

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM MONTAGEM INDUSTRIAL

MARCELO FERREIRA DE SOUZA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE
DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE PLATAFORMAS
MARÍTIMAS DE PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS NATURAL**

Niterói, RJ
2019

MARCELO FERREIRA DE SOUZA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE
DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE PLATAFORMAS
MARÍTIMAS DE PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS NATURAL**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Orientador:

Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo

Coorientador:

Prof. Dr. Paulo Roberto Duailibe Monteiro

Niterói, RJ

2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S719e Souza, Marcelo Ferreira de
Estudo da aplicação de dispositivos de limitação de corrente de curto-circuito em sistemas elétricos de plataformas marítimas de produção de óleo e gás natural / Marcelo Ferreira de Souza ; Guilherme Gonçalves Sotelo, orientador ; Paulo Roberto Duailibe Monteiro, coorientador. Niterói, 2019.
141 p. : il.

Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PMI.2019.mp.01283387760>

1. Indústria petrolífera. 2. Instalação de estrutura offshore. 3. Instalação elétrica Industrial. 4. Curto-circuito. 5. Produção intelectual. I. Sotelo, Guilherme Gonçalves, orientador. II. Monteiro, Paulo Roberto Duailibe, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

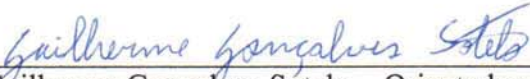
MARCELO FERREIRA DE SOUZA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE DE
CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE PLATAFORMAS MARÍTIMAS DE
PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS NATURAL**


Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em
Montagem Industrial da Universidade Federal
Fluminense, como requisito parcial para obtenção do
Grau de Mestre. Área de Concentração: Montagem
Industrial.

Aprovada em, 21 de agosto de 2019.


BANCA EXAMINADORA




Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo – Orientador - Presidente
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Paulo Roberto Duailibe Monteiro – Coorientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Luís Fernando Correa Monteiro
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Dedico este trabalho aos meus pais, sempre presentes, a minha esposa Viviane, pelo carinho e companheirismo, e aos meus queridos filhos, Júlia e João Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense – UFF pela oportunidade de retorno e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus orientadores, professores Guilherme Gonçalves Sotelo e Paulo Roberto Duailibe Monteiro, pela atenção, direcionamento e incentivo para a elaboração desta dissertação.

Ao doutorando André Tiago Queiroz, pela inestimável ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa e aos meus filhos pela compreensão e carinho.

RESUMO

Este trabalho aborda os conceitos e aplicações dos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito em sistemas elétricos industriais, com ênfase em instalações elétricas de plataformas marítimas do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), que estão operando na exploração e produção de óleo e gás natural no Brasil. Inicialmente, o trabalho apresenta uma base teórica das correntes de curto-circuito nos sistemas elétricos. Em seguida, os principais tipos de dispositivos limitadores de curto-circuito são apresentados, descrevendo as suas características e os princípios utilizados para redução das magnitudes das correntes de curto-circuito das instalações elétricas. O foco do trabalho é analisar uma alternativa ao dispositivo limitador de corrente de curto-circuito pirotécnico empregado atualmente como padrão nos painéis principais destes FPSOs. Apesar da comprovada eficácia do dispositivo pirotécnico quanto à redução das magnitudes das correntes de curto-circuito do sistema elétrico do FPSO, a sua atuação tem restrições operacionais à plena operação da plataforma e, conseqüentemente, perdas na produção de óleo e gás. Isto posto, a proposta do trabalho é analisar a viabilidade da instalação de um reator limitador de corrente em paralelo com o dispositivo pirotécnico com o objetivo de mitigar os impactos na curva de produção quando da sua atuação. Para a análise desta proposta, o sistema elétrico de um FPSO típico é modelado na ferramenta computacional ATP - *Alternative Transient Program*, que é um programa específico de análise de transitórios eletromagnéticos. Através das simulações no modelo computacional desenvolvido, são analisados o desempenho dinâmico e a viabilidade técnica da aplicação da alternativa proposta neste trabalho. Por fim, conclui-se que o desempenho da proposta é satisfatória e se mostra como uma alternativa de instalação no sistema elétrico do FPSO, buscando uma maior confiabilidade na curva de produção planejada da unidade.

Palavras-chave: Indústria do Petróleo. Instalações Marítimas. Sistemas Elétricos Industriais. Limitadores de Corrente de Curto-circuito.

ABSTRACT

This work presents the concepts and applications of Fault Current Limiters in industrial power systems, emphasizing on the electrical installations of FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading), which is a kind of oil and gas offshore platforms operating in Brazilian pre-salt fields. Initially, the work describes a theoretical basis of the short-circuit currents in the FPSO electrical power systems. After that, the main types of Fault Current Limiters are presented, highlighting their characteristics and the principles that are used for reducing the magnitudes of the short-circuit currents. The focus of this work is to study the pyrotechnic Fault Current Limiters used in the main electrical panels of the FPSOs currently. Despite of its effectiveness in reducing short-circuit currents, there are operational restrictions when those devices are triggered on the power system of oil and gas production of the platform. The proposal of this work is to analyze a reactor limiter in parallel with the pyrotechnic Fault Current Limiter in order to mitigate the impacts on the oil and gas production curves. In order to analyze this proposed arrangement, a typical electrical system used in Brazilian FPSOs was modeled in the ATP - Alternative Transient Program which is a specific computer program of electromagnetic transient analysis. Through digital simulations, the dynamic performance and feasibility of alternative proposed were analyzed. Finally, it is concluded that the performance of the arrangement proposed of Fault Current Limiter could be as an alternative in the typical electrical power system of FPSO.

Keywords: Petroleum Industry. Offshore Installations. Electrical Equipment Industry. Fault Current Limiters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 2.1	Corrente de curto-circuito e suas componentes.	23
Fig. 2.2	Momento do curto-circuito mais desfavorável.	24
Fig. 2.3	Momento do curto-circuito mais favorável.	24
Fig. 2.4	Curva do curto-circuito próximo ao gerador.	25
Fig. 2.5	Representação gráfica comparativa entre curvas de curto-circuito com o uso do DLC.	27
Fig. 2.6	Arranjo unifilar típico simplificado de aplicação de DLCs.	28
Fig. 2.7	Circuito básico de aplicação do reator limitador.	30
Fig. 2.8	Estrutura típica de um reator com núcleo de ar.	33
Fig. 2.9	Arranjo trifásico com reatores sobrepostos.	34
Fig. 2.10	Diagrama simplificado de um DLC pirotécnico.	37
Fig. 2.11	Inserto comum de um DLC pirotécnico.	37
Fig. 2.12	Exemplos de taxa de elevação da corrente.	38
Fig. 2.13	Detalhamento construtivo de um limitador pirotécnico.	38
Fig. 2.14	Exemplo de um circuito elétrico sob condições de curto-circuito.	39
Fig. 2.15	Curva da corrente de curto-circuito com atuação do DLC pirotécnico.	39
Fig. 2.16	Arranjo do DLC pirotécnico em paralelo com o reator limitador.	41
Fig. 2.17	Formas das curvas das correntes de curto-circuito prospectiva, com DLC pirotécnico e com DLC pirotécnico em paralelo com um reator limitador.	42
Fig. 2.18	Diagrama de fase de um material supercondutor.	44
Fig. 2.19	Detalhe do sistema criogênico do dispositivo supercondutor.	48
Fig. 2.20	Exemplo de DLCs supercondutores em aplicação.	50
Fig. 2.21	DLC supercondutor do tipo indutivo.	51
Fig. 2.22	Modelo básico de um dispositivo TCSC.	56
Fig. 2.23	Modelo básico de um dispositivo TCSC com MOV.	57
Fig. 2.24	Modelo básico de um IPC.	59
Fig. 3.1	Diagrama unifilar de um FPSO com 6 geradores de 13,8 kV.	64
Fig. 3.2	Diagrama unifilar simplificado típico de um FPSO do pré-sal.	68
Fig. 4.1	Curva das correntes de ajuste de disparo do DLC pirotécnico.	80
Fig. 4.2	Modelo simplificado do DLC pirotécnico.	82

Fig. 4.3	Formas das curvas da corrente e tensão quando da fusão do elo fusível.	84
Fig. 4.4	Formas das curvas da corrente e tensão quando da fusão do elo fusível.	84
Fig. 4.5	Formas das curvas da corrente e tensão extraídas do modelo do ATPdraw.	85
Fig. 4.6	Corrente de curto-circuito de contribuição permissível por semi-barra.	88
Fig. 5.1	Corrente de partida direta do motor de 11 MW / 13,8 kV.	92
Fig. 5.2	Corrente de partida direta do motor de 960 kW / 4,16 kV	92
Fig. 5.3	Curvas das tensões na partida direta do motor de 11 MW em modo normal de operação.	94
Fig. 5.4	Curvas das tensões na partida direta do motor de 11 MW em modo contingencial de operação.	96
Fig. 5.5	Corrente de curto-circuito prospectiva sem o DLC no painel principal.	100
Fig. 5.6	Curva da corrente de curto-circuito que atravessa o DLC pirotécnico da semi-barra B para semi-barra A.	100
Fig. 5.7	Curvas das correntes de curto-circuito no Caso 1 com DLC pirotécnico.	102
Fig. 5.8	Curva da corrente de transição entre o DLC pirotécnico e o reator limitador.	103
Fig. 5.9	Curvas das correntes de curto-circuito no Caso 1 com DLC pirotécnico em paralelo com o reator limitador.	103
Fig. 5.10	Curvas das correntes que atravessam o reator limitador da semi- barra B para semi-barra A.	104
Fig. 5.11	Curvas das correntes de curto-circuito no Caso 1 com o reator limitador.	105
Fig. 5.12	Comparativo das curvas das correntes de curto-circuito no Caso 1.	106
Fig. 5.13	Curvas das correntes que atravessam o DLC pirotécnico da semi- barra B para semi-barra A quando do curto-circuito no Caso 3.	108
Fig. 5.14	Comparativo das correntes de curto-circuito no Caso 3.	109
Fig. 5.15	Corrente de curto-circuito que atravessa o DLC pirotécnico no Caso 4.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Principais Dispositivos Limitadores de Curto-Circuito para SEIs.	29
Tabela 2.2	Valores nominais de DLC pirotécnicos comerciais.	36
Tabela 2.3	Especificação Técnica de um DLC pirotécnico de um FPSO típico.	40
Tabela 2.4	Principais projetos de DLCs supercondutores resistivos.	49
Tabela 3.1	Demanda do Sistema de 480 V.	70
Tabela 3.2	Limites de regulação de tensão.	72
Tabela 3.3	Limites de regulação de frequência.	72
Tabela 4.1	Valores de ajuste no DLC pirotécnico modelado.	85
Tabela 4.2	Máxima corrente de curto-circuito de uma semi-barras do painel de 13,8 kV.	87
Tabela 5.1	Demanda máxima do FPSO típico.	90
Tabela 5.2	Motores selecionados para partir no estudo de afundamento de tensão.	91
Tabela 5.3	Afundamento de tensão em condição normal de operação com $V = 1,0$ pu.	93
Tabela 5.4	Afundamento de tensão em condição normal de operação com $V = 1,1$ pu.	93
Tabela 5.5	Afundamento de tensão com $V = 1,0$ pu e o reator na interligação do painel.	95
Tabela 5.6	Afundamento de tensão com $V = 1,1$ pu e o reator na interligação do painel.	95
Tabela 5.7	Casos do estudo dos curtos-circuitos trifásicos.	99
Tabela 5.8	Especificação das correntes de curtos-circuitos dos painéis.	99
Tabela 5.9	Correntes de curto-circuito nos casos 1, 2, 3 e 4.	111
Tabela 5.10	Parâmetro de um reator limitador para o FPSO.	113

GLOSSÁRIO

ANSI	<i>American National Standards Institute.</i>
ASR	<i>Analogue Simplified Regulator.</i>
ATP	<i>Alternative Transient Program.</i>
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator.</i>
CCM	Centro de Controle de Motores.
CDC	Centro de Distribuição de Cargas.
DLC	Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-circuito.
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission System.</i>
FPSO	<i>Floating, Production, Storage and Offloading.</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current.</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission.</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device.</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
IMO	<i>International Maritime Organization.</i>
<i>Inrush</i>	Corrente de energização dos transformadores elétricos de potência.
IPC	<i>Interphase Power Controller.</i>
MODU CODE	<i>Mobile Offshore Drilling Units Code.</i>
<i>Onshore</i>	Terrestre
<i>Offshore</i>	Marítimo
PMS	<i>Power Management System.</i>
pu	por unidade.
QUENCH	Transição do material supercondutor de seu estado supercondutor para o estado normal abruptamente.
RMS	<i>Root Mean Square</i> (raiz média quadrática ou valor eficaz).
SEI	Sistema Elétrico Industrial.
SFCL	<i>Superconducting Fault Current Limiters.</i>
SOLAS	<i>Safety of Life at Sea.</i>
TG	Turbogerador.
TGCP	<i>Turbo Generator Control Panel.</i>
TIE	Disjuntor de interligação de barras ou semi-barras em sistemas elétricos.
UPS	<i>Uninterruptable Power Supply.</i>
VSD	<i>Variable Speed Drive.</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	Motivação	15
1.2.	Descrição	16
1.3.	Objetivo	16
1.4.	Estudo de Caso	17
1.5.	Estrutura do Texto	17
2.	DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	19
2.1.	Correntes de Curto-circuito	20
2.2.	Aplicações dos Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito	26
2.3.	Principais Dispositivos Limitadores de Corrente De Curto-Circuito	29
2.3.1.	Reatores Limitadores de Núcleo de Ar	29
2.3.2.	Dispositivos Pirotécnicos	34
2.3.3.	Dispositivos Pirotécnicos com Reatores Limitadores em Paralelo	41
2.3.4.	Dispositivos Supercondutores	43
2.3.5.	Impedância de Aterramento	52
2.3.6.	Dispositivos com Tecnologia FACTS	53
2.3.7.	Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida	57
2.3.8.	Controle de Potência Interfases - IPC	58
3.	SISTEMA ELÉTRICO TÍPICO DE UMA PLATAFORMA MARÍTIMA DE PETRÓLEO	61
3.1.	Introdução	61
3.2.	Particularidades do Sistema Elétrico do FPSO	62
3.3.	Especificações Técnicas	64
3.4.	Cargas Elétricas	65
3.5.	Sistema de Geração Energia Elétrica	66
3.6.	Sistema de Distribuição da Plataforma	67
3.6.1.	Sistema de Média Tensão	68
3.6.2.	Sistema de Baixa Tensão	69
3.6.3.	Sistema de Energia Ininterrupta	71
3.7.	Demandas das Cargas Elétricas da Plataforma	71
3.8.	Condições Operacionais	72
3.8.1.	Limites Operacionais	72

3.8.2.	Controles do Sistema de Geração Principal	73
4.	MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA MARÍTIMA DE PETRÓLEO DO TIPO FPSO	75
4.1.	Considerações Iniciais	75
4.2.	Modelagem dos Geradores, Transformadores e Motores	75
4.3.	Dispositivos Pirotécnicos	79
4.3.1.	Premissas	79
4.3.2.	Modelagem do Dispositivo Pirotécnico	82
4.4.	Reator Limitador	85
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	90
5.1.	Análise das Tensões nos Barramentos	90
5.1.1.	Resultados em Modo Normal de Operação	92
5.1.2.	Resultados em Modo de Contingência Operacional	94
5.1.3.	Análise dos Resultados	96
5.2.	Análise de Curto-Circuito	97
5.2.1.	Análise de Curto-Circuito no Caso 1	100
5.2.2.	Análise de Curto-Circuito no Caso 2	107
5.2.3.	Análise de Curto-Circuito no Caso 3	108
5.2.4.	Análise de Curto-Circuito no Caso 4	109
5.2.5.	Análise dos Resultados	110
5.3.	Viabilidade Econômica da Instalação do Reator Limitador	112
6.	CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	115
6.1.	Conclusão	115
6.2.	Propostas de Trabalhos Futuros	116
7.	REFERÊNCIAS	117
8.	APÊNDICES	124
8.1.	Cargas do Sistema de 13,8 kV	124
8.2.	Cargas do Sistema de 4,16 kV	125
8.3.	Demanda do FPSO Típico em Operação Plena	126
8.4.	Diagrama Unifilar Simplificado	128
8.5.	Esquema do Sistema Elétrico Modelado no ATPDraw	129
8.6.	Especificação Técnica dos Equipamentos	131
8.6.1.	Geradores Síncronos	131
8.6.2.	Motores de Indução	132
8.6.3.	Transformadores	134

8.6.4.	Cabos Elétricos	135
8.7.	Dados de Entrada da Modelagem no ATPDRAW	136
8.7.1.	Geradores Síncronos e Controladores	136
8.7.2.	Motores de Indução	137
8.6.3.	Transformadores	138
8.7.4.	Cabos Elétricos	138
8.8.	Modelagem do Dispositivo Pirotécnico	139
8.9.	Diagrama Unifilar – Casos do Estudo de Curto-Circuito	141

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos projetos das plataformas marítimas de produção de óleo e gás para exploração dos campos do pré-sal brasileiro é um grande desafio para diversas áreas da engenharia. Os campos do pré-sal estão localizados a centenas de quilômetros da costa, em águas ultra profundas, sob elevadas pressões dos reservatórios e extraído óleo e gases extremamente agressivos aos materiais das tubulações e equipamentos. Para estas plataformas operarem com elevados níveis de eficiência e segurança em condições extremamente adversas nas quais vêm sendo instaladas, é necessário encontrar soluções criativas e inovadoras para o desenvolvimento de novos sistemas e equipamentos a fim de se adequarem às plantas de processo. Como efeito imediato, a inclusão desses novos sistemas e equipamentos nas plantas de processo acarreta a necessidade natural de aumento da capacidade de geração de energia elétrica dessas plataformas (HAZEL, 2017).

Este aumento na demanda de energia elétrica das plataformas vem acarretando a elevação dos níveis das correntes de curto-circuito das instalações, fato que demanda uma atualização dos projetos elétricos empregados até então (HAZEL, 2017). Os sistemas elétricos com elevados níveis de correntes de curto-circuito exigem equipamentos de altas capacidades interruptivas e estruturais que, conseqüentemente, possuem custos, tamanhos e pesos elevados. Essas novas exigências técnicas podem inviabilizar, tanto pelo aspecto técnico quanto pelo aspecto financeiro, o investimento na exploração do reservatório. Com a finalidade de viabilizar o projeto elétrico, dispositivos para limitação da corrente de curto-circuito são utilizados para reduzir as magnitudes das correntes de curto-circuito e garantir a segurança e a confiabilidade do suprimento de energia elétrica.

1.1. MOTIVAÇÃO

Os projetos elétricos das plataformas do tipo FPSO - *Floating, Production, Storage and Offsloading* - brasileiras têm como padrão a instalação de um Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-circuito (DLC), do tipo pirotécnico, na interligação entre duas semi-barras do painel principal de 13,8 kV. Este DLC tem como finalidade reduzir as magnitudes das correntes de curto-circuito do sistema elétrico da plataforma, cuja capacidade de geração de energia elétrica chega a atingir 100 MW (DIAS, 2016).

Ocorre que este DLC pirotécnico ao ser atuado, isola por completo as duas semi-barras do painel, impondo, desta forma, restrições operacionais à planta de processo da plataforma.

Estas restrições operacionais, que poderão comprometer por dias a capacidade plena de produção da plataforma, impactarão diretamente na curva de produção de óleo e gás e, conseqüentemente, no faturamento da empresa. Como exemplo, um impacto de 25 % na curva de produção plena de uma plataforma típica do pré-sal brasileiro, que tem a capacidade de processar até 150 mil barris por dia, acarretará uma perda diária de aproximadamente US\$ 2.500.000,00, considerando US\$ 65,00 uma cotação média do barril de petróleo no ano de 2018 (MACROTRENDS, 2019).

Neste contexto, este trabalho busca estudar uma alternativa técnica com relação ao emprego exclusivo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito – DLCs pirotécnico nos sistemas elétricos das plataformas marítimas do tipo FPSO atuais, tema ainda pouco abordado em literaturas e trabalhos acadêmicos.

1.2. DESCRIÇÃO

O presente estudo apresenta uma alternativa técnica à aplicação do DLC pirotécnico como limitador da corrente de curto-circuito no sistema elétrico típico das plataformas brasileiras do tipo FPSO. Tal alternativa propõe a instalação de um reator a núcleo de ar em paralelo com o DLC pirotécnico. Neste arranjo, a corrente circulará normalmente pelo dispositivo pirotécnico, que possui impedância nula ou muito pequena, de forma que o reator, sem passagem de corrente elétrica, não adicionará perdas técnicas (perdas joules e queda de tensão) em condições normais de operação. Já na ocorrência de um defeito, a atuação do DLC pirotécnico fará com que o reator seja de fato inserido no circuito, garantindo assim a continuidade de alimentação do barramento principal e evitando a entrada da plataforma em condições de restrições operacionais.

1.3. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é verificar, através da modelagem de um sistema elétrico típico de uma plataforma marítima na ferramenta computacional ATP

(*Alternative Transient Program*), a viabilidade da instalação de um reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico que faz a limitação da corrente de curto-circuito entre as semi-barras do painel principal de 13,8 kV.

1.4. ESTUDO DE CASO

As aplicações dos DLCs pirotécnicos em sistemas elétricos industriais se tornaram frequentes e hoje é uma solução padrão para reduzir os elevados níveis das correntes de curto-circuito de sistemas elétricos isolados e de elevada capacidade de geração de potência como os instalados em plataformas marítimas. Embora estes dispositivos sejam eficazes e amplamente empregados em plataformas marítimas, há alguns inconvenientes na sua instalação os quais serão detalhados mais adiante neste trabalho.

A principal contribuição deste trabalho é analisar uma alternativa à instalação usual dos DLCs pirotécnicos nos sistemas elétricos dos atuais FPSOs, objetivando prover a continuidade da produção de óleo e gás mesmo quando o DLC pirotécnico se encontrar fora de operação.

1.5. ESTRUTURA DO TEXTO

O desenvolvimento da dissertação foi estruturado em 6 capítulos, contando com este na qual foi feita a introdução ao tema abordado.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos do curto-circuito e os principais tipos de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito utilizados atualmente, assim como os dispositivos que ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento.

No Capítulo 3 estão descritos os detalhes do projeto elétrico que atende um modelo típico de plataforma marítima que opera na extração do petróleo do pré-sal brasileiro.

O Capítulo 4 contém o desenvolvimento da modelagem do sistema elétrico do FPSO típico na ferramenta computacional ATPDraw e, posteriormente, apresenta-se no Capítulo 5 os resultados obtidos nos testes e as análises das simulações no modelo dinâmico do sistema elétrico do FPSO no contexto da instalação do reator limitador

em paralelo com o DLC pirotécnico. O estudo apresenta às implicações nos níveis das correntes de curto-circuito e quedas de tensão do arranjo do limitador de corrente de curto-circuito proposto para interligação do painel principal.

Por fim, o Capítulo 6 expõe as conclusões dos estudos realizados e termina com indicações de alguns desdobramentos possíveis deste trabalho.

2. DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Atualmente há uma tendência das empresas geradoras de energia elétrica em desenvolver e priorizar projetos de geração de energia elétrica provenientes de fontes limpas, renováveis e de baixo impacto ambiental, tendo em vista que os megaprojetos de grandes centrais elétricas vêm perdendo espaço e sofrendo uma grande rejeição da sociedade devido aos fortes impactos causados no meio ambiente. Este fato vem estimulando a construção de centrais elétricas de pequeno porte, como parques eólicos, nas quais são projetadas visando baixo impacto ambiental e a proximidade com os centros de carga e consumidores. Essa nova característica do fornecimento de energia elétrica contribui para o aumento dos níveis das correntes de curto-circuito das instalações elétricas existentes, visto que as impedâncias inerentes às linhas de transmissões e das redes de distribuição, que contribuem naturalmente na redução das correntes de curto-circuito, são eliminadas dos circuitos (ARSÊNIO, 2012; MENDROCK, 2009).

A elevação da magnitude das correntes de curto-circuito das instalações acarreta a necessidade de instalação de equipamentos com maiores capacidades elétricas, rigidez mecânica e volume, o que pode acabar inviabilizando novos projetos devido à elevação dos custos e das dificuldades na construção e montagem. Para as instalações existentes, a elevação do nível da corrente de curto-circuito, devido à inserção de novas fontes geradoras e/ou interconexões não prevista originalmente, pode levar a necessidade de substituição dos equipamentos (transformadores, barramentos, disjuntores etc.) que porventura venham superar as suas capacidades construtivas. (DIAS, 2016).

Neste contexto, a utilização de dispositivos que possibilitem a redução dos níveis das correntes de curto-circuito, além de viabilizar economicamente um projeto, implicam em menores esforços mecânicos dos equipamentos, maior confiabilidade na operação do sistema e na segurança pessoal. A instalação destes dispositivos, denominados Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito (DLCs), podem superar os problemas dos elevados níveis de corrente de curto-circuito que as instalações elétricas vêm sendo atualmente submetidas (FERREIRA, 2013).

2.1. CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Um curto-circuito pode ser definido como uma conexão acidental, de baixa impedância, entre dois ou mais pontos que estão em diferentes potenciais elétricos. A magnitude da corrente de curto-circuito depende essencialmente do potencial das fontes de energia ligadas ao sistema. Os curtos-circuitos podem ser definidos como: trifásico, bifásico, bifásico-terra e monofásico (fase-terra). Apesar de raros, em média 5 % dos casos, os curtos-circuitos trifásicos são os mais severos, pois acarretam os valores máximos das correntes de curto-circuito do sistema. Já os curtos-circuitos do tipo monofásico são os mais comuns, em geral 80 % dos casos, mas com menor exigência dos equipamentos elétricos devido a sua menor magnitude. (SANTOS, 2009).

Os estudos e as análises das correntes de curto-circuito fazem parte de qualquer projeto elétrico. Estas análises têm como objetivo:

- a) Determinar a capacidade térmica dos cabos e equipamentos do sistema em suportar as correntes de curto-circuito as quais ficarão submetidos;
- b) Calcular os esforços mecânicos dos elementos estruturais dos equipamentos elétricos que ficarão sujeitos aos efeitos dinâmicos dessas elevadas correntes;
- c) Ajustar os dispositivos de proteção contra sobrecorrentes;
- d) Dimensionar os dispositivos de proteção, tais como os dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito, os fusíveis, os disjuntores e os transformadores de corrente e
- e) Dimensionar o sistema de aterramento.

Quando ocorre um curto-circuito em uma instalação elétrica, a magnitude da corrente dependerá das forças eletromotrizes das máquinas que a compõem, suas impedâncias e as impedâncias dos componentes da instalação, como os transformadores e os cabos elétricos.

Dentre as forças eletromotrizes, os geradores elétricos são os equipamentos que dão a maior parcela de contribuição aos valores das correntes de curto-circuito. Os geradores são acionados por uma fonte primária de movimento, onde nos FPSOs

estas fontes primárias correspondem às turbinas (geradores principais) e motores diesel (geradores auxiliar e de emergência). Na ocorrência de um curto-circuito, os geradores continuam produzindo tensão, visto que as suas excitações de campo são mantidas e os acionadores continuam girando os eixos dos geradores com velocidade considerável, próxima da nominal. Estas tensões produzem correntes de curto-circuito que fluem dos geradores ao ponto de defeito. Estas correntes de curto-circuito são limitadas apenas pelas impedâncias dos próprios geradores e pelas impedâncias entre os terminais dos geradores e o ponto de defeito (CASANOVA, 2008).

Os motores síncronos, por apresentarem aspectos construtivos similares aos geradores, também contribuem para a corrente de curto-circuito no ponto do curto-circuito. Em operação normal, os motores drenam energia da rede elétrica. Quando há a ocorrência do curto-circuito o motor deixa de ser alimentado, porém a inércia do eixo do motor faz com que seja produzida tensão nos enrolamentos da armadura, assim como ocorre com o gerador. Desta forma, os motores passam a atuar como geradores, contribuindo também com a corrente de curto-circuito por alguns ciclos após a ocorrência do defeito. A magnitude desta corrente dependerá da potência do motor, do seu nível de tensão, da impedância da máquina e da impedância do circuito de alimentação do motor (ISIDORO, 2006).

Os motores de indução também contribuem para o total da corrente de curto-circuito. A diferença da contribuição desta máquina para a máquina síncrona está no seu aspecto construtivo. Nos motores de indução não há excitação de campo por corrente contínua, pois o fluxo magnético do rotor é gerado por indução, como nos transformadores. Na ocorrência de um curto-circuito no sistema, apesar do motor deixar de ser alimentado, o fluxo induzido no rotor não cessa instantaneamente. Esse fluxo que permanece circulando no rotor age produzindo tensão nos enrolamentos do estator até que o eixo da máquina pare completamente, ou o fluxo decaia a zero. A contribuição da corrente de curto-circuito de um motor de indução decai mais rapidamente que a corrente produzida pelas máquinas síncronas devido à excitação de campo das máquinas síncronas ser constante e a excitação dos motores de indução desaparecer alguns ciclos após o corte de sua alimentação (ISIDORO, 2006).

A reatância das máquinas rotativas não é constante como a de transformadores e cabos elétricos, mas é complexa e variável no tempo. O valor da

corrente de curto-circuito logo após a ocorrência da falta difere consideravelmente em função das reatâncias das máquinas síncronas e dos motores de indução. A corrente de curto-circuito inicia com um alto valor e decai a um valor estacionário depois de decorrido certo tempo da ocorrência do curto-circuito. Como esta variação da magnitude da corrente é rápida e a excitação de campo e a velocidade do rotor permanecem praticamente constantes, a redução do valor da corrente só pode ser explicada pela mudança da reatância aparente da máquina (SANTOS, 2009).

Existem três valores típicos de reatância das máquinas rotativas, que caracterizam cada estado da máquina de acordo com o tempo decorrido após a falta (MOREIRA, 2009):

- a) Reatância subtransitória de eixo direto (X_d''): é a reatância do início da falta e que diminui rapidamente de valor (em 0,02 s – 0,05 s). É a responsável pelo maior valor da corrente de curto-circuito.
- b) Reatância transitória de eixo direto (X_d'): é a reatância aparente inicial do estator e atua normalmente entre 0,05 s à 3 s depois da falta.
- c) Reatância síncrona (X_d): determina o valor da corrente de estado estacionário e seu valor não é considerado nos cálculos de curto-circuito.

