realizado através de material metálico.

O selo do tipo labirinto se baseia no princípio de vasos comunicantes. O fluido dielétrico permanece em contato direto com os fluidos produzidos, sendo segregados pela ação da gravidade. Os fluidos são forçados a percorrer um labirinto estreito de modo a dificultar que os fluidos produzidos cheguem até o motor. Por depender da ação da gravidade, este selo opera bem quando instalada na posição correta para que

foi fabricado, normalmente na vertical. Além disso, como o fluido dielétrico está em contato com o fluido produzido é inevitável que com o tempo o fluido dielétrico seja contaminado.

Os protetores, conforme ilustrado na figura 3.4, também possuem a função de equalizar a pressão do poço (meio externo) com a do óleo dielétrico (meio interno) dos motores e suportar os esforços axiais descendentes exigidos pela bomba centrífuga.

Podem ser utilizados um ou mais selos em um conjunto BCS/BCSS. Geralmente é utilizada uma composição de selos tipo bolsa e labirinto em configuração série ou paralelo. A configuração série aumenta a confiabilidade do conjunto, pois caso a primeira barreira de selagem seja transposta ainda existem outra barreira para permitir a continuidade operacional. A composição em paralelo aumenta a capacidade do sistema em termos da expansão do óleo dielétrico devido a variações de temperatura, e são utilizadas quando o motor necessita de uma capacidade de expansão de óleo dielétrico maior do que um selo é capaz de fornecer.

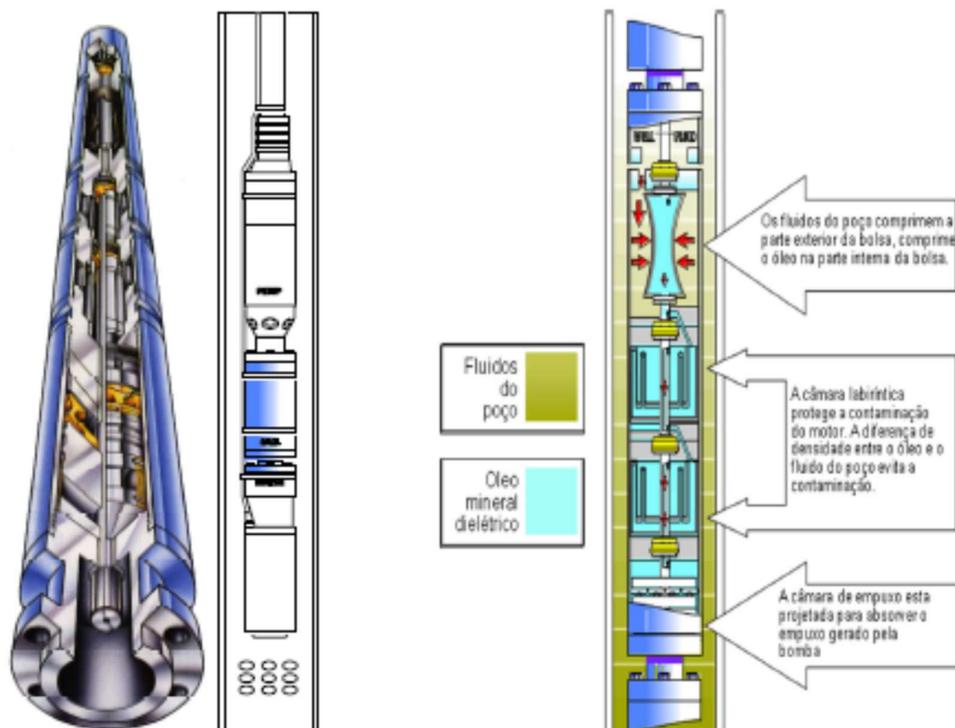


Figura 3.4- Principais componentes de um Protetor de BCSS;

3.1.3 Bombas Centrífugas Multi-estágios

As bombas centrífugas, como a ilustrada na figura 3.5, são as responsáveis por transferir a energia (cinética mais potencial) necessária para o fluido ser elevado até a superfície. Ela basicamente é composta por uma parte rotativa, o impulsor, que gera forças centrífugas que incrementam a energia cinética do fluido. A parte estacionária, o difusor, dirige o fluido da forma mais eficiente ao seguinte impulsor. Neste processo, parte da energia cinética é transformada em energia potencial ou de pressão.

São bombas compostas geralmente por um grande número de estágios e pode ser dispostas em *tandem* (série), de modo ao conjunto atingir a quantidade de *head* necessário para permitir a elevação de petróleo requerida.

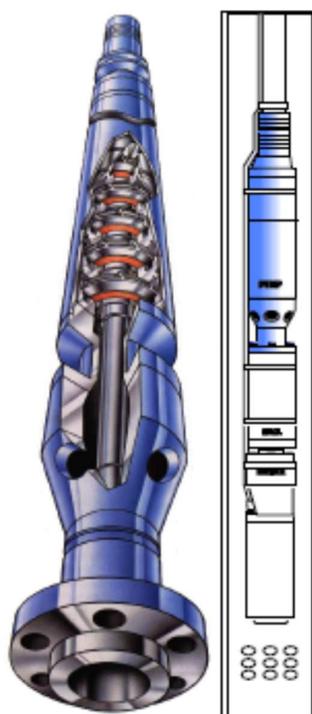


Figura 3.5- Vista interna em corte de uma bomba centrífuga utilizada no conjunto BCSS;

O fluido (petróleo) percorre o caminho através do *intake* e ganha pressão conforme flui através dos diversos estágios. Após ganhar pressão prossegue através da coluna de produção rumo à plataforma de produção.

3.1.4 Sensor de fundo

O sensor tem a função de fornecer, em tempo real, informações sobre as condições de operação às quais os conjuntos de BCS, ou BCSS, estão submetidos. Ao acompanhar as condições de operação é possível identificar previamente problemas operacionais e evitar possíveis danos aos equipamentos. Alguns dos parâmetros monitorados são:

- Pressão e Temperatura na admissão da bomba;
- Pressão e Temperatura na descarga da bomba;
- Temperatura do Motor;
- Vibração do conjunto (média ou nos dois eixos);
- Corrente de fuga para a terra;

As variáveis são medidas no fundo do poço e enviadas à superfície através um sinal modulado através do próprio cabo elétrico de potência, sendo que na superfície existe um módulo eletrônico (*Choke*) para demodular e decodificar o sinal. Os dados disponíveis são utilizados para monitoramento e também proteção dos conjuntos BCS/BCSS. As variáveis são disponibilizadas na sala de controle das plataformas sendo acompanhados diretamente pela equipe de operação e também disponibilizados em sistemas remotos podendo ser analisados a distância.

Para proteção do conjunto BCS/BCSS, são implementadas lógicas específicas em controladores lógicos programáveis (CLPs) das plataformas, utilizados informações retiradas do sensor de fundo e também do conversor de frequência. A função da lógica é emitir alarmes para equipe de operação e promover o desligamento do VFD caso as variáveis atinjam um nível crítico.

Conjuntos BCS/BCSS de grande potência e empregados em poços críticos geralmente são equipados com sensor de fundo, porém devido ao custo do sensor e apesar da grande vantagem de sua utilização, existem poços que não possuem todos estes sinais e em alguns casos extremos não há sinal nenhum de fundo.

3.2 INTERLIGAÇÃO ELÉTRICA SUBMARINA

3.2.1 Cabos Elétricos de Potência (CEP)

Os cabos elétricos de potência, como ilustrado na figura 3.6, possuem a função de transferir a energia elétrica da plataforma de petróleo até os motores elétricos do conjunto de fundo. Seu dimensionamento depende de diversas características da aplicação, como tensão dos motores, corrente, pressão, temperatura e distância da unidade de produção até o poço de petróleo.

O cabo é preso externamente à coluna de produção por cintas ou *clamps* permanecendo exposto ao anular do poço durante toda a instalação e operação do sistema. Este é constituído por um condutor para cada fase, uma camada de isolante, uma fita de proteção, uma camada de proteção (também conhecida como jaqueta) e uma armadura externa para proteção mecânica.

Para instalações mais críticas, considera-se ainda uma barreira de chumbo sobre o isolamento, para reduzir a infiltração de gás no isolamento do cabo, e armadura externa dupla fabricada em aço carbono ou MONEL (65-70% Ni e 20-30% Cu).

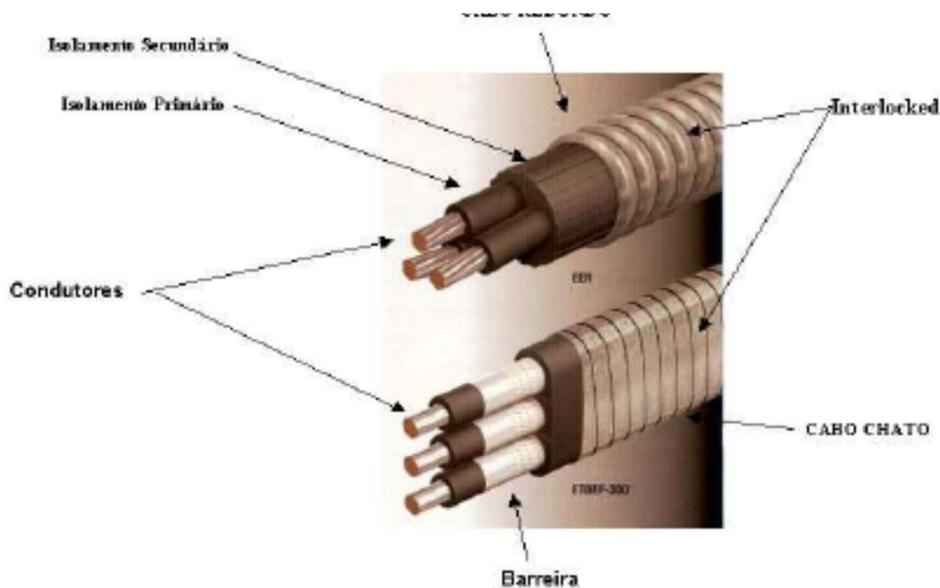


Figura 3.6- Cabos elétricos utilizados em sistemas BCS e BCSS; Fonte : catalogo Schlumberger

O crescente aumento da potência dos equipamentos deste sistema está intimamente relacionado com o aumento da classe de tensão e pressão dos equipamentos. Com a aplicação do sistema BCSS em grandes profundidades e em poços direcionais com grandes distâncias das unidades de produção, a utilização de equipamentos com classes de tensão e pressão maiores acarretam em uma minimização da corrente e respectivamente da queda de tensão nos cabos elétricos submarinos, consequentemente com menores perdas.

Existem sistemas onde frequentemente são empregados cabos do tipo umbilicais eletro-hidráulicos, que possuem internamente não somente os condutores de cobre, mas também mangueiras e fibras ópticas para envio de produtos químicos e dados respectivamente.

3.2.2 Conectores do Sistema elétrico submarino

Em sistemas com Árvore de Natal Submarina (BCSS), o cabo submarino é ancorado no leito marinho e conectado eletricamente através de conector elétrico submarino à unidade UTU (*Umbilical Terminal Unit*). A conexão elétrica com a ANM é realizada através de um jumper submarino removível (através de ROV), podendo ser retirado em caso de necessidade de avaliação do poço. A conexão com a ANM é realizada através de um conector elétrico submarino ao penetrador da *Tree Cap*, como mostra a Figura 3.7.

A conexão elétrica do interior da ANM com a parte interna do poço é realizada através de um dispositivo chamado penetrador do *Tubing Hanger* (TH), também através de conectores elétricos submarinos.

O CEP percorre o caminho internamente ao poço até o penetrador da cápsula do conjunto de fundo. Do lado interno da cápsula, a conexão elétrica com os motores do BCSS é realizada através de trecho de cabo chato, também chamado de *Motor Lead Extension* (MLE).

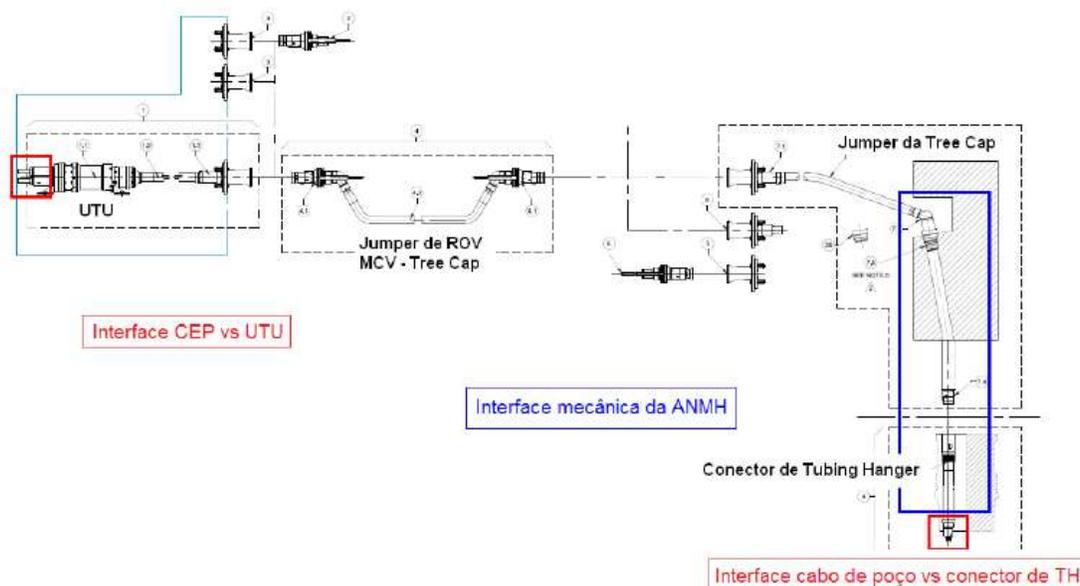


Figura 3.7- Sistema elétrico submarino utilizado na alimentação da BCSS;

O conector do *packer*, ou penetrador de *packer*, é utilizado em poços que possuem *packer* ou *tubing mounted* e funciona de modo similar ao conector da Árvore de Natal.

3.3 EQUIPAMENTOS DE SUPERFÍCIE

3.3.1 Centro de Distribuição de Cargas

O Centro de Distribuição de Cargas (CDC) é o painel responsável por suprir energia elétrica para o sistema BCSS através do sistema elétrico da plataforma. O painel está conectado eletricamente ao sistema de distribuição principal de energia elétrica da plataforma na topologia de secundário seletivo, ou seja, podem-se alimentar as cargas através de duas barras (A / B) dispostas internamente ao painel, sendo que cada uma possui o seu respectivo disjuntor de entrada. Tal sistema permite que a totalidade das cargas possa ser alimentada através de ambos os lados do sistema elétrico ou, ambos através da manobra do disjuntor de interligação entre as barras.

Sistemas de alta potência normalmente trata-se de um painel de Média Tensão com tensão nominal em 4,16 kV ou superior. Cada sistema BCSS é alimentado exclusivamente por um dos cubículos de saída deste painel. Cada cubículo é composto por um disjuntor de média tensão, e seu respectivo sistema de medição, sinalização e comando, além do sistema de proteção elétrica que é realizada através de relé digital multifunção.

O cubículo de saída é interligado à entrada do conversor de frequência de Média Tensão através de cabos elétricos isolados.

3.3.2 Caixas de junção

A caixa de junção (*Junction Box*) é instalada geralmente em área externa e próxima à entrada dos *risers* na plataforma, sendo necessário que seja apropriada para instalação em áreas classificadas. Sua função é basicamente abrigar a interligação elétrica entre os cabos elétricos de superfície oriundos da saída do variador de frequência e os cabos submarinos que chegam nesta área.

Podem ser compostas internamente de conectores de média tensão ou barramentos de cobre para interligação entre o cabo de superfície e umbilicais de potência através de terminais de média tensão do tipo mufla.

3.3.3 Conversor de frequência de Média Tensão

O conversor de frequência de Média Tensão, como ilustrado na figura 3.7, é o equipamento objeto do estudo desta dissertação, e tem como principal objetivo promover o controle da rotação do conjunto BCSS através da variação da frequência e tensão aplicada ao motor elétrico. Os equipamentos utilizados atualmente para aplicação de BCSS de alta potência possuem potência nominal da ordem de 2.000 HP refrigerados a ar com corrente de saída nominal 260 A, tensão de saída até 6.600 volts em corrente alternada.



Figura 3.8- Conversor de frequência CHBI de MT - 2000 HP – tensão de saída 0 - 6,6 kV para testes de BCSS

A utilização de conversores de frequência no acionamento de conjuntos BCSS é motivada pelos seguintes fatores:

- Permite a flexibilidade operacional no controle da vazão de bombeio através do controle de velocidade;
- Isolamento do sistema elétrico da plataforma, protegendo o conjunto de eventuais perturbações no sistema elétrico;
- Permite configuração de rampas de partida suave, evitando a partida direta e contribuindo para o aumento da vida útil do conjunto de fundo;
- Permite registro de eventos, proteção elétrica e monitoramento de partidas, paradas, corrente e tensão do motor.
- Permite um menor impacto da partida do BCSS no sistema elétrico da unidade marítima;

Junto com o crescente aumento da profundidade dos poços, das distâncias entre os poços de produção e a plataforma e conseqüente aumento das potências envolvidas, vem a necessidade de reduzir as perdas e queda de tensão nos cabos elétricos submarinos. Com o advento da evolução da eletrônica de potência aplicada para conversores de frequência de média tensão, e paralelamente a evolução da classe de tensão dos motores elétricos de conjunto BCSS de alto desempenho, o projeto do sistema BCSS de alta potência foi favorecido no que tange a possibilidade de utilização de conversores de frequência com saída diretamente em Média Tensão, sem a necessidade da utilização de um transformador abaixador submarino, e diminuindo as perdas comparativamente aos sistemas que utilizam transformador abaixador e transformador elevador na saída do VFD (topologia *high-low-high*).

Em sistemas com alta potência a partida em rampa é praticamente obrigatória tanto devido ao dimensionamento dos conjuntos BCSS quanto ao impacto no sistema elétrico da unidade de produção.

As principais topologias utilizadas na atualidade pelos fabricantes de conversores de frequência de Média Tensão PWM Multinível são o *Cascaded H-Bridge inverter* e o *Neutral Point Clamp (NPC)*. Devido à grande utilização de equipamentos com a topologia CHBI em Bombeio Centrifugo Submerso, este será tema da análise de disponibilidade desta dissertação. Para avaliação da sua confiabilidade e disponibilidade dentro do sistema BCS/BCSS é necessário um estudo aprofundado de seus componentes, que será realizado mais adiante.

3.4 ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DO SISTEMA BCSS

A energia necessária para realizar a elevação de petróleo é gerada na própria plataforma através do sistema de geração de energia elétrica. Geralmente são empregados turbo-geradores a gás e/ou moto-geradores a diesel na geração principal das unidades de produção.

O sistema de alimentação elétrica de cargas presente nas unidades de produção geralmente utiliza a topologia de secundário seletivo. Desta forma, normalmente os equipamentos possuem redundância e podem ser acionadas através de dois lados da alimentação elétrica. Esta configuração provê maior confiabilidade, pois em caso

de falha em um alimentador ou equipamento existe outra opção de alimentação, mantendo a disponibilidade dos sistemas presentes na plataforma de produção.

Quando se avalia a alimentação elétrica dos sistemas de bombeio centrífugo submerso submarino, verifica-se que essa redundância muitas vezes não é fisicamente possível. Tal característica ocorre devido à indisponibilidade de espaço físico para instalação de dois conjuntos de fundo dentro um poço, e também devido a limitações de espaço físico e peso para instalação de equipamentos de grande porte no *top-side*. A alimentação elétrica do conversor de frequência de Média tensão ocorre através de um disjuntor presente em um Centro de Distribuição de Cargas (CDC) de Média Tensão. Desta forma, sob a ótica do sistema elétrico a jusante do CDC não existe mais redundância neste sistema.

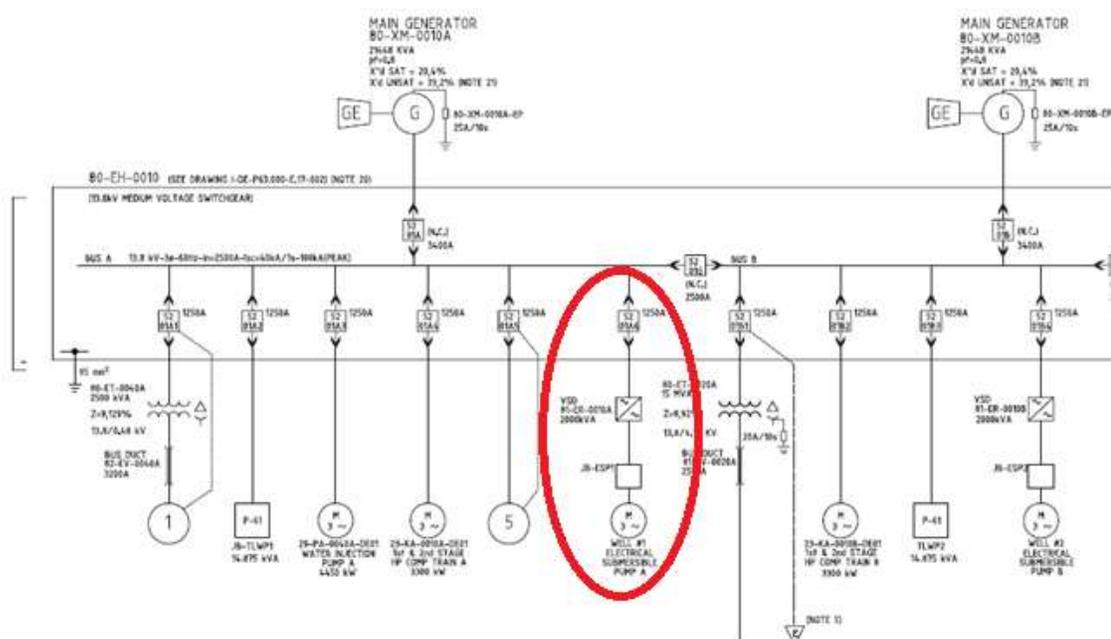


Figura 3.9- Diagrama unifilar da alimentação elétrica do conversor de frequência de um BCSS;

Os conversores de frequência aplicados nos sistemas BCSS atuais de alta potência (ordem de 1.600 HP) possuem potência nominal da ordem de 2.000 HP e tensão de saída até 6.600 volts. Desta forma, são equipamentos que possuem dimensões que impossibilitam considerar redundância para cada equipamento devido às limitações de espaço físico a bordo das plataformas de produção. Assim, a aplicação

de técnicas para aumento da disponibilidade de VFD's, empregando redundância integrada torna-se especialmente importante, de modo a manter uma alta disponibilidade para o sistema. A Figura 3.9 ilustra um diagrama da alimentação elétrica do conversor de frequência de um BCSS.

Em breve análise em termos de disponibilidade, pelo fato do sistema BCSS possuir alimentação elétrica oriunda da geração principal, é extremamente desejável que o sistema de geração principal possua uma alta disponibilidade.

A disponibilidade do sistema BCSS será igual ou inferior à disponibilidade do sistema de geração e distribuição principal. Não é o objetivo desta dissertação abordar tópicos relativos à disponibilidade de sistemas de geração e distribuição, mantendo como foco o conversor de frequência e suas interfaces.

4 DETALHAMENTO INTERNO DOS COMPONENTES DE UM VFD MULTINÍVEL DE MÉDIA TENSÃO TOPOLOGIA CHBI APLICADO NO SISTEMA BCS/BCSS

O conceito de aplicar conversores de frequência PWM Multinível no acionamento de motores elétricos foi introduzido na década de 1980. Consiste basicamente em promover a variação da frequência aplicada à máquina através retificação e reconstrução do sinal de saída através da modulação PWM em diversos níveis de tensão. A forma da variação da frequência e da tensão de saída são resultados das formas de controle e parâmetros escolhidos no VFD podendo ser configurado para diversos tipos de aplicação.

Diversas topologias de inversores multiníveis foram propostas nos últimos anos (CORZINI ET ALL 2004) utilizando modulação PWM, por exemplo, diodo grampeado, Capacitor flutuante e Ponte H em cascata. Neste trabalho conforme informado anteriormente serão abordados aspectos construtivos de conversores de frequência multinível na configuração Ponte H em cascata (CHBI), por constituírem grande parte das aplicações no acionamento de Bombeio Centrífugo Submerso Submarino. Devido à necessidade de longos cabos de saída e peculiaridades do sistema BCS/BCSS, componentes não convencionais foram incorporados ao conversor de frequência para permitir a operação, como filtro senoidal de saída e interface de comunicação com sala de controle.

Para permitir uma análise da confiabilidade e disponibilidade de conversores de frequência na topologia Multinível é necessário primeiramente identificar e analisar as funções dos principais componentes do equipamento.

4.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES

4.1.1 Circuitos de potência

A estrutura típica de componentes empregada na etapa de potência em um conversor Multinível de Média tensão PWM CHBI é demonstrada na figura 4.1:

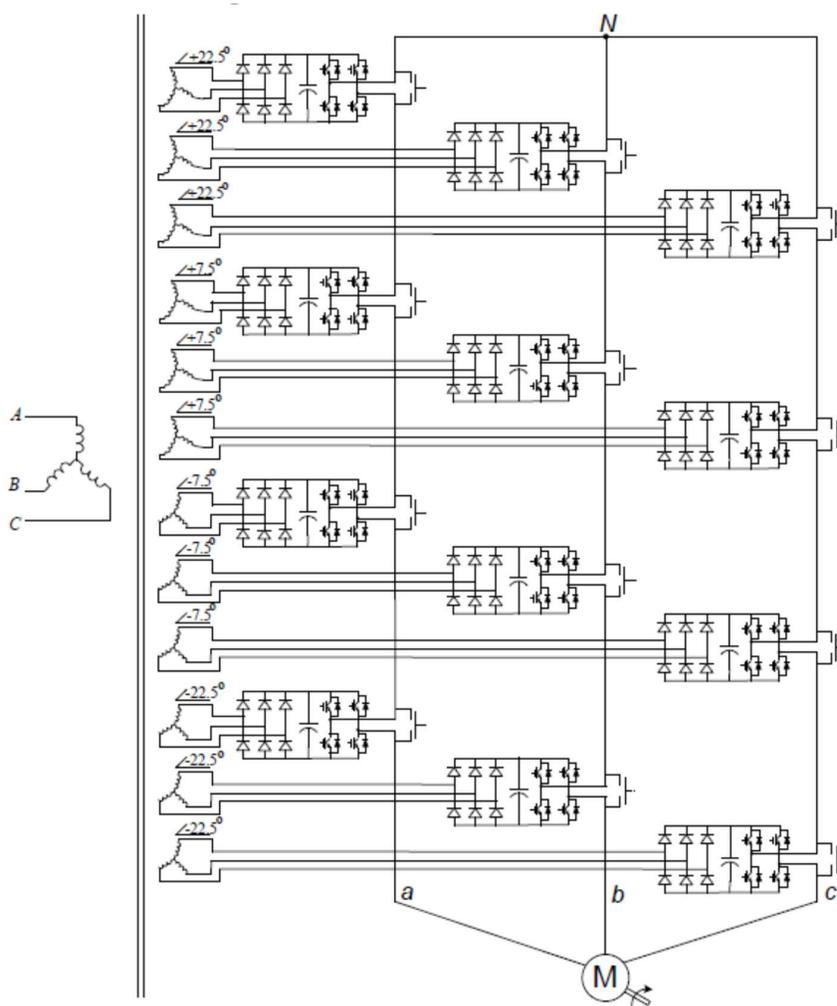


Figura 4.1- Componentes internos de potência de um VFD Multinível (ZHOU et All, 2006);

O transformador na entrada geralmente é disposto dentro do próprio painel do conversor de frequência, possuindo diversos enrolamentos secundários de saída para permitir o deslocamento angular. Cada enrolamento secundário alimenta especificamente uma das células de potência em baixa tensão. O cubículo do transformador contém um ou mais ventiladores (na parte de cima do Gabinete) utilizados para resfriamento. O transformador é projetado com número de enrolamentos secundários necessário para possibilitar a construção da tensão de saída de projeto em diversos níveis.