O valor da corrente de curto-circuito depende consideravelmente dos valores das reatâncias das máquinas. A equação (1) dá o valor da corrente de curto-circuito trifásico nos terminais de um gerador:

$$I_{cc} = \frac{E_g}{jX_d''} \quad (1)$$

Sendo:

I_{cc} : corrente de falta trifásica.

E_g : tensão interna do gerador no momento do curto-circuito.

X_d'' : reatância transitória de eixo direto.

A corrente de curto-circuito tem normalmente forma de onda semelhante à ilustrada na Figura 2.1. Esta onda representa uma característica assimétrica nos ciclos iniciais e decai a uma forma simétrica, daí é comum nos estudos de curto-circuito

serem apresentados os valores de corrente de curto simétrico e assimétrico (ANDRADE, 2011).

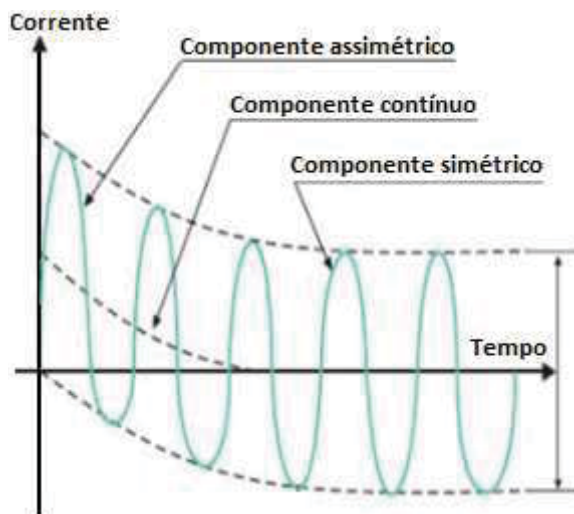


Fig. 2.1 – Corrente de curto-circuito e suas componentes.
Fonte: SANTOS (2009), adaptado pelo autor.

O fato de a onda apresentar uma componente assimétrica está relacionado à razão entre a reatância e a resistência (X/R) do circuito e ao momento de aplicação do curto-circuito. Em sistemas elétricos industriais a resistência de um circuito é desprezível em relação à reatância e a corrente de curto-circuito fica atrasada em relação à tensão em aproximadamente 90° . Caso o curto-circuito ocorra no pico de tensão gerada, a corrente iniciará seu ciclo do zero, pois estará defasada em 90° e se manterá simétrica em relação ao eixo dos zeros. Caso a falta ocorra no instante em que a tensão tem valor nulo, a corrente inicial vai ser essencialmente assimétrica, pois mesmo partindo do zero ela necessitará manter a defasagem, por isso ficará acima do eixo dos zeros. Estes dois casos mostram os momentos extremos que podem ocorrer com a corrente de curto, dependendo principalmente do momento de ocorrência da falta. As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram estes dois momentos, o mais favorável e o mais desfavorável (MOREIRA, 2009).

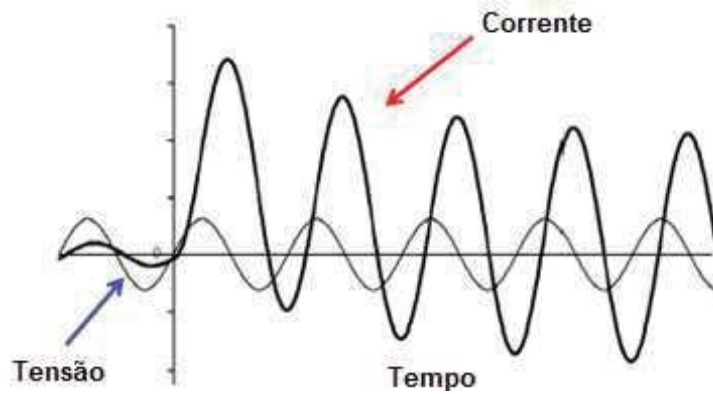


Fig. 2.2 – Momento do curto-circuito mais desfavorável.

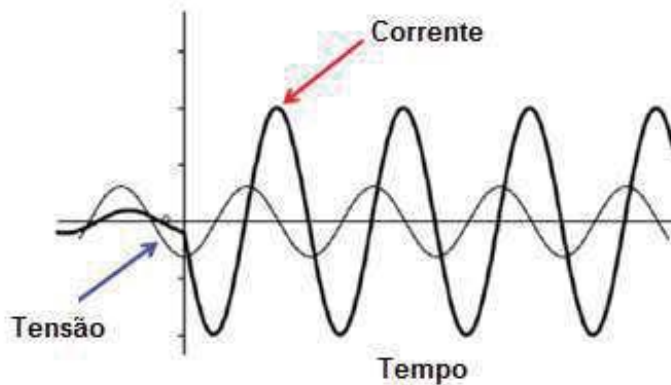


Fig. 2.3 – Momento do curto-circuito mais favorável.

A modelagem da corrente de curto-circuito é dividida em duas componentes para facilitar os cálculos: uma componente simétrica alternada e uma componente contínua. A soma destas componentes resulta no valor da corrente de curto-circuito em qualquer instante, conforme equação (2).

$$i(t) = i(t)_{\text{simétrica}} + i(t)_{\text{contínua}} \quad (2)$$

Os valores assimétricos das correntes de curtos-circuitos são empregados para a determinação da capacidade dos equipamentos em suportar os efeitos dinâmicos das correntes de curto-circuito. Já os valores simétricos são usados para determinar as capacidades de interrupção dos equipamentos de seccionamento, como os disjuntores, assim como as capacidades de suportar os efeitos térmicos produzidos pelas correntes de curto-circuito, conforme descrito em IEEE (2001).

A forma de onda completa da corrente de curto-circuito é ilustrada na Figura 2.4, cujos os valores mais relevantes da onda podem ser obtidos através das equações (3) e (4):

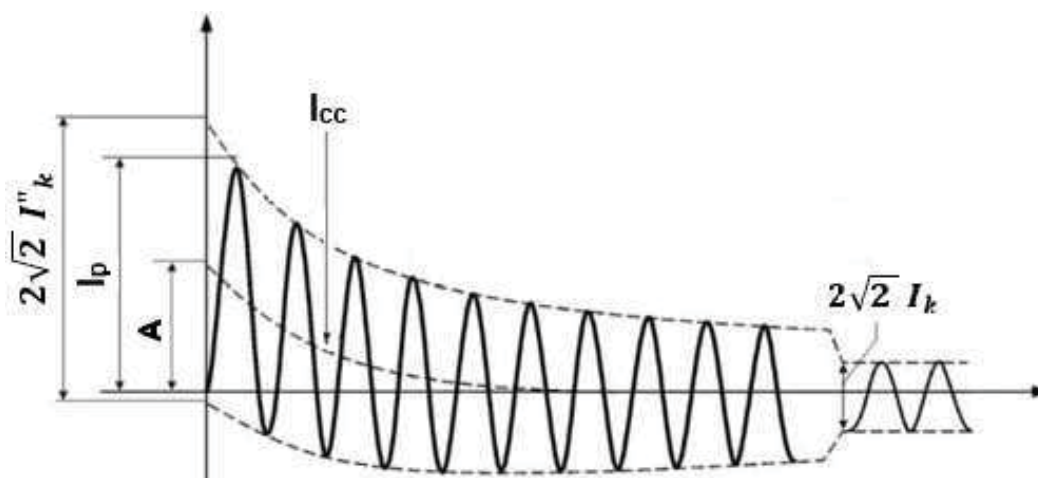


Fig. 2.4 - curva do curto-circuito próximo ao gerador.
Fonte: norma IEC-61363, adaptado pelo autor.

$$i_p = \sqrt{2} I''_k + I_{cc} \quad (3)$$

$$I_{cc} = \sqrt{2} I''_k e^{-2\pi \left(\frac{R}{X}\right)t} \quad (4)$$

Onde:

I''_k : corrente inicial simétrica de curto-circuito.

I_p : corrente de crista de curto-circuito.

I_{cc} : componente corrente contínua de decaimento da corrente de curto-circuito.

I_k : corrente de curto-circuito em estado permanente.

A : valor inicial da corrente da componente em corrente contínua.

Nas plataformas marítimas, que possuem sistemas isolados, a contribuição das correntes de curto-circuito dos motores é somada a dos geradores para formar a corrente de curto-circuito total. É assumido que as máquinas síncronas são as principais responsáveis pelo valor da corrente de curto simétrica, pois a contribuição dos motores de indução decai rapidamente a zero e só contribui efetivamente para a corrente inicial assimétrica.

2.2. APLICAÇÕES DOS DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Para proteção das instalações elétricas dos efeitos das elevadas correntes de curto-circuito, em geral são utilizados fusíveis e relés para comandar a atuação dos disjuntores. Para redução das magnitudes alcançadas nos instantes iniciais dessas correntes de curto-circuito, geralmente reatores limitadores de corrente são utilizados. Apesar de largamente instalados nos Sistemas Elétricos Industriais, os três equipamentos apresentam alguns inconvenientes. O reator limitador, embora muito utilizado pela sua simplicidade e confiabilidade, impõe ao circuito queda de tensão e perdas de energia indesejáveis durante as condições normais de operação. O fusível é um dispositivo simples, barato, robusto, confiável e pode suportar correntes de curto-circuito de até 200 kA. O problema do fusível é que quando atuado acarreta o desligamento de todo o circuito por ele protegido, sendo necessário a substituição manual por um novo fusível para o seu restabelecimento. Já o disjuntor tem como principal problema o tempo de atuação para interrupção da corrente de curto-circuito, que ocorre somente após os primeiros ciclos de sua ocorrência (YADAV, 2014).

A instalação dos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito tem como finalidade limitar as correntes de curto-circuito à valores inferiores as capacidades nominais dos equipamentos que compõem o Sistema Elétrico Industrial (SEI). As reduções ou interrupções dessas correntes de curto-circuito podem ser feitas diretamente através dos próprios DLCs, em tempos extremamente rápidos, ou através de disjuntores após a atuação de um DLC que agiria apenas para reduzir a magnitude da corrente de curto-circuito (MORAES, 2016). A Figura 2.4 ilustra curvas das correntes de curtos-circuitos de um circuito sem o DLC comparado ao circuito com o emprego de um DLC.

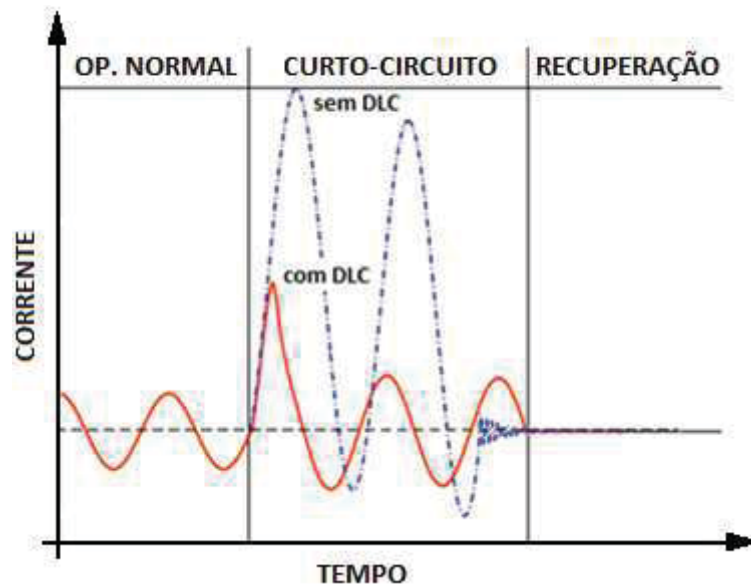


Fig. 2.5 – Representação gráfica comparativa entre curvas de curto-circuito com o uso do DLC.
 Fonte: NOE (2017), adaptado pelo autor.

As características ideais de um DLC (VERMA, 2009) podem ser resumidas conforme descrito abaixo:

- a) Virtualmente inexistente quando o sistema opera em condições normais, ou seja, uma impedância quase nula, a fim de evitar perdas resistivas, perdas reativas e quedas de tensão entre seus terminais;
- b) Detecção da corrente de falta dentro do $\frac{1}{4}$ de ciclo, e redução considerável da magnitude da corrente de curto-circuito nos próximos ciclos;
- c) Inserir uma alta impedância em condições de curto-circuito;
- d) Capacidade de operar em curtos-circuitos múltiplos de forma eficaz e sem danos repetidas vezes e em curto intervalo;
- e) Reestabelecimento automático e em curto período, sem a necessidade da intervenção humana;
- f) Possuir um alto nível de confiabilidade e livre de manutenção por longos períodos de funcionamento;
- g) Não afetar a coordenação dos relés de proteção;
- h) Apresentar baixo peso e pequeno volume; e
- i) Não alterar o fator de potência da instalação.

Além de reduzir a magnitude da corrente de curto circuito a patamares tecnicamente aceitáveis pelos equipamentos em operação, um DLC pode proporcionar outros benefícios ao sistema elétrico, tais como:

- a) Reduzir os afundamentos de tensão;
- b) Reduzir as sobretensões temporárias devido à conexão de produtores independentes de energia;
- c) Reduzir os custos em função da possibilidade de aquisição dos equipamentos elétricos de menor capacidade; e
- d) Prover maior segurança operacional, devido à redução da corrente de curto-circuito.

Para os SEIs típicos de plataformas marítimas, a aplicação mais usual dos DLCs é na interconexão entre barramentos (*tie-breaker* em inglês) conforme mostrado na Figura 2.6. Neste arranjo o sistema não é dimensionado para suportar a capacidade total de curto-circuito dos quatro geradores, uma vez que a contribuição entre os barramentos será reduzida em função da atuação do DLC.

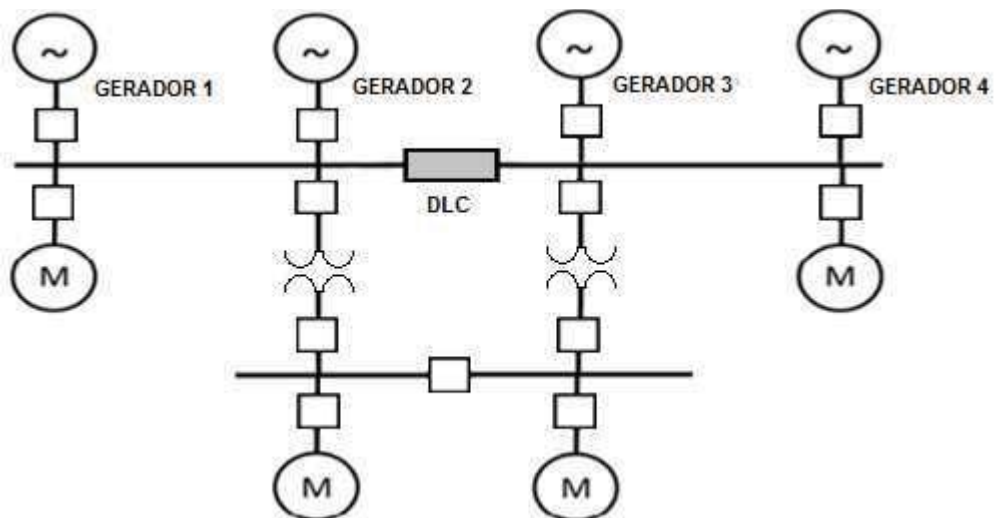


Fig. 2.6 - Arranjo unifilar típico simplificado de aplicação de DLCs.

O arranjo elétrico da Figura 2.6, com quatro geradores e o painel principal dividido em dois barramentos com o DLC interconectando-os, é o arranjo tipicamente empregado nas plataformas do tipo FPSO objeto do estudo de caso analisado neste trabalho.

2.3. PRINCIPAIS DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Os DLCs podem ser divididos em duas categorias:

- a) Limitadores passivos: são os dispositivos que não necessitam de acionamentos externos para limitar e controlar as correntes de falta. Estes dispositivos aumentam a impedância naturalmente em condições de falta.
- b) Limitadores ativos: são os dispositivos que apresentam baixa impedância em condições normais e rápido crescimento da impedância em condições de falta.

Na Tabela 2.1 é apresentado um resumo dos principais dispositivos limitadores de curto-circuito para os SEIs de acordo com o seu grau de desenvolvimento na cadeia de inovação e de disponibilidade no mercado.

Tabela 2.1 – Principais Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito para SEIs.

Dispositivo	Reator núcleo de ar	Pirotécnico	Supercondutor Tipo Resistivo	Supercondutor Tipo Indutivo
Limites de operação	36 kV 2.500 A	50 kV 3.000 A	138 kV 900 A	11 kV 2.000 A
Acionamento	Não requer	externo	interno	interno
Tempo de atuação	Não aplicável	$\leq \frac{1}{4}$ de ciclo	$< \frac{1}{4}$ de ciclo	< 5 ms
Tempo de reposição	Não aplicável	Requer troca	10 ms à 2 s	0,3 ms à 0,2 s
Redução de corrente	Depende do reator	< 70 %	< 80 %	Abaixo de 20 %
Resfriamento	não	não	sim	sim
Peso / volume	Pesado e volumoso	Leve e volumoso	pequeno	Pesado e volumoso
Maturidade tecnológica	Plenamente comercial	Plenamente comercial	Comercial (sob encomenda)	P&D Protótipo pilotos
Referência	(GE, 2018)	(ABB, 2018)	(YADAV, 2014)	(FERREIRA, 2013)

2.3.1. REATORES LIMITADORES DE NÚCLEO DE AR

Os reatores limitadores de núcleo de ar são os mais antigos e ainda hoje os mais empregados na limitação da corrente de curto-circuito em sistemas elétricos de

baixa e média tensão. Por ser um equipamento simples e robusto, geralmente apresenta o custo mais baixo. Estes reatores são projetados para se obter um alto valor de reatância indutiva e baixa resistência ôhmica. Desta forma, a finalidade destes reatores é inserir uma reatância indutiva no circuito a fim de amortecer e reduzir a magnitude da corrente de curto-circuito do circuito. A limitação da corrente é obtida com a simples inserção de uma impedância $Z = j\omega L$ no circuito, conforme ilustrado na Figura 2.7.

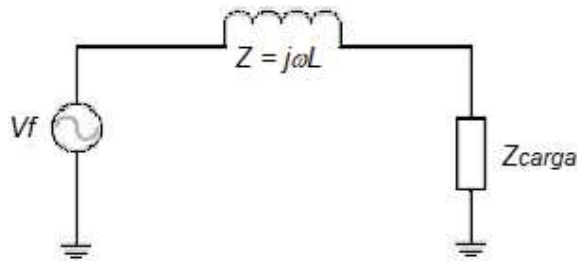


Fig. 2.7. Circuito básico de aplicação do reator limitador.
Fonte: YADAV (2014), adaptado pelo autor.

Os reatores com núcleo de ar fornecem uma resposta linear de impedância versus corrente elétrica. Como é importante a reatância não variar em condições de curto-circuito, os reatores com núcleo de ar (não-magnéticos) são as soluções mais comuns para limitação das correntes de curto-circuito, pois como não há a presença do núcleo de ferro não ocorrerá a saturação do núcleo para correntes elevadas e, conseqüente, a redução de sua reatância indutiva.

Ainda que simples e com uma tecnologia antiga e amplamente conhecida, estes reatores com núcleo de ar possuem relevantes vantagens, tais como: (i) eficiência na redução da corrente de curto-circuito, (ii) baixo custo, (iii) alta resistência mecânica para suportar elevadas correntes, (iv) baixa manutenção, (v) livre dos riscos de contaminação ambiental e de fogo por não ser imerso em óleo, (vi) baixo nível de ruído, (vii) estrutura à prova de intempéries e (viii) vida útil longa, superior a 30 anos (MENDROCK, 2009).

A refrigeração dos reatores também pode ser feita a óleo, com ventilação natural (NA) ou ventilação forçada (NF). A refrigeração à óleo tem como vantagem a maior eficiência quando comparada com a ar, pois facilita a troca de calor e permite o

arrefecimento mais rápido do sistema no caso de correntes de curto-circuito sucessivas.

Apesar de amplamente empregados, de custo reduzido e eficiente no controle da corrente de falta, em condições normais de operação os reatores apresentam desvantagens consideráveis ao introduzir uma impedância permanente no circuito, tais como: (i) consumo de energia (perdas por efeito Joule e pelicular), (ii) queda de tensão, (iii) interferência no fator de potência, (iv) criação de elevados campos magnéticos em seu entorno e (v) afetam a regulação de tensão, acarretando de uma forma geral na redução da eficiência do sistema. Sob carga é comum uma queda de tensão de 5 % através dos terminais do reator, o que pode comprometer em cerca de 10 % a eficiência do equipamento que está sendo alimentado e até mesmo prejudicar a partida de motores de potência elevada (SCHAFFER, 2002). Do ponto de vista econômico, estas desvantagens devem ser levadas em consideração, pois o seu custo ao longo dos anos pode até inviabilizar este tipo de solução.

Em função destas perdas e da queda de tensão é comum não instalar os reatores diretamente no circuito de alimentação. Como exemplo, no arranjo da Figura 2.6, a função do DLC, que faz a interconexão entre dois barramentos (*bus-tie*), é limitar a contribuição das correntes dos geradores e motores instalados em cada um dos barramentos quando da ocorrência de uma falta. Em condições normais de operação pequena corrente irá percorrer o reator, visto que o projeto elétrico do painel de distribuição deve prezar pelo balanceamento das cargas entre os barramentos.

A especificação de um reator se baseia em simulações de curto-circuito e a estimativa inicial do valor da indutância deve ser feita considerando apenas as contribuições das fontes principais. Por exemplo, um SEI de baixa tensão em 480 V é alimentado por um transformador abaixador de 2,5 MVA com impedância igual a 10 %. A corrente de curto-circuito simétrica no secundário do transformador pode ser estimada pela equação (5):

$$I_{CC} = \frac{1}{Z_{tr}} \cdot \frac{S_{tr}}{\sqrt{3} \cdot V_n} \quad (5)$$

Onde:

I_{cc} – corrente de curto-circuito, em amperes (A).

Z_{tr} – impedância do transformador (pu), em %.

S_{tr} – potência nominal do transformador, em volt-ampere (VA).

V_n – tensão nominal do secundário do transformador, em volts (V).

$$I_{cc} = \frac{1}{0,1} \cdot \frac{2,5 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 480V} = 30,1 \text{ kA}$$

Considerando que se queira limitar a corrente em 20 kA, desprezando as resistências do transformador e do reator, seria necessária uma reatância equivalente de:

$$I_{cc} = 20 \text{ kA} = \frac{1}{X_{eq}} \cdot \frac{2,5 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 480V} \Rightarrow X_{eq} = 15 \%$$

O valor percentual da reatância indutiva do reator pode ser obtido pela equação (6):

$$X_{eq} = Z_{tr} + X_{reator} \Rightarrow X_{reator} = 5 \% \quad (6)$$

A impedância calculada está nas grandezas base do transformador, onde $V_{base} = 480 \text{ V}$ e $S_{base} = 2,5 \text{ MVA}$. Assim, a impedância do reator em ohms é encontrada pela aplicação da equação (7):

$$X_{reator(\Omega)} = X_{reator} \cdot \frac{V_b^2}{S_b} \quad (7)$$

$$X_{reator(\Omega)} = 5\% \cdot \frac{480V^2}{2,5MVA} \Rightarrow X_{reator} = 4,61 \text{ m}\Omega$$

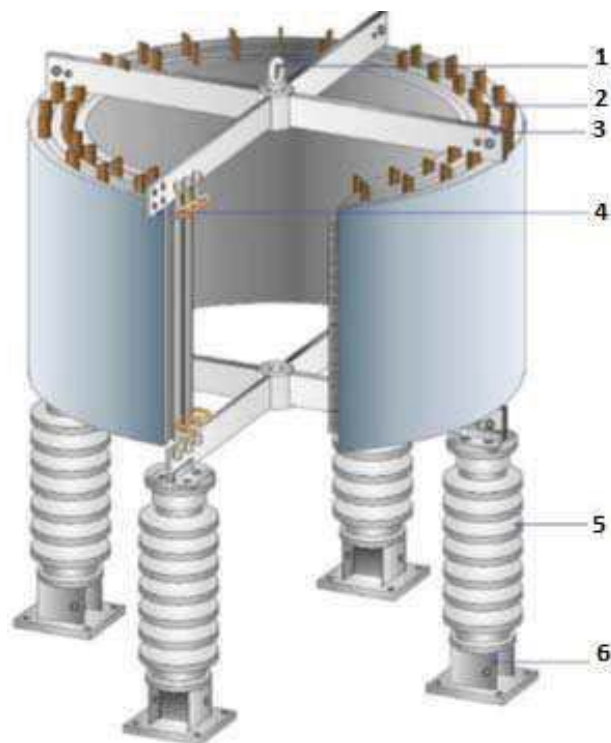
Logo, o valor da indutância do reator em henry (H) é calculado pela equação (8):

$$X_L = 2\pi fL \quad (8)$$

$$X_{reator} = 2\pi fL \Rightarrow L = \frac{4,61 \text{ m}\Omega}{2\pi \cdot 60 \text{ Hz}} \Rightarrow L = 12,23 \mu\text{H}$$

A partir deste dimensionamento preliminar, determina-se o fator de qualidade (X/R) do reator com base no sistema e são feitos os cálculos de curto-circuito e o ajuste fino do valor da indutância, uma vez que as contribuições de motores e/ou geradores locais aumentam a corrente de curto-circuito resultante.

Construtivamente os reatores com núcleo de ar são equipamentos relativamente simples, pois consistem basicamente de uma ou mais bobinas concêntricas, encapsuladas em fibra impregnada em resina epóxi. Os cilindros são construídos de fios isolados, separados entre si por meio de espaçadores de fibra de vidro, que criam dutos capazes de prover o resfriamento dos cilindros por convecção natural do ar (SANTOS, 2015). A Figura 2.8 ilustra em perspectiva um reator com núcleo de ar, do tipo seco, de fabricação da General Electric - GE.



- 1 – Olhal de içamento
- 2 – Espaçadores (dutos de resfriamento)
- 3 – Cruzeta (aranha)
- 4 – Terminal
- 5 – Isolador suporte
- 6 – Pedestais de suporte

Fig. 2.8 - Estrutura típica de um reator com núcleo de ar.
Fonte: catálogo (GE, 2018), adaptado pelo autor.

Os fios podem ser de alumínio ou cobre, porém os altos custos e peso específico do cobre fazem com que o uso do alumínio seja predominante, ficando a aplicação de fios de cobre a projetos mais específicos.

Os reatores são instalados sobre pedestais e isoladores, ambos dimensionados em função dos requisitos do sistema e das condições ambientais nas quais ficarão submetidos (nível de vento, sísmico, entre outros). Estes equipamentos são montados em arranjos de acordo com a disponibilidade de área e das distâncias magnéticas requeridas, a fim de evitar a influência da mútua indutância entre eles e sobre-esforços eletromagnéticos atuando entre reatores adjacentes no momento do curto-circuito. Os reatores podem ser montados lado a lado, em triângulo ou com as bobinas sobrepostas, conforme mostrado na Figura 2.9.



Fig. 2.9 - Arranjo trifásico com reatores sobrepostos.
Fonte: catálogo (GE, 2018).

2.3.2. DISPOSITIVOS PIROTÉCNICOS

O desenvolvimento dos DLCs do tipo pirotécnico se deu, em especial, devido à limitação da condução de corrente dos fusíveis, que para sistemas de 15 kV tradicionalmente eram limitados em até 300 A. Ao desenvolvê-los para maior capacidade, não se obteve níveis aceitáveis na limitação das correntes de curto-circuito nos fusíveis, devido ao tempo inadequado do derretimento das lâminas de metal de maior espessura (G&W CLIP, 2001). Os DLCs do tipo pirotécnicos, ou

limitadores de corrente por disparo em uma tradução livre de *Triggered Current Limiter* – TCL, superaram esta limitação encontrada nos fusíveis e hoje são os únicos limitadores de corrente no mercado que suportam uma corrente nominal de até 5.000 A. Estes DLCs possuem como grande vantagem não comprometer os parâmetros elétricos do sistema, pois funcionam como um simples condutor, sem inserir resistências ou reatâncias no circuito.

Estes dispositivos são capazes de interromper elevadas correntes de curto-circuito em tempos extremamente pequenos (menores que $\frac{1}{4}$ de ciclo). A fim de ilustrar a velocidade de interrupção destes dispositivos, um disjuntor necessita de 3 a 5 ciclos para interromper uma corrente de curto-circuito no SEI, período este suficiente para causar severos danos aos equipamentos sujeitos à passagem da energia da corrente de curto-circuito (SARMIENTO, 2007).

Apesar de serem utilizados em milhares de instalações pelo mundo desde a década de 50, estes dispositivos foram difundidos no Brasil somente a partir dos anos 90 e instalados em plataformas marítimas de óleo e gás a partir do ano 2000 (DIAS, 2016). Tais dispositivos devem ser instalados em conjunto com equipamentos de manobra e proteção convencionais, pois deverão atuar somente em condições extremas, quando os valores da corrente de falta podem danificar a instalação. É importante ressaltar que as correntes de curto-circuito que não provocam danos são interrompidas normalmente pelos disjuntores, ou seja, não ocorre a atuação do dispositivo pirotécnico, pois estes só são atuados para valores mais altos das correntes de curto-circuito (ABB, 2014).

Uma das principais aplicações deste DLC se dá quando das ampliações de instalações existentes devido à entrada de novos geradores ou transformadores. A entrada de novos alimentadores acarreta na elevação do nível da corrente de curto-circuito da instalação elétrica, podendo esta nova corrente superar a capacidade dos equipamentos existentes e estes serem destruídos pelo efeito dinâmico dessa corrente elevada. A instalação de DLCs do tipo pirotécnico evita a contribuição desta nova fonte alimentadora quando da ocorrência de faltas (CARARRO et al, 2012).

Estes dispositivos possuem uma elevadíssima capacidade de interrupção da corrente de falta. Como exemplo, um dispositivo pirotécnico para instalações com

nível de tensão de 17,5 kV pode interromper até 210 kA, permitindo desta forma, ser na maioria dos casos, a única solução técnica a ser adotada na limitação de correntes de falta extremamente elevadas. A Tabela 2.2 mostra as características técnicas de DLCs pirotécnicos disponibilizados no mercado por um tradicional fabricante do dispositivo.