A célula de potência é composta por uma ponte retificadora trifásica, capacitores do link DC e IGBT's da etapa inversora, como ilustrado na Figura 4.2. Cada célula possui proteção contra curto-circuito através de fusíveis em sua entrada. Além dos componentes de potência, também integram a célula sua respectiva placa de controle, responsável por receber os sinais de chaveamento por fibra óptica e efetivamente promover o disparo dos IGBTs da ponte inversora, e a placa de driver dos IGBTs.

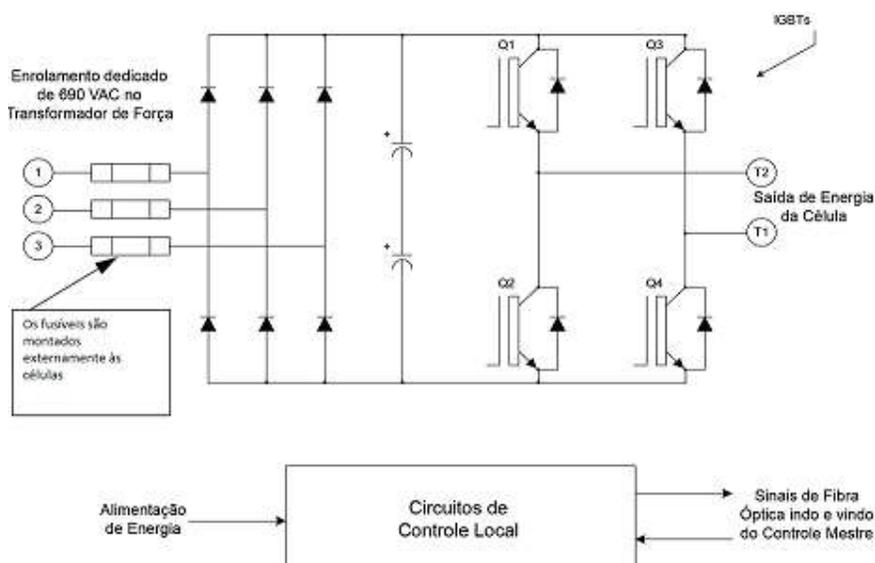


Figura 4.2- Componentes de uma célula de potência (Fonte: Manual Siemens);

Todas as células, como as ilustradas na figura 4.3, são eletricamente e mecanicamente idênticas. Esta característica permite que sejam intercambiáveis quanto à posição física de conversor de frequência, facilitando a solução de problemas pela

equipe de manutenção. Cada célula possui internamente uma placa de controle, responsável pelo chaveamento dos IGBTs, que se comunica com o sistema de controle através de uma conexão de fibra óptica. Esta conexão é a única ligação entre as células e o controle principal localizado no cubículo de Controle, assim cada célula está galvanicamente isolada do controle principal.

Cada célula do equipamento geralmente pode ser equipada com um contator de *bypass*. Esse contator pode ser energizado pelo controle principal do VFD se o funcionamento da célula associada falhar. Assim, quando o contator estiver energizado a célula defeituosa estará isolada e não fará mais parte do sistema elétrico, o que permitirá ao VFD retornar a operação de maneira automática ou manual.



Figura 4.3- Células de potência de um conversor de frequência para BCSS.

Nas ocasiões em que uma célula falhar e for “*bypassada*”, o controle automaticamente fará uma compensação (deslocando o ponto neutro) para que a tensão aplicada ao motor continue equilibrada. Os conversores de frequência aplicados nos sistemas BCSS são dimensionados com uma célula extra por fase, de modo a compensar os efeitos de queda de tensão nos longos cabos de saída. As células sobressalentes auxiliam na compensação da perda de tensão devido à saída do circuito da célula em falha.

A energia de alimentação do sistema de controle para as placas das células é fornecida a partir de uma fonte chaveada de alimentação localizada na placa de controle de célula. Esta fonte permite que a potência de controle seja derivada das conexões secundárias trifásicas individuais do transformador, de maneira que o cubículo de controle permanece galvanicamente isolado.

O Sistema de Controle Principal é composto basicamente por um conjunto de CPU, placas I/O, fontes, placas condicionadoras de sinais e sensores. Por questões de segurança, o cubículo de controle está fisicamente e eletricamente isolado de qualquer ponto do circuito de média tensão.

O controle para cada uma das células de saída é realizado através de laços de comunicação por fibra óptica entre o sistema de controle principal e as respectivas placas de controle que se encontram fisicamente dentro de cada célula.

O sistema de controle também monitora as informações de operação de cada célula, além da tensão de entrada, tensão de saída e valores de corrente. A informação sobre a tensão de entrada e saída é fornecida às placas de controle por um sistema de atenuação consistindo de um divisor de tensão resistivo.

Geralmente são utilizados dois sensores de efeito Hall colocados em duas das fases de saída para monitoramento da corrente de saída para o motor. Da mesma forma, dois transformadores de corrente são colocados em duas das fases de entrada para monitoramento da corrente de entrada. Os valores de polaridade e da resistência de carga devem ser sempre mantidos.

Cada célula recebe informações de modulação para o chaveamento dos IGBTs através do sistema de fibra óptica, de forma ao VFD conseguir desenvolver a correta tensão de saída e frequência requeridas pela carga. A tensão aplicada aos condutores

do motor é construída em diversos níveis. A construção do sinal multinível oferece duas vantagens distintas: a diminuição dos transitórios de tensão (dv/dt) nos condutores do motor e a alta qualidade da corrente no motor, por ser praticamente senoidal.

O equipamento de potência de 2.000 HP com tensão de saída variando entre zero até 6.600 volts geralmente possui 6 células por fase com tensão de entrada de 630 volts. São resfriadas através de exaustores que geralmente também são projetados para permitir operação com redundância.

4.1.2 Filtro Senoidal de saída

Em aplicações com cabos de saída muito longos (geralmente acima de 2000 metros), o VFD PWM Multinível demanda a instalação de um filtro de saída, de modo a minimizar os efeitos das sobretensões ocasionadas devido ao chaveamento PWM em ressonância com a impedância do cabo. Sua função basicamente é reduzir os transitórios dv/dt que poderiam gerar danos à isolação do sistema, bem como tornar a forma de onda de saída do VFD praticamente senoidal.

Em aplicações de sistemas BCSS é praticamente mandatório a existência do filtro senoidal de saída, devido às longas distâncias envolvidas entre a localização do conjunto de fundo e a plataforma.

É basicamente composto por um circuito LC disposto na saída do conversor de frequência, ou seja, um circuito série contendo reator em cada fase em série e banco de capacitores trifásico ligado em estrela.

4.1.3 Sistema de Controle Principal

O VFD Multinível PWM, ilustrado na figura 4.4, possui placas de circuitos impressos e sensores internos necessários para a medição, condicionamento, interpretação e modulação de sinais necessários para reconstruir a onda senoidal e controlar a variação de frequência. Além disso, é composto por uma CPU responsável pela realização de todo o processamento de dados e funções secundárias, como registro de eventos, registro de falhas e alteração e armazenamento dos parâmetros de configuração.

O Sistema de controle principal consiste de um rack de controle (CPU) e diversas outras placas I/O, condicionamento de sinais e controle. A CPU recebe energia de uma fonte de energia individual, oriunda da alimentação auxiliar externa. A parte vital do controle é a placa microprocessadora, sendo esta responsável por controlar todas as outras placas do barramento da CPU.

Geralmente a placa microprocessadora contém um cartão de memória removível. Em caso de falha desta placa, por qualquer motivo, as informações específicas de parâmetros e o programa do sistema para o VFD estarão armazenados no cartão. Desta forma, permite-se que a placa microprocessadora seja substituída sem a necessidade de reprogramar o acionamento.

Existe uma placa de interface de sinais para condicionar os sinais externos e enviá-los à placa de conversão analógica para digital. Esta faz a conversão em intervalos pré-especificados e envia amostras digitais dos sinais para a placa microprocessadora. Da mesma forma existem módulos de entradas e saídas digitais que pré-condicionam os sinais externos e também os enviam para a placa microprocessadora. Esta placa calcula o conjunto de valores para serem enviados ao modulador digital. O modulador digital então determina os comandos de comutação para cada célula e compila uma mensagem com esse comando para cada célula. Essas mensagens são enviadas por meio das placas de interface de fibra óptica.

A placa de comunicação fornece uma interface direta com rede MODBUS / ETHERNET e também torna possível a comunicação em vários outros protocolos de redes industriais através da utilização de placas de adaptação de rede, como exemplo, PROFIBUS DP.

Para o sistema de controle principal, normalmente são utilizadas duas fontes de tensão DC em redundância para aumentar a confiabilidade.

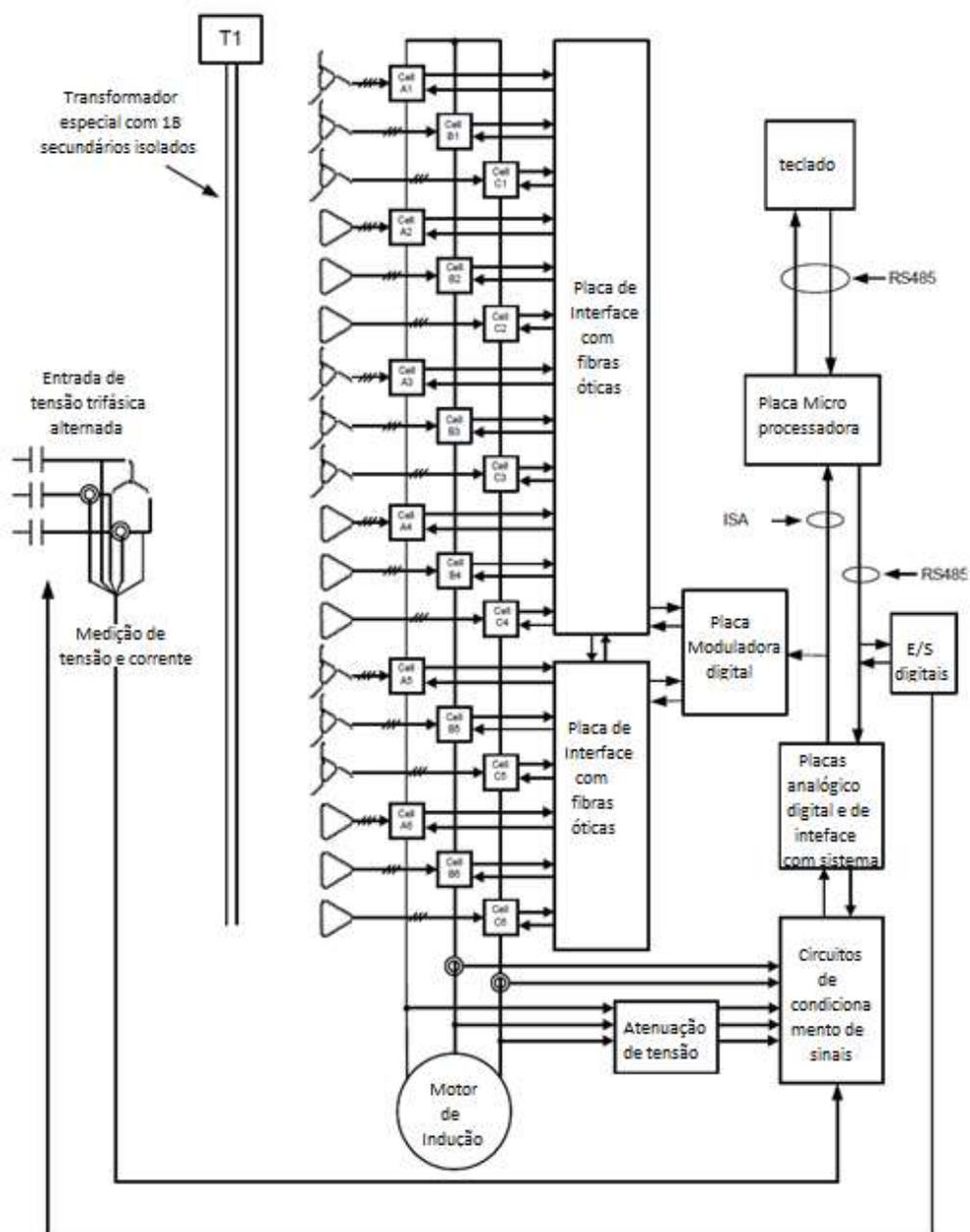


Figura4.4- Componentes internos de um VFD Multinível;

O número de placas de interface e de canais de fibra óptica depende diretamente do número de células de cada inversor. Cada célula possui seu próprio canal de fibra óptica para comunicação com as placas moduladoras do sistema principal de controle. As fibras são responsáveis por transferir as informações de chaveamento do controle principal para as respectivas células individualmente.