Tabela 2.2 – Valores nominais de DLC pirotécnicos comerciais (ABB, 2014).

Tensão Nominal (V)	Corrente Nominal (A)	Capacidade de Interrupção (kA _{rms})
750	630 a 5.000	Até 140
1.200	630 a 4.000	Até 210
17.500	630 a 4.000	Até 210
24.000	630 a 3.000	Até 140
36.000	630 a 2.500	Até 140

Os DLCs pirotécnicos são formados basicamente por dois condutores em paralelos: um condutor principal e um elemento fusível. O condutor principal conduz a corrente nominal do circuito, podendo atingir até 5.000 A. No momento que o dispositivo de medição e disparo do dispositivo pirotécnico detecta um determinado valor instantâneo da corrente e uma taxa de elevação da corrente pré-estabelecidos, ocorre o disparo eletrônico de um atuador químico que explode e interrompe o condutor principal, fazendo com que o fusível em paralelo limite a corrente de curto-circuito através de sua fusão.

As Figuras 2.10 e 2.11 ilustram o diagrama simplificado dos componentes do circuito elétrico que formam um dispositivo pirotécnico e a foto de uma unidade comercial, comumente denominado inserto (*insert* na língua inglesa), monofásico fabricado pela ABB.

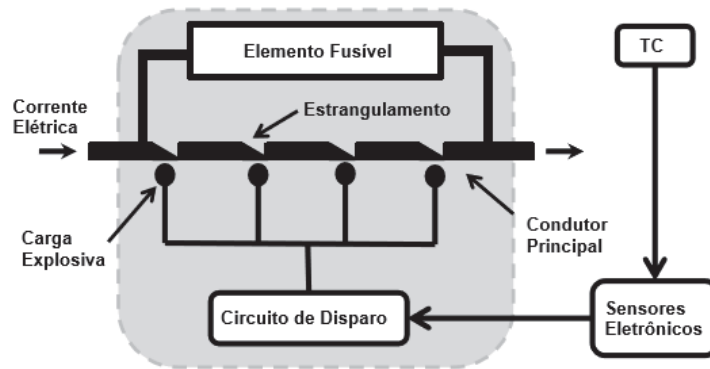


Fig. 2.10 – Diagrama simplificado de um DLC pirotécnico.
Fonte: catálogo ABB (2014).

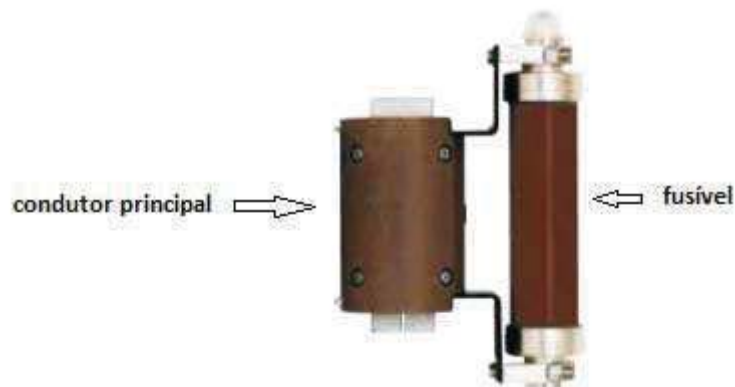


Fig. 2.11 - Inserto comum (condutor principal e fusível) de um DLC pirotécnico.
Fonte: catálogo ABB (2014), adaptado pelo autor.

De forma a distinguir uma corrente de curto-circuito de baixa magnitude, que deverá ser interrompida pelos disjuntores, de uma corrente de curto-circuito elevada, na qual deverá atuar o DLC pirotécnico, um dispositivo de medição e disparo é responsável por detectar o valor instantâneo da corrente e da taxa de elevação da corrente (di/dt). Apenas ultrapassando os valores nominais pré-estabelecidos é que se dará o disparo para abertura do dispositivo. A Figura 2.12 exemplifica a taxa de elevação através da comparação entre duas curvas senoidais de correntes de curto-circuito. Por esta figura é possível notar que as taxas ou derivadas das correntes elétricas (di/dt) variam de acordo com as magnitudes das correntes de curto-circuito.

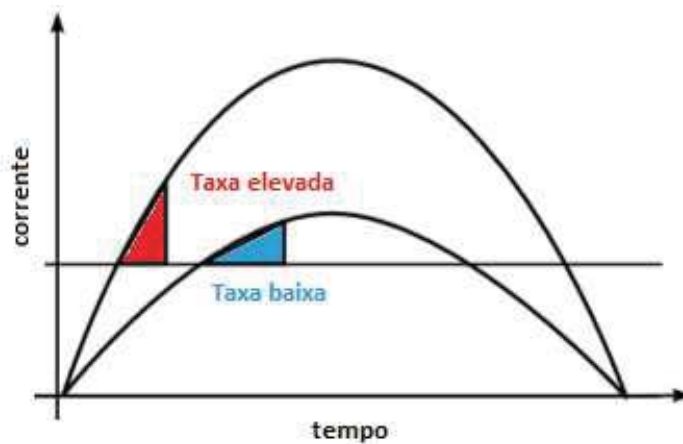
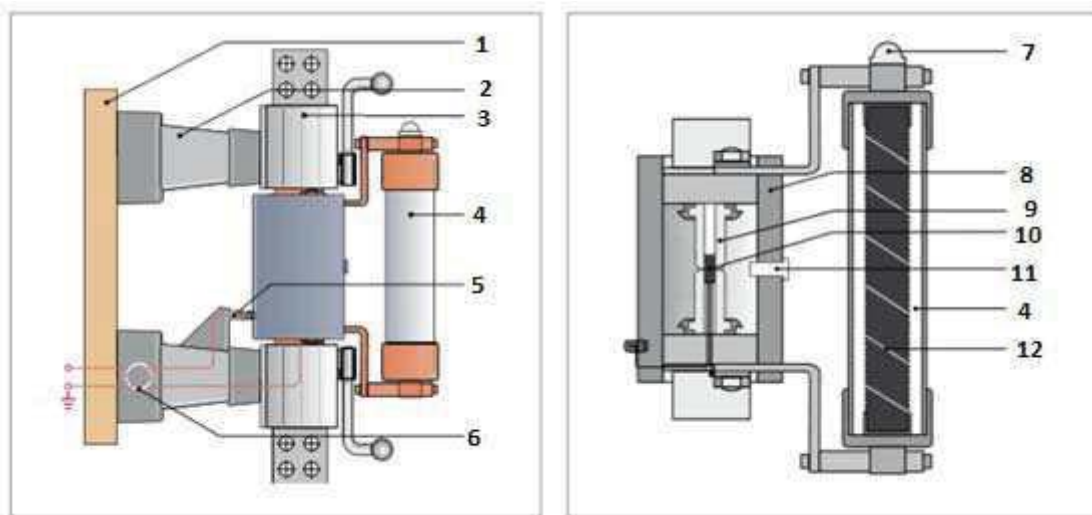


Fig. 2.12 – Exemplos de taxas de elevação da corrente.
Fonte: catálogo ABB (2014), adaptado pelo autor.

Na Figura 2.13 é detalhada a estrutura de um dispositivo pirotécnico para instalações de 12 kV e com capacidade nominal de 2.000 A.



- | | |
|--|--------------------------------------|
| (1) Placa de base | (7) Indicador de fusível |
| (2) Isolador | (8) Tubo isolador |
| (3) Cabeça de pólo com dispositivo de fixação. | (9) Ponte fulminante |
| (4) Fusível | (10) Detonador |
| (5) Contato telescópico | (11) Indicador do condutor principal |
| (6) Isolador com transformador de impulsos. | (12) Elemento fusível |

Fig. 2.13 - Detalhamento construtivo de um limitador pirotécnico
Fonte: catálogo ABB (2014), adaptado pelo autor.

Tomando como exemplo o esquema unifilar da Figura 2.14, representando uma instalação hipotética onde a corrente de curto-circuito máxima suportada pelos equipamentos seja de 32 kA, a atuação de um dispositivo pirotécnico ocorrerá da seguinte forma:

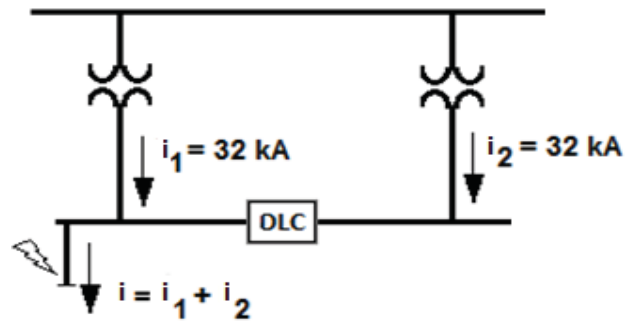


Fig. 2.14. Exemplo de um circuito elétrico sob condições de curto-circuito.

Assumindo que há um curto-circuito a jusante do disjuntor, uma corrente de 32 kA poderia fluir através de cada transformador para o ponto de curto-circuito. Este efeito resultaria em um total de 64 kA que seria o dobro da capacidade suportável pela instalação. O comportamento da corrente i_2 que circula pelo dispositivo pirotécnico é ilustrado na Figura 2.15, sendo visível a forma rápida de limitação a fim de não contribuir para o valor máximo da corrente de curto-circuito $i_1 + i_2$ no local da falha. Desta forma, a atuação do dispositivo pirotécnico não submeterá a instalação a uma corrente superior à corrente permitida e suportada pelos equipamentos.

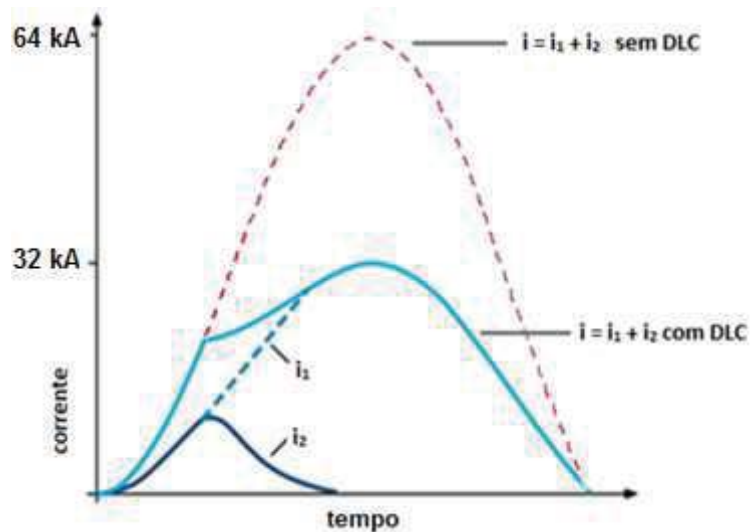


Fig. 2.15 - Curva da corrente de curto-circuito com atuação do DLC pirotécnico.
Fonte: catálogo ABB (2014), adaptado pelo autor.

Na Tabela 2.3 são apresentadas as especificações técnicas de um DLC pirotécnico utilizado na interconexão entre dois barramentos de 13,8 kV do sistema elétrico do FPSO típico objeto deste estudo.

Para fins estatísticos, o fabricante ABB considerada o disparo de um dispositivo pirotécnico, em média, uma vez a cada quatro anos. Entretanto, ao contrário do que preconiza a estimativa do fabricante, ocorre que intempestivos disparos deste DLC vêm sendo observados quando em operação nos SEIs. Estudos identificaram que os transientes iniciais de curtos-circuitos por vezes causam elevados valores de di/dt , que costumam confundir a lógica de disparo atuando inapropriadamente o DLC pirotécnico (HIBBERT, 2005).

Tabela 2.3 – Especificação técnica de um DLC pirotécnico de uma plataforma típica.

Descrição	Características
Fabricante	ABB
Modelo	Is-Limiter
Tensão nominal	13,8 kV
Corrente nominal	3.150 A
Frequência	60 Hz
Corrente máxima de curto-circuito (I_{max})	40 kA
Máxima taxa de crescimento da corrente $(di/dt)_{max}$	21,326 kA/ms
Proteção	40 kA _{rms} /100 kA _{crista}
Fusíveis (dois em paralelo)	10 kV – 17,5 kV / 125 A / 63 kA (Fabricante Siba)

Estas ocorrências demonstram a importância de se ajustar de forma confiável a lógica de disparo deste tipo de DLC, tanto do ponto de vista operacional quanto do ponto de vista financeiro. Uma vez indevidamente atuado, um DLC pirotécnico requer a substituição dos seus insertos, cujo custo aproximado, do modelo da Tabela 2.3 em julho de 2018, era de R\$ 88.000,00 cada unidade monofásica de inserto ou US\$ 22.656,00, considerando a taxa P_{tax} do Banco Central do Brasil em 19/07/2018. Além dos custos diretos para aquisição dos insertos, no período de tempo necessário para o restabelecimento do DLC, a planta industrial irá operar com restrições que pode acarretar diretamente em perdas de produção.

2.3.3. DISPOSITIVOS PIROTÉCNICOS COM REATORES LIMITADORES EM PARALELO

A principal desvantagem da aplicação do DLC pirotécnico está em comprometer a continuidade de alimentação do circuito após a atuação do dispositivo. Para minimizar este efeito, pode-se utilizar o dispositivo pirotécnico em paralelo com reatores limitadores de curto-circuito, conforme ilustra a Figura 2.16. Durante o regime permanente, a corrente de carga circula normalmente pelo dispositivo pirotécnico, que tem impedância praticamente nula, de forma que o reator, sem a passagem de corrente elétrica, não adiciona perdas técnicas (perdas joules e queda de tensão) em regime permanente.

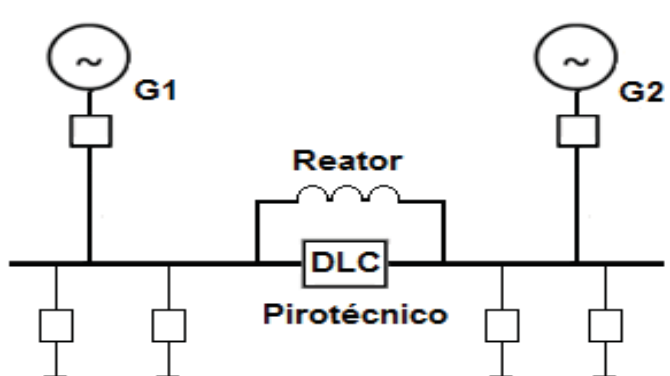


Fig. 2.16. Arranjo do DLC pirotécnico em paralelo com um reator limitador.

Neste arranjo com os dispositivos em paralelo, durante a ocorrência de um curto-circuito, a atuação do dispositivo pirotécnico faz com que o reator seja inserido no circuito, que deverá ser dimensionado para reduzir o valor da corrente de curto-circuito dentro dos limites de interrupção dos disjuntores do circuito onde ocorreu o defeito e a suportabilidade dos equipamentos.

A Figura 2.17 compara as curvas das correntes de curto-circuito trifásico de uma das fases de um sistema elétrico em três situações: (i) a curva prospectiva, ou seja, sem dispositivo para a limitação da corrente de curto-circuito, (ii) com apenas o DLC pirotécnico e (iii) com o DLC pirotécnico em paralelo com o reator limitador.

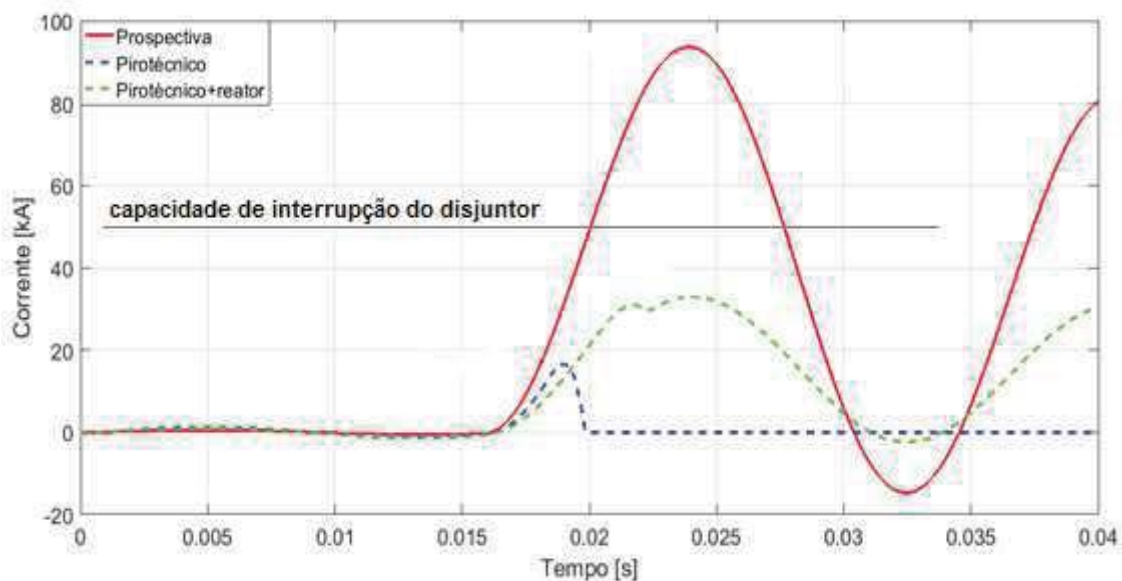


Fig. 2.17 – Formas das curvas das correntes de curto-circuito prospectiva, com DLC pirotécnico e com DLC pirotécnico em paralelo com um reator limitador.

A instalação do reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico elimina o maior inconveniente de utilização de um dispositivo pirotécnico, que uma vez atuado interrompe a passagem de corrente do circuito, deixando-o fora de operação até o restabelecimento do dispositivo pirotécnico pela área de manutenção. Portanto, apesar do incremento de custos com a instalação do reator limitador, esta alternativa evita o desligamento completo das cargas que o sistema alimenta, garantindo a continuidade do processo a qual o sistema elétrico está inserido.

Entretanto, para aplicação de um dispositivo pirotécnico com um reator em paralelo, há condições que devem ser observadas conforme SCHAFFER (2000):

- a) O reator deve ser dimensionado para operar continuamente quando da retirada do dispositivo pirotécnico do circuito, mantendo as condições operacionais e de segurança do sistema. Além disso, a impedância do reator não deve ser alta ao ponto de a queda de tensão implicar em perdas de eficiência dos equipamentos e nas partidas dos motores;
- b) Na ocorrência de faltas monofásicas e bifásicas, a abertura dos insertos do dispositivo pirotécnico levará à energização dos respectivos reatores conectados as fases defeituosas. Com apenas um ou dois reatores energizados deverá ser garantida que o desbalanceamento de tensão entre fases não afete a operação do sistema;

- c) É desejável que a substituição dos insertos atuados, ou a manutenção do dispositivo pirotécnico, ocorra sem a desenergização do sistema, a fim de não interromper a alimentação de suas cargas. Para tanto, será necessário inserir equipamentos isoladores no circuito, como disjuntores ou chaves, o que pode onerar a instalação e
- d) Adequada resposta aos transitórios elétricos durante a inserção do reator no circuito. Porém, na história do uso deste arranjo nenhum distúrbio específico durante a inserção dos reatores foi notado.

2.3.4. DISPOSITIVOS SUPERCONDUTORES

2.3.4.1. Breve Histórico dos Materiais Supercondutores

O fenômeno da supercondutividade foi inicialmente descrito por Heike Kamerlingh Onnes no ano de 1911, em Leiden, Holanda, que, ao estudar as propriedades elétricas de tubos capilares de mercúrio a baixas temperaturas, observou que a resistência elétrica deste material caía repentinamente a zero quando a temperatura descia abaixo dos 4,2 K (-268,8°C) (ROSE-INNES, 1994). A resistência do material não foi caindo gradualmente, como Onnes suspeitava, mas de maneira abrupta. Este novo estado da matéria ficou conhecido por estado supercondutor e a temperatura a que o material entrava neste estado ficou conhecida por temperatura crítica (T_c). A investigação das propriedades da matéria a baixas temperaturas valeu a Onnes o prêmio Nobel em 1913, estabelecendo aquelas que eram as principais teorias àquela altura relativa à resistividade elétrica dos materiais a baixas temperaturas (FERREIRA, 2013). Ainda em 1911, Onnes observou também que o estado supercondutor não dependia somente da temperatura. Onnes apurou que o estado supercondutor dependia também da densidade de corrente que atravessava o material, existindo um valor máximo também para esta sem que o material passasse ao estado normal, ou resistivo. Este valor de densidade de corrente ficou denominado por densidade de corrente crítica (J_c).

Em 1914, Onnes observou que o estado supercondutor de um material podia ser anulado por um campo magnético H maior do que um certo campo magnético crítico (H_c). Portanto, já em 1914 sabia-se que a supercondutividade poderia ser

destruída quando fosse superado qualquer um dos chamados parâmetros críticos: a temperatura, o campo magnético e a densidade de corrente elétrica (BARROSO, 2014).

Por conta disto, o estado da supercondutividade é definido pelos seguintes parâmetros principais:

- a) Temperatura crítica (T_c).
- b) Campo magnético crítico (H_c).
- c) Densidade de corrente crítica (J_c).

A relação entre a temperatura crítica, o campo magnético crítico e a corrente crítica podem ser representados tridimensionalmente pelo diagrama de fase T_c - H_c - J_c ilustrado na Figura 2.18. O diagrama de fase representa a superfície crítica do material, ou seja, no interior desta superfície o material encontra-se no estado supercondutor, no exterior encontra-se no seu estado normal.

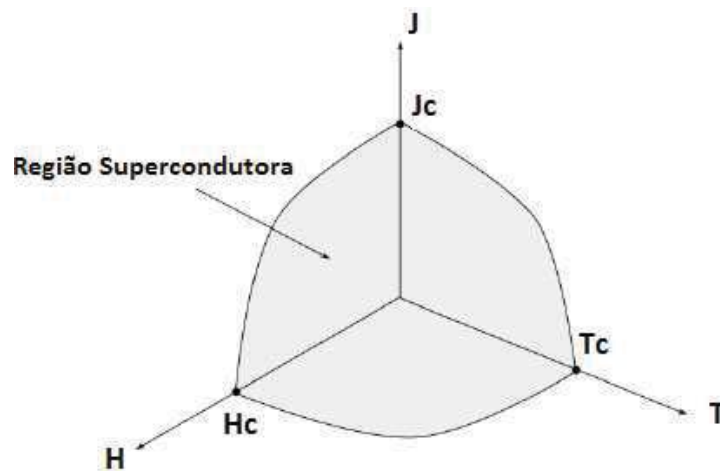


Fig. 2.18. Diagrama de fase de um material em estado supercondutor.

Logo depois da descoberta da supercondutividade em 1911, não existia nenhuma explicação teórica sobre o fenômeno da supercondutividade. Acreditava-se que um supercondutor fosse apenas um condutor ideal com resistência nula. Em 1933, W. Meissner e R. Ochsenfeld descobriram que não existia indução magnética (B) no interior de uma parte maciça de um material no estado supercondutor. Este fenômeno de expulsão do fluxo magnético do interior da parte maciça de um supercondutor passou a ser conhecido como Efeito Meissner (ARSÊNIO, 2012). Esse

fenômeno difere o estado supercondutor do condutor ideal. A Supercondutividade passa então a ser conhecida como um novo estado da matéria.

Em 1957 Bardeen, Cooper e Schieffer formularam a mais importante teoria microscópica que permite explicar praticamente todos os efeitos associados com a supercondutividade. Esta formulação teórica passou a ser conhecida na literatura como a teoria BCS (iniciais dos autores). Os autores da teoria BCS foram premiados em 1972 com o Prêmio Nobel de Física. Em homenagem a Cooper, os dois elétrons ligados que participam do fenômeno coletivo da supercondutividade receberam o nome de pares de Cooper (BARROSO, 2014).

Em 1986, Johannes Georg Bednorz e Karl Alex Müller, da empresa IBM, publicaram resultados de uma pesquisa que indicavam a existência de supercondutividade acima dos 30 K (-243 °C). Este trabalho valeu-lhes o prêmio Nobel em 1987 e estes materiais ficaram designados como materiais supercondutores de alta temperatura (HTS – *High Temperature Superconductor*). No mesmo ano, os investigadores M.K. Wu, da Universidade do Alabama, e C.W. Chu, da Universidade de Houston produziram os primeiros supercondutores cerâmicos com temperaturas críticas acima da temperatura do nitrogênio líquido, cuja temperatura de liquefação, para 1 atm, é igual a 77,4 K (-195,6 °C) (SIMÕES, 2013).

A descoberta de materiais supercondutores com temperaturas críticas acima da temperatura de liquefação do nitrogênio líquido tratou-se de um passo muito importante, uma vez que esta faixa de temperaturas é alcançável mais fácil e de maneira muito mais econômica e segura. Os sistemas criogênicos são até 40 vezes mais eficientes nesta faixa de temperatura, quando comparados com a faixa do hélio líquido (SIMÕES, 2013).

2.3.4.2. Aplicações dos Materiais Supercondutores

O emprego de materiais supercondutores em aplicações tecnológicas tem se desenvolvido amplamente após a descoberta de materiais supercondutores de alta temperatura crítica, onde o processo de resfriamento passou a utilizar o nitrogênio líquido, diminuindo consideravelmente o custo do sistema criogênico.

Uma das mais promissoras aplicações dos supercondutores são nos DLCs nas redes de geração, transmissão e distribuição. As faixas de tensão para aplicação dos DLCs supercondutores são essencialmente em média e alta tensão, porém não se exclui aplicações também em baixa tensão. Os limitadores de corrente a base de materiais supercondutores de alta temperatura, ou em inglês *Superconducting Fault Current Limiters (SFCL)*, têm sido estudados por vários grupos de pesquisas e empresas, sendo alguns modelos instalados para testes e outros em operação definitiva (ARSÉNIO, 2012).

O primeiro grande teste realizado com limitador supercondutor foi em 1996 quando a empresa ABB (Asea Brown Boveri) testou um limitador do tipo indutivo em uma rede sueca de 10 kV, com potência de 1,2 MVA.

A empresa alemã Nexans Superconductors conseguiu desenvolver em 2004 um limitador supercondutor resistivo, denominado CURL10, fazendo uso do material Bi-2212. Estes limitadores foram testados em uma rede de distribuição alemã de 10 kV, com potência de 10 MVA (ARSÉNIO, 2012). A maioria dos protótipos ainda estão em fase de testes e homologação. Os primeiros limitadores supercondutores comerciais foram instalados pela Nexans Superconductors em uma rede de distribuição de 12 kV (SILVA, 2013).

As principais características destes limitadores, que não são encontradas nos dispositivos limitadores convencionais, são:

- a) Rápido tempo de atuação: atuam com eficiência em meio ciclo de corrente;
- b) Grande capacidade de limitação: limitadores supercondutores do tipo resistivo podem limitar a corrente de falta em até 10 vezes, dependendo da configuração do circuito;
- c) Não precisam ser substituídos: quando submetido a uma corrente de curto-circuito o material supercondutor que compõe o limitador apenas passa ao seu estado normal. Após a falta é necessário apenas um determinado tempo para que o material supercondutor retorne ao seu estado de resistividade nula, retornando novamente às suas condições originais de

operação. Por conseguinte, também não há necessidade de sobressalentes;

- d) Não necessitam de sensores auxiliares: alguns limitadores convencionais necessitam de sensores ou chaves para que na ocorrência de uma falta possam ser detectadas para então os dispositivos serem acionados. Nos dispositivos limitadores supercondutores a atuação de limitação da corrente de curto-circuito ocorre devido à propriedade intrínseca do material em alterar o valor de sua resistividade quando submetido à altas correntes (acima da corrente crítica);
- e) São leves e menores (especialmente no caso do tipo resistivo) quando comparados com os demais limitadores;
- f) São “invisíveis” em condições normais: sob condições normais de operação do sistema elétrico, estes dispositivos apresentam resistência desprezível e podem ser projetados para apresentarem indutância reduzida, evitando assim, quedas de tensão e perdas de energia e
- g) Falha segura: mesmo se o limitador falhar, ele irá limitar a corrente. Um defeito no sistema criogênico, ou qualquer outro problema durante um curto circuito, fará com que o material do dispositivo passe para o estado normal e apresente resistividade diferente de zero, limitando assim a corrente de curto-circuito.

2.3.4.3. Principais Modelos

Tipo Resistivo

O DLC supercondutor resistivo trabalha com temperaturas em torno de 77 K (temperatura do nitrogênio líquido), sendo montado diretamente em série com o circuito a ser protegido. O supercondutor resistivo fica imerso continuamente no nitrogênio líquido, conforme ilustrado na Figura 2.19, sendo assim importante que esteja bem protegido do meio exterior para não haver troca de calor. Em condições normais de operação, o material supercondutor se encontra no estado supercondutor, ou seja, com resistência nula e sem perda por efeito Joule. Quando da ocorrência de

uma falta, o valor da corrente crítica é superado e o material em estado supercondutor, devido à transição abrupta do material (*quench*) para o estado normal, insere uma impedância série no circuito quase que instantaneamente, por conta da resistividade do material encontrada seu estado normal. Esta impedância faz com que essa corrente seja limitada antes que seu primeiro valor de crista seja alcançado. Segundo Monteiro (2005), tempos inferiores a 1 ms podem ser alcançados entre a ocorrência do curto-circuito e a atuação de limitação do DLC supercondutor.

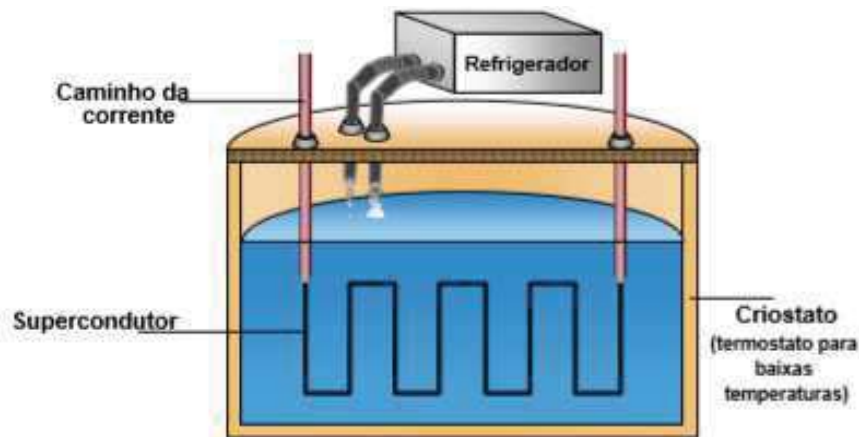


Fig. 2.19 - Detalhe do sistema criogênico do DLC supercondutor.
Fonte: MONTEIRO (2005).