4.1.4 Alimentações Externas

O conversor de frequência de média tensão necessita receber alimentações auxiliares de fontes externas além da alimentação da tensão principal. Basicamente, existem dois tipos de alimentações externas necessárias:

- Alimentação externa para ventilação interna (380 a 480 volts);
- Alimentação externa da tensão de comando e controle (127 a 220 volts);

A indisponibilidade das alimentações auxiliares, bem como da alimentação principal, conduz o equipamento a uma condição de parada. Portanto, tais alimentações devem ser oriundas de fontes confiáveis. Uma forma de tornar a alimentação da tensão de comando mais confiável é através da implementação de um sistema redundante de fonte ininterruptas de energia (UPS) com chave de transferência.

A alimentação dos resistores de aquecimento existentes nos compartimentos do painel normalmente é oriunda de fonte externa e devem ser acionadas sempre que o inversor estiver desligado para fins de preservação.

4.1.5 Interface de automação com sala de controle (CCR)

Diversas variáveis do conversor de frequência e do próprio BCS/BCSS são monitoradas pelos operadores através da sala de controle e também são utilizadas para proteção do conjunto de fundo.

Da mesma forma, comandos de controle, como partida e parada da bomba também são enviadas pela sala de controle para o VFD. As informações podem ser transmitidas via *hardwired* ou através de protocolo de rede (e.g. Modbus, Profibus).

A estrutura padrão da interface do sistema BCS com a sala de controle pode ser visualizada na figura 4.5:

5 ANÁLISE DE FALHAS E DISPONIBILIDADE DE CONVERSORES DE FREQUENCIA MULTINIVEL TOPOLOGIA CHBI NO SISTEMA BCSS

O estudo da confiabilidade em conversores de frequência PWM Multinível CHBI é um tópico importante devido à grande quantidade de componentes eletrônicos empregados em seu projeto, dentre eles semicondutores, placas de controle e sensores. O aumento do número de componentes no projeto geralmente tem como consequência uma queda da confiabilidade em conversores de frequência (ZHOU, 2009).

Em geral são encontrados artigos técnicos na literatura que abordam a confiabilidade dos conversores de frequência na topologia PWM Multinível com base na topologia empregada de seus componentes de eletrônica de potência. No entanto não são encontrados trabalhos que realizem uma abordagem completa do conversor de frequência, contemplando também os sistemas de medição, alimentação e sistemas de controle do VFD de Média Tensão.

O sistema de medição e controle é igualmente importante na avaliação da disponibilidade do equipamento, uma vez que a ocorrência de falhas em placas componentes do circuito de controle e comando resulta na parada direta do VFD.

Além disso, empiricamente, falhas no sistema de controle são mais difíceis de identificar do que falhas no sistema de potência. Este fato ocorre porque o sistema de controle em equipamentos modernos é suficientemente sofisticado e capaz de identificar falhas ocorridas no sistema de potência e indicá-las na IHM ou através de software. Este fato torna o tempo de identificação da falha praticamente nulo pela equipe que realizará a análise. Além disso, os conversores atuais estando bem especificados para aplicação são capazes de empregar técnicas de redundância para reduzir o tempo de retorno do equipamento à operação para falhas em seus circuitos de potência, citando como exemplo a capacidade dos conversores de frequência modernos de promover o *bypass* de uma célula de potência danificada.

No entanto, quando a falha é originária do sistema de controle e na interface com o sistema de automação, a identificação pode não ser trivial. A depender da natureza da falha, pode não existir nenhuma indicação por parte do equipamento ou ainda existir falsos alarmes, falhas intermitentes e desligamentos espúrios, dificultando ou mesmo inviabilizando a identificação por parte da equipe de manutenção.

Nestes casos, pode ser concluído de maneira empírica que o tempo de identificação da falha é inversamente proporcional à experiência e especialização do profissional que estará realizando a análise da falha.

Em plataformas produtoras de petróleo ou unidades industriais em locais remotos existe também um agravante relacionado ao tempo de reparo de uma falha desta natureza, pois caso identificação ou reparo não possa ser realizada pela equipe de manutenção a bordo, será necessário o envio de um profissional especialista, acarretando em um maior tempo para solução do problema.

Tal fato contribui para aumentar o MTTR e que por sua vez se traduz diretamente em perda de produção. Sendo assim, o lucro cessante deve ser considerado na avaliação técnico econômica.

5.1 A CONFIABILIDADE DE UM CONVERSOR CASCADED H BRIDGE POR CÁLCULO ATRAVÉS DE DADOS DE TAXAS DE FALHAS

No caso de conversores de frequência Multinível de Média Tensão CHBI, as células com falhas podem ser retiradas do circuito elétrico para permitir a operação com as células saudáveis restantes com redução da tensão de saída (ZHOU, 2009) utilizando a técnica do deslocamento de neutro.

Com base na topologia já abordada de um VFD CHBI, a confiabilidade da etapa de potência de um conversor com 18 células pode ser representada por:

$$R(t) = (e^{-\lambda_1 t})^{18} \cdot (e^{-\lambda_2 t})^{36} \cdot (e^{-\lambda_3 t})^{54} \cdot (e^{-\lambda_4 t})^{18} \quad (13)$$

Onde:

λ_n : Taxa de falhas (TF) do componente (MTTF⁻¹)

λ_1 : TF Ponte de diodos

λ_2 : TF ramos dos IGBT

λ_3 : TF Capacitores do link DC

λ_4 : TF Placa de controle de célula

A tabela 1 fornece alguns dados específicos para os componentes de potência de uma célula de conversor CHBI. A unidade FIT (*failure in time*) representa o número de falhas a cada 1×10^9 horas.

Tabela 1-Taxas de falhas de componentes de potência de uma célula (ZHOU, 2009);

Componente	λ (FIT)
Ponte de diodos	$\lambda = 6 \times 6$ diodos
Ramo IGBT	$\lambda = 20 \times 2$ ramos
Capacitor	$\lambda = 25$
Indutor	$\lambda = 19$
Contator	$\lambda = 150$

Como é possível verificar, as taxas de falhas de componentes encontradas na literatura se referem especificamente aos componentes eletrônicos de potência. Para um cálculo efetivamente representativo da confiabilidade de uma célula de potência, seria necessário incluir a confiabilidade da placa de controle da célula. A taxa de falha específica para estas placas de controle não são encontradas na literatura por serem bastante específicas e seu projeto pode variar entre fabricantes distintos.

Adicionalmente, conforme abordado anteriormente, o conversor de frequência aplicado no sistema BCSS é composto por uma grande quantidade de componentes em seu sistema de medição e controle, além de possuir interface de comunicação para com a sala de controle, igualmente importantes que a etapa de potência para disponibilidade do equipamento.

Conforme esperado, devido à complexidade do sistema de controle do conversor de frequência CHBI, a tentativa de um cálculo completo da confiabilidade e disponibilidade de um conversor de frequência através de valores estatísticos de taxas de falhas de seus componentes dependeria de um banco de dados de falhas extremamente grande, mesmo assim poderia apresentar uma inconsistência significativa.

Neste caso, uma análise de falhas empírica para os equipamentos específicos no acionamento BCSS precisa ser realizada para trazer informações dos tipos de falhas reais ocorridas, que possam permitir a implementação de técnicas de projeto ou manutenção que possam mitigar seus efeitos.

5.2 ANÁLISE DE FALHAS REAIS DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA NO ACIONAMENTO DE BCSS

Foi realizada uma análise detalhada das ocorrências de falhas em conversores de frequência CHBI de média tensão utilizados no acionamento de BCS de águas profundas, através de uma coleta substancial de dados e relatórios poços offshore instalados nas Bacias de Campos, Espírito Santo e Santos no período entre 2010 e 2016. Nestes campos foram obtidos dados de 38 poços instalados com e VFDs de MT utilizados no acionamento de BCSS, distribuídos entre diversas plataformas e ativos de produção.

Foram levantados relatórios técnicos e os registros de tratamento de anomalia contendo a análise de árvore falha (FTA) de cada evento, e de acordo com o resultado de cada falha foi realizada uma classificação dos eventos de acordo com sua respectiva causa raiz. Para cada equipamento, foram levantados os respectivos índices TTF e TTR, posteriormente, calculados os respectivos tempos médio para falhas e tempo médio para reparo. O anexo I possui uma tabela com parte dos dados levantados.

Dentre todos os eventos registrados, um chamou a atenção para severidade de falha e elevado potencial de perda de produção. Esta ocorrência foi um curto circuito com arco elétrico nos terminais de entrada de um conversor de frequência com alimentação em 13,8 kV. Neste caso específico não existiu perda de produção associada, pois o BCS já se encontrava em falha e aguardando intervenção, desta forma não foi contabilizado como perda devido ao VFD. Na análise da causa raiz, essa falha foi relacionada com problemas de projeto e também na fase de construção e montagem do equipamento. Este evento aconteceu aproximadamente 18 meses após a movimentação de comissionamento. Assim, essa falha foi caracterizada como uma falha catastrófica, porém extremamente rara. Devido a estes fatores, o tempo para reparo não foi considerado nesta primeira análise, pois geraria uma clara distorção no *MTTR* para todos os demais eventos.

Da mesma forma, falhas causadas por fontes externas, por exemplo, instabilidade e perda de energia auxiliar não foram consideradas nesta primeira análise de disponibilidade.

As diversas falhas foram classificadas conforme a localização do componente causador de acordo com a análise de falhas, sendo agrupadas.

Foi identificado um registro total de 998,98 horas de indisponibilidade devido a falhas nos VFDs e seus respectivos sistemas automação, dentro do universo dos 38 poços analisados.

Analisando o universo das falhas registradas, foi levantada a possibilidade de estratificar as diversas falhas ocorridas de acordo com sua causa raiz em três grupos principais: falhas em célula de potência, falhas nos sistemas de controle e falhas na interface de automação.

Tabela 2-Indisponibilidade total registrada classificada de acordo com grupo de falha;

Indisponibilidade estratificada (h)	
Sistemas de Controle	274,53
Interface com automação	646,96
Células de Potência	77,48
TOTAL	998,98

A grande maioria das falhas ocorreu na interface do VFD com o respectivo sistema de automação da plataforma, sendo que as falhas nos sistemas de controle ficaram em segundo lugar. Além disso, algumas falhas registradas em interface com a automação são intermitentes e de difícil identificação técnica. As falhas nas células de potência constituíram 14% dos eventos identificados, como mostra a figura 5.1.

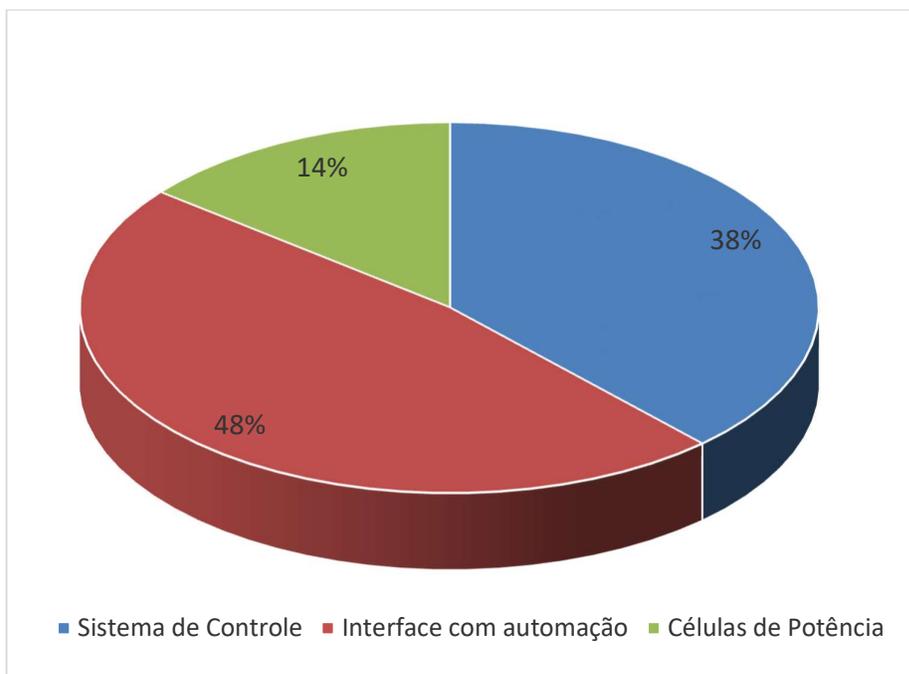


Figura 5.1- Classificação das falhas e porcentagem por grupo de falha;

Em uma segunda análise, considerando o tempo de indisponibilidade (TTR ou *downtime*) para cada uma das falhas registradas, foi constatado que as falhas com a interface de automação representaram 65% da indisponibilidade total registrada, apesar de representar 48% das falhas totais.

As falhas envolvendo as células de potência representaram apenas 8% do total de indisponibilidade geral, apesar de representaram 14% das falhas, como visto na figura 5.2.

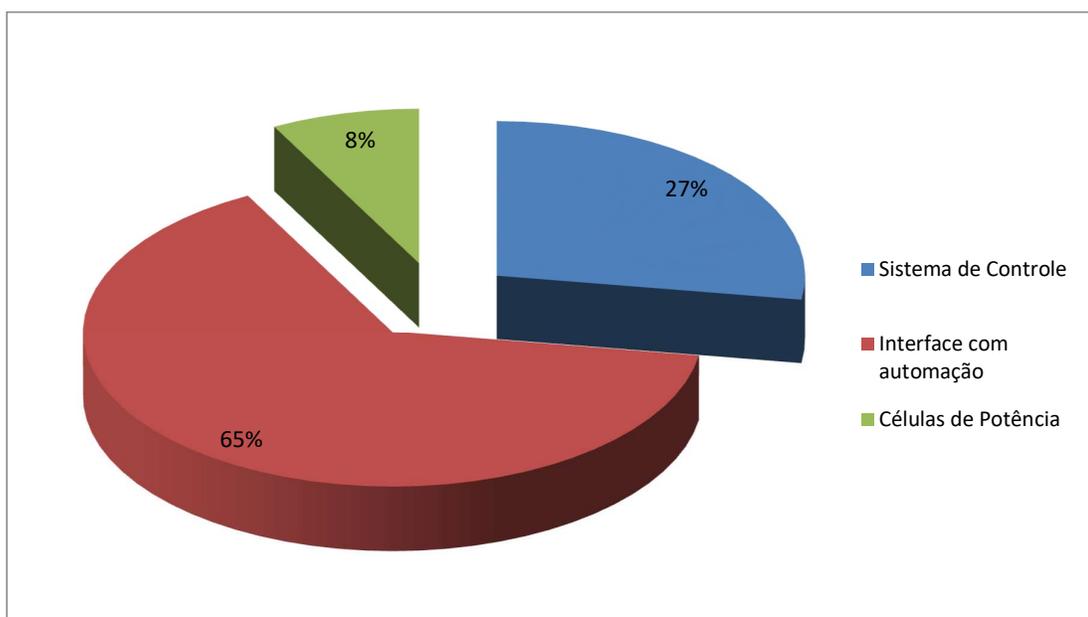


Figura 5.2- Porcentagem por tempo de indisponibilidade;

A disponibilidade média registrada para os sistemas de VFDs CHBI no acionamento de BCSS foi de 99,881%. Nesta análise foi considerado o modelo de dois estados, ou seja, o conversor apresenta-se no estado de disponível para utilização (considerado em funcionamento ou em *stand-by*) ou no estado de reparo. O resultado comprova que os *drives* utilizados nesta aplicação possuem naturalmente uma alta disponibilidade.

O tempo médio para falhar calculado (MTTF) para o espectro de dados avaliado foi de 21.198,3 horas. O tempo médio de reparo (MTTR) para todo o espectro foi de 43,23 horas. Os tempos médios para reparar para estes três grupos principais de falha também foram calculados:

Tabela 3-MTTR por grupo de falhas;

Grupo de falhas	MTTR (horas)	Desvio Padrão (horas)
Células de Potência	25,82	30,05
Sistema de Controle	34,18	28,34
Interface com automação	64,70	71,09

Conforme esperado, o tempo médio para reparo para falhas em células de potência foi o menor entre os três principais grupos de falhas. O tempo médio de reparo para esse grupo de falha deveria ainda muito menor, mas foi bastante impactado por apenas uma das falhas registradas. Essa falha demandou um TTR de 68,3 horas entre a falha e retorno do poço, devido a inexistência de célula sobressalente a bordo. Se essa falha fosse expurgada da análise, o tempo médio para reparo (substituição) de uma célula de potência defeituosa e retorno do poço a produção ficaria em apenas 4,59 horas.

Este resultado da análise demonstra que as técnicas de projeto utilizadas pelos fabricantes para a etapa de potência destes conversores, como exemplo, a modularidade e intercambiabilidade das células de potência, possibilidade de utilizar contatores de *bypass* e deslocamento de neutro, bem como dimensionamento de componentes internos, geram efeitos diretos na confiabilidade e disponibilidade geral destes equipamentos.

Essa evidência também demonstra a importância de existir uma boa gestão de sobressalentes dos VFDs de MT a bordo, bem como sua preservação dos componentes reservas.

5.2.1 Exemplo 1: Falha em placa Microprocessora do sistema de controle do VFD

Em março de 2016, um VFD com potência nominal de 990 HP e com tensão de saída de 0 - 4,16 KV utilizado no acionamento de um boço BCS sofreu falha indicando um alarme na sala de controle com "*VFD Internal Trip*".

Após uma análise da equipe a bordo, foi identificado que a causa da parada do VFD foi devida uma falha da placa microprocessadora do sistema de controle do VFD, mostrada na figura 5.3.

A placa precisou ser substituída e o tempo total de parada do poço ficou em 41,35 horas para retornar à produção. A maior parte deste tempo foi relacionado à identificação da falha, pois o alarme na sala de controle não fornecia indicação precisa sobre a falha, tornando difícil a identificação.

A perda de produção associada a essa falha foi de 9.750 bbl, representando um custo total de US\$ 487.500,00 apenas considerando o lucro cessante, em uma análise com preço médio do barril de U\$ 50,00.



Figura 5.3- VFD CHBI acionamento de BCSS em plataforma falha placa microprocessora com parada de produção;

5.2.2 Exemplo 2: Falha intermitente em cartão de saída digital do CLP de interface com sala de controle

Em outro caso, também em um poço acionado por um VFD de 1.300 HP, tensão de saída 0 – 4,8 KV, não foi possível estabelecer a produção de poço por 72 horas consecutivas devido a uma falha intermitente do cartão de saída do SDCD disponível na sala de controle de interface com o VFD, ilustrada na figura 5.4.

A saída digital de comando de partida do VFD estava com mau contato e o sinal da DO sempre acabava perdido durante a partida, acarretando em parada total do VFD.

Esta foi uma falha que demandou o embarque de especialista para apoio a equipe a bordo, porque o VFD permitiu a partida do poço por diversas vezes, porém o desligamento ocorria após poucos segundos, sendo apenas informado o alarme "VFD Stop". A perda de produção total devido a este episódio foi de 18.900 BBL.

Uma redundância na interface com a sala de controle da unidade poderia evitar essa perda.

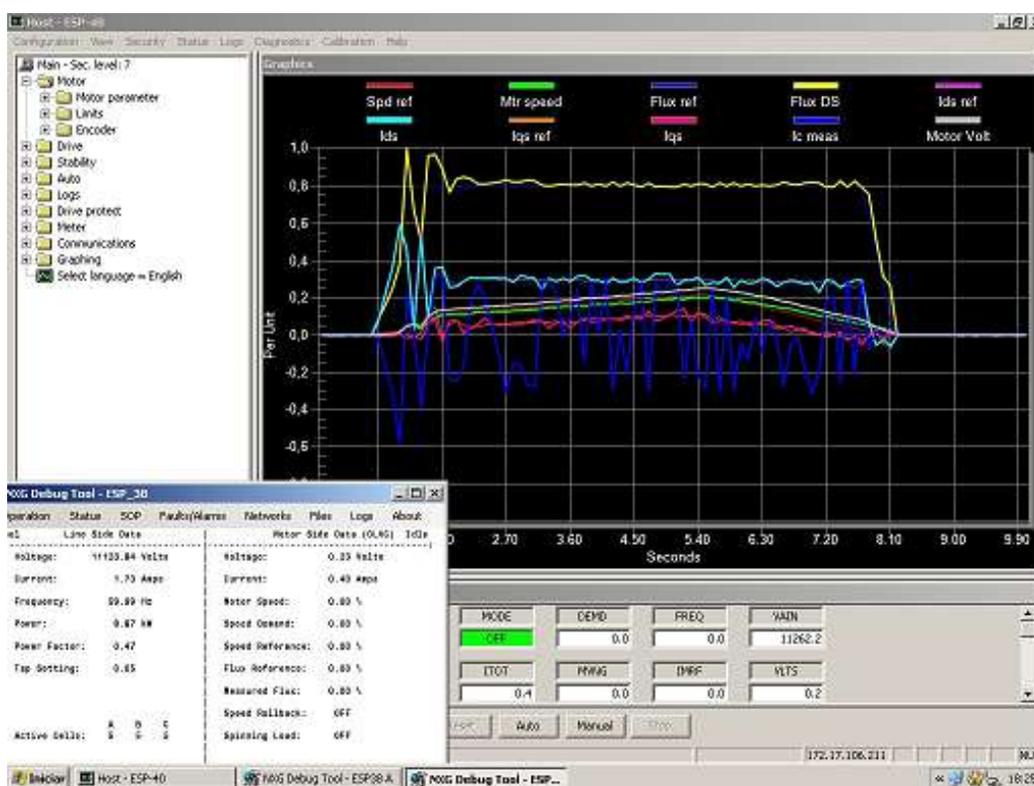


Figura 5.4- Partida e parada do poço BCS devido intermitência no comando do VFD;

5.2.3 Exemplo 3: Falha em célula de potência com parada de produção

Neste outro episódio em plataforma, ocorreu uma parada do VFD e do BCSS com a indicação na sala de controle "VFD internal TRIP". O operador foi até o equipamento, onde foi verificado que o alarme de "falha na célula A2", ilustrada na figura 5.5. A falha foi resultado de um problema de conector da fibra óptica.

O equipamento de 2.000 HP, 13,8 KV de entrada e 0 – 6,6 kV de tensão de saída é equipado com contadores de by-pass de célula, e neste caso foi autorizado a utilização. A célula foi manualmente “*bypassada*” pelo controle do VFD, e o conversor de frequência retornou à operação normalmente utilizando o deslocamento de neutro. Durante uma posterior parada de produção programada, a célula danificada foi substituída.

O tempo necessário para retorno do poço foi de 3,43 horas. A perda de produção estimada foi de 1.980 bbl.



Figura 5.5-Célula de potência A2 do conversor de frequência apresentou falha na fibra ótica;

5.2.4 Exemplo 4: Falha de curto-circuito na entrada de 13,8 kV de um VFD de poço

Em julho/2015, em um conversor de frequência de 2,000 HP, 13,8 kV e 0 - 6,6 kV, foi registrada uma falha bastante crítica, devido a ocorrência de um curto-circuito nos terminais de entrada de VFD. Esta falha não ocasionou perda de produção, porque de BCSS não se encontrava operacional, aguardando para ser substituído. Porém a natureza da falha constituiu um grande potencial de perda.

O disjuntor de proteção à montante existente no painel centro de Distribuição de cargas de 13,8 kV foi desligado instantaneamente devido a atuação da função 50/51 – (Curto circuito) isolando a entrada do conversor. Mesmo assim, o dano devido ao arco elétrico na entrada comprometeu diversos componentes, sensores e terminais, além de espalhar fuligem por todo o cubículo de entrada, como pode ser visto na figura 5.6.

Esse tipo de falha demanda um tempo de reparo muito grande, pois envolve a necessidade de limpeza completa do cubículo, substituição de componentes, substituição dos terminais e muflas de MT, além da realização de diversos testes antes do conversor de frequência poder entrar em operação. Neste caso, felizmente o transformador de entrada não foi severamente danificado, tendo apenas sido danificado alguns terminais.

Essa falha foi classificada como muito rara. Para este caso específico de falha de catastrófica cujo tempo de reparo seria muito alto, apenas a redundância total do inversor poderia ser a solução para um rápido retorno.



Figura 5.6-Falha de curto-circuito na entrada do VFD;

Caso o BCSS estivesse em operação, essa falha teria causado um lucro cessante bastante elevado, pois demandou um trabalho de algumas semanas para recompor a integridade do equipamento.

Essa falha nos demonstra que apesar de extremamente raras e esporádicas, uma falha catastrófica envolvendo os componentes internos de média tensão, como por exemplo, o transformador principal, terminais e barramentos de média tensão de entrada, filtro senoidal e terminais de saída, pode ocorrer, gerando transtornos e indisponibilidade bem maiores que uma simples troca de placa ou célula.

5.3 AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE E TEMPO DE REPARO

O tempo de reparo do equipamento em uma plataforma de petróleo ou área remota é um somatório que pode basicamente ser representado pela seguinte fórmula:

$$T_{reparo} = T_{if} + T_{ect} + T_{ls} + T_{rp} \quad (14)$$

Onde:

T_{if} : Tempo identificação da falha;

T_{ect} : Tempo de execução do conserto e testes;

T_{ls} : tempo para liberação do serviço;

T_{rp} : Tempo de preparação para retorno de produção;

Para falhas ocorridas nas células de potência de conversores de frequência CHBI podemos verificar que o tempo de identificação da falha é praticamente nulo, pois o sistema de controle é responsável por identificar e alarmar a causa da falha, por exemplo, identificando uma célula defeituosa e alarmando na sala de controle (CCR) e própria IHM do equipamento.

As células de potência são construídas de forma modular, de maneira a reduzir o tempo de reparo e a necessidade de mão de obra especializada para substituição. Desta forma, o tempo de reparo se traduz basicamente no tempo de desconexão dos

cabos da célula defeituosa e realização da sua substituição por uma célula sadia existente em estoque. Em casos onde não exista célula disponível em estoque, também pode ser utilizado o recurso do *by-pass* da célula, sendo que o VFD poderá fornecer a tensão de saída utilizando deslocamento de neutro.

Porém para falhas no sistema de controle, o tempo de identificação é inversamente proporcional a experiência da equipe que irá realizar a análise, podendo demandar diversas medições e substituição de componentes de modo a realizar a análise por exclusão. Assim, em unidades *offshore* o tempo de reparo pode ser não desprezível (acima de desejável) e causar prejuízos consideráveis.