Para prevenir o aquecimento excessivo do dispositivo e evitar que o tempo necessário para seu resfriamento seja longo, ou até queime o material supercondutor, a corrente de curto-circuito é conduzida durante somente alguns poucos ciclos. Em seguida, o DLC supercondutor é desconectado por equipamentos de manobra ligados em série, como os disjuntores. Após o resfriamento, o dispositivo volta a ser inserido à temperatura normal de operação, no seu estado de supercondutividade original.

O uso de limitadores supercondutores do tipo resistivo permite a limitação da corrente de curto-circuito sem os efeitos negativos de outras tecnologias empregadas na limitação de curto-circuito convencionais. Entre os efeitos negativos superados com a utilização de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores, são possíveis citar as quedas de tensão em regime permanente e na partida de motores quando utilizados reatores limitadores, a longa indisponibilidade do sistema quando dispositivos pirotécnicos são atuados e as formas de onda da corrente de falta limitada não sofrer distorções quando limitada por limitadores puramente resistivos (MAFRA,

2016). Entretanto, o grande diferencial deste tipo de limitador é o fato de que a inserção de resistência em série durante um curto-circuito diminuirá fortemente a relação X/R do sistema, diminuindo os picos de corrente de curto-circuito assimétrica.

A Tabela 2.4 reúne exemplos de projetos nos quais foram empregados limitadores supercondutores resistivos.

Tabela 2.4 - Principais projetos de DLCs supercondutores resistivos

Empresa	País / Ano	Dados	Fases	Supercondutor
Siemens / AMSC	Estados Unidos / 2007	7,5 kV / 300 A	1 ϕ	Fita YBCO
Hyundai / AMSC	Coréia / 2007	13,2 kV / 630 A	1 ϕ	Fita YBCO
Toshiba	Japão / 2008	6,6 kV / 72 A	3 ϕ	Bloco de Bi 2212
KEPRI	Coréia / 2011	22,9 kV / 3.000 A	3 ϕ	Fita YBCO
RSE	Índia / 2012	9 kV / 1.000 A	3 ϕ	Fita YBCO
AMSC / Siemens	Estados Unidos / 2012	115 kV / 1200 A	3 ϕ	Fita YBCO
Nexans SC	Estados Unidos / 2013	24 kV / 1.000 A	3 ϕ	Fita YBCO
Nexans SC	Inglaterra / 2015	12 kV / 1.600 A	3 ϕ	Fita YBCO
Applied Materials	Estados Unidos / 2016	115 kV / 550 A	3 ϕ	Fita YBCO
RSE (*)	Itália / 2016	9 kV / 15,6 MVA	3 ϕ	Fita YBCO

Referências: (NOE, 2017), exceto RSE (*) cuja referência é (ETXEGARAI, 2017).

A Figura 2.20 ilustra exemplos de DLC supercondutores resistivos em operação.



Fig. 2.20 - Exemplos de DLCs supercondutores em aplicação.

Fonte: (NOE, 2017).

- Nexans: tipo resistivo, YBCO, 12 kV, 600 A, instalado em 2015 (NOE, 2017).
- Siemens: tipo resistivo, YBCO, 12 kV, 815 A, instalado em 2016 (NOE, 2017).
- Applied Materials: tipo resistivo, YBCO, 115 kV, 550 A, instalado em 2016 (NOE, 2017).

Tipo Indutivo

O DLC supercondutor do tipo indutivo assemelha-se a um transformador com o secundário em curto-circuito, sendo o primário composto por um condutor elétrico normal e o secundário composto por material supercondutor, conforme ilustrado na Figura 2.21.

Em regime normal de funcionamento, verifica-se que a impedância do limitador é próxima de zero, uma vez que a impedância nula do supercondutor no secundário é refletida no primário e, por consequência, não existe queda de tensão nos terminais do DLC. Por outro lado, quando em curto-circuito, as correntes induzidas no secundário ultrapassam a corrente crítica do material supercondutor, passando este material do estado supercondutor para o seu estado normal. Desta forma, a impedância originada na bobina secundário é refletida para a bobina primária,

limitando assim a corrente de curto-circuito, além de introduzir uma queda de tensão no circuito. (FERREIRA, 2013).

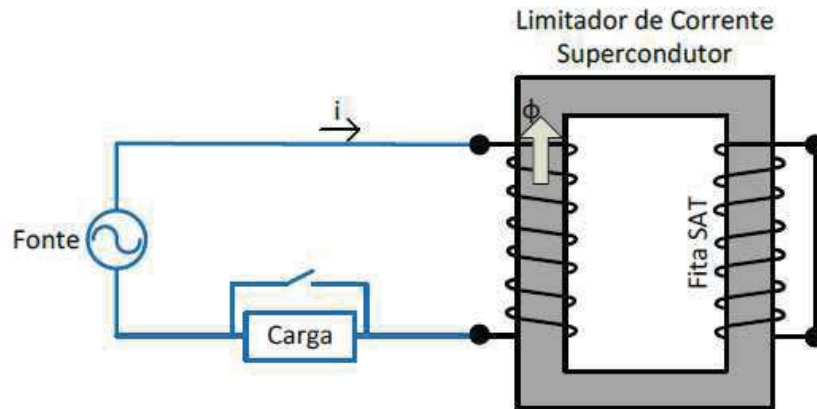


Fig. 2.21. DLC supercondutor do tipo indutivo.
Fonte: ARSÊNIO (2012).

Com relação às vantagens e desvantagens deste tipo de DLC supercondutor quando comparado ao do tipo resistivo, pode-se destacar (FERREIRA, 2013):

- a) Vantagens: (i) possibilidade de alterar a impedância do dispositivo mediante a variação do número de espiras no primário, (ii) ausência das questões de integridade física existentes nos DLCs supercondutores do tipo resistivos, na medida que o do tipo indutivo estão ligados magneticamente com o circuito e (iii) maior facilidade de suprimir os pontos quentes, visto que o material supercondutor não fica submetido diretamente às correntes nominais do circuito.
- b) Desvantagens: (i) existência de núcleos ferromagnéticos resulta em peso e volume consideráveis e (ii) inoperáveis em circuito de corrente contínua.

Ainda, segundo (DIDIER et al, 2015) em uma análise comparativa entre os limitadores supercondutores do tipo indutivo e o tipo resistivo foi demonstrada a maior eficiência do tipo resistivo na limitação das correntes de curto-circuito, onde tempos inferiores a 1 ms podem ser alcançados entre a ocorrência do curto-circuito e sua limitação, bem como na resposta as instabilidades transitórias do sistema elétrico.

2.3.5. IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

O aterramento do neutro, através de resistores em sistemas elétricos de média e baixa tensão na indústria do petróleo e química, assim como em outras indústrias, é uma prática que foi disseminada em diversos países do mundo em meados dos anos 80. Esta prática se sustenta na habilidade especial desta tecnologia de aterramento do neutro de eliminar sobretensões transitórias e, simultaneamente, reduzir a corrente de curto-circuito circulante durante o curto-circuito fase-terra as quais, estatisticamente, constituem mais de 80 % dos eventos no universo de curtos-circuitos na indústria (COSTA et al, 2014).

A impedância de aterramento é aplicada para atenuar os efeitos dos curtos-circuitos monofásicos (fase-terra), sendo conectada do ponto neutro dos transformadores de potência ou dos geradores à malha de terra. A impedância de aterramento pode ser simplesmente um resistor, uma reatância ou um conjunto de resistor associado a uma reatância.

Os resistores de aterramento limitam as correntes de curto-circuito a valores que podem variar na prática entre 5 % e 60 % do valor da corrente de curto-circuito trifásico. O valor da resistência ôhmica do resistor é função de dois fatores básicos (MAMEDE, 2013):

- a) A corrente de defeito monofásico resultante da instalação do resistor de aterramento deve ser suficientemente capaz de acionar os dispositivos de proteção e
- b) A corrente de defeito monofásico deve ser suficientemente reduzida a fim de que os esforços térmicos e dinâmicos devem ser compatíveis com os valores nominais dos equipamentos em operação no sistema.

As vantagens da aplicação deste sistema de aterramento do neutro podem se resumidas da seguinte forma (COSTA et al, 2014):

- a) As correntes de falta são baixas e não existem danos e estresses no sistema elétrico;

- b) As baixas correntes reduzem significativamente a possibilidade de choque elétrico, principalmente devido às tensões de passo e toque;
- c) Durante curtos-circuitos fase-terra o arco elétrico é reduzido, evitando desta forma as consequências severas deste fenômeno, para pessoas e equipamentos;
- d) Elimina as sobretensões transitórias causadas por faltas à terra, preservando a isolação dos equipamentos e conseqüentemente aumentando sua vida útil e
- e) Mantém a continuidade operacional do sistema durante a falta à terra, evitando paralisações onerosas.

Por outro lado, este esquema de aterramento apresenta dificuldades em sistemas de grande porte, obrigando o emprego de dispositivos e técnicas especiais para a sinalização e localização do primeiro defeito. Na ocorrência de um segundo defeito, a segurança humana fica comprometida (PINHEIRO, 2013).

2.3.6. DISPOSITIVOS COM TECNOLOGIA FACTS

A tecnologia FACTS, que é a abreviação da expressão *Flexible Alternating Current Transmission System* ou Sistema Flexível de Transmissão em Corrente Alternada, foi revolucionária quando começou a ser empregada nos sistemas elétricos de potência no final da década de 1980 (ANDRADE, 2011). Com o avanço desta tecnologia, os equipamentos eletromecânicos foram sendo gradualmente abandonados para condicionamento de energia. O conceito FACTS consiste no uso combinado de elementos passivos com dispositivos semicondutores de potência, sendo estes dispositivos parcialmente ou totalmente controláveis, que permite maior flexibilidade para condicionar a energia no sistema de potência. O termo flexibilidade está relacionado com a capacidade rápida e contínua para alterar os principais parâmetros que controlam a dinâmica de funcionamento de um sistema elétrico (ETT et al, 2011).

As principais aplicações dos dispositivos FACTS são (LANES, 2006):

- a) Controle do fluxo de energia;
- b) Amortecimento de oscilações eletromecânicas;
- c) Aumento da capacidade de transmissão e
- d) Limitação das correntes de curto-circuito.

Os equipamentos com tecnologia FACTS envolvem um conjunto de controladores dentre os quais deve-se escolher aquele que melhor se encaixa em cada aplicação específica. Estes equipamentos podem ser divididos em três categorias básicas: os equipamentos *shunt* (em derivação), os equipamentos série e os controladores que combinam equipamentos série e *shunt* simultaneamente. A seguir são citados alguns destes dispositivos com suas respectivas finalidades (ETT et al, 2011):

- a) Compensadores estáticos – SVC (*Static Var Compensator*): controle rápido da tensão local e amortecimento de oscilações de potência.
- b) Reator derivação controlado por tiristor – TCR (*Thyristor Controlled Reactor*): controle e compensação contínua da tensão local (por exemplo, em casos de instabilidade de tensão, sobretensões transitórias, sobretensões das linhas de transmissão em vazio etc.) e da potência reativa além da redução de oscilações no sistema.
- c) Capacitor derivação chaveado por tiristor – TSC (*Thyristor Switched Capacitor*): controle e compensação discreta da tensão e da potência reativa suprida ao sistema, além da correção do fator de potência indutivo das cargas conectadas.
- d) Capacitor série controlado por tiristor – TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*): teoricamente, o TCSC pode desempenhar a função de controle dinâmico do fluxo de potência numa linha de transmissão; aumento da estabilidade dinâmica do sistema de transmissão, melhoria da regulação de tensão e balanço da potência reativa; amortecimento de oscilações de baixa frequência; aumentar capacidade de transmissão; entre outros.

- e) Limitador de corrente de curto-circuito - SCCL (*Short-Circuit Current Limiter*): controle dinâmico da corrente de curto-circuito e da energia em linhas de transmissão.
- f) Regulador de Ângulo de Fase controlado por Tiristor - TCPAR (*Thyristor-Controlled Phase Angle Regulator*): controle dinâmico da tensão e do fluxo de potência através da variação do ângulo de transmissão.
- g) Compensador Síncrono Estático – STATCOM (*Static Synchronous Compensator*): controle rápido da tensão local e da potência reativa. É também utilizado no amortecimento de oscilações de potência, cancelamento de harmônicos, controle do fator de potência, mitigação de *flickers*, balanço de carga assimétrica e outras solicitações.
- h) Compensador síncrono estático em série – SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*): controle instantâneo (aumento e redução) do fluxo de potência ativa e reativa em uma linha de transmissão, e amortecimento de oscilações transitórias no sistema.
- i) Controlador unificado de fluxo de energia – UPFC (*Unified Power Flow Controller*): controle rápido do fluxo de energia tanto via *shunt* quanto via série; suporte da tensão de linha, regulação do ângulo de fase; amortecimento de oscilações no sistema; redução dos efeitos de ressonância subsíncrona (RSS); limitação de correntes de falta; minimização das perdas de energia sem necessidade de reprogramar a geração; entre outras.

Dentre estes dispositivos o TCSC é o controlador FACTS mais promissor para aplicações em limitações de corrente de curto-circuito (MONTEIRO, 2005). A Figura 2.22 mostra um circuito básico de um dispositivo TCSC.

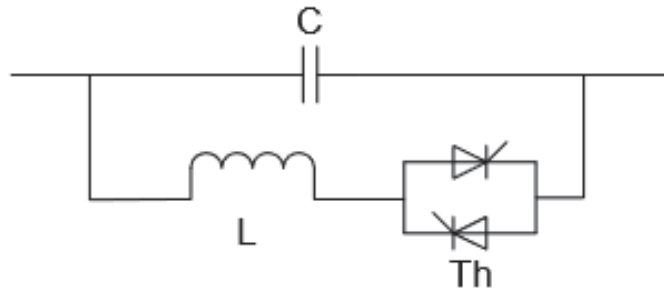


Fig. 2.22. Circuito básico de um dispositivo TCSC.
Fonte: VERMA (2009).

Este modelo foi proposto por Karady (1992). Este tipo de limitador é formado por um capacitor em paralelo com um indutor em série com um par de tiristores.

Em condições normais de operação, os tiristores estão em estado bloqueado, ou seja, sem a ativação de seus respectivos terminais de controle (portas *gate*), e toda corrente atravessa o capacitor. A capacitância em série no circuito insere naturalmente uma compensação reativa para linhas com reatância indutiva. Portanto, em condições normais de operação a impedância através do limitador é dada pela equação (9) (VERMA, 2009):

$$Z_{FCL(NORMAL)} = \frac{-j}{\omega C} \quad (9)$$

Porém, quando da ocorrência de um curto-circuito os tiristores são instantaneamente chaveados, permitindo assim a passagem da corrente elétrica pelo indutor e introduzindo no circuito o valor máximo de reatância indutiva. Desta forma, a nova impedância no dispositivo resulta na equação (10) (VERMA, 2009):

$$Z_{FCL(FLT)} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (10)$$

Esta impedância é capaz de limitar a corrente de curto-circuito e introduzir uma queda de tensão entre seus terminais nas condições de falta.

Para desempenhar as funções de limitador de corrente de curto-circuito, o TCSC tem que ser dimensionado para suportar as correntes de curto-circuito e apresentar uma alta impedância indutiva. Por isto, um TCSC necessita ser protegido contra picos de tensão e de corrente de valor excessivo, geralmente através da

inclusão de dispositivos de proteção, como um varistor (MOV – *Metal Oxid Varistor*) mostrado no circuito da Figura 2.23.

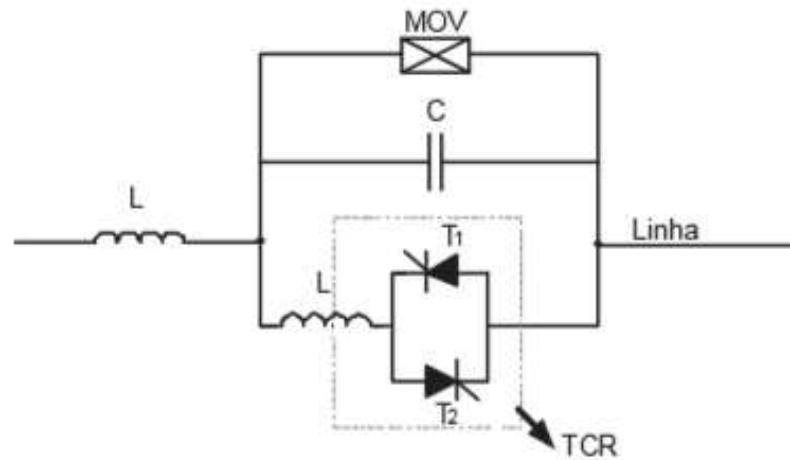


Fig. 2.23 - Circuito básico de um dispositivo TCSC com MOV.
Fonte: VERMA (2009), adaptado pelo autor.

Normalmente, os equipamentos FACTS desempenham mais do que uma única função principal na rede, justificando a sua versatilidade e instalação no sistema. Uma vantagem adicional na instalação de equipamentos baseados em eletrônica de potência está na ocupação de áreas relativamente menores quando comparadas com outras tecnologias tradicionais.

A desvantagem de utilizar estes dispositivos apenas como limitador de corrente de curto-circuito em sistemas elétricos industriais torna-o atualmente inviável economicamente. Devido a isto, sua aplicação em sistemas elétricos deve ir além desta funcionalidade, como amortecer as oscilações de potência, controlar fluxos de energia e aumentar a capacidade de transmissão dos sistemas elétricos de potência de extra alta tensão.

2.3.7. DISJUNTORES ELETRÔNICOS DE ABERTURA RÁPIDA

Aproveitando da evolução da eletrônica de potência e dos dispositivos de estado sólido, os disjuntores eletrônicos têm se apresentado como mais uma alternativa no tratamento de limitação ou extinção de correntes de curto-circuito. Uma das grandes vantagens é relativa ao tempo de atuação. Enquanto disjuntores eletromecânicos convencionais possuem tempo de atuação da ordem de 3/2 ciclos (≈ 25 ms) em baixa tensão (SCHNEIDER, 2019) e de 2 ½ ciclos (≈ 42 ms) em média

tensão (ABB, 2019), os disjuntores contendo chaves eletrônicas reduzem esse tempo para aproximadamente $\frac{1}{2}$ ciclo (≈ 8 ms) nos sistemas elétricos industriais, tanto de média tensão quanto de baixa tensão. (ANDRADE, 2011).

Entretanto, as chaves de estado sólido têm perdas que são inerentes ao aspecto construtivo, o que implica em perdas altas em regime normal quando comparadas aos disjuntores convencionais de média e baixa tensão. Além disso, não se atinge valores tão altos de corrente a ser protegida como no caso de disjuntores convencionais. Dessa forma, pode-se empregar os disjuntores rápidos atuando como limitadores de corrente de curto-circuito em instalações cujas capacidades dos disjuntores existentes estejam sendo superadas. No momento do curto-circuito, os disjuntores rápidos atuam seccionando um barramento ou abrindo uma linha, reduzindo assim o nível da corrente de curto-circuito total e permitindo desta forma, a operação adequada e segura dos disjuntores convencionais existentes. Este tipo de aplicação só seria viável, portanto, se os disjuntores de abertura rápida atuassem em um tempo mais curto do que os disjuntores convencionais, o que seria possível no caso da utilização de chaves eletrônicas (ANDRADE, 2011).

Na prática, os disjuntores eletrônicos ainda possuem um alto custo para sua aquisição e em sua maioria se encontram em fase de desenvolvimento (ANDRADE, 2011).

2.3.8. CONTROLADOR DE POTÊNCIA INTERFASES - IPC

A tecnologia IPC - Controlador de Potência Interfases - foi desenvolvida pela ABB em conjunto com a Hydro Quebec – CITEQ e pode ser considerada como uma solução promissora para limitar as correntes de curto-circuito em situações de superação de subestações transformadoras, principalmente aquelas com limitações de espaço físico (OLIVEIRA, 2005).

O IPC utiliza equipamentos convencionais, como capacitores, indutores, transformadores defasadores e dependendo da aplicação que se queira deste dispositivo, módulos de eletrônica de potência também podem ser acrescentados ao circuito.

Os IPCs são conectados entre duas barras e possuem, no mínimo, dois ramos em paralelos, no qual um é capacitivo e o outro indutivo, como pode ser visto na Figura 2.24. Além disso, um elemento defasador pode estar em série com a reatância nesses ramos. Este elemento pode ser (i) um transformador defasador, (ii) conexões de transformadores convencionais e (iii) conexões entre fases diferentes de dois sistemas síncronos.

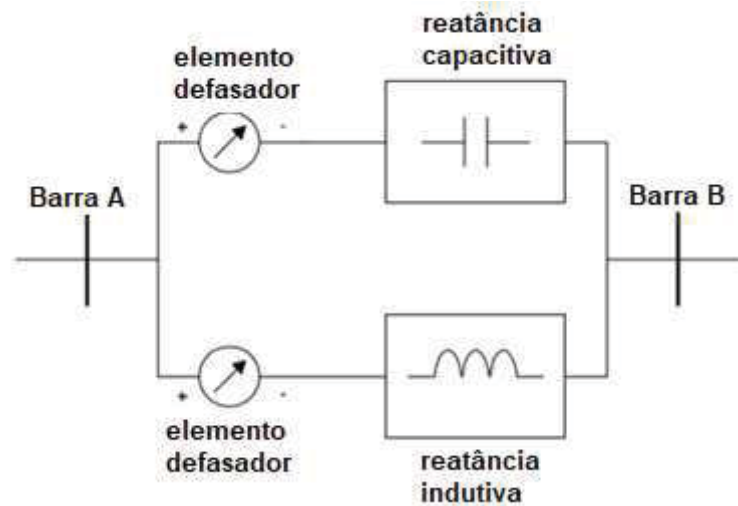


Fig. 2.24 - Circuito básico de um IPC.
Fonte: ANDRADE (2011).

De modo simplificado podemos dizer que a conexão do IPC em série com a linha de transmissão permite um controle do fluxo de carga, uma vez que a atuação de reatâncias diferentes em cada ramo em conjunto com uma defasagem em um dos ramos pode limitar a corrente que chega até a barra B pela alteração da impedância após a detecção da falta.

As principais aplicações do IPC são:

- a) Interligações de redes assíncronas;
- b) Interligações de subsistemas síncronos;
- c) Aumento da capacidade de transformação sem aumentar os níveis de correntes de curto-circuito e
- d) Controle do fluxo de energia em linhas de transmissão.

Para cada uma destas aplicações, existe um tipo de arranjo específico do IPC, que deriva do arranjo básico apresentado na Figura 2.24. Estes arranjos também são

diferenciados quando aplicados em redes síncronas (IPCs síncronos) e em redes assíncronas (IPCs assíncronos).

Dependendo da aplicação, os IPCs síncronos podem ser designados pelos seguintes termos (LEMAY, 2001):

- a) Interligador de Desacoplamento (ID): usados para desacoplar redes em interligações, evitando os problemas de oscilação, de flutuações excessivas de tensões e de elevação dos níveis de curto-circuito.
- b) Transformador Limitador de Corrente de Curto-Circuito (TLCC): usados para desacoplar redes quando existir outros transformadores convencionais em paralelo, permitindo o aumento da capacidade de transformação sem elevar os níveis de curto-circuito nas redes envolvidas.
- c) Transformador Defasador Assistido (TDA): a mais simples aplicação do IPC em transmissão é o transformador defasador (*Phase Shifting Transformer* – PST) em paralelo com uma reatância. Estes dispositivos podem ser usados para aumentar a capacidade de transferência dos transformadores defasadores existentes ou para implementar um equivalente PST de maior capacidade por um custo mais baixo.

Segundo Lemay (2001), a utilização de IPCs em redes assíncronas, embora sejam viáveis, apresentam um custo muito elevado e se encontra em estágio de desenvolvimento. Os IPCs síncronos são menos complexos e apresentam possibilidades de utilização mais ampla.

3. SISTEMA ELÉTRICO TÍPICO DE UMA PLATAFORMA MARÍTIMA DE PETRÓLEO

3.1. INTRODUÇÃO

Na geopolítica do petróleo mundial, as descobertas do pré-sal estão entre as mais importantes em todo mundo na última década, colocando o Brasil na 15ª posição de reservas comprovadas de petróleo no mundo, com 12,6 bilhões de barris, conforme divulgado no periódico (BP, 2017). Entretanto, comparada à outras reservas mundiais, os grandes diferenciais do petróleo armazenado na camada do pré-sal brasileiro são a sua qualidade e o seu alto valor comercial.

Desde o início da exploração das reservas do pré-sal brasileiro, iniciada em setembro de 2008 com uma produção média de 40 mil barris por dia, ocorreu um crescimento vertiginoso da produção em uma década, ultrapassando a marca média diária de 1,5 milhões de barris em 2018 (PETROBRAS, 2019). Atualmente, praticamente toda a produção e reservas provadas do petróleo brasileiro estão localizadas em alto mar, a dezenas de quilômetros de distância da costa, o que evidencia a importância das plataformas marítimas de produção no contexto brasileiro

As plataformas marítimas de produção são classificadas como:

- a) Plataforma fixa do tipo jaqueta – foram as pioneiras a serem implementadas no Brasil para produção marítima, para lâminas d'água de até 300 metros e a poucos quilômetros de distância da costa. Podem produzir sozinhas, mandando o óleo diretamente para terra por meio de tubulações, ou com os chamados navios aliviadores acoplados à plataforma. Hoje encontram-se em desuso e com baixíssima produção.
- b) Plataforma do tipo semissubmersível (SS) – consiste em uma plataforma superior, sempre acima da lâmina d'água, apoiada por colunas em flutuadores submersos. Para conter as movimentações, devido à ação das ondas, correntes marítimas e vento, podem ser utilizados dois sistemas para a fixação da unidade flutuante: o sistema de ancoragem ou o sistema de posicionamento dinâmico. Podem ser instaladas em grandes profundidades (mais de 2.000 metros), porém não possuem reservatórios

para o armazenamento da produção, necessitando ser interligada a oleodutos ou a navios aliviadores para o seu escoamento. Essas plataformas têm capacidade de produzir até 180 mil barris por dia e são ainda comuns no portfólio das empresas petrolíferas.

- c) Navio Plataforma – são conhecidos como plataformas do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), que são navios com capacidade de extrair, processar, armazenar e prover a transferência do petróleo produzido. Para fixação da plataforma são empregados sistemas de ancoragem similares aos adotados nas semissubmersíveis. As plataformas do tipo FPSO possuem a mesma capacidade de produção das semissubmersíveis, porém como são capazes de armazenar a produção em diversos tanques localizados no casco do navio, podem operar a grandes distâncias da costa, onde a construção de oleodutos é inviável. Por esta particularidade em especial, é o tipo de plataforma marítima adotado para explorar os campos do pré-sal brasileiro. Estas plataformas estão sendo instaladas sobre lâminas d'água de mais de 2.000 m de profundidade, com capacidade para processar 150 mil barris de petróleo/dia, de comprimir 6 milhões de m³ de gás/dia, de armazenar 1,6 milhões de barris de petróleo em seus tanques.

3.2. PARTICULARIDADES DO SISTEMA ELÉTRICO DO FPSO

Para a elaboração de um projeto básico de eletricidade de uma plataforma de petróleo é necessário conhecer a quantidade de óleo e gás que se deseja produzir. Anteriormente a elaboração do projeto básico, realiza-se uma análise preliminar de cargas e calcula-se a demanda de potência ao longo dos anos de operação da plataforma. Este estudo preliminar possibilita avaliar os aspectos técnicos e econômico-financeiros com o intuito de analisar as alternativas para o sistema de geração e distribuição da unidade. Nesta análise se define a quantidade de geradores, arranjo, níveis de tensões e potências nominais.

Dentre os sistemas elétricas industriais, os sistemas das plataformas marítima de produção possuem consideráveis particularidades, a começar por serem sistemas elétricos isolados, ou seja, não são interligados a nenhum outro sistema. Estes

sistemas são projetados a fim de alcançar o mais elevado nível de segurança, flexibilidade, confiabilidade e robustez. Para isso, tanto as cargas quanto os alimentadores seguem a filosofia da redundância. Para a mesma função, dois equipamentos são instalados para garantir que em caso de falha, ou necessidade de manutenção de um, o outro possa substituí-lo. Desta forma também funcionam os alimentadores (NAVARRO, 2015).

No passado, quando as plataformas marítimas demandavam potências de até 60 MW, as cargas geralmente eram supridas diretamente pelos geradores de 11 kV ou 13,8 kV. Com o aumento da capacidade de processamento das plataformas marítimas e, conseqüentemente a elevação da corrente demandada, o passo natural do projeto elétrico seria a elevação do nível de tensão para 33 kV ou 69 kV. Entretanto, o problema da elevação da tensão do sistema elétrico seria a necessidade da instalação de inúmeros transformadores para alcançar da tensão de utilização das cargas. Além dos transformadores, há ainda o aumento do peso e do volume dos equipamentos e painéis elétricos para este maior nível de tensão, o que inviabiliza por completo a sua implantação em unidades marítimas (HAZEL, 2017).

Como as demandas elétricas dos novos FPSOs já vêm ultrapassando a faixa dos 100 MW de potência, a solução adotada para manter o nível de tensão na classe de 15 kV foi seccionar o barramento principal, ficando a sua interconexão a cargo de um DLC pirotécnico. Dividindo o barramento principal em duas semi-barras e distribuindo os geradores e as cargas de forma balanceada, conforme ilustrado na Figura 2.6, quando da ocorrência de uma falta a atuação do DLC impede que as correntes dos geradores e das cargas motóricas instalados na barra não afetada, contribuam na elevação do nível da corrente de curto-circuito no ponto da falta.

De acordo com o incremento das cargas nos FPSOs e do aumento da capacidade de geração, o painel principal tende a possuir maior número de barras interligadas pelo DLC pirotécnico (HAZEL, 2017), seguindo a mesma lógica da eliminação da contribuição da corrente de curto-circuito das barras não afetadas em função da atuação dos DLCs pirotécnicos, conforme exemplificado na Figura 3.1.