Percebe-se que os VFD's com tecnologia CHBI existentes no mercado utilizam em seus projetos técnicas de detecção, localização e reconfiguração para aumento de sua disponibilidade (i.e. *Bypass* de célula). A modificação dos projetos dos equipamentos existentes para adoção de técnicas de mascaramento demandaria um alto custo de engenharia e projeto. Deste modo, serão abordadas posteriormente técnicas para aumento da disponibilidade através da estratégia de detecção, localização e reconfiguração para Conversores de frequência Multinível, considerando como sendo a mais adequada para aumento da disponibilidade geral.

Após a identificação da falha, o tempo para execução do serviço e testes é dependente de um fator crucial especialmente em plataformas e locais remotos: a existência e disponibilidade de componentes sobressalentes a bordo. Empiricamente, muitas vezes torna-se necessário a substituição de placas eletrônicas de controle tanto como forma de identificação da falha quanto para o reparo propriamente dito.

A indisponibilidade de células de potência, placas, ventiladores, sensores e outros periféricos a bordo podem influenciar e muito o tempo total de retorno do poço. Caso não disponível a bordo, o componente danificado terá que ser enviado de outra plataforma próxima ou de terra, elevando o tempo para retorno.

Assim, verifica-se que para o processo de retorno rápido do poço à produção, é essencial uma boa gestão de sobressalentes com a devida preservação a bordo.

Os tempos para liberação do serviço e preparação do retorno à produção são praticamente constantes, pois envolvem a sistemática de permissão para trabalho e de rotina operacional respectivamente. São totalmente independentes da avaliação técnicas da falha.

6 TÉCNICAS PARA AUMENTO DA DISPONIBILIDADE DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA PWM MULTINÍVEL (CHBI) APLICADOS AO SISTEMA BCSS

Analisando os resultados da análise de falhas e de confiabilidade executada, torna-se possível propor a utilização de algumas técnicas para mitigação dos efeitos de falhas com relação a carga acionado, no caso específico estudado, as bombas submersíveis.

Tais técnicas se dividem em técnicas que podem ser implementadas na fase de projeto ou realização do sistema do poço, e outras que estão atreladas a atividades de manutenção preventiva.

Pelo princípio de Pareto, as falhas prioritariamente a serem consideradas são aquelas que trazem uma maior indisponibilidade ao sistema BCSS, ou seja, falhas na interface com a automação e sistema de controle dos conversores de frequência.

6.1 TÉCNICAS DE PROJETO PARA O CONVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA BCSS

6.1.1 AUMENTO DA CONFIABILIDADE DAS ALIMENTAÇÕES EXTERNAS

No sistema estudado a disponibilidade da alimentação principal do VFD está diretamente associada à disponibilidade da alimentação de BCS/BCSS. Portanto em plataformas em que o método de elevação é o bombeio centrífugo submerso, torna-se importantíssimo garantir a alta confiabilidade e disponibilidade da geração principal. Para efeitos de simulação serão considerados cenários onde exista disponibilidade total de energia para alimentação do sistema, pois se deseja analisar a confiabilidade do VFD e não do sistema de geração a bordo.

A confiabilidade da alimentação externa dos circuitos de controle e dos ventiladores é essencial, podendo ser empregados circuitos com fontes de maior confiabilidade. Para o circuito de controle, uma forma de aumentar a disponibilidade desta fonte é a utilização de circuito através de fontes ininterruptas de energia (UPS).

Os equipamentos de mercado em geral utilizam tensão de controle em corrente alternada, normalmente 120 volts ou 220 volts. Como técnica de aumentar ainda mais

a disponibilidade do equipamento seria a utilização de equipamentos que fossem projetados e especificados cuja tensão de controle pudesse utilizar a tensão em corrente contínua oriunda diretamente dos bancos de baterias das plataformas de petróleo.

Os bancos de baterias das unidades de produção são em geral confiáveis e robustos, cujo tempo médio entre falhas (MTBF) é diretamente proporcional a qualidade das baterias e da capacitação da equipe de manutenção, sendo estimado da ordem de 6.000.000 h (Wotecoski, 2007). Além disso, na grande maioria das unidades de produção existem baterias redundantes, tornando o sistema de corrente contínua muito confiável.

6.1.2 A REDUNDÂNCIA DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

A redundância completa dos conversores é uma solução intuitiva para aumentar a disponibilidade da alimentação elétrica de conjuntos BCS/BCSS. Porém, sua aplicação prática depende de diversos fatores:

- Implementação durante fase de projeto das plataformas;
- Disponibilidade de espaço físico na plataforma;
- Número de Poços com BCSS;
- Vazão dos poços;
- Custo da implementação;

No caso de plataformas com diversos poços BCSS e com disponibilidade de espaço físico, pode ser adotado um conversor de frequência em stand-by para cada cinco conversores, pois não é esperado que mais de um conversor venha a falhar ao mesmo tempo. O conversor de frequência *standby* pode ser disponibilizado com cabos de saída com comprimento suficiente de forma que possam ser transferidos e conectados na caixa de junção de saída do conversor de frequência defeituoso pela equipe de manutenção de bordo, ou estar conectado a um painel contendo contadores de Média tensão na saída dos conversores de frequência de forma.

A vantagem de possuir um painel de saída com contadores é que a transferência do VFD defeituoso para o *standby* depende apenas da manobra de fechamento

dos contadores, otimizando o tempo de retorno do poço em caso de falha. Porém as desvantagens são a inserção de mais um componente no circuito, espaço físico e o custo do painel.

Para uma análise correta, deve-se levar em consideração o tempo de configuração do conversor de frequência que estava em *standby*, pois deverá possuir a mesma parametrização do conversor que apresentou falha.

6.1.3 REDUNDÂNCIA DA ETAPA DE CONTROLE DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA CHBI

A perda da comunicação entre a sala de controle e o VFD geralmente resulta no desligamento do conjunto BCSS. Portanto os sistemas de automação bem como os meios físicos empregados são igualmente importantes para a disponibilidade do sistema. A redundância da rede de comunicação (Ex: *modbus* e *hardwired*) também é uma técnica empregada que acarreta no aumento da disponibilidade do sistema.

A redundância de sistemas de controle de VFDs CHBI na configuração “*cold standby*” é uma técnica que pode contribuir para aumento da disponibilidade geral do sistema. Conversores de frequência com redundância do sistema de controle não são aplicados na atualidade em sistemas BCS/BCSS. A sua aplicação pode conferir uma altíssima confiabilidade e disponibilidade a estes sistemas, por compensar a fragilidade dos projetos com relação à identificação de falhas em sistemas de controle.

Na indústria nuclear existem conversores de frequência CHBI com redundância da etapa de controle aplicados no controle de velocidade de bombas de recirculação da água de resfriamento dos reatores, ou *boiler water reactor* (BWR), como técnica para aumento da disponibilidade geral devido à criticidade da aplicação. A figura 6.1 ilustra a arquitetura de controle do VFD nesta aplicação.

Além disso, aumentar a modularidade dos dispositivos de controle também podem trazer bons resultados reduzindo o tempo para substituir um componente danificado.

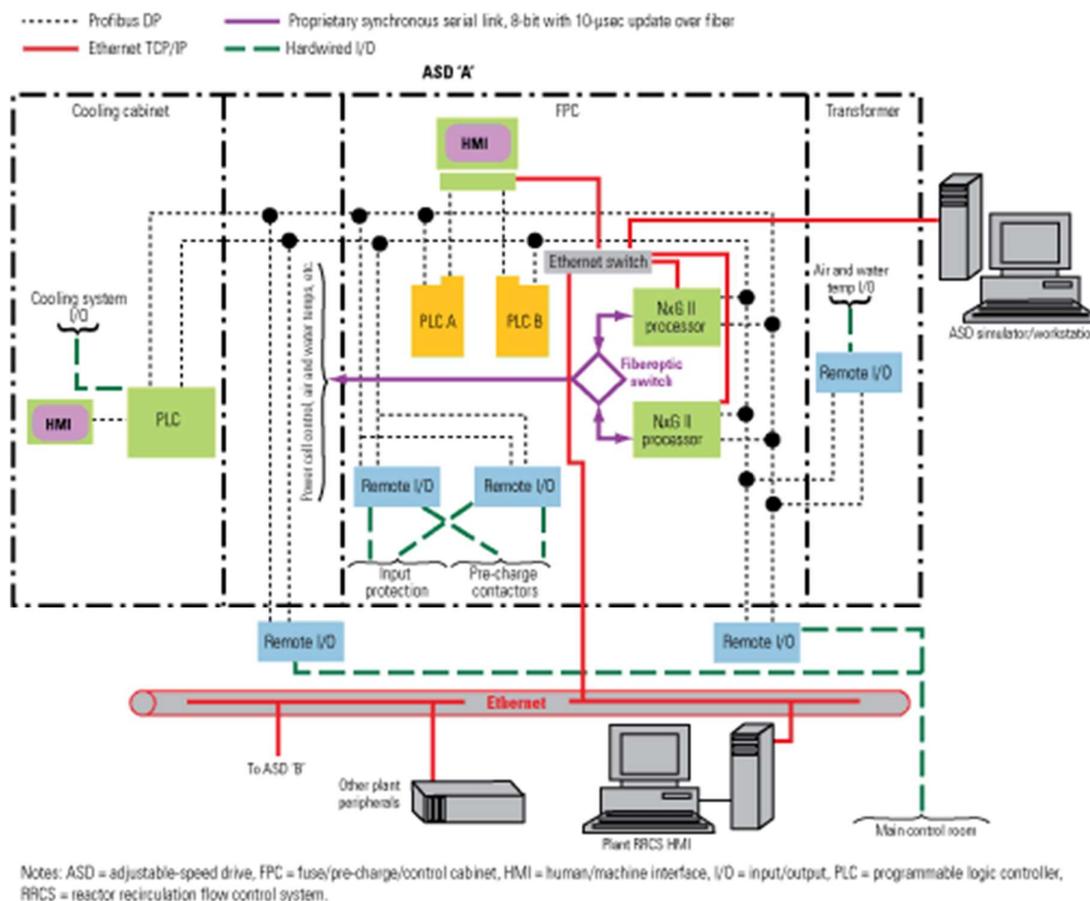


Figura 6.1 Arquitetura de VFD com sistemas de controle e CLPs redundantes utilizado na indústria nuclear. (MORGAN, 2007)

6.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DIAGRAMA DE BLOCOS (RBD)

As simulações foram implementadas utilizando a ferramenta de análise de confiabilidade e disponibilidade através de diagrama de blocos RBD do software Block-Sim™. Cada bloco está representando um grupo de componentes e possui opção de ser modelado através de diversos tipos de distribuição de taxas de falhas, sendo que para os componentes eletrônicos foi adotada a distribuição exponencial.

As taxas de falhas e parâmetros de confiabilidade dos componentes foram obtidas principalmente do histórico de falhas de conversores de frequência Multinível CHBI utilizados na aplicação de BCSS nas plataformas levantados no estudo de análise de falhas das Bacias de Campos, Espírito Santo e Santos. Algumas taxas de falhas foram obtidas em artigos técnicos sobre o tema disponíveis na literatura.

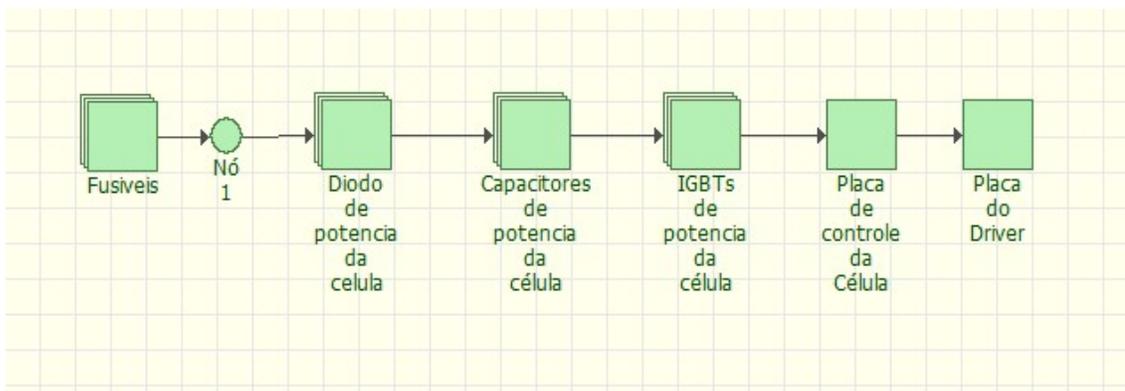


Figura 6.2 Diagrama de blocos de confiabilidade de uma célula de potencia

Conforme explicado anteriormente, a modelagem completa em diagrama de blocos (Figura 6.2) de todos os componentes de um conversor de frequência de media tensão não apenas seria extremamente complexa, mas também seria necessária uma quantidade extremamente grande de dados de falhas para constituir indicadores de taxas de falhas que fossem realmente representativos da realidade.

Com os dados disponíveis, optou-se pela representação de maneira simplificada utilizando os dados de falhas estratificados pelos principais grupos de modos de falhas no drive levantados previamente, como ilustrado na figura 6.3.

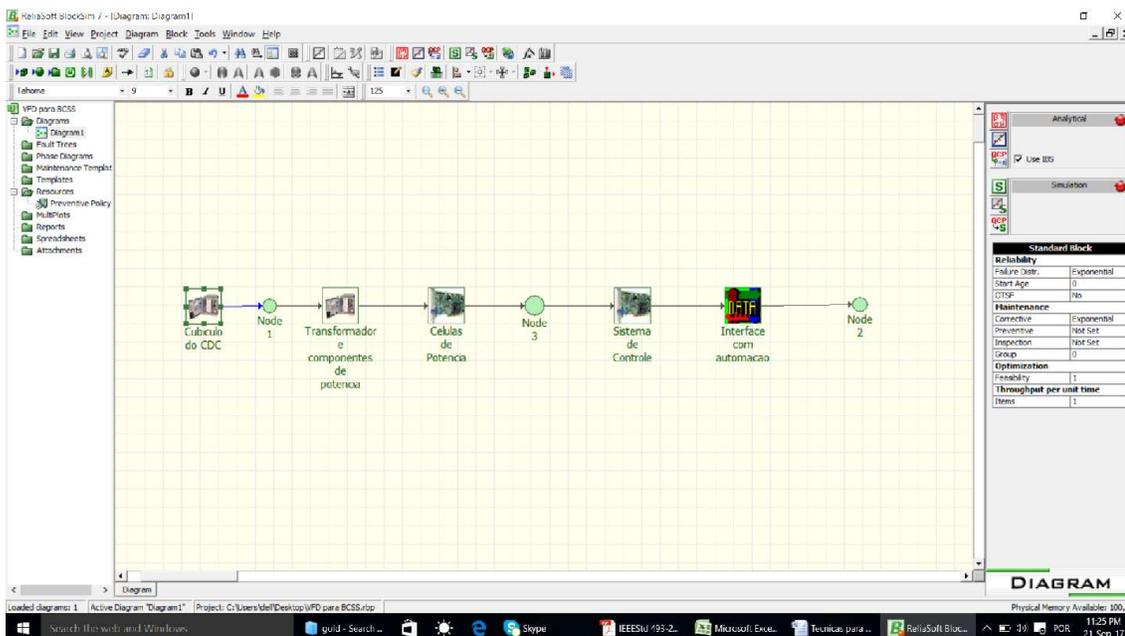


Figura 6.3 Modelagem de confiabilidade de VFD CHBI através de diagrama de Blocos

Para a simulação os disjuntores a montante do conversor localizados nos CDCs foram utilizados dados estatísticos de falhas dos disjuntores de média tensão instalados em painel de acordo com IEEE Std 493-2007 Gold Book.

Considerando os componentes de potência no modelo, disjuntor de entrada e transformador, os resultados indicaram uma disponibilidade média de 99,822% do sistema na topologia convencional.

6.2.1 SIMULAÇÃO DE REDUNDÂNCIA TOTAL DE VFD

A utilização de um sistema totalmente redundante para um conversor aplicado ao BCSS consiste em dois conversores de frequências alimentados cada um pelo seu respectivo cubículo no CDC a montante, porém com as saídas disponíveis para alimentação de um único BCS. Através de cálculos e também intuitivamente, esta é a configuração que fornece a maior confiabilidade para o poço.

Em caso de falha de um VFD, a equipe de bordo poderia passar a rodar o novo poço através do VFD em *standby* apenas com um processo de manobra bastante rápida, possibilitando a investigação da causa raiz da falha e realização de manutenção corretiva de forma totalmente isolada do conversor de frequência.

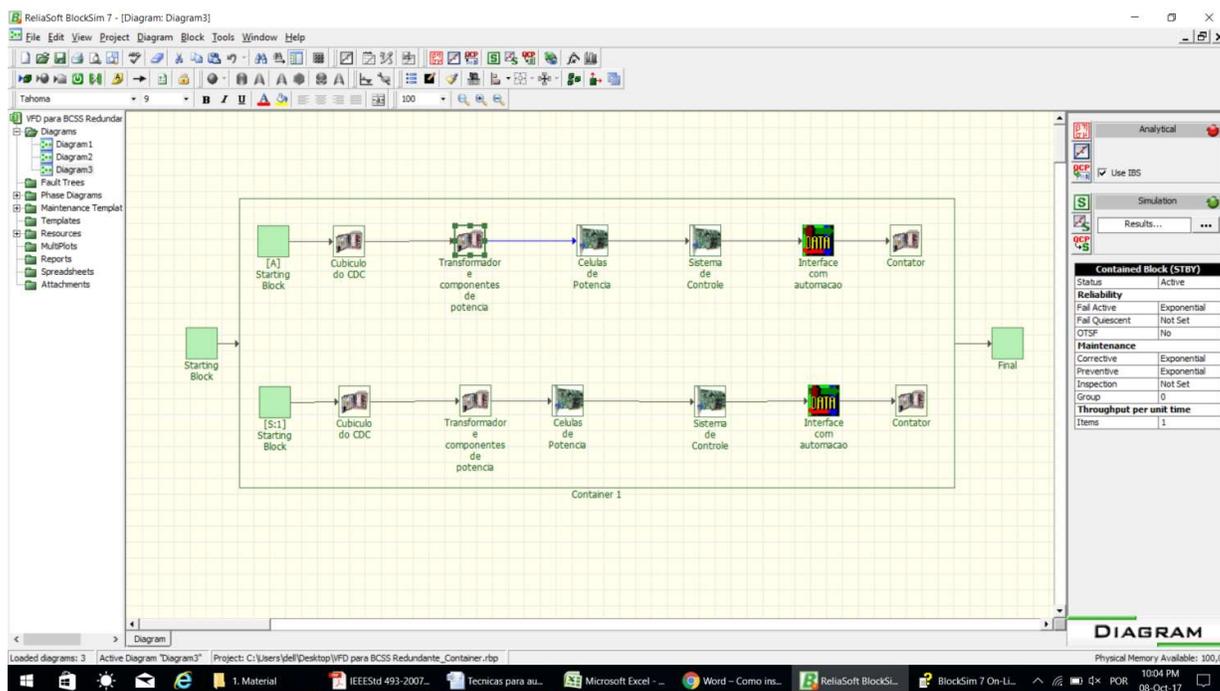


Figura 6.4- Modelagem de confiabilidade de VFD com redundância total no acionamento de BCS

As simulações demonstraram que a disponibilidade geral para um sistema com VFD redundante, considerando os dados de falhas levantados durante este estudo para equipamentos na topologia convencional é de 99,999%. Obviamente para este resultado ser factível na prática, o conversor de frequência em *standby* deve possuir sua manutenção preventiva em dia, além de estar devidamente parametrizado e configurado para sua aplicação assim que solicitado.

Devido às limitações de espaço físico e peso existentes nas plataformas de petróleo, além do custo de conversor de frequência adicional, em plataformas com diversos poços com BCSS torna-se interessante analisar a possibilidade de aplicar um VFD redundante em *standby* para um determinado grupo de poços.

Empiricamente, porém associados aos resultados obtidos das simulações, a utilização de um conversor reserva em *standby* para cada cinco conversores em produção em plataformas com alto número de poços acionados por VFD, pode gerar um aumento considerável de confiabilidade, mas também em harmonia com os demais requisitos de peso, espaço e também de custo.

6.2.2 SIMULAÇÃO DE REDUNDÂNCIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DO VFD

Pela análise de Pareto, os maiores problemas com relação à indisponibilidade e tempo de retorno dos conversores de frequência aplicados BCSS são acarretados por falhas no sistema de controle e no sistema de automação, muito devido à sua complexidade e necessidade de mão de obra especializada. Portanto, foram realizadas simulações com redundância no sistema de controle e interface de automação para verificar o percentual de disponibilidade possível de ser alcançado.

Com base no histórico de falhas e dados estatísticos, as simulações realizadas indicam que aplicando VFDs com redundância no sistema de controle e automação pode se alcançar uma disponibilidade média de 99,942%, considerando uma boa gestão de sobressalentes para a etapa de potência.

A tabela 4 informa os resultados das simulações com relação à disponibilidade dos conversores nas diferentes configurações.

Tabela 4-Disponibilidade calculada no simulador para os diversos equipamentos

Resultados das simulações			
Equipamento	Tempo	Etapa Potência Células disponíveis	Disponibilidade
VFD convencional	20 anos	S	99,8958%
VFD convencional	20 anos	-	99,8931%
VFD redundante	20 anos	S	99,9930%
VFD redundante	20 anos	-	99,9897%
VFD controle redundante	20 anos	S	99,9423%
VFD controle redundante	20 anos	-	99,9417%

6.3 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

6.3.1 IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA POR OPORTUNIDADE

Por razões de segurança, para realização de manutenção preventiva nos conversores de frequência aplicados em sistemas BCS/BCSS é necessária obrigatoriamente a parada do poço, acarretando em uma respectiva perda de produção. Desta forma, para este equipamento geralmente são criados planos de manutenção por oportunidade.

São realizadas tais manutenções aproveitando as paradas programadas de produção das plataformas, geralmente realizadas com uma periodicidade de aproximadamente três anos. Podem ser também realizadas por oportunidade, aproveitando paradas não programadas. Nas paradas programadas devem sempre no mínimo ser programada uma limpeza interna detalhada e uma inspeção visual para identificar componentes com desgaste ou na iminência de entrarem em falha ou defeito.

A substituição de componentes com algum sinal de degradação, mesmo que ainda não apresentem falha ou defeito, pode contribuir significativamente para a confiabilidade do conversor. Placas eletrônicas, fontes, sensores, conectores e fibra óticas que já apresentem sinais de desgaste devem ser substituídas preventivamente.

A substituição preventiva de equipamentos dinâmicos como exaustores e ventiladores também são importantes e contribuem para o aumento da confiabilidade.

Capacitores eletrolíticos empregados nas células de potência devem ser substituídos preventivamente. Mesmo atuando em condições ideais de temperatura, a vida útil dos capacitores é de aproximadamente 10 anos. Uma substituição preventiva pode evitar falhas e danos maiores ao conversor. Em condições mais severas de temperatura, a troca deve acompanhar a estimativa de vida útil diminuindo o tempo para substituição.

6.3.2 GESTÃO DE SOBRESSALENTES

Para obter um bom resultado de tempo de reparo em plataformas e locais remotos, deve ser implementada uma boa gestão de sobressalentes e componentes reservas disponíveis em caso da necessidade de manutenção corretiva dos conversores de frequência de média tensão.

Os componentes muitas vezes são específicos para cada tipo de inversor. Placas eletrônicas, sensores e até mesmo cartões de memória são intrínsecos de cada modelo de *drive*.

Muitas unidades fabris de produção e plataformas utilizam softwares ou sistema integrado para auxiliar no gerenciamento da manutenção, i.e., SAP R3™ Módulo PM. Estes softwares, quando bem utilizados, podem promover o suprimento automático dos componentes reservas, e emitir relatórios sobre a quantidade de sobressalentes a bordo por determinado tipo de equipamento.

Devem ser mantidas células reservas a bordo, de modo a permitir uma rápida substituição quando necessário, bem como um estoque de placas e módulos eletrônicos. Ventiladores e exaustores reservas devem ser sempre mantidos em estoque a bordo sempre que possível.

Uma maior modularidade do sistema de controle dos conversores de frequência, quando aplicada no projeto do fabricante, geralmente resulta em diversos efeitos benéficos de manutenibilidade para sistemas em locais remotos e na gestão de sobressalentes. Tal fato ocorre devido os componentes estarem agrupados em módulos, diminuindo o número geral de itens diversos necessários em estoque.

Adicionalmente, os componentes modularizados contribuem muito para a diminuição do tempo de identificação da falha e no tempo de execução do reparo, pois

demanda uma análise tecnicamente menos complexa pela equipe de manutenção, contribuindo para um menor tempo médio de reparo.

6.4 ESTUDO DE CASO COM ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

6.4.1 COMPARAÇÃO DE CUSTO DE PROJETO

O custo do conversor de frequência representa uma fração muito pequena do investimento necessário para um projeto de um poço com sistema BCS/BCSS. Mesmo sendo equipamento chave para o bom funcionamento do sistema, o custo do conversor de frequência é menor que 1% do custo total do projeto de um poço BCSS.

Como explicado anteriormente, cada parada do conjunto BCS/BCSS possui impacto na sua vida útil principalmente devido ao gradiente térmico. Eventos de parada do poço devido a um desligamento externo ou falta de energia na plataforma, resultando na indisponibilidade do poço após o retorno da energia e restabelecimento da planta não são incomuns. Portanto, o aumento de confiabilidade e disponibilidade do conversor de frequência traz um ganho imensurável apenas referente a essa questão.

Porém uma avaliação mais direta da viabilidade econômica do projeto passa também por uma análise do lucro cessante devido às diferenças de confiabilidade e tempo de reparo estimado entre os projetos, considerando obviamente também as diferenças entre seus custos de implantação.

A realização de uma comparação econômica entre um projeto convencional e outro aplicando técnicas para aumento da disponibilidade do conversor de frequência CHBI passa necessariamente por avaliação das características de um poço produtor. Para uma análise e estudo de caso foram levantadas as principais características de um poço produtor existente na Bacia de Campos onde o método de elevação preponderante é o BCSS alimentado por conversor de frequência CHBI de Média tensão.