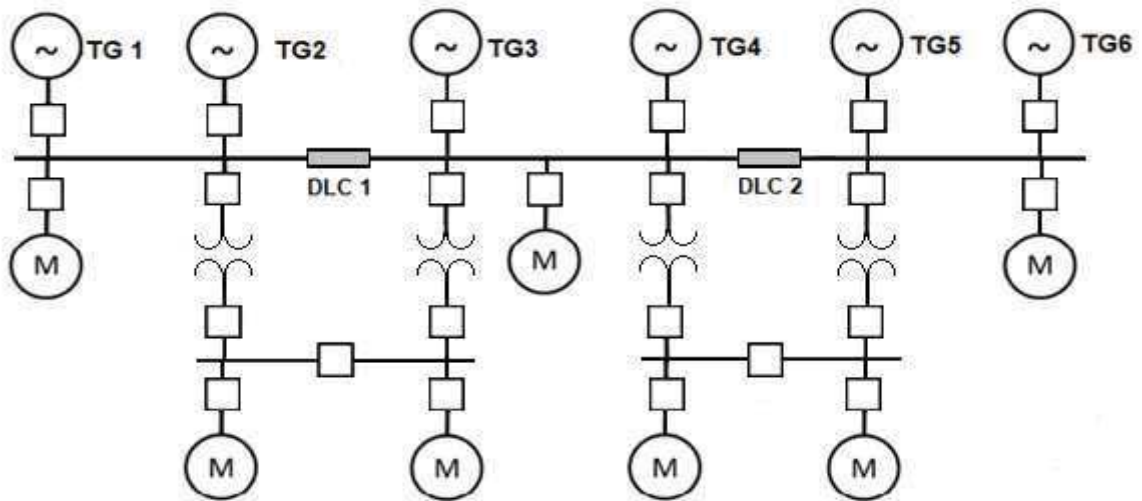


Fig. 3.1 – Diagrama Unifilar de um FPSO com 6 geradores de 13,8 kV.

Outra particularidade a ser observada na elaboração dos projetos elétricos é que as plataformas de produção de petróleo são consideradas embarcações marítimas, sendo desta forma submetidas aos rigorosos requisitos técnicos das organizações internacionais de classes marítimas. Portanto, além das normas técnicas nacionais e internacionais, as exigências dos órgãos reguladores marítimos devem ser levadas em consideração no projeto elétrico destas unidades, assim como as normas e padrões da Sociedade Classificadora, responsável pela certificação necessária para emissão da apólice de seguro da embarcação.

3.3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Conforme mencionado anteriormente, as especificações técnicas dos sistemas elétricos das plataformas marítimas devem obedecer aos padrões e normas estabelecidas por diversos órgãos, tais como: da Sociedade Classificadora, IMO, SOLAS, MODU CODE, IEC, IEEE e os padrões próprios das empresas petrolíferas.

Para as plataformas típicas, objeto deste trabalho, podem-se destacar os seguintes padrões técnicos que vêm sendo adotados em seus projetos:

- a) Tensão da geração principal: 13,8 kV.
- b) Níveis de tensão de alimentação dos motores:
 - Acima de 1.200 kW → 13,8 kV;
 - entre 150 kW até 1.200 kW → 4,16 kV e
 - até 150 kW → 480 V.

- c) Sistema de Aterramento:
- 13,8 kV – alta impedância com transformador (a corrente de curto-circuito para terra é limitada a valores seguros);
 - 4,16 kV – alta impedância;
 - 480 V e 220 V – não aterrado (isolado) e
 - 125 Vcc e 24 Vcc – não aterrado (isolado).
- d) Cálculo da corrente de curto-circuito de acordo com a norma (IEC-60909-0, 2016).
- e) Queda de tensão máxima de 15 % da tensão nominal do barramento durante a partida dos motores. Para os casos em que a partida direta de motores de baixa tensão causar quedas de tensão superiores à 15 % deve-se utilizar dispositivos de partida indireta, como *soft-starters*.
- f) Limites das correntes de curto-circuito (durante de 1 s):
- Sistema 13,8 kV → $I_{cc} \leq 50 \text{ kA}_{\text{rms}}$.
 - Sistema 4,16 kV → $I_{cc} \leq 40 \text{ kA}_{\text{rms}}$.
 - Sistema 480 V → $I_{cc} \leq 50 \text{ kA}_{\text{rms}}$.

Para as futuras gerações das FPSOs, que já se encontram em desenvolvimento, o aumento da demanda de energia elétrica vem trazendo um grande desafio: capacidade de atender as exigências técnicas sem nenhuma concessão aos critérios de segurança da unidade marítima.

3.4. CARGAS ELÉTRICAS

As cargas elétricas das plataformas marítimas são classificadas de acordo com a sua importância para a continuidade operacional e a segurança da unidade. De acordo com a sua classificação, a alimentação da carga pode ser redundante em diversos níveis, a fim de garantir a funcionalidade e a confiabilidade exigida pelo sistema.

As cargas elétricas nas plataformas são classificadas como cargas normais, auxiliares, essenciais e de emergência.

- a) As cargas normais são aquelas passíveis de interrupção sem risco operacional ou de segurança da planta industrial e da embarcação.
- b) As cargas auxiliares também podem sofrer interrupções, porém são necessárias para a retomada de produção da planta industrial e dos sistemas navais e por isto contam com a alimentação de um gerador dedicado, denominado Gerador Auxiliar, que entra em operação quando da falha de alimentação do sistema de geração principal.
- c) As cargas essenciais são aquelas consideradas essenciais pelos órgãos reguladores marítimos e pelas regras da Sociedade Classificadora da embarcação. Estas cargas também são atendidas por um gerador dedicado, denominado Gerador de Emergência, que entra em operação quando da falha de alimentação do sistema de geração principal.
- d) As cargas de emergência são aquelas que atendem aos sistemas críticos da planta industrial e dos sistemas navais, sendo, portanto, as cargas responsáveis pela segurança da tripulação e pela integridade da embarcação. Devido à sua criticidade, as cargas de emergência são alimentadas, além do gerador de emergência, por dois sistemas ininterruptos de energia, operando em redundância e em locais distintos da embarcação.

3.5. SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O sistema de geração principal é constituído por 4 turbo-geradores, que geram uma tensão nominal de 13,8 kV com frequência de 60 Hz. Cada unidade de geração possui valores de potência nominal de 25 MW / 31,25 MVA e fator de potência de 0,8, sendo o gerador acionado por uma turbina bicombustível, normalmente alimentada pelo próprio gás produzido na plataforma ou, emergencialmente, por óleo diesel. Todos geradores principais têm o neutro aterrado através de alta impedância, a fim de limitar as correntes de curto-circuito monofásicas e, conseqüentemente, limitar os danos mecânicos nos enrolamentos e núcleos dos geradores e motores de 13,8 kV.

Em condições normais de operação, três turbo-geradores são capazes de fornecer energia para todas as unidades consumidoras da plataforma, ficando o 4º turbo-gerador em *stand-by*. Durante um pico de carga, o uso do 4º turbo-gerador pode ser requisitado para atender a demanda da planta. Desta forma, todo o sistema elétrico da plataforma deve ser projetado para atender de forma segura e confiável essa condição atípica de operação.

Há ainda integrados ao sistema elétrico da plataforma dois geradores de menor capacidade acionados por motores diesel. Tais geradores são denominados Gerador Auxiliar e Gerador de Emergência e somente entram em operação em condições emergenciais ou na falha da geração principal da embarcação. Cada um desses geradores gera uma potência elétrica de saída de 1.800 kW / 2.250 kVA, com tensão nominal de 480 V e 60 Hz de frequência.

3.6. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA PLATAFORMA

O projeto elétrico das plataformas prevê um elevado grau de flexibilidade e confiabilidade no que se refere a topologia e manobras para enfrentar situações de falha em seus principais equipamentos ou liberação destes para execução de manutenção. Neste sentido, o sistema de distribuição deve ser projetado com adequada redundância de modo que uma falha em qualquer circuito ou seção do barramento não comprometa todo o sistema. A falha em qualquer circuito ou seção de barramento não causa a indisponibilidade de outras cargas por um longo período.

A distribuição elétrica da plataforma é feita por um sistema radial secundário seletivo e distribuído em três níveis de tensão, 13,8 kV, 4,16 kV e 480 V. Um diagrama unifilar simplificado típico é mostrado na Figura 3.2.

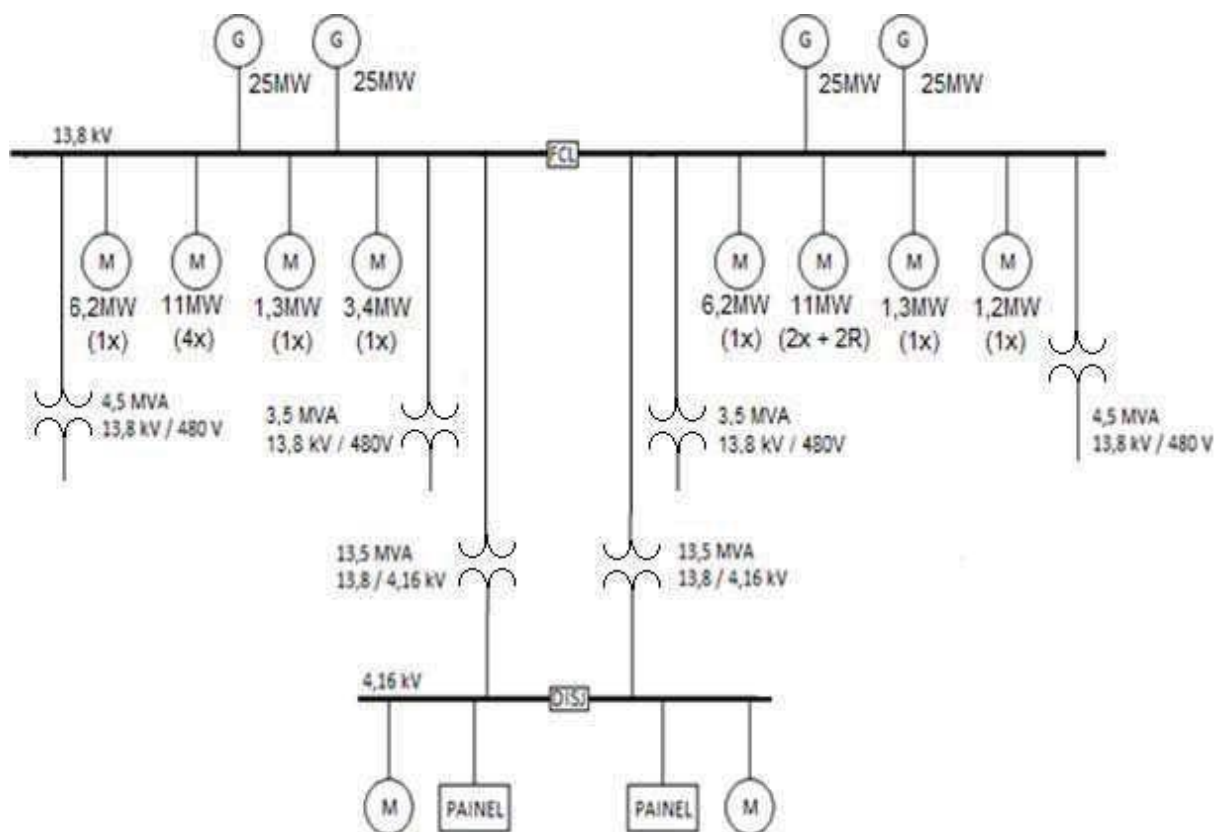


Fig. 3.2. Diagrama unifilar simplificado típico de um FPSO do pré-sal.

3.6.1. SISTEMA DE MÉDIA TENSÃO

3.6.1.1. SISTEMA DE 13,8 kV

O painel de 13,8 kV é dividido em dois barramentos, semi-barras A e semi-barras B, e interconectado por um disjuntor, denominado disjuntor *TIE* (disjuntor de interconexão de barras), em série com um DLC do tipo pirotécnico, que limita a corrente de crista de curto-circuito abaixo da corrente que o painel suporta em todas as condições de operação. Em cada uma das semi-barras são conectados dois turbo-geradores principais.

Este painel possui corrente nominal de 3.150 A e é projetado para suportar uma corrente de curto-circuito simétrica de $50 \text{ kA}_{\text{rms}}$ em 1 s e correntes de crista de até 130 kA.

As cargas alimentadas pelo painel principal de 13,8 kV estão listadas no Apêndice 8.1.

3.6.1.2. SISTEMA DE 4,16 kV

O painel principal de 4,16 kV também é dividido em dois barramentos e interconectados por um disjuntor que opera normalmente aberto. Cada semi-barramento é alimentada por um transformador com 13,5 MVA de potência nominal. Este painel é projetado para suportar uma corrente de curto-circuito simétrica de 40 kA_{rms} em 1 s e correntes de crista de até 104 kA.

As cargas alimentadas pelo painel de 4,16 kV estão listadas no Apêndice 8.2.

O painel PN-5143507 de 4,16 kV é o que alimenta os motores com as maiores potências dos equipamentos do casco da plataforma, que são as bombas de cargas (12 unidades de 590 kW), as bombas de *slop* (2 unidades de 360 kVA) e uma bomba *butterworth* (260 kW). Todos estes motores são acionados por meio de VSDs, que suavizam a corrente de partida destes motores e evitam quedas de tensão bruscas no sistema.

3.6.2. SISTEMA DE BAIXA TENSÃO

3.6.2.1. Sistema de 690 V

Este nível de tensão é dedicado para a alimentação de dois painéis, os quais operam em redundância. Estes painéis são alimentados por dois transformadores de dois enrolamentos, 13,8 kV / 690 V, com potência de 2.500 kVA cada. Cada painel alimenta quatro bancos de aquecedores de 610 kW, que são destinados para o aquecimento do processo de regeneração de gás. Os fatores de potência desses painéis são unitários devido às características da carga.

3.6.2.2. Sistema de 480 V

Os transformadores abaixadores de 13,8 kV para 480 V possuem três enrolamentos para alimentação redundante dos painéis principais de baixa tensão dos sistemas de produção (PN-5143003 e PN-5143006) e dos sistemas navais (PN-5148501 e PN-5143501). A adoção de transformadores de três enrolamentos propicia menor custo de material (menor número de equipamentos e dispositivos de comando e proteção) e redução de peso e espaço na plataforma. Cada transformador tem que

suprir a demanda dos dois painéis que alimentam em caso de indisponibilidade de um dos transformadores.

Os principais painéis de baixa tensão (CDCs) são também divididos em dois barramentos, interconectados por um disjuntor, a fim de obter maior disponibilidade e flexibilidade nas manobras de operação e manutenção. Esses painéis operam normalmente com os disjuntores de interconexão dos barramentos abertos, a fim de diminuir os níveis das correntes de curto-circuito da instalação. Estes painéis são projetados para suportar uma corrente de curto-circuito simétrica de 50 kA_{rms} em 1 s e correntes de crista de até 105 kA.

Para os painéis de baixa tensão com barramento único (CCMs), e com cargas predominantemente motóricas, são instalados reatores limitadores de corrente no alimentador dos painéis com objetivo de limitar as correntes de curto-circuito. Estes painéis alimentam motores de potência até 55 kW, além de cargas não-motóricas de potência de até 150 kW, e são projetados para suportar uma corrente de curto-circuito simétrica de 25 kA_{rms} em 1 s e correntes de crista de até 52,5 kA.

As demandas máximas do sistema de 480 V estão resumidas na Tabela 3.1 por meio do somatório das cargas alimentadas pelos seus respectivos transformadores de potência.

Tabela 3.1. Demandas do sistema de 480 V.

Identificação do Equipamento	Descrição	Demanda Máxima (kW)
TF-5143002A	Transformador 3,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema de Produção	1.449
TF-5143501A	Transformador 4,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema do Casco	1.960
TF-5143002B	Transformador 3,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48kV – Sistema de Produção	1.228
TF-5143501B	Transformador 4,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema do Casco	1.960

3.6.2.3. Sistema de 220 V

A função do sistema de 220 V na plataforma é fornecer alimentação para sistema de iluminação, tomadas, cargas de telecomunicações, aquecimento de tubulações (*heat tracing*) e serviços gerais.

O sistema em 220 V atende também o módulo de acomodação (casario) da plataforma. Este sistema é distribuído por circuitos em 220/127 V.

3.6.3. SISTEMA DE ENERGIA ININTERRUPTA

A plataforma conta também com dois sistemas UPS (*Uninterruptable Power Supply*) para alimentação das cargas críticas da embarcação, que diferentemente dos geradores de emergência, as alimentações dos circuitos permanecem ininterruptas quando ocorre um corte na alimentação principal. Esses sistemas são compostos por bancos de baterias, painéis elétricos, módulos retificadores, módulos inversores e chaves de transferência estáticas. Cada UPS tem potência nominal de saída de 150 kVA, com tensão de saída trifásica em 220 V e 60 Hz de frequência.

Por questões de segurança e continuidade operacional, os sistemas UPS são instalados em locais distantes um do outro na plataforma, alimentados por painéis distintos. Em condições normais, a carga é dividida entre os dois sistemas, porém ambos são dimensionados para operar com 100 % da carga em condições de contingência.

3.7. DEMANDAS DAS CARGAS ELÉTRICAS DA PLATAFORMA

O Apêndice 8.3 apresenta as cargas do sistema elétrico do FPSO típico objeto do estudo com o cenário de “Operação Plena”. Para este cenário de operação plena a tabela informa os equipamentos previstos para operar simultaneamente, assim como os motores reservas (*stand-by*), que só entram em operação quando da falha ou manutenção do equipamento principal.

O cenário de operação plena, cuja demanda é de 94,24 MW, é considerado o ponto de maior demanda de potência ativa ao longo de toda a vida operacional do FPSO, com a máxima combinação de simultaneidade de cargas.

O Apêndice 8.4 ilustra um diagrama unifilar simplificado do arranjo do sistema elétrico do FPSO objeto do estudo.

3.8. CONDIÇÕES OPERACIONAIS

3.8.1. LIMITES OPERACIONAIS

De acordo com as especificações técnicas do FPSO típico objeto do estudo, os limites de regulação de tensão do sistema elétrico em condições de regime permanente e transitório devem obedecer aos valores estabelecidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Limites de regulação de tensão.

Regime	Regulação	Geração Principal
Permanente	Sobretensão (%)	+ 2,5
	Subtensão (%)	- 2,5
Transitório	Sobretensão (%)	+ 20
	Subtensão (%)	- 15
	Recuperação de tensão (%)	± 3
	Tempo de recuperação (s)	1,5

Já os limites de regulação de frequência, em regime permanente e transitório dos geradores principais do FPSO, devem obedecer aos valores descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Limites de regulação de frequência.

Regime	Regulação	Turbogerador
Permanente	Sobre-frequência (%)	+ 5
	Sub-frequência (%)	- 5
Transitório	Sobre-frequência (%)	+ 10
	Sub-frequência (%)	- 10
	Tempo de recuperação (s)	5

3.8.2. CONTROLES DO SISTEMA DE GERAÇÃO PRINCIPAL

Os TGCPs (*Turbo Generator Control Panels*) são os responsáveis por realizar o controle primário da frequência e da tensão dos turbo-geradores que alimentam as cargas elétricas de todo o FPSO.

Para o controle de frequência existe dois modos de controle primário: isócrono e *droop*. Estes modos influenciam na forma como os TGs (Turbogeneradores) compartilham potência ativa elétrica quando estão operando em paralelo em uma mesma barra. O controle de frequência (potência ativa) é realizado pelo ASR (*Analogue Simplified Regulator*), que recebe o sinal de valor-alvo (*setpoint*) do TGCP e atua através do controle de injeção de combustível nos TGs. Já o controle primário de tensão em cada TG é realizado pelo regulador AVR (*Automatic Voltage Regulator*), que recebe um sinal de *setpoint* individual do TGCP. O controle de tensão influencia na forma como os TGs compartilham potência reativa elétrica quando estão em paralelo em uma mesma barra.

O controle secundário dos TGs é realizado por um sistema de gerenciamento de energia denominado PMS (*Power Management System*), cujo principal objetivo é garantir o fornecimento de energia confiável e estável. Abaixo, resumidamente, são apresentados os principais controles realizados pelo PMS:

- a) Controle de potência ativa: para que os modos de operação de frequência se tornem estáveis quando há mais de um TG na mesma barra, torna-se necessário o controle secundário, que tem a função de fornecer uma referência de potência ativa (via frequência) para cada TG. O PMS verifica a potência total da carga e divide uniformemente entre os TGs ativos (*load sharing*).
- b) Controle de potência reativa: controla o compartilhamento da potência reativa entre os geradores. O PMS verifica a potência reativa total do sistema e depois distribui o valor individual de potência reativa para cada TG.
- c) Inibição de partida dos motores (*inhibit start*): o PMS verifica continuamente a reserva girante do sistema e pode inibir ou permitir a partida de qualquer

carga motórica alimentada em 13,8 kV e 4,16 kV. Caso o sistema verifique que não há reserva girante para partida de uma determinada carga motórica, o PMS informa a necessidade de partida de outro TG.

- d) *Field Forcing*: é um comando do TGCP que possibilita aumentar a tensão do barramento antes da partida de grandes cargas, através do aumento da corrente de campo dos geradores principais. Após a partida do motor o comando *field forcing* é desativado e, conseqüentemente, a tensão dos barramentos retornam as condições nominais do sistema. O objetivo principal é minimizar o afundamento de tensão provocado pela entrada de grandes cargas motóricas do painel principal.
- e) *Load Shedding*: é o descarte seletivo de cargas realizado via PMS e está ativado em todas as cargas motóricas alimentadas em média tensão com potência superior a 750 kW, visando evitar uma parada completa (*shut-down*) do sistema elétrico. Uma programação é feita no PMS a fim de selecionar a ordem de prioridades de descarte das cargas para determinados cenários de operação da plataforma.

Todo o controle e o monitoramento das condições operacionais do sistema elétrico do FPSO descritos neste item, é realizado através de computadores instalados na sala de controle da plataforma, com a IHM (Interface Homem Máquina) diretamente em telas gráficas que dão a visão geral do sistema elétrico, incluindo os sistemas auxiliares e as listas de alarmes.

4. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA MARÍTIMA DE PETRÓLEO DO TIPO FPSO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo deste capítulo é apresentar o modelo do sistema elétrico do FPSO típico que foi desenvolvido na ferramenta computacional ATP a fim de analisar as implicações da instalação do reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico na interligação das semi-barras do painel principal de 13,8 kV.

Diversos modelos matemáticos dos componentes de um sistema elétrico têm sido utilizados e aperfeiçoados ao longo do tempo, visando o aprimoramento da simulação dos sistemas elétricos. Dentre estes modelos matemáticos, o simulador ATPDraw é uma interface gráfica na plataforma do Windows (Microsoft) desenvolvido com base no software de análise de transitórios eletromagnéticos ATP, que permite a construção do arquivo de entrada por meio de conjunto de blocos e modelos existentes no programa. Esta interface gráfica possui mais de 65 componentes padrões e ainda possibilita a criação de novos dispositivos por meio da ferramenta MODELS. Cada componente gráfico do dispositivo ou equipamento permite a inclusão dos dados e parâmetros correspondentes em janelas próprias que ajustam os dados aos formatos de entrada requeridos pelo ATP (FONSECA, 2003).

O EMTP-ATPDraw é um programa comumente utilizado para estudos de transitórios elétricos. Dada a confiabilidade e robustez deste programa, toda a modelagem do sistema elétrico do FPSO objeto deste estudo foi elaborada com os componentes e padrões de programação disponíveis no ATPDraw.

O Apêndice 8.5 apresenta o esquema do sistema elétrico do FPSO que foi modelado para este estudo no ATPDraw.

4.2. MODELAGEM DOS GERADORES, TRANSFORMADORES E MOTORES

Os equipamentos de média tensão do sistema elétrico objeto deste estudo, como os motores, os transformadores e os geradores, possuem modelos matemáticos específicos e disponíveis na biblioteca do ATPDraw. Já as cargas de baixa tensão, por apresentarem baixa relevância nos transitórios elétricos analisados, foram

simplificadas por motores equivalentes cujas potências correspondem às demandas dos respectivos painéis.

a) Geradores

Para modelagem dos geradores síncronos empregados no FPSO foram utilizados o modelo máquinas síncronas *SM Type 58 (phase domain)* disponível na biblioteca do ATPDraw. Neste modelo ainda foram inseridos controles de tensão e velocidade em entradas específicas.

Para viabilizar as análises de afundamento de tensão do sistema na partida das grandes máquinas, na modelagem dos geradores foram inseridos reguladores de tensão e velocidade. O regulador de tensão tem basicamente a função de manter constante a tensão de saída do gerador, através de ajustes na sua excitatriz. Para o controle de frequência do sistema, cada turbina é equipada com um sistema regulador de velocidade que possibilita que a turbina possa ser partida, acelerada e mantida na velocidade nominal e operar em carga com a potência de saída demandada no TG. Ambos os controles empregados neste estudo foram baseados conforme (SOUZA, 2015).

Os Apêndices 8.6.1 e 8.7.1 detalham, respectivamente, as especificações técnicas e os parâmetros de entrada utilizados na modelagem dos geradores.

b) Motores de Indução de Média Tensão

Todos os motores empregados na plataforma são do tipo indução. Para a modelagem foi utilizado o modelo universal de máquinas de indução disponível na biblioteca do ATP denominado *UM Induction Machine type 3*.

Os Apêndices 8.6.2 e 8.7.2 detalham, respectivamente, as especificações técnicas e os parâmetros de entrada utilizados na modelagem dos motores de indução.

c) Transformadores

Para a modelagem dos transformadores foi utilizado o modelo de Transformador Saturável Trifásico: *SatTrafo - General Saturable Transformer*. Este

modelo se aproxima de transformadores reais por considerar as perdas nos enrolamentos do cobre e as perdas no material ferro magnético do núcleo, além de realizar o cálculo da curva saturação dos transformadores de dois e três enrolamentos, que caracterizam os principais parâmetros necessários para a simulação.

Os dados de entrada da modelagem dos transformadores buscaram atingir as características mais reais do equipamento em operação, em especial, as correntes observadas durante os transitórios nas manobras de energização, denominada corrente de *inrush*. A corrente de *inrush* pode alcançar, nos primeiros ciclos após a energização, valores elevados, correspondente a várias vezes o valor da corrente nominal do transformador, decrescendo em magnitude até atingir o regime permanente e com duração relativamente longa, da ordem de segundos (CARVALHO, 2013). Para modelagem completa dos transformadores na base de dados do ATPDraw, foi necessário incluir a representação da curva de histerese.

Os Apêndices 8.6.3 e 8.7.3 detalham, respectivamente, as especificações técnicas e os parâmetros de entrada utilizados na modelagem dos transformadores.

d) Cabos elétricos

Para modelagem dos cabos elétricos, que interligam os equipamentos ao painel principal do sistema elétrico, foi utilizado o modelo LINEPI3S (*RLC symmetrical PI equivalent*) disponível na biblioteca do ATPDraw. Os dados de entrada deste modelo levam em consideração o comprimento, a resistência, a indutância e a capacitância dos cabos elétricos utilizados nos circuitos.

Os Apêndices 8.6.4 e 8.7.4 detalham, respectivamente, as formações dos cabos elétricos por circuito e os dados de entrada utilizados na modelagem.

e) Cargas de Baixa Tensão

Todos os equipamentos de média tensão, como motores de indução de 13,8 kV e 4,0 kV, transformadores e geradores, foram modelados individualmente. Já as cargas de baixa tensão foram simplificadas, uma vez que a contribuição das cargas de baixa tensão para os estudos de transitórios elétricos é significativamente inferior as cargas de média tensão. Desta forma, considerando que a agregação das cargas

de baixa tensão ser usual em estudos elétricos, estas cargas foram modeladas como um motor equivalente, de gaiola simples, cuja potência nominal é a demanda máxima nos respectivos painéis (MAFRA, 2016).

Para representar as cargas equivalentes dos painéis do sistema de produção foram inseridos modelos *UM Induction Machine type 3* de motores de indução do ATPDraw, de gaiola simples. Para estes painéis foram modelados motores de indução com fator de potência indutivo de 0,8 e com potência igual a demanda máxima de cada painel, nos valores de 1.449 kW e 1.228 kW, respectivamente.

Assim como ocorrido nos painéis do sistema de produção, as cargas nos painéis dos sistemas do casco foram simplificadas por meio de um único motor de indução, modelo *UM Induction Machine type 3*. Cada motor foi modelado considerando a demanda máxima de cada painel, no valor de 1.960 kW, com fator de potência indutivo de 0,8.

f) Transformadores para Regeneração de Gás

Os transformadores dedicados para o aquecimento no processo de regeneração de gás alimentam uma carga total de 2.450 kW cada, sob uma tensão de 690 V. Tais transformadores operam sempre em redundância, ou seja, um em operação normal e o outro reserva. Dado que estes transformadores alimentam somente cargas resistivas, ou seja, de fatores de potência unitários, estas não foram modeladas como motores de indução. Estas cargas resistivas de 2.450 kW foram modeladas utilizando o componente *Branch RLCY3* (cargas trifásicas resistivas, indutivas e capacitivas em estrela). Nestas condições, a resistência pode ser calculada pelas equações (11) e (12):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{2450 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 690 \text{ V}} = 2.050 \text{ A} \quad (11)$$

$$R = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot I} = \frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 2.050 \text{ A}} = 0,194 \ \Omega \quad (12)$$

4.3. DISPOSITIVO PIROTÉCNICO

O modelo de um DLC pirotécnico consiste basicamente em uma chave ideal em paralelo com o modelo de um fusível limitador. Apesar do conceito simples e do emprego de apenas dois dispositivos, não há na biblioteca do ATPDraw um modelo de DLC pirotécnico disponível, ou ainda dispositivos equivalentes, que reproduzam com realidade os efeitos dos transitórios magnéticos, do processo de fusão dos fusíveis e da extinção do arco e da corrente elétrica.

4.3.1. PREMISSAS

A lógica e os ajustes de disparo são as partes mais importantes para a eficácia do DLC pirotécnico, uma vez que a não atuação do dispositivo pode causar sérios danos aos equipamentos que ficarão submetidos à elevada corrente de curto-circuito e, conseqüentemente, ao pessoal no seu entorno. Desta forma, o DLC pirotécnico deve ser ajustado com acurácia para disparar na menor corrente de curto-circuito estabelecida, porém insensível aos transitórios inerentes à operação, tais como partida de grandes motores e energização dos transformadores.