Dados e características do poço com BCSS - PPT-37:

Vazão inicial de bruta com BCSS: $2.200 \text{ m}^3/\text{dia} \times 6,289 = 13.838 \text{ bbl}$;

BSW médio: 35%;

Número de poços com BCSS na plataforma: 1;

Disponibilidade média do VFD na arquitetura convencional: 0,9989

Disponibilidade estimada para o VFD aplicando redundância total: 0,9999

Diferença de produção estimada entre VFD com redundância para VFD convencional:

$$\Delta_{oleo} = (D_R - D_C) \times d \times anos \times Q_{bruta} \times (1 - BSW) \quad (15)$$

$$(0.9999 - 0.9989) \times 360 \times 10 \times 13.838 \times (1 - 0,35) = 32.380,9 \text{ bbl.};$$

Considerando um preço estimado de US\$ 50/bbl, esta análise simplificada mostra uma redução da perda de receita de mais de US\$ 150.000,00 por ano em média. A otimização da produção pode ser muito rentável e o tempo de retorno do investimento muito curto na comparação dos projetos e sistemas convencionais comparativamente com o uso de conversores de frequência e sistemas com estrutura mais confiável. A avaliação financeira precisa de ser feita para cada poço e precisa de ser consistente, realizando o devido ajuste para variações de preço do barril de petróleo.

Esta análise não considera o aumento de vida do conjunto BCS devido a maior confiabilidade de energia para sua alimentação, reduzindo os ciclos térmicos devido ao número de novas partidas. Devido ao grande número de variáveis envolvidas é difícil de determinar o aumento de vida, mas o retorno financeiro devido à postergação de intervenções com sonda e aumento de vida útil do BCSS, em muitas aplicações pode superar em muitas vezes o ganho com a otimização das perdas de produção.

Também se torna evidente que o preço do barril do petróleo possui uma grande relevância na análise econômica, sendo que aqui foi abordada de forma bastante simplificada por não ser o foco do trabalho. Porém, a análise econômica para estimar o valor do barril de petróleo e valor do dólar é realizada de forma sistemática pelas empresas de produção de petróleo com base em modelos matemáticos com objetivo de minimizar o erro. Uma análise econômica mais elaborada, considerando o fluxo de caixa ao longo dos anos, pode acrescentar ainda mais valor a esta análise e impactar na escolha da técnica a ser implementada caso-a-caso.

7 CONCLUSÃO

O aumento da confiabilidade e disponibilidade de sistemas de bombeamento Centrífugo Submersos tem sido buscado incessantemente pela indústria de petróleo. Tal busca ocorre devido aos altos custos que envolvem as intervenções para substituição dos equipamentos submarinos, devido à necessidade afretamento de sondas especiais e ao alto lucro cessante envolvido em paradas não programadas deste sistema.

O conversor de frequência é um equipamento de superfície chave na operação deste Sistema, porém representa um custo menor que 1% do projeto de um poço submarino. As técnicas que possam contribuir para uma alta disponibilidade deste equipamento contribuem diretamente para um aumento da disponibilidade do sistema BCS / BCSS e devem ser adotadas na fase de projeto e especificação técnica.

Paralelamente, a confiabilidade e a disponibilidade de conversores de frequência de média tensão são variáveis importantes nas aplicações industriais e sistemas de produção que utilizam este tipo de equipamento. Tal característica significa que os fabricantes dos conversores de frequência precisam sempre trabalhar na melhoria contínua do projeto, implementando novas técnicas de projeto e estudos para evolução dos equipamentos de forma a atenderem os requisitos dos sistemas em que estão sendo aplicados.

Para aplicações muito especiais como sistemas em que é necessária uma confiabilidade extrema, por exemplo, alto lucro cessante, requisitos extremos de segurança como instalações nucleares ou aplicações em áreas remotas, algumas técnicas de projeto podem ser adotadas para aumentar ainda mais a confiabilidade e disponibilidade.

No caso da aplicação no sistema de bombeio centrifugo submerso, devido à possibilidade de dano ao BCSS, ao alto lucro cessante envolvido em paradas de produção não programadas, além de serem equipamentos fisicamente localizados em plataformas e locais remotos, com dificuldade de mobilização rápida de mão de obra especializada, é desejável adotar técnicas para obtenção de uma altíssima disponibilidade ainda maior para os conversores de frequência.

Aspectos que podem contribuir para aumentar a disponibilidade dos conversores de frequência contribuem para um aumento na disponibilidade do sistema BCS. Novas técnicas e equipamentos podem ser considerados na fase de projeto e especificação técnica para minimizar os problemas de campo.

As técnicas que podem ser implementadas para aumento da disponibilidade do VFDs dependem de diversos fatores intrínsecos das plataformas de produção, desde a disponibilidade de espaço físico a bordo da quantidade de poços com este tipo de sistema na plataforma e da vazão do poço produtor. Portanto, precisam ser cuidadosamente avaliadas caso a caso durante a fase de projeto.

A análise de falhas realizada nos equipamentos instalados nas Bacias de Campos, Santos e Espírito Santo trouxeram valiosas informações quanto aos principais modos de falhas. Essa análise de falha permitiu concluir que os conversores de frequência de Média tensão CHBI utilizados hoje em sistemas BCSS em águas profundas são equipamentos confiáveis e robustos, com disponibilidade média acima de 99,8%, podendo ser utilizados em aplicações críticas. Porém, técnicas podem ser implementadas para melhorar ainda mais a confiabilidade e disponibilidade.

Na análise de falhas realizada, foi possível estratificar as falhas em grupos e verificar que as falhas em células de potência representam um potencial pequeno de *downtime*, devido às diversas características já implementadas pelos fabricantes nos conversores, quanto à identificação da célula defeituosa pela IHM do equipamento, modularidade e intercambiabilidade na substituição e possibilidade de utilização de by-pass para as células. Simplesmente precisa estar associada também à uma boa gestão de sobressalentes a bordo.

No entanto, problemas obtidos na interface com automação e nos sistemas de controle dos conversores CHBI se demonstraram como o principal motivo de perda de produção e paradas, devido principalmente ao fato de que muitas vezes suas causas raízes são difíceis de identificar rapidamente pela equipe de bordo, demandando mão de obra especializada.

A alimentação auxiliar necessária para o sistema de controle interno do conversor de frequência deve ser oriunda de fonte confiável, podendo ser implementada através de UPS redundantes ou diretamente em corrente contínua através dos bancos de baterias das plataformas para o controle. Da mesma forma, a alimentação para os

ventiladores / exaustores também necessita ser confiável, podendo ser oriunda dos circuitos mais confiáveis do sistema de distribuição da plataforma.

Foi possível identificar que a redundância dos conversores de frequência para alimentação de BCS/BCSS pode ser uma boa prática, desde que implementada durante a fase de projeto, e dependendo do número de poços com BCS/BCSS na plataforma. Uma simulação foi realizada e verificou-se que um conversor reserva para cada 5 drives operacionais pode ser uma boa técnica em unidades com grande número de poços com VFD.

A redundância do controle e automação dos conversores de frequência também pode resultar em aumento significativo da confiabilidade e disponibilidade do sistema, pois permitiria um rápido retorno de produção através da comutação do controle utilizado, podendo a análise da falha ser agendada para uma parada programada de produção.

A realização da manutenção preventiva também é de fundamental importância para uma alta disponibilidade dos conversores. Para os conversores de frequência utilizados no acionamento de BCSS é recomendada a realização de manutenção preventiva por oportunidade, aproveitando as paradas programadas de produção das plataformas.

As conclusões obtidas através das simulações é que para poços de produção de alto fluxo, a implementação de técnicas de alta confiabilidade aliada uma boa gestão de sobressalentes e manutenção preventiva a bordo, podem trazer resultados muito bons em comparação com o equipamento convencional.

8 REFERÊNCIAS

Aguiar, M. P. S. Análise quantitativa do histórico de falhas e desempenho dos conjuntos BCS e BCSS da Bacia de Campos. V seminário de elevação artificial e escoamento. Nov/2011.

BILLINTON, R. ALLAN, R. N. **Reliability Evaluation of Power Systems**. Second Edition. New York: Plenum Press, 1996. 514 p.

Corzini, K.A., Hossein. Wielebski, M.W., Jean-Luc.Peng, F. Z., Wang, J. **Control of Cascaded Multilevel Inverters**, IEEE Transactions on Power Electronics, 2004.

CREVELING, C.J. **Increasing the reliability of electronic equipment by the use of redundant circuits**. *Proceedings of the IRE*. New York, 44(4):509- 515, abr.1956.

DUTRA, D. MOURENTE, J. Drives de Media Tensão versus Drives de Baixa Tensão com transformadores adaptadores. 7 Encontro de Engenharia elétrica da Petrobras. Dez /2003.

IEEE Recommended Practice Std 493™-2007- Design of reliable industrial and commercial power systems (Gold Book) – Reliability

Iman-Eini, Hossein.Schanen, Jean-Luc. Farhangi, Shahrokh .Khakbazan-Fard, Mahboubeh. **A Fault-Tolerant Control Strategy for Cascaded H-Bridge Multilevel Rectifiers**, Journal of power electronics, vol 10, 2010.

International standard IEC 61025 - Fault tree analysis (FTA).Second edition 2006-12.

MORGAN, J.W.; GODE, T. BWR Recirculating pump adjustable speed drive performance and control affects.2010. **18th International Conference on Nuclear Engineering**. Xian. China.

MORGAN, J.W.; Upgrade your BWR recirc pumps with adjustable speed drives. 11/15/2007.

MOURENTE, J. **Apostila de Acionamento Elétrico e Eletrônica de Potência**, Curso de Formação de Engenheiros De Equipamentos – Elétrica. Rio de Janeiro, 2008.

OREDA 2002.Offshore and reliability Data. 4th Edition. SINTEF Industrial management. Distribuído por Det Norske Veritas (DNV).

Shaver, C.D., Cain, S.A. Partial Discharge and Partial Discharge Testing for ESP Motors. IEEE PCIC 2011.

SANTOS, A. A. Bombeio Centrífugo Submerso – BCS. Monografia de Especialização, Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE/UFRJ. p. 43 Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, J.A.G.; OLIVEIRA, P.S. **Bombeamento Centrífugo Submerso**. 1º Edição. Petróleo Brasileiro S.A, 2002, 74 p.

THOMAS, José E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004, 250 p.

Weber, Taisy Silva. Tolerância à Falhas: Conceitos e Exemplos, Programa de Pós-Graduação em Computação - Instituto de Informática – UFRGS, Disponível em <http://www.inf.ufrgs.br/~taisy/disciplinas/textos/ConceitosDependabilidade.pdf>, Capturado em 15/09/2014, Porto Alegre, 2001.

White Paper **TD02000001E**. The Reliability of Neutral Point Clamped vs. Cascaded H-Bridge Inverters. Eaton Corporation. 2009.

Wotecoski, A. Confiabilidade aplicada a sistemas críticos de alimentação elétrica. Aumento da disponibilidade e abandono do sistema tradicional. 9 Encontro de Engenharia elétrica. Petrobras. Dez/2007.

Zhou, Liang. Smedley, Keyue Ma. **Reliability comparison of multi-level inverters for motor drive**. IEEE, 2009.

9 ANEXO I

Tabela com registros de dados de falhas de VFD no acionamento de BCSS com TTR

Poço	Data da falha	Data do retorno	TTF (h)	TTR (h)	Sistema
GLF-27	13-3-10 3:40 PM	13-3-10 4:42 PM	1719,66	1,03	Sistema de Controle
GLF-28	24-4-10 7:50 AM	25-4-10 2:30 PM	2719,83	30,67	Sistema de Controle
GLF-28	13-6-10 9:10 AM	13-6-10 8:50 PM	1170,66	11,67	Sistema de Controle
GLF-28	14-6-10 5:30 PM	15-6-10 1:13 PM	20,66	19,72	Sistema de Controle
JUB-09	2-2-11 9:35 AM	2-2-11 6:00 PM	681,58	8,42	Interface com automação
JUB-06	9-2-11 10:30 PM	11-2-11 7:34 PM	9718,50	45,07	Sistema de Controle
JUB-06	8-3-11 1:00 PM	12-3-11 9:00 PM	593,43	104	Interface com automação
GLF-27	29-3-11 10:15 AM	2-4-11 2:30 PM	9137,55	100,25	Sistema de Controle
JUB-18	18-6-11 11:00 AM	18-6-11 8:40 PM	3851	9,67	Interface com automação
GLF-27	21-2-12 3:05 PM	21-2-12 11:00 PM	7800,58	7,92	Sistema de Controle
ESP-23	12-5-12 3:20 AM	12-5-12 8:12 PM	496,13	16,87	Sistema de Controle
MA-15	8-3-13 8:00 PM	9-3-13 7:45 PM	19171,75	23,75	Interface com automação
PPT-12	21-2-14 7:00 AM	21-2-14 10:00 PM	2439,66	15,00	Interface com Automação
PPT-12	14-5-14 7:00 AM	20-5-14 7:00 AM	1953,00	144,00	Interface com Automação
ESP-38	15-8-14 7:00 AM	18-8-14 7:00 AM	22663,00	72,00	Interface com Automação
JUB-27	2-11-14 3:56 AM	11-11-14 4:30 PM	33363,93	228,56	Interface com automação
PPT-16	17-3-15 3:27 PM	17-3-15 9:12 PM	56,23	5,75	Células de Potência
PPT-37	13-12-15 10:28 AM	13-12-15 12:52 PM	16746,75	2,40	Interface com Automação
PPT-37	14-12-15 8:43 AM	14-12-15 5:25 PM	19,85	8,70	Interface com Automação
MA-15	5-3-16 6:09 PM	7-3-16 11:30 AM	937,87	41,35	Sistema de Controle
PPT-37	10-3-16 10:13 AM	10-3-16 1:39 PM	2080,8	3,43	Células de Potência
BLA-1	19-5-16 5:01 PM	22-5-16 1:19 PM	19073,02	68,30	Células de Potência
MA-15	1-6-16 4:49 PM	1-6-16 5:25 PM	488,52	54,21	Interface com automação