A princípio, o disparo do DLC pirotécnico deve ocorrer antes do primeiro pico de corrente de curto-circuito, com base na taxa de elevação da corrente (di/dt). Entretanto, atrelar o disparo apenas à taxa di/dt pode levar o dispositivo a disparos indevidos, visto que o sistema elétrico está sempre sujeito à transitórios, mesmo que de baixa magnitude. Para que este problema não ocorra, além do ajuste da taxa de variação di/dt , é estabelecida uma janela entre valores de corrente de curto-circuito, denominadas i_1 e i_2 , sendo i_1 a máxima corrente instantânea e i_2 a mínima corrente instantânea. Desta forma, para a lógica de disparo do DLC pirotécnico ser atendida, a taxa di/dt é excedida e o valor instantâneo da corrente de curto-circuito deverá se situar na janela de corrente i_1 e i_2 , simultaneamente, conforme ilustrado na Figura 4.1.

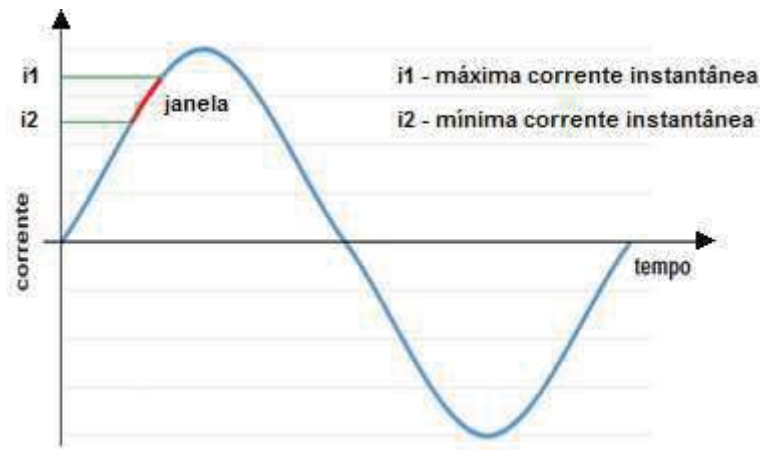


Fig. 4.1 – Representação do ajuste de disparo do DLC pirotécnico na curva da corrente elétrica.

Para o ajuste de disparo de um DLC pirotécnico no sistema elétrico típico do FPSO, objeto de estudo, alguns critérios devem ser observados:

- a) O DLC deve proteger, exclusivamente, o sistema 13,8 kV contra elevadas correntes de curto-circuito.
- b) As correntes de partida dos motores e as correntes de *inrush* do transformador não devem causar o disparo do DLC.
- c) O DLC não deve operar para curtos-circuitos ocorridos no sistema de 4,16 kV.
- d) O DLC é habilitado para atuar somente com 3 ou 4 geradores em operação.
- e) Deverá ser instalado um disjuntor em série com o DLC pirotécnico, sendo a abertura deste imediatamente acionada quando da atuação do DLC. Um relé auxiliar é associado à lógica de abertura do DLC para o comando de abertura deste disjuntor trifásico, mesmo que o curto-circuito dispare apenas um ou dois insertos do dispositivo.

Tendo em vista o grau de complexidade e a alta responsabilidade envolvida na determinação dos valores para ajuste do DLC pirotécnico, os fabricantes destes dispositivos vinculam ao contrato de fornecimento que os ajustes sejam estabelecidos por eles próprios, cujos cálculos são extraídos de programas computacionais proprietários.

Basicamente, a definição das correntes i_1 e i_2 é feita com base nas magnitudes das correntes de energização dos transformadores, partida de motores e da corrente de atuação mínima necessária. Sendo assim, considerando o sistema elétrico objeto deste estudo, pode-se estabelecer que a corrente i_2 deve ser:

- a) Superior a corrente de *inrush* dos transformadores: o DLC pirotécnico não deverá ser atuado pela corrente de *inrush* proveniente da energização de um transformador de potência, considerando o sistema operando a carga máxima. O maior transformador do sistema possui a capacidade de 13,5 MVA e a sua corrente de *inrush* é de aproximadamente 6 vezes a sua corrente nominal, que equivale à 3.340 A.
- b) Superior a corrente de partida de motores: o DLC pirotécnico não deverá ser atuado pela maior corrente de partida dos motores do sistema, considerando o sistema com carga máxima. A maior corrente de partida dos motores do sistema elétrico objeto do estudo é de 3.390 A, equivalente à 4 vezes a corrente nominal do motor com potência nominal de 11 MW, partida direta, instalado no painel de 13,8 kV.
- c) Inferior a menor corrente em que a atuação do DLC é necessária.

A corrente i_1 é normalmente ajustada entre 1 e 4 kA acima do ajuste da corrente i_2 , conforme orientação dos fabricantes dos DLCs pirotécnicos. Com a definição de i_1 e i_2 é possível calcular a menor taxa de variação neste intervalo, que será o ajuste de disparo pela taxa de variação.

O disjuntor instalado em série com o DLC pirotécnico deverá ser aberto quando a lógica de disparo do pirotécnico for atendida. Para o isolamento completo das semi-barras do painel principal por este disjuntor, é considerada a contagem do tempo desde o instante de sensibilização das entradas analógicas do IED até o instante de separação dos contatos e extinção do arco pelo disjuntor. O tempo de processamento do IED se dá em torno de 20 ms (SCHNEIDER ELECTRIC, 2019) e o tempo de abertura mínima do disjuntor de média tensão (ABB, 2019) em 40 ms, totalizando 60 ms para separação completa das semi-barras após a ocorrência do curto-circuito.

De acordo com orientação dos fabricantes, para uma operação segura, os parâmetros da lógica de disparo deverão ser reavaliados sempre que ocorrer alterações no sistema elétrico e quando da ocorrência de curtos-circuitos na instalação.

4.3.2. MODELAGEM DO DISPOSITIVO PIROTÉCNICO

O modelo desenvolvido para o DLC pirotécnico buscou reproduzir da maneira mais fiel os efeitos dos transitórios eletromagnéticos nos milésimos de segundos de sua atuação. O modelo buscou reproduzir o processo de fusão e extinção da corrente em um fusível limitador em paralelo com uma chave ideal, que representa o condutor que é explodido no disparo do dispositivo. O modelo desenvolvido neste trabalho se baseou no trabalho apresentado por DIAS (2016), no qual foi implementado nos programas computacionais ATPDraw e Simulink (Matlab). A Figura 4.2 representa de forma simplificada o modelo do DLC pirotécnico implementado.

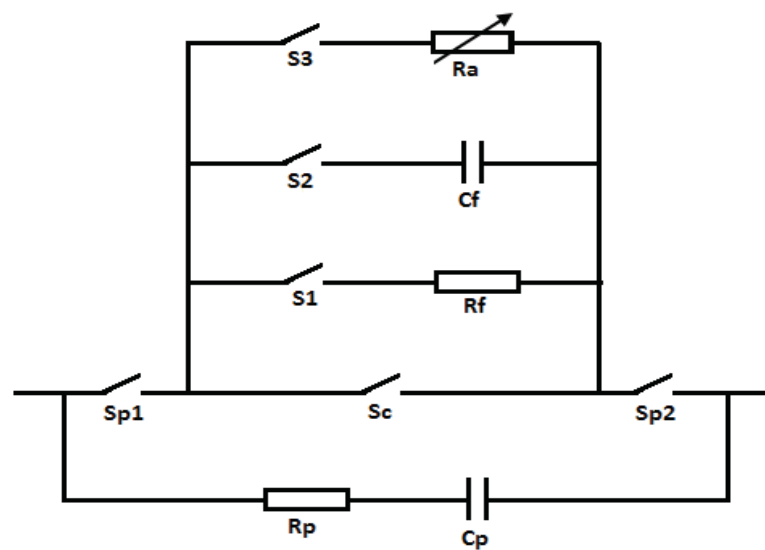


Fig. 4.2 – Modelo simplificado do DLC pirotécnico.

Este modelo foi reproduzido e adequado para as condições elétricas do sistema elétrico do FPSO objeto do estudo. Os elementos empregados na modelagem do DLC pirotécnico desempenham as seguintes funções:

- a) R_p e C_p representam a impedância parasita do fusível e possuem importância para estabilidade numérica da simulação.

- b) R_f representa a resistência do fusível antes da fusão do elo. A corrente que percorre R_f é medida e a integral I^2t é calculada, e quando este valor exceder o especificado para fusível, a chave S1 se abre e, simultaneamente, a chave S2 se fecha.
- c) A capacitância C_f simula o crescimento da tensão que ocorre quando da fusão do elo fusível. O valor desta capacitância pode ser calculado com base em folhas de testes dos fabricantes. Este valor também pode ser calculado considerando os valores típicos de sobretensão durante a atuação de fusíveis limitadores estabelecidos pela norma (IEEE C37.48, 2011), que de forma conservadora estima uma sobretensão de 2,5 vezes a tensão nominal do fusível.
- d) Quando a tensão do fusível ultrapassar um valor máximo definido ($V_{m\acute{a}x}$), a chave S2 se abre e a chave S3 se fecha, simultaneamente. Com o fechamento de S3 a resistência não linear R_a é inserida no circuito. Esta resistência representa no modelo a resistência variável do arco elétrico que se forma quando do rompimento do elo fusível. Quando a corrente passa pelo zero pela primeira vez, a chave S3 se abre e interrompe o circuito.
- e) A chave S_c representa o condutor que deverá ser explodido no disparo e as chaves S_{p1} e S_{p2} fazem a abertura completa do DLC após a extinção da corrente. A lógica e ajustes de disparo desta chave são as partes mais importantes para o correto funcionamento do dispositivo.

Como a capacidade de memória no ATPDraw fica comprometida devido ao grande número de componentes na modelagem do sistema elétrico, foi empregado o módulo de simulação MODELS para o modelo do DLC pirotécnico. O uso do MODELS teve o intuito de minimizar o uso de memória requerido no modelo do DLC pirotécnico. Este módulo é uma linguagem de programação para simulação no domínio do tempo, utilizada como ferramenta para simular o comportamento dinâmico de sistemas físicos complexos. Esta linguagem de programação viabiliza o desenvolvimento de modelos de circuito e controle de forma mais objetiva, evitando a necessidade do uso e adequação dos blocos disponíveis no ATP. No Apêndice 8.8 é apresentado o código de programação desenvolvido para modelagem do DLC pirotécnico.

Com o objetivo de validar o comportamento do DLC modelado neste trabalho, as formas das curvas características da fusão dos fusíveis limitadores apresentadas por Hibbert (2005) e Petit (1989) foram confrontadas com a forma das curvas extraídas do modelo elaborado, conforme apresentado nas ilustrações da Figura 4.3, 4.4 e 4.5. Ao se comparar as três ilustrações se pode observar que há coerência entre elas.

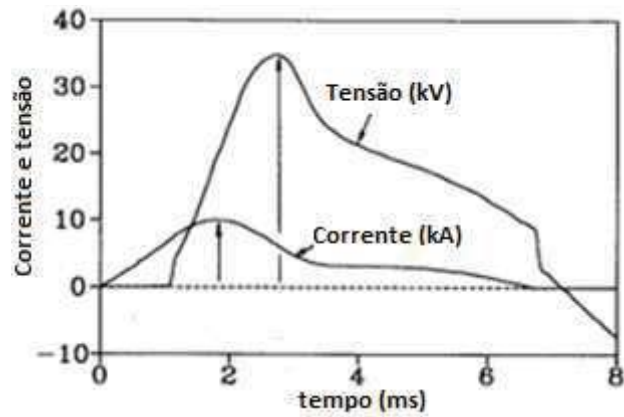


Fig. 4.3 – Formas das curvas da corrente e tensão quando da fusão do elo fusível.

Fonte: HIBBERT (2005), adaptado pelo autor.

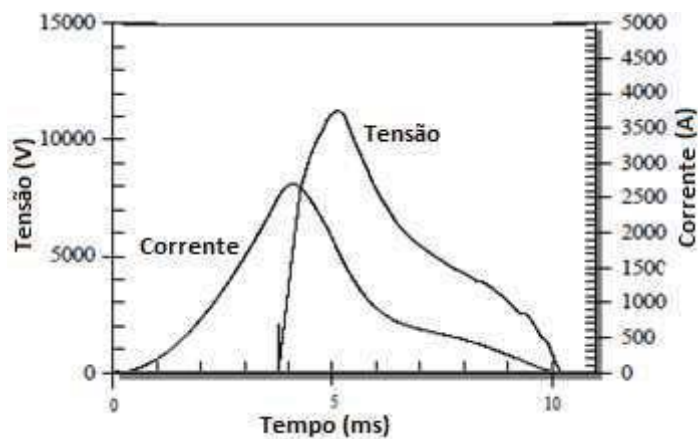


Fig. 4.4 – Formas das curvas da corrente e tensão quando da fusão do elo fusível.

Fonte: PETIT et al (1989), adaptado pelo autor.

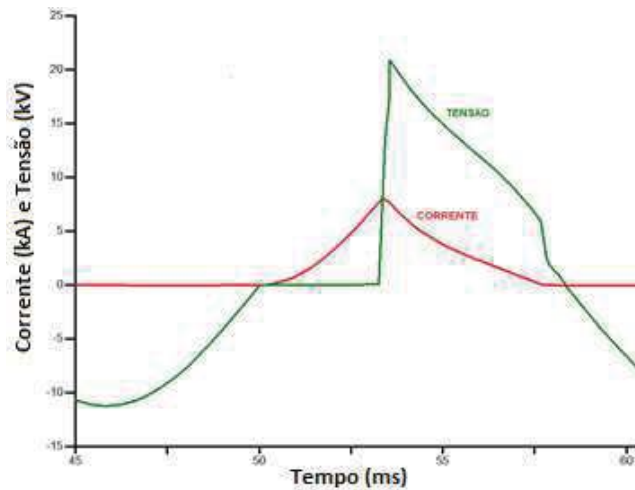


Fig. 4.5 – Formas das curvas da corrente e tensão extraídas do modelo no ATPDraw.

A lógica e os parâmetros de ajustes para disparo são as partes mais sensíveis do DLC pirotécnico. Considerando que neste trabalho a modelagem do sistema elétrico do FPSO típico foi toda desenvolvida com base nas folhas de dados dos equipamentos instalados e nas suas condições operacionais, foram definidos para a lógica de disparo os mesmos parâmetros de ajustes empregados no FPSO. Os valores dos ajustes para lógica de disparo do modelo do DLC pirotécnico estão sumarizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Valores de ajuste no DLC pirotécnico modelado.

Valores de ajuste do DLC pirotécnico		
i_1	12,50	kA
i_2	9,50	kA
di/dt	5,30	kA/ms
I^2t	62.000	A^2s
$V_{m\acute{a}x}$	16.000	V

4.4. REATOR LIMITADOR

Em condições normais de operação o reator ligado em paralelo com o DLC pirotécnico não interferirá no sistema elétrico, tendo em vista que como a resistência elétrica do DLC pirotécnico é insignificante, a corrente por este dispositivo irá circular. Entretanto, quando da atuação do DLC pirotécnico, o reator será instantaneamente inserido no circuito, assumindo desta forma a função de interligação das semi-barras

e de limitar as correntes de curto-circuito entre as duas semi-barras do painel principal de 13,8 kV.

Para o dimensionamento deste reator duas condições devem ser atendidas: o valor máximo da corrente percorrida em regime permanente e o valor máximo admissível de contribuição de curto-circuito entre as duas semi-barras do painel.

O valor máximo da corrente a ser percorrida no reator pode ser calculado considerando dois geradores ligados a uma semi-barra do painel, que operando em plena carga alimenta cargas conectadas na outra semi-barra. Desta forma, a corrente que atravessa o reator pode ser calculada pela equação de potência trifásica (11):

$$I_n = \frac{2 \cdot S_{gerador}}{\sqrt{3} \cdot V_{nom}} = \frac{2 \cdot 31,5 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \text{ kV}} = 2.636 \text{ A} \quad (11)$$

Outra hipótese para determinar o valor máximo da corrente fluindo entre as duas semi-barras do painel de 13,8 kV é considerar o valor nominal da corrente do barramento do painel, ou seja, 3.150 A. Com o objetivo de buscar resultados mais conservadores, neste estudo foi considerado para o reator uma corrente nominal de 3.150 A.

A máxima corrente de curto-circuito admissível percorrida entre as semi-barras pode ser obtida considerando a diferença entre a máxima corrente suportável pelo painel, no caso do painel principal uma corrente de 50 kA em 1 s, e a máxima contribuição da corrente de curto-circuito permitida por uma das semi-barras. Para o cálculo da corrente máxima de contribuição de uma das semi-barras, quando da ocorrência de um curto-circuito, deve ser considerado a seguinte condição de operação:

- a) Dois geradores principais em operação;
- b) Todas os motores do sistema 4,16 kV em operação e
- c) Todos os motores de 13,8 kV, ligados a semi-barra, alimentados.

Com base na norma *Short-circuit Currents in Three Phase A.C. Systems* (IEC-60909-0, 2016), a qual define metodologias para cálculo de correntes de curto-circuito, é possível obter as contribuições de curto-circuito para cada equipamento. De acordo

com Jakobsen, Peck e Snow (2012), esta norma é normalmente considerada para instalações de plataformas marítimas, mesmo não tendo sido escrita para esta finalidade.

A Tabela 4.2 apresenta a máxima contribuição de uma semi-barra de forma isolada, ou seja, não considerando as correntes provenientes da outra semi-barra. Os dados dos geradores e dos transformadores são referentes às especificações técnicas dos equipamentos, com as devidas correções da norma *Short-circuit Currents in Three Phase A.C. Systems* (IEC-60909-0, 2016). Os dados dos motores de 13,8 kV e de 4 kV são obtidos utilizando as considerações genéricas dada pela referida norma (MAFRA, 2016).

O resultado da corrente total obtido na Tabela 4.2, de aproximadamente 35 kA, considera o máximo carregamento esperado por uma semi-barra e desconsidera o decaimento AC da corrente de curto circuito. Aplicando o fator de assimetria de 2,6, obtido da relação $\frac{I_{crista}}{I_{cc}}$ do painel principal, resulta o valor de corrente de crista máximo de 91 kA. Dado que o limite da corrente de curto-circuito simétrica dos equipamentos é de 50 kA_{rms} e 130 kA de corrente de crista, o reator deverá limitar a contribuição da outra semi-barra em 15 kA e até 39 kA de crista no primeiro ciclo, conforme ilustrado na Figura 4.6.

Tabela 4.2 – Máxima corrente de curto-circuito de uma semi-barra do painel de 13,8 kV.

Equipamento	Contribuição individual (kA)	Quantidade	Total (kA)
Gerador	10,8	2	20,16
Motor 11 MW	2,39	4	9,56
Motor 6,2 MW	1,37	1	1,37
Motor 3,4 MW	0,83	1	0,83
Motor 1,13 MW	0,44	1	0,44
Transformador 13,5 MVA	1,87	1	1,87
Total			34,23

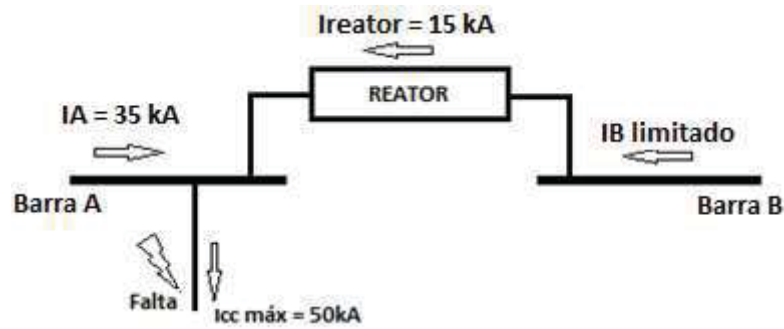


Fig. 4.6 – Corrente de curto-circuito de contribuição permissível por semi-barra.

Da equação (12), encontrada no catálogo de um fabricante de reator limitador (IBT, 2018), pode-se obter o valor da reatância do reator necessária para limitar a corrente de contribuição da outra semi-barra em até 15 kA.

$$X_L = \frac{V_n \cdot k}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{I_{c2}} - \frac{1}{I_{c1}} \right) \quad (12)$$

Onde:

X_L = reatância nominal (Ω)

V_n = tensão nominal (V)

k = fator de sobretensão de 1,05 de acordo com (IEEE C 57.16, 2011).

I_{c2} = corrente de curto-circuito depois da inserção do reator

I_{c1} = corrente de curto-circuito antes da inserção do reator

$$X_L = \frac{13,8 \text{ kV} \cdot 1,05}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{15 \text{ kA}} - \frac{1}{35 \text{ kA}} \right) = 0,318 \Omega$$

Aplicando a equação (8) da reatância indutiva, resulta um valor de indutância de 0,845mH.

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,318}{376,8} = 0,845 \text{ mH} \quad (8)$$

Os cálculos para obtenção da reatância indutiva e a indutância do DLC do tipo reator a ar também podem ser obtidos com a aplicação da equação (13) das potências de curto-circuito (SEIVER et al, 1999).

$$\frac{1}{kVA_{reator}} = \frac{1}{kVA_{desejado}} - \frac{1}{kVA_{barra}} \quad (13)$$

Onde o $kVA_{desejado}$ é o limite de 15 kA de contribuição da semi-barra não afetada pelo curto-circuito e o kVA_{barra} é a corrente de curto-circuito de contribuição

gerada pela semi-barra curto-circuitada, ou seja, 35 kVA. Aplicando a equação das potências de curto-circuito, encontramos a potência reativa de 627,46 MVar. De posse da potência reativa, aplica-se as equações (8) e (14) para encontrar a indutância do reator limitador e a reatância indutiva, respectivamente.

$$X_L = \frac{Vn^2}{kVA_{reator}} = \frac{(13,8 \text{ kV})^2}{627,46 \text{ MVA}} = 0,303 \Omega \quad (14)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,303}{376,8} = 0,805 \text{ mH} \quad (8)$$

Pode-se observar que os valores encontrados com a aplicação das duas equações podem ser considerados similares. Entretanto, para a modelagem, foi inserido o valor obtido da equação encontrada no catálogo do fabricante, pois nesta equação considera o fator de sobretensão no cálculo da indutância conforme sugerido pela ANSI.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. ANÁLISE DAS TENSÕES NOS BARRAMENTOS

Com a introdução do reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico é previsto um maior afundamento de tensão no sistema elétrico nas ocasiões em que o sistema elétrico operar em modo contingencial, ou seja, com o DLC pirotécnico fora de operação. Esta suposição se deve a impedância inserida pelo reator limitador no circuito elétrico. Com objetivo de analisar os afundamentos das tensões no sistema elétrico foi considerado a situação mais crítica de operação do sistema elétrico: o momento de maior demanda de potência ativa ao longo de todo ciclo de vida do FPSO. Com base nesta premissa, a Tabela 5.1 detalha os equipamentos em operação e as demandas dos painéis nesta condição de carregamento máximo do sistema.

Tabela 5.1 - Demanda máxima do FPSO típico.

Equipamento	Demanda individual (MW)	Quantidade	Total (MW)
Compressor de gás principal	11	2	22
Compressor de gás exportação	11	2	22
Compressor de gás injeção	11	1	11
Bomba de injeção de água	6,25	2	12,5
Bomba booster de remoção de sulfato	1,13	2	2,26
Compressor VRU	3,4	1	3,4
Bomba de serviço de poço	1,23	1	1,23
Painel do Aquecedor de gás	2,45	1	2,45
Painel de 4,16 kV	10,6	1	10,8
Painéis de Baixa Tensão (1)	6,6	1	6,6
Total			94,24

Nota (1): considerados os painéis nas condições de demandas máximas, carregando o TF-5143002A com 1,45 MW, o TF-5143002B com 1,23 MW e os TF-5143501A/B com 1,96 MW cada.

Para suprir esta condição de carregamento extremo, o sistema elétrico do FPSO opera nas seguintes condições:

- Os quatro geradores principais operando em paralelo.

- b) O PMS ajustando a tensão de saída dos geradores em 1,0 pu ou 1,1 pu (*field forcing* ativado no PMS) quando da partida de grandes máquinas.
- c) O painel principal de 13,8 kV com as semi-barras interligadas.
- d) Demais painéis operando em “L”, ou seja, com o disjuntor de interligação das semi-barras fechado, ficando o painel alimentado por um único transformador.

O Apêndice 8.4 ilustra um diagrama simplificado do sistema elétrico que auxilia na visualização destas condições de operação.

No caso do sistema elétrico objeto do estudo, os maiores afundamentos de tensão ocorrem quando da partida direta dos motores de maiores potências. Para simulação foram escolhidos o motor de maior potência do sistema de 13,8 kV e o motor de maior potência do sistema de 4,16 kV. Os dados dos motores escolhidos para simulação estão resumidos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Motores selecionados para partida no estudo de afundamento de tensão.

Equipamento	Semi barra	Tensão (kV)	Potência (kW)	Corrente nominal (A)	Corrente de partida
M-C-UC-1231001A	A	13,8	11.000	535	(Ip/In) = 4,0
M-B-5111001A	A	4,16	960	188	(Ip/In) = 5,2

Notas:

- (1) Ip – corrente de partida do equipamento.
- (2) In – corrente nominal do equipamento

As Figuras 5.1 e 5.2 ilustram o comportamento das curvas das correntes de partida direta destes motores, sob tensão nominal, obtidas através da simulação do modelo do sistema elétrico do FPSO desenvolvido no ATPDraw.

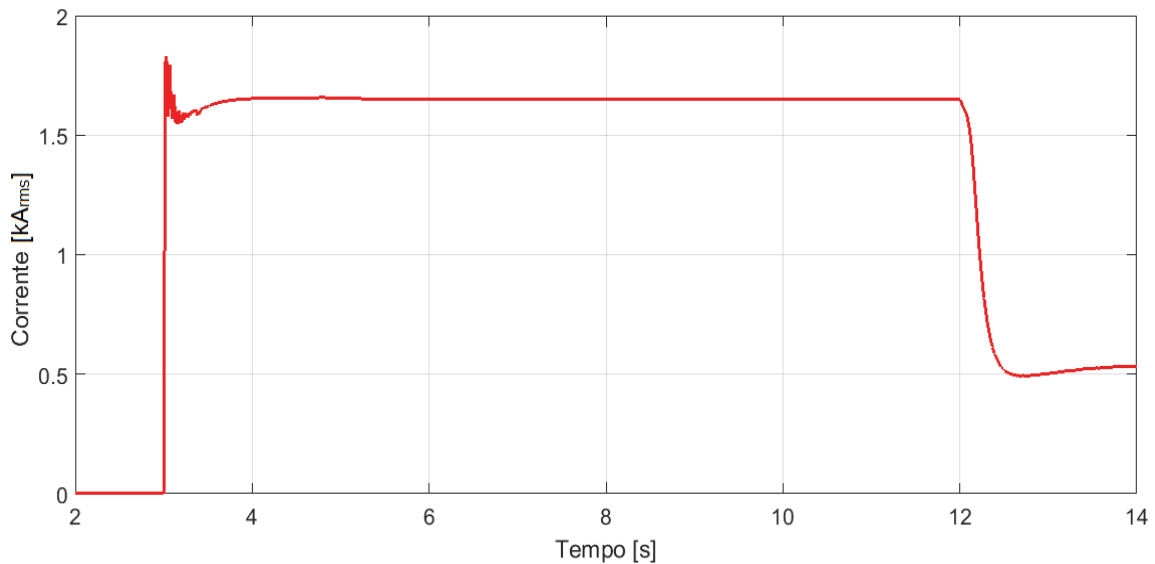


Fig. 5.1 – Corrente de partida direta do motor de 11 MW / 13,8 kV.

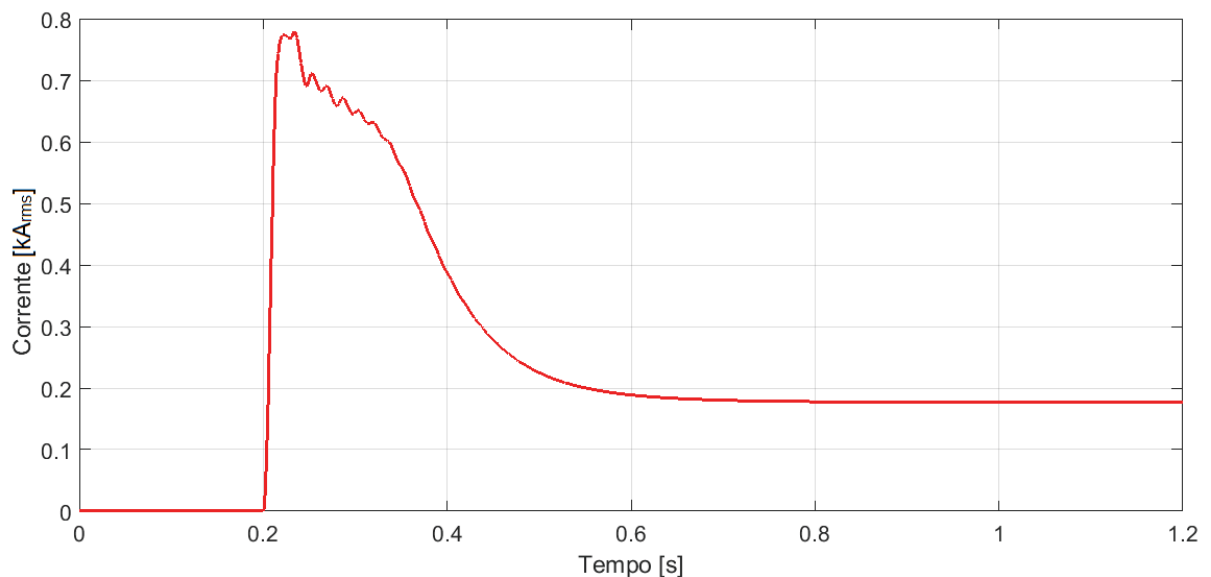


Fig. 5.2 – Corrente de partida direta do motor de 960 kW / 4,16 kV.

5.1.1. RESULTADOS EM MODO NORMAL DE OPERAÇÃO

No modo de operação normal, o painel principal deve operar com DLC pirotécnico interligando as semi-barras A e B, ficando o reator limitador, ligado em paralelo, com uma passagem de corrente elétrica irrelevante. Os resultados das quedas de tensões obtidos nestas simulações são demonstrados nas Tabelas 5.3 e 5.4, sendo que na Tabela 5.3 os resultados são referentes aos geradores principais ajustados para tensão nominal de saída ($V = 1,0$ pu) e na Tabela 5.4 os geradores operando no modo *Field Forcing* ($V = 1,1$ pu).

Tabela 5.3 – Afundamento de tensão em condição normal de operação com $V = 1,0$ pu.

PONTOS DE MEDIÇÃO		MOTOR ACIONADO	
		M-C-UC-1231001A (em pu)	M-B-5111001A (em pu)
Painel de 13,8 kV	Tensão pré-partida	0,997	1,000
	Tensão na partida	0,896	0,991
	Queda de tensão	10,1 %	0,9 %
Painel de 4,16 kV	Tensão pré-partida	1,004	1,001
	Tensão na partida	0,893	0,972
	Queda de tensão	11,1 %	2,9 %
Painel de Produção 480 V	Tensão pré-partida	1,005	0,999
	Tensão na partida	0,891	0,991
	Queda de tensão	11,3 %	0,8 %

Tabela 5.4 - Afundamento de tensão em condição normal de operação com $V = 1,1$ pu.

PONTOS DE MEDIÇÃO		MOTOR ACIONADO	
		M-C-UC-1231001A (em pu)	M-B-5111001A (em pu)
Painel de 13,8 kV	Tensão pré-partida	1,097	1,100
	Tensão na partida	0,965	1,092
	Queda de tensão	12,0 %	0,7 %
Painel de 4,16 kV	Tensão pré-partida	1,098	1,110
	Tensão na partida	0,963	1,079
	Queda de tensão	12,2 %	2,8 %
Painel de Produção 480 V	Tensão pré-partida	1,099	1,101
	Tensão na partida	0,959	1,093
	Queda de tensão	12,7 %	0,7 %

A Figura 5.3 compara as curvas dos afundamentos das tensões nos painéis do sistema elétrico quando da partida direta do motor de 11 MW alimentado pelo painel de 13,8 kV, em modo normal de operação e sob tensão nominal.

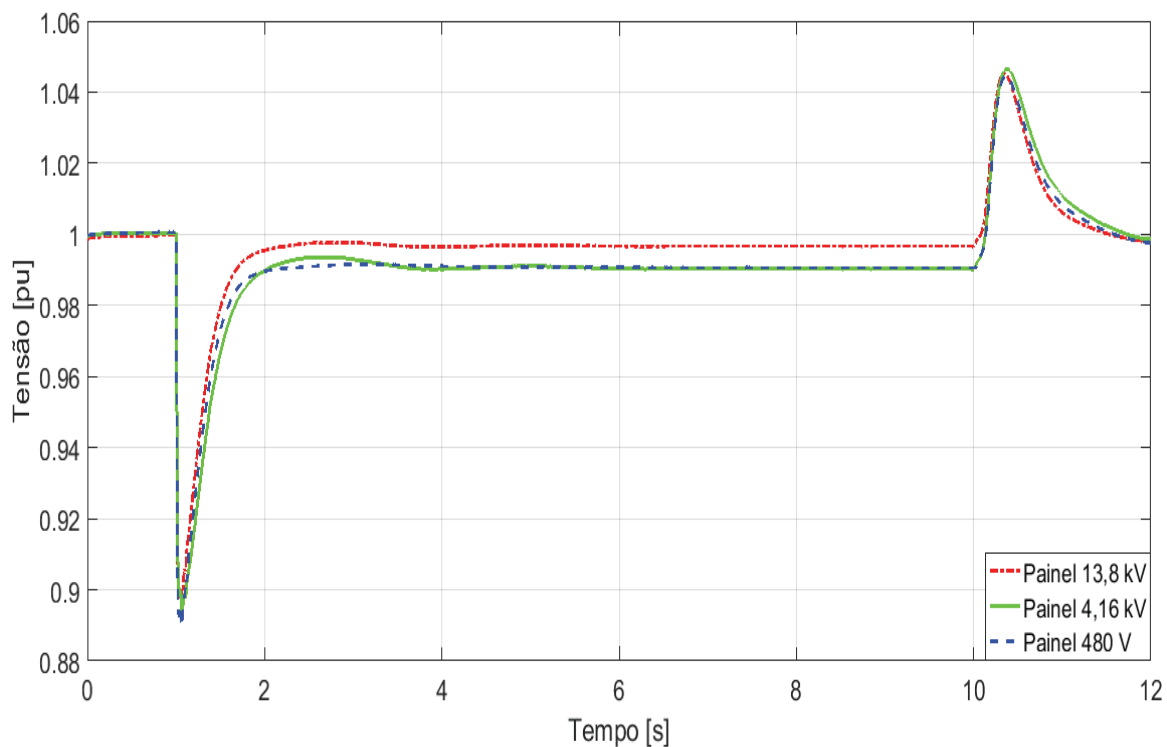


Fig. 5.3 – Curvas das tensões nos painéis na partida direta do motor de 11 MW em modo normal de operação e tensão nominal.

5.1.2. RESULTADOS EM MODO DE CONTIGÊNCIA OPERACIONAL

No modo de contingência operacional, o painel principal opera com DLC pirotécnico aberto e a interligação das semi-barras A e B do painel principal realizada exclusivamente pelo reator limitador. Nestas condições se espera um maior afundamento da tensão nos painéis tendo em vista a queda de tensão no reator limitador. Os resultados obtidos nestas simulações são demonstrados nas Tabelas 5.5 e 5.6, sendo que na Tabela 5.5 os resultados são referentes aos geradores principais ajustados para tensão nominal de saída e na Tabela 5.6 os geradores operando no modo *Field Forcing* ($V = 1,1$ pu).

Tabela 5.5 - Afundamento de tensão com V= 1,0 pu e com o reator na interligação do painel.

PONTOS DE MEDIÇÃO		MOTOR ACIONADO	
		M-C-UC-1231001A (em pu)	M-B-5111001A (em pu)
Painel de 13,8 kV	Tensão pré-partida	0,999	0,999
	Tensão na partida	0,878	0,988
	Queda de tensão	12,1 %	1,1 %
Painel de 4,16 kV	Tensão pré-partida	1,001	1,001
	Tensão na partida	0,876	0,970
	Queda de tensão	12,5 %	3,1 %
Painel de Produção 480 V	Tensão pré-partida	1,000	0,999
	Tensão na partida	0,872	0,990
	Queda de tensão	12,8 %	0,9 %

Tabela 5.6 - Afundamento de tensão com V= 1,1 pu e com o reator na interligação do painel.

PONTOS DE MEDIÇÃO		MOTOR ACIONADO	
		M-C-UC-1231001A (em pu)	M-C-UC-1231001A (em pu)
Painel de 13,8 kV	Tensão pré-partida	1,098	1,099
	Tensão na partida	0,946	1,090
	Queda de tensão	13,8 %	0,8 %
Painel de 4,16 kV	Tensão pré-partida	1,098	1,110
	Tensão na partida	0,945	1,078
	Queda de tensão	13,9 %	2,9 %
Painel de Produção 480 V	Tensão pré-partida	1,089	1,101
	Tensão na partida	0,940	1,091
	Queda de tensão	13,6 %	0,9 %

A Figura 5.4 compara as curvas dos afundamentos das tensões nos painéis do sistema quando da partida direta do motor de 11 MW alimentado pelo painel de 13,8 kV, em modo contingencial de operação e sob tensão nominal

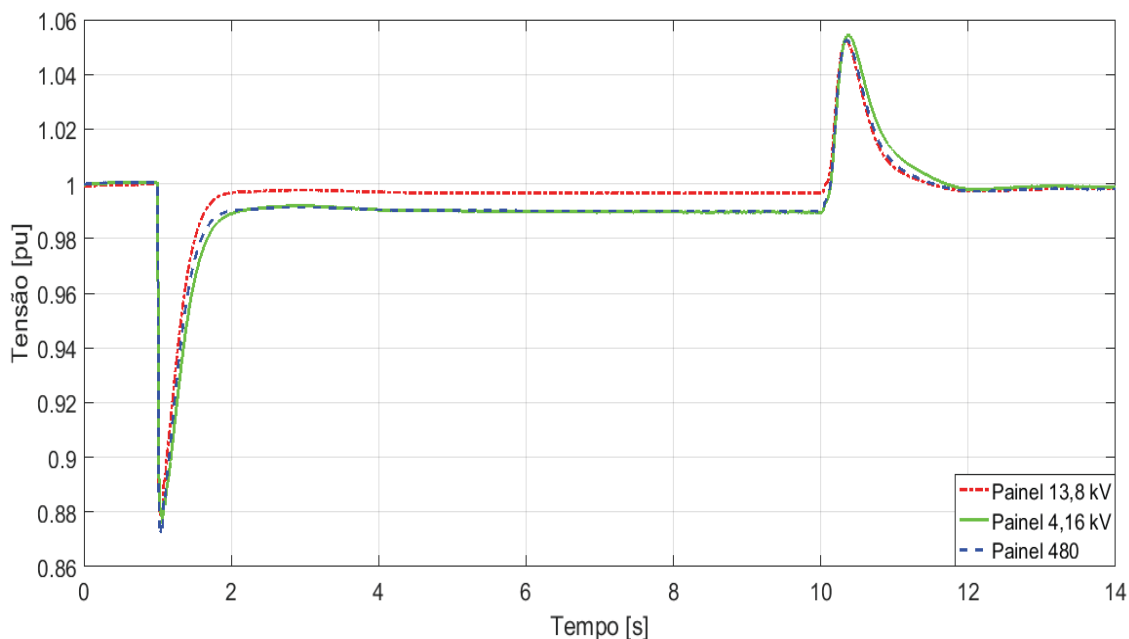


Fig. 5.4 – Curvas das tensões nos painéis na partida direta do motor de 11 MW em modo contingencial de operação e tensão nominal.

5.1.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados mostram que para todos os casos simulados, as tensões nos sistemas de média e baixa tensão não apresentam afundamentos de tensão superior a 15 % da tensão nominal nos seus respectivos painéis durante a partida dos motores, mesmo sob a mais severa condição de carregamento do sistema e no modo normal de operação. Outro ponto a ser observado é que com a habilitação do modo *Field Forcing* (tensão de saída em 1,1 pu) os afundamentos de tensão durante as partidas dos motores não atingem nem 10 % da tensão nominal dos painéis. De acordo com os resultados da simulação e registrados na Tabela 5.6, a menor tensão durante a partida no modo contingencial é de 0,94 pu no Painel de Produção de 480 V.

Nota-se que a partida direta do motor de maior potência do painel de 4,16 kV não traz variações consideráveis de tensão nos sistemas de 13,8 kV e de baixa tensão. No próprio painel de 4,16 kV os afundamentos de tensão observados não são muito bruscos, atingido uma tensão mínima de 0,97 pu quando partindo sob tensão nominal (1,0 pu) e no modo contingencial de operação.

A pior situação da tensão ocorre no painel de baixa tensão quando da partida do motor de 11 MW no painel principal, com tensão de geração em 1,0 pu e em modo contingencial de operação (Tabela 5.5). A tensão no painel de baixa tensão chega a

0,872 pu, o equivalente à 418 V, porém dentro das premissas estabelecidas pelo projeto de um limite máximo de 15 % de queda de tensão durante a partida dos motores.

A análise dos resultados demonstra que o reator limitador na interligação das semi-barras do painel principal acrescenta em torno de 2 % a mais de afundamento de tensão nos painéis do sistema elétrico da FPSO, conforme observado ao confrontar os valores das Tabelas 5.3 e 5.5 durante a partida do motor de 13,8 kV. Diante disto, pode-se concluir que este aumento no afundamento de tensão não causa impactos na operação do sistema elétrico, tornando a alternativa de instalação do reator limitador no painel principal viável quanto aos limites estabelecidos para queda de tensão.

5.2. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO

Conforme detalhado no Capítulo 4, para as análises das correntes de curto-circuito, a modelagem do sistema elétrico do FPSO no ATPDraw reproduziu os motores de média tensão individualmente, visto que estas grandes máquinas também contribuem para a elevação dos níveis da corrente de curto-circuito, conforme apresentado na Tabela 4.2. No caso das cargas motóricas alimentadas em baixa tensão a modelagem foi simplificada ao ser adotado um motor equivalente de gaiola simples, conforme detalhado no Capítulo 4 deste estudo.

De acordo com o estabelecido nas premissas de atuação do DLC pirotécnico, a lógica do dispositivo só habilita o seu disparo em caso de curto-circuito no nível de tensão de 13,8 kV, visto que é o nível de tensão em que se encontram as condições mais severas para suportabilidade do sistema elétrico. Apesar das simulações deste trabalho se restringirem aos curtos-circuitos trifásicos, pois são os defeitos que resultam nas correntes de curto-circuito de maior amplitude no sistema elétrico do FPSO, cabe destacar que na prática sob quaisquer tipos de curtos-circuitos (monofásico, bifásico ou trifásico), ocorre um comando de disparo dos insertos das fases afetadas pelo curto-circuito e de abertura do disjuntor instalado em série com o DLC pirotécnico, isolando desta forma por completo as duas semi-barras do painel principal.

Como um dos objetivos deste trabalho é analisar o comportamento do sistema elétrico sob a condição mais severa de curto-circuito no sistema, foi considerado o maior carregamento possível em uma das semi-barras do painel principal de 13,8 kV. Da mesma forma que fora estabelecido para as análises de afundamento de tensão, o maior carregamento em uma semi-barra do painel principal ocorre quando: (i) estão operando os quatro geradores em paralelo, (ii) todos os motores do painel de 13,8 kV estão conectados e operando em regime permanente, (iii) todas as cargas do painel de 4,16 kV estão conectadas, com o painel operando em “L”, ou seja, o disjuntor de interligação das semi-barras fechados e finalmente (iv) as cargas de baixa tensão estão na condição de demanda máxima e exclusivamente alimentadas pela semi-barra analisada. Estas condições simulam as condições mais severas de curto-circuito nas quais os painéis ficam submetidos em toda vida útil do FPSO e para o estudo foi considerado o máximo carregamento na semi-barra “A” do painel principal. O Apêndice 8.9 ilustra, através de um diagrama unifilar simplificado, esta condição de operação do sistema.

Em todos os casos de curtos-circuitos analisados neste trabalho, o momento da ocorrência do curto-circuito foi aplicado quando a onda da tensão na fase A passa por zero, que resulta na situação mais desfavorável do curto-circuito e que onde se espera um valor máximo da componente contínua da corrente de curto-circuito, conforme ilustrado na Figura 2.2.

Neste estudo foram simulados quatro casos de curto-circuito trifásicos para as análises do comportamento dinâmico do sistema elétrico do FPSO quando da instalação do reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico. Para estas análises foram consideradas as condições mais severas de curto-circuito da instalação, conforme descrito no parágrafo anterior, e aplicados nos casos apresentados na Tabela 5.7 e no diagrama unifilar simplificado do Apêndice 8.9.

Tabela 5.7 – Casos dos estudos de aplicação dos curtos-circuitos trifásicos.

CASO	TENSÃO	LOCAL DO CURTO-CIRCUITO
1	13,8 kV	Semi-barra “A” do painel principal
2	13,8 kV	Terminais do motor de maior potência na semi-barra “A”
3	4,16 kV	Barramento do Painel de 4,16 kV
4	480 V	Barramento do Painel do Sistema de Produção de 480 V

Os curtos-circuitos do tipo monofásicos (fase-terra) não foram objeto deste estudo, tendo em vista que o sistema de aterramento do FPSO possui alta impedância nos neutros dos geradores e transformadores, limitando desta forma as correntes de curtos-circuitos a valores seguros.

A Tabela 5.8 apresenta os níveis máximos especificados das correntes de curtos-circuitos dos painéis.

Tabela 5.8 – Especificação das correntes de curtos-circuitos dos painéis.

Painel	Tensão Nominal (kV)	Corrente de curto-circuito (kA)	
		Simétrico / 1 s	crista
Principal	13,8	50	130
Sistema de Produção	4,16	40	104
Sistema de Produção	0,48	50	105

Conforme estabelecido na norma (IEC-60909, 2016), nas folhas de dados dos fabricantes dos painéis, a corrente de crista informada é a corrente que submete o painel ao máximo *stress* mecânico suportável criado pelas forças magnéticas, enquanto a corrente de curto-circuito simétrica é a que impõe aos barramentos do painel o máximo *stress* térmico suportável no período de 1 segundo.

Previamente as análises de curto-circuito, o modelo do sistema elétrico foi utilizado para simular um curto-circuito trifásico no Caso 1 considerando o painel principal em barramento único. Esta simulação teve como objetivo confirmar a necessidade técnica e econômica de seccionamento do barramento em duas semi-

barras (A e B) e a instalação de um DLC interligando-as com a finalidade de reduzir as magnitudes das correntes de curto-circuito.

Com o arranjo do painel principal em barramento único, a corrente de crista encontrada foi de 187,3 kA e a corrente de curto-circuito simétrica foi de aproximadamente 71,8 kA_{rms}, ou seja, ambos os valores ultrapassam as correntes suportáveis pelo painel principal especificados na Tabela 5.8. A Figura 5.5 ilustra a curva da corrente de curto-circuito prospectiva obtida em uma das fases nesta condição.

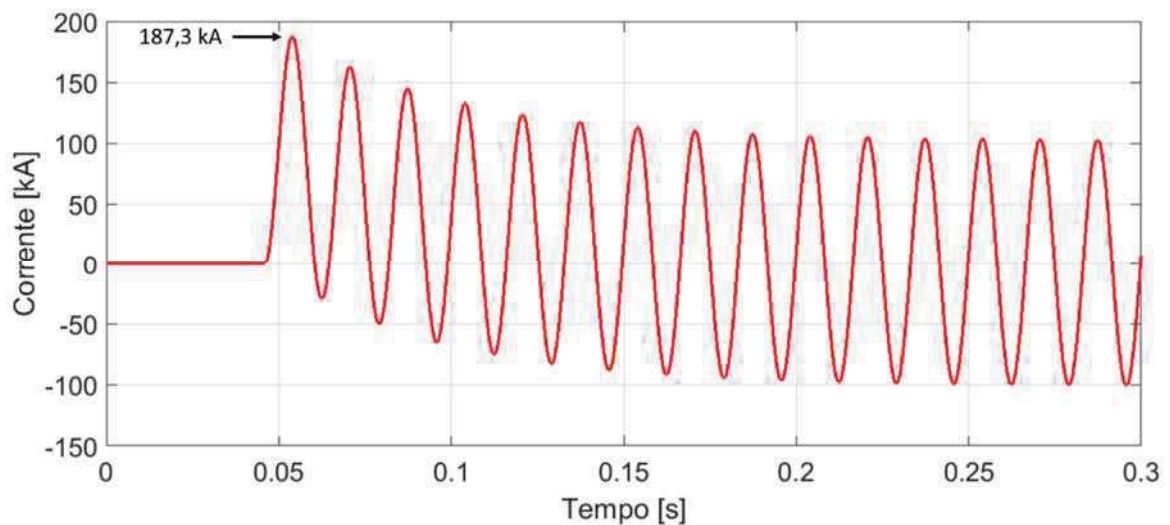


Fig. 5.5 – Corrente de curto-circuito prospectiva sem o DLC no painel principal.

Com base nestes resultados, cujas correntes de curto-circuito ultrapassam em 40 % a capacidade suportada pelo painel, fica comprovada a necessidade de seccionamento do barramento do painel principal e a instalação de um DLC. Nesta condição, não só o painel principal, mas também os demais equipamentos elétricos nele conectados ficariam com suas integridades físicas comprometidas.

5.2.1. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO NO CASO 1

5.2.1.1. ANÁLISE PARA TENSÃO DE GERAÇÃO IGUAL A 1,0 PU.

a) DLC pirotécnico

Para avaliar a limitação das correntes de curto-circuito do sistema elétrico típico da plataforma, foi simulado um curto-circuito no barramento de 13,8 kV, no Caso

1, considerando o arranjo original do painel de 13,8 kV do FPSO, ou seja, com o DLC pirotécnico fazendo a interconexão das semi-barras A e B do painel.

A Figura 5.6 ilustra a curva da corrente de curto-circuito, no instante da passagem pelo 0° da onda senoidal da fase A, que fluem pelo DLC pirotécnico da semi-barra B para semi-barra A no momento do curto-circuito. Observa-se que a corrente de contribuição da semi-barra B é interrompida pelo DLC pirotécnico em aproximadamente $\frac{1}{4}$ de ciclo, com valor de crista de até 17,8 kA.

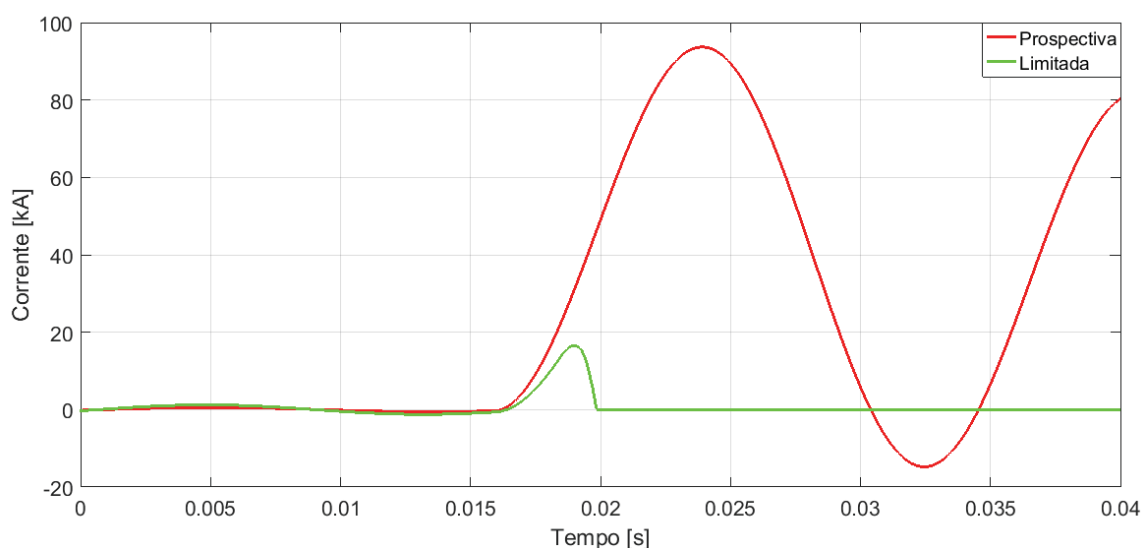


Fig. 5.6 – Curva da corrente de curto-circuito que atravessa o DLC pirotécnico da semi-barra B para semi-barra A.

A Figura 5.7 ilustra as correntes de curto-circuito trifásico no Caso 1. A corrente de crista máxima, obtida no primeiro semiciclo do período subtransitório, é de 93,3 kA e a corrente de curto-circuito simétrica é de 35,4 kA_{rms}. Nesta figura pode-se observar que, em torno de $\frac{1}{4}$ de ciclo, as curvas das correntes de curto-circuito apresentam pequenas depressões causadas pela abertura dos inserts do DLC pirotécnico.

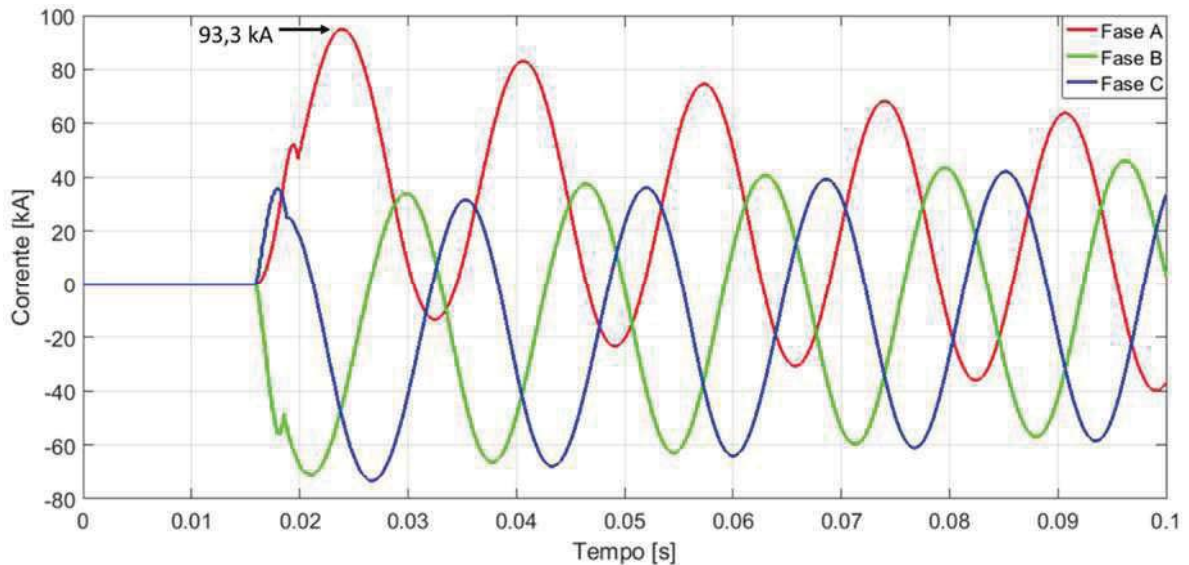


Fig. 5.7 – Curvas das correntes de curto-circuito no Caso 1 com DLC pirotécnico.

Os resultados obtidos confirmam que o emprego do DLC pirotécnico fornece um compromisso adequado com relação à limitação da corrente de curto-circuito de contribuição da semi-barras B para semi-barras A e vice-versa, visto que os valores das correntes de curto-circuito efetivamente não ultrapassam os limites suportáveis do painel.

b) DLC pirotécnico em paralelo com o reator limitador

O contexto chave deste estudo é representado neste arranjo do DLC pirotécnico em paralelo com o reator limitador interligando as semi-barras A e B do painel principal. Nas simulações deste arranjo foram mantidas as mesmas condições do item anterior. Conforme previsto, no instante inicial do defeito a corrente de curto-circuito flui pelo condutor do DLC pirotécnico. Neste momento o dispositivo lógico do DLC pirotécnico monitora a corrente de curto-circuito e, caso a corrente de curto-circuito fique enquadrada dentro dos parâmetros de atuação do DLC, o dispositivo aciona a explosão do condutor, fazendo a corrente de curto-circuito fluir pelos elos fusíveis do DLC pirotécnico. Em paralelo, no curto período da fusão dos elos fusíveis, a corrente de curto-circuito começa a percorrer o reator limitador, de modo que a corrente de curto-circuito flui integralmente pelo reator quando ocorrer a abertura dos elos fusíveis do DLC pirotécnico. A Figura 5.8 ilustra o transitório da passagem da corrente de curto-circuito entre o elo fusível e o reator limitador.

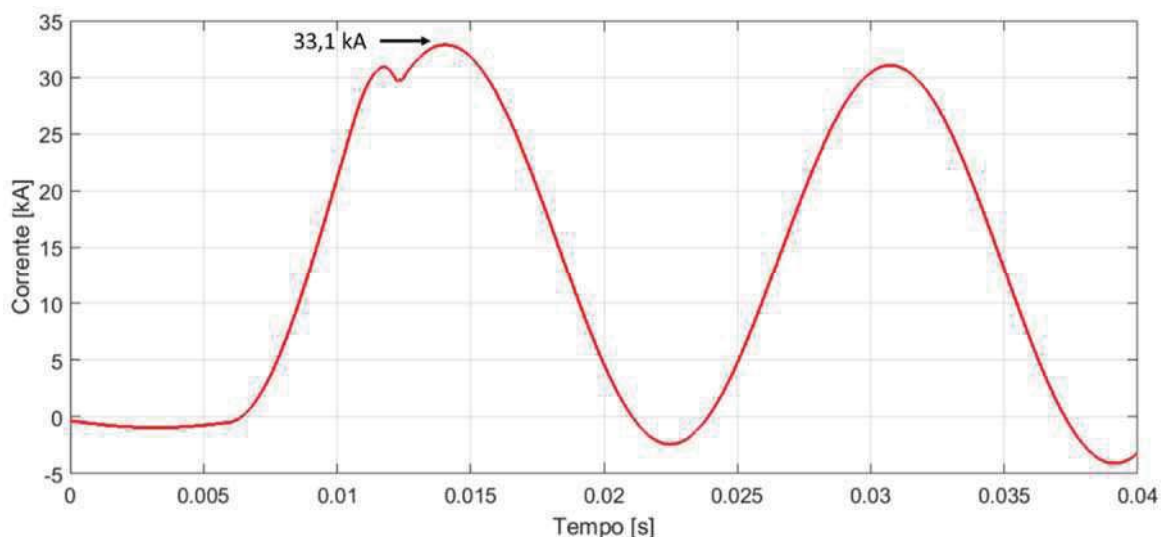


Fig. 5.8 – Curva da corrente de transição entre o DLC pirotécnico e o reator limitador.

Nos primeiros ciclos destacados na Figura 5.8 observa-se que a corrente de curto-circuito de contribuição da semi-barra B alcança uma crista de 33,1 kA, sendo que após alguns ciclos a corrente de curto-circuito simétrica fica estabilizada em 12,3 kA_{rms}. Estes valores das correntes elétricas que fluem pelo reator são coerentes com o calculado e evidencia a eficácia do reator em limitar a corrente de curto-circuito dentro dos níveis suportáveis pelo painel.

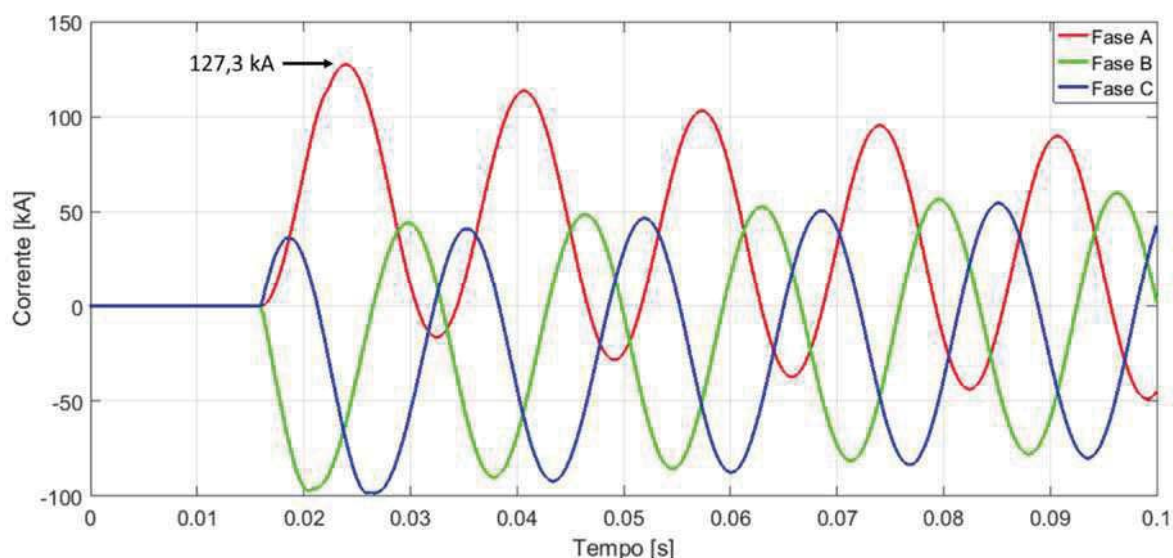


Fig. 5.9 – Curvas das correntes de curto-circuito no Caso 1 com DLC pirotécnico em paralelo com o reator limitador.

A Figura 5.9 ilustra as correntes do curto-circuito no Caso 1. Com a inclusão do reator no circuito, a corrente de crista máxima sobe para 127,3 kA e a corrente de curto-circuito simétrica alcança 47,9 kA_{rms}, valores estes dentro do especificado e suportável pelo painel.

Conforme descrito no Capítulo 4, embora haja continuidade elétrica na interconexão das semi-barras A e B propiciada pelo reator limitador, as correntes de curto-circuito são interrompidas devido à abertura dos disjuntores de proteção dos geradores e do disjuntor *t*ie do painel principal.

c) Reator limitador

Neste arranjo o sistema elétrico da plataforma estaria operando em modo de contingência, ou seja, somente com o reator limitador na interligação entre as semi-barras do painel 13,8 kV. Nestas condições o DLC pirotécnico estaria fora de operação, situação que ocorre quando um ou mais insertos estiverem atuados ou o DLC pirotécnico estiver em serviço de manutenção. A Figura 5.10 ilustra as curvas das correntes de curto-circuito trifásica que fluem pelo reator limitador. Verifica-se que a corrente de crista alcança 32,9 kA e a corrente de curto-circuito simétrica fica em 11,9 kA_{rms}. Nota-se que a magnitude da corrente de crista é maior quando comparada com a corrente de curto-circuito limitada pelo DLC pirotécnico em paralelo com o reator, tendo em vista nesta situação não há o DLC pirotécnico para absorver o primeiro ciclo da energia da corrente de curto-circuito. Com relação à corrente de curto-circuito simétrica, os valores são idênticos em ambas situações, pois neste intervalo do curto-circuito somente o reator limitador está conectado ao circuito.

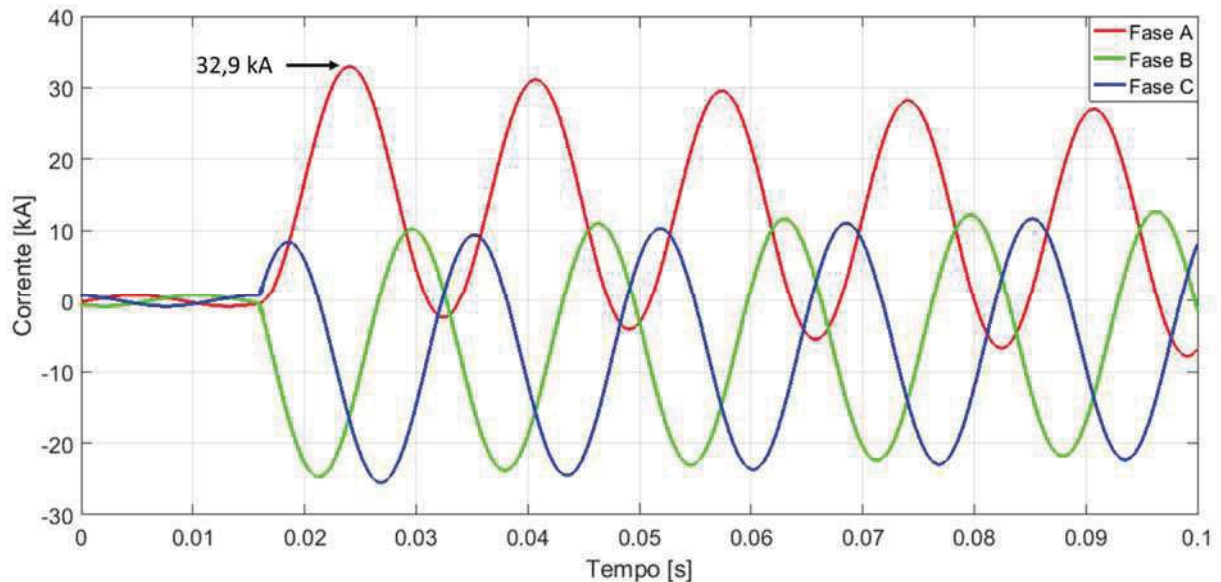


Fig. 5.10 - Curvas das correntes que atravessam o reator limitador da semi-barras B para semi-barras A.

A Figura 5.11 ilustra as formas de onda das correntes de curto-circuito trifásico no Caso 1 na situação em que o DLC de interligação do painel principal é somente o reator limitador. Com somente o reator no circuito, a mínima elevação da corrente de crista máxima pode ser desconsiderada, passa de 127,3 kA para 127,7 kA, e a corrente de curto-circuito simétrica permanece inalterada em 47,9 kA_{rms}, conforme previsto. Estes valores permanecem dentro do especificado e suportável pelo painel principal, embora próximos dos seus limites.

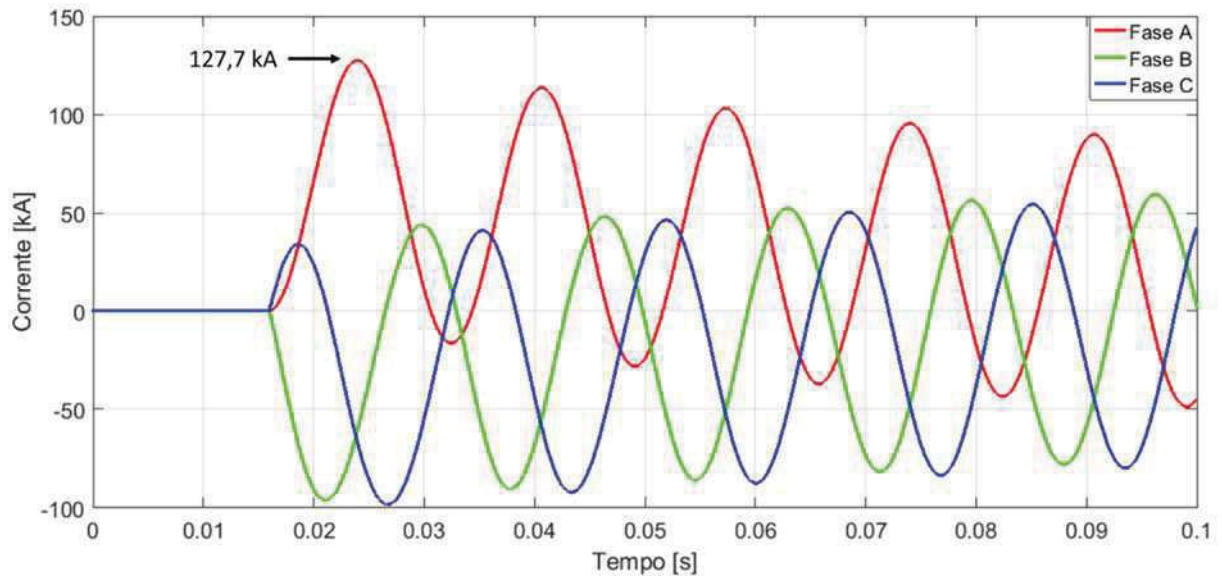


Fig. 5.11 – Curvas das correntes de curto-circuito no Caso 1 com o reator limitador.

Por meio da análise comparativa das curvas da Figura 5.12 é possível observar que a instalação original do FPSO, ou seja, somente com o pirotécnico, é mais eficiente na limitação das correntes de curto-circuito da instalação. Entretanto, a inclusão do reator limitador em paralelo mantém as magnitudes das correntes de curto-circuito dentro dos limites suportados pelo painel principal. Cabe ainda observar que, quando a instalação está com o pirotécnico e o reator limitador em paralelo a curva possui uma taxa de elevação mais elevada comparada a instalação somente com o reator. Este fato se justifica observando que no momento inicial do curto-circuito o pirotécnico representa uma impedância nula para passagem da corrente até o seu rompimento, ao passo que com somente o reator limitador desde o momento do curto-circuito há a reatância indutiva no circuito limitando a sua elevação.

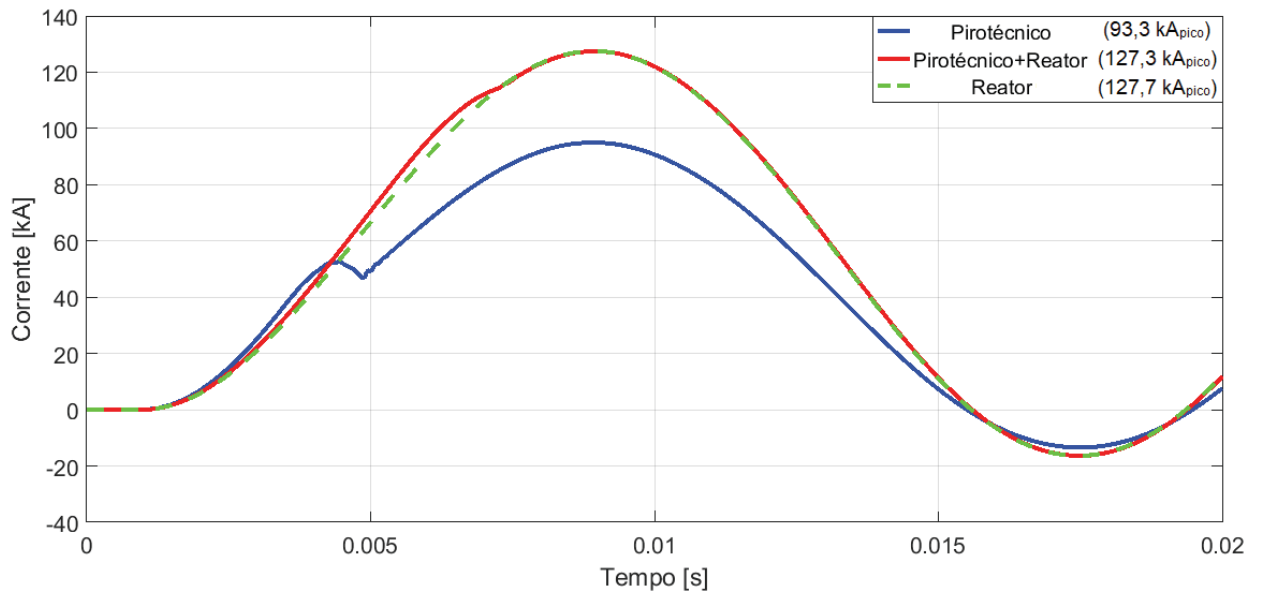


Fig. 5.12 – Comparativo das curvas das correntes de curto-circuito no Caso 1.

5.2.1.2. ANÁLISE PARA TENSÃO DE GERAÇÃO IGUAL A 1,1 PU.

Para o acionamento das grandes máquinas, o controlador PMS do sistema de geração elétrica pode constatar que há necessidade de habilitar o modo *field forcing* com o objetivo de mitigar os efeitos do afundamento de tensão do sistema elétrico do FPSO. Com o objetivo de avaliar as implicações nas magnitudes das correntes de curto-circuito com o sistema neste modo de operação, foram realizadas simulações nas mesmas condições da análise anterior, porém com o sistema de geração em 1,1 pu na tensão de saída.

a) DLC pirotécnico

Com a condição original do sistema, ou seja, com somente o DLC pirotécnico interligando as duas semi-barras do painel principal, a corrente de crista passa de 93,3 kA para 102,1 kA enquanto a corrente de curto-circuito simétrica aumenta de 35,4 kA_{rms} para 39,6 kA_{rms}. Nota-se que as elevações dos valores das correntes de curto-circuito seguem proporcionalmente a elevação da tensão de geração do sistema.

Pode-se concluir que mesmo na condição do sistema de geração em modo *field forcing*, os valores alcançados pelas correntes de curto-circuito não superam os

limites suportáveis pelo painel, confirmando que o DLC pirotécnico atende plenamente aos requisitos esperados de limitação da corrente de curto-circuito do sistema.

b) DLC pirotécnico em paralelo com o reator limitador

Com o reator limitador instalada em paralelo com o DLC pirotécnico a corrente de crista salta de 127,3 kA para 132,8 kA e a corrente de curto-circuito simétrica chega a 52,7 kA_{rms}, ou seja, os dois valores ultrapassam os limites suportáveis pelo painel, requerendo desta forma que o cálculo da impedância do reator limitador seja ajustado.

c) Reator limitador

Nesta condição de contingência operacional, da mesma forma que o ocorrido com o sistema gerando em 1,0 pu, há um aumento da corrente de crista, passando de 127,7 kA para 133,6 kA, enquanto a corrente de curto-circuito simétrica permanece com os mesmos valores do arranjo DLC pirotécnico em paralelo com o reator limitador, ou seja, 52,7 kA_{rms}. Nesta condição o painel também não suportaria as máximas correntes de curto-circuito na qual ficaria submetido, sendo, portanto, necessário o ajuste impedância do reator limitador.

5.2.2. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO NO CASO 2

De acordo com as curvas das correntes de curto-circuito obtidas no Caso 2, nota-se uma atenuação nos valores das correntes de curto-circuito quando comparadas aos valores obtidos no Caso 1, devido à inclusão da impedância dos cabos de alimentação do motor na impedância total do curto-circuito. Observa-se que as correntes de crista e simétricas são reduzidas em 12,09 % e 3,75 %, respectivamente, quando comparadas ao curto-circuito franco no barramento do painel principal (Caso 1).

Pelos resultados obtidos nas simulações de curto-circuito no Caso 2, pode-se concluir que a atenuação das correntes de curto-circuito não foi suficiente para evitar o acionamento do DLC pirotécnico, conforme estabelecido nas premissas do projeto para curtos-circuitos no sistema de 13,8 kV e resumidos na Tabela 4.1.

5.2.3. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO NO CASO 3

Apesar da lógica de disparo só habilitar a atuação do DLC pirotécnico em casos de curto-circuito nas tensões de 13,8 kV, um curto-circuito trifásico no painel de 4,16 kV foi aplicado para observar as correntes de curto-circuito que fluem pelo DLC instalado no painel de 13,8 kV, assim como observar também os desmembramentos no painel de 4,16 kV.

A Figura 5.13 apresenta a curva das correntes que fluem pelo DLC pirotécnico quando do curto-circuito trifásico no painel de 4,16 kV. A curva demonstra que a corrente de crista de 8,4 kA é inferior a menor corrente ajustada ($i_2 = 9,5$ kA) para o disparo do DLC pirotécnico. Desta forma, mesmo nas condições mais severas de um curto-circuito no painel de 4,16 kV, a corrente de curto-circuito não é alta o suficiente para acionar o limitador DCL pirotécnico instalado no painel de 13,8 kV.

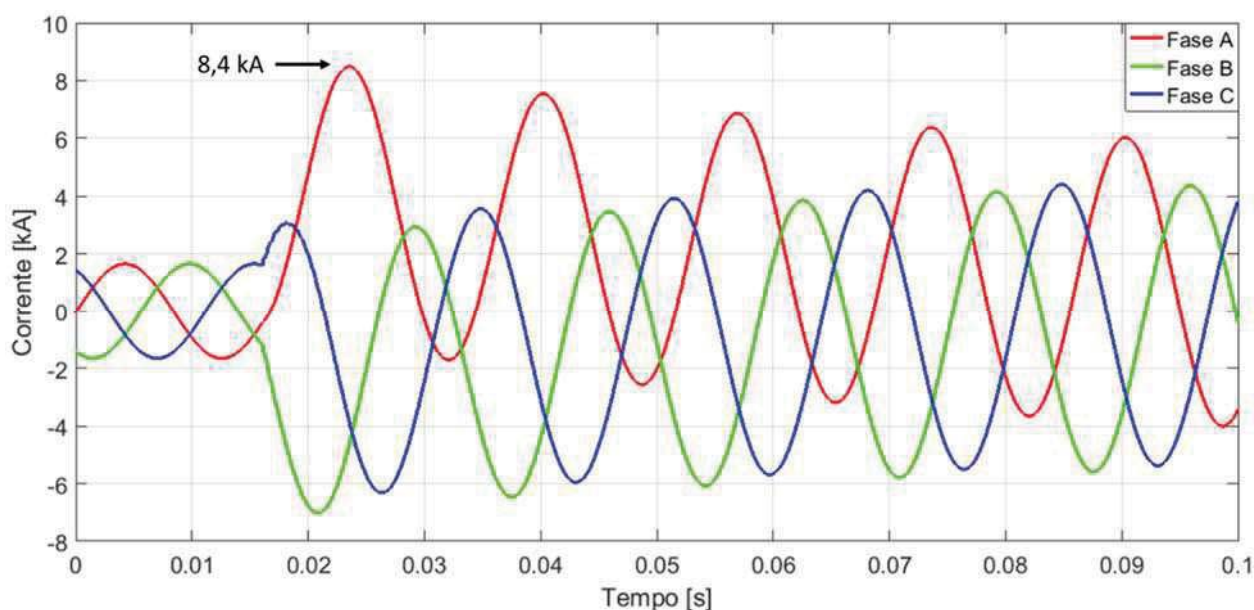


Fig. 5.13 – Curvas das correntes que atravessam o DLC pirotécnico da semi-barras B para semi-barras A quando do curto-circuito no Caso 3.

Ao analisar as condições dos curtos-circuitos no Caso 3, nota-se uma redução na corrente de curto-circuito quando a interligação entre as semi-barras do painel principal é feita exclusivamente pelo reator limitador. A corrente de crista é reduzida em 1,5 kA, passando de 70,0 kA para 68,5 kA, e a corrente de curto-circuito simétrica é reduzida de 24,2 kA para 23,7 kA. Esta redução da corrente de curto-circuito se justifica pela impedância do reator limitador, que eleva a impedância total do circuito.

A Figura 5.14 compara as duas curvas de correntes de curto-circuito simuladas no Caso 3: (i) pirotécnico em paralelo com o reator limitador e (ii) somente reator limitador.

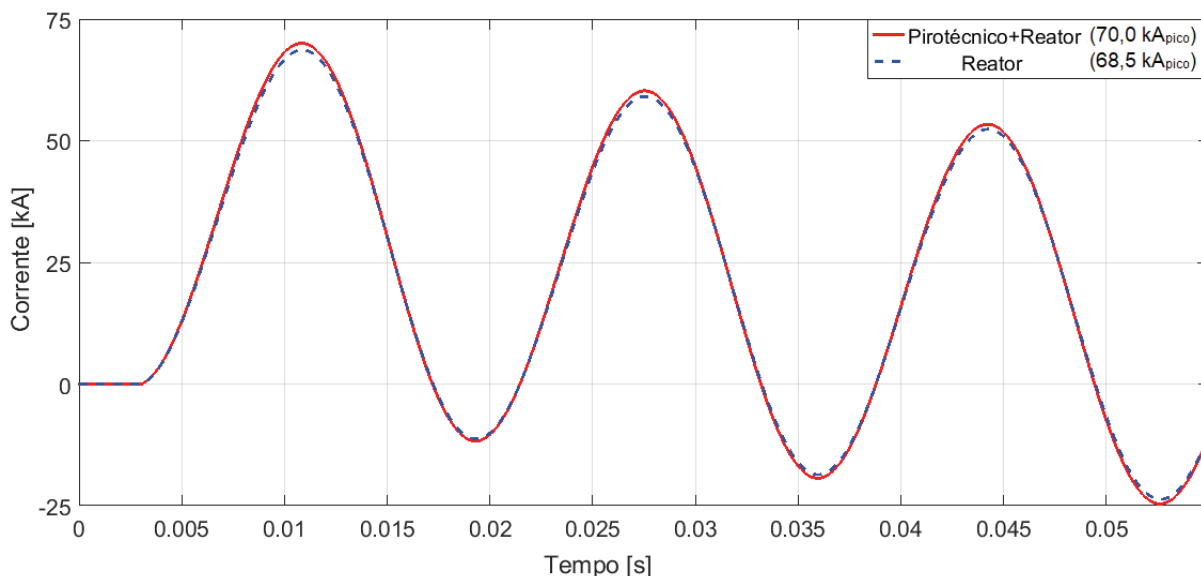


Fig. 5.14 – Comparativo das correntes de curto-circuito no Caso 3.

Os resultados desta simulação, resumidos na Tabela 5.9, demonstram que os limites suportáveis das correntes de curto-circuito do painel de 4,16 kV não são ultrapassados nos dois arranjos de DLCs na interconexão das semi-barras do painel de 13,8 kV.

5.2.4. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO NO CASO 4

A simulação de um curto-circuito trifásico em um dos painéis de baixa tensão do sistema de produção (PN-5143003) foi feita para verificar, assim como analisado no painel de 4,16 kV, que as magnitudes das correntes de curto-circuito não são suficientes para sensibilizar a lógica de disparo do DLC pirotécnico. Além disso, esta simulação também teve o objetivo de verificar se as correntes de curto-circuito não excederam os limites estabelecidos nas especificações técnicas.

A Figura 5.15 apresenta a curva da corrente elétrica que atravessa o DLC pirotécnico quando do curto-circuito trifásico no painel de 480 V. Nota-se que a corrente de crista, no valor de 2,2 kA, é inferior à corrente mínima necessária para o disparo do DLC pirotécnico.

No caso das correntes de curto-circuito no painel, observa-se uma redução imperceptível da corrente de curto-circuito no painel quando este é protegido exclusivamente pelo reator limitador e que sob quaisquer arranjos de DLC no painel principal os valores das correntes de curto-circuito não ultrapassam os seus limites suportáveis.

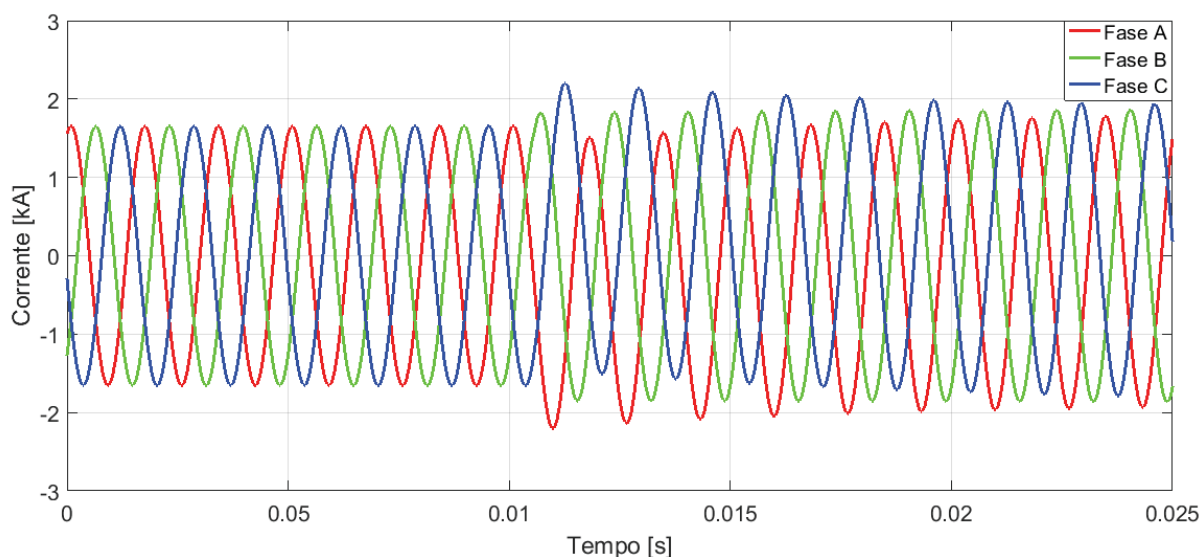


Fig. 5.15 – Corrente de curto-circuito que atravessa o DLC pirotécnico no Caso 4.

Os resultados da simulação no Caso 4, resumidas na Tabela 5.9, mostram que corrente de crista no instante do curto-circuito que flui pelo DLC pirotécnico é inferior a menor corrente ajustada na lógica de disparo do pirotécnico. Tal fato reforça que curtos-circuitos no sistema de baixa tensão são incapazes de sensibilizar o disparo de abertura dos insertos do DLC pirotécnico e que os painéis de baixa tensão também suportam o *stress* mecânico e térmico mesmo quando da ocorrência do curto-circuito nas mais severas condições de carregamento do sistema elétrico.

5.2.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados das correntes de curto-circuito obtidas por meio das simulações no modelo dinâmico do sistema elétrico do FPSO estão resumidos na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Resumo das correntes de curto-circuito nos Casos 1, 2, 3 e 4.

Caso	Tensão (V)	Corrente de Curto-Circuito							
		Limites do painel		DLC pirotécnico		DLC pirotécnico com reator		Somente reator	
		I_{crista} (kA _{crista})	$I_{\text{simétrica}}$ (kA _{rms})	I_{crista} (kA _{crista})	$I_{\text{simétrica}}$ (kA _{rms})	I_{crista} (kA _{crista})	$I_{\text{simétrica}}$ (kA _{rms})	I_{crista} (kA _{crista})	$I_{\text{simétrica}}$ (kA _{rms})
1	13.800	130	50	93,3	35,4	127,3	47,9	127,7	47,9
1	15.180	130	50	102,1	39,6	132,8	52,7	133,6	52,7
2	13.800	130	50	86,1	35,2	111,9	46,1	113,1	46,1
3	4.160	104	40	70,0	24,2	70,0	24,2	68,5	23,7
4	480	105	50	67,7	25,2	67,7	25,2	67,1	25,0

Com base nos resultados das simulações de curto-circuito é possível concluir que:

- O DLC pirotécnico, que é o DLC originalmente utilizado na interligação das semi-barras A e B do painel principal dos FPSOs típicos objetos deste estudo, atende plenamente a função de limitação das correntes de curto-circuito do sistema elétrico mesmo sob a mais severa condição de carregamento da plataforma.
- Embora não atinjam os valores máximos das correntes suportáveis do painel principal, a instalação do reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico eleva consideravelmente os níveis das correntes de curto-circuito quando ocorridos no sistema de 13,8 kV. Desta forma, o dimensionamento e especificações técnicas do reator limitador devem ser rigorosas, considerando valores de possíveis sobretensões e sobrecorrentes nos cálculos.
- Conforme relatado no 5.2.1.2, verificou-se que quando da operação dos geradores principais no modo *field forcing*, ou seja, com a tensão de geração em 1,1 pu, os valores das correntes de curto-circuito ultrapassam ligeiramente os limites máximos suportável pelo painel principal. Sendo assim, apesar do modo *field forcing* ser atípico e operar apenas por um curto período, recomenda-se o dimensionamento do reator limitador considerando esta sobretensão prevista no sistema.

- d) Para os painéis de 4,16 kV e de baixa tensão, a influência nas magnitudes das correntes de curto-circuito quando da instalação do reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico é irrelevante. Este fato se deve ao DLC pirotécnico não atuar para ocorrências de curto-circuito nestes painéis, conforme é previsto no projeto e lógica de atuação do dispositivo.

5.3. VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA INSTALAÇÃO DO REATOR LIMITADOR

Os fabricantes dos DLCs pirotécnico presumem a atuação dos seus dispositivos num intervalo de 4 anos, porém na prática vem sendo constatada a sua atuação indevidamente, acarretando por vezes na indisponibilidade e afetando na confiabilidade da instalação elétrica (HIBBERT, 2005). Este inconveniente se torna mais relevante em instalações de sistemas elétricos em locais isolados, que possuem dificuldades logísticas para serem acessados e cuja a atuação do DLC provoca restrições operacionais que afetam diretamente a produção e a receita da empresa. Sendo assim, apesar da comprovada eficácia do DLC pirotécnico na limitação das correntes de curto-circuito, algumas desvantagens deste tipo de DLC vem sendo observados:

- a) Os disparos intempestivos, que vêm sendo observados devido à complexidade para os ajustes da lógica de disparo (HIBBERT, 2005).
- b) Os disparos indevidos no decorrer da fase de comissionamento das instalações, acarretando gastos com a substituição dos insertos e atrasos no cronograma de energização do SEI.
- c) A exclusividade do fabricante no fornecimento de peças de reposição, que são importadas e de longo prazo de entrega no Brasil, geralmente 75 dias.
- d) A obrigatoriedade de contratação dos serviços do fabricante em reparos e prestação de assistência técnica.
- e) O software de programação do ajuste da lógica de controle e disparo é proprietário, ou seja, não permite acesso do usuário para ajustes na programação por toda vida útil do dispositivo.

- f) Ao ser atuado, o DLC pirotécnico compromete a continuidade da alimentação do circuito, exigindo a substituição do inserto atuado. O período necessário para o restabelecimento do circuito acarretará em perdas de produção e, conseqüentemente, receita para a empresa.

Diante destes fatos, a instalação de um reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico visa contornar essas desvantagens e as restrições que acabam sendo impostas pelos fabricantes para realização de serviços de reparo e manutenção com maior celeridade.

Os resultados obtidos nas simulações de curto-circuito e afundamento de tensão no sistema elétrico do FPSO demonstraram a viabilidade técnica da instalação de um reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico na interconexão das semi-barras do painel principal. Como parâmetro para uma avaliação dimensional foram levantadas as características de um reator limitador a núcleo de ar similar com o reator estudado, conforme detalhado na Tabela 5.10:

Tabela 5.10 – Parâmetros de um reator limitador trifásico para o FPSO

Parâmetro	Valor	Unidade
Indutância Nominal	0,85	mH
Corrente Nominal	3.000	A
Tensão nominal	13,8	kV
Corrente de curto-circuito permanente (rms)	36	kA em 1 s
Corrente de crista	92	kA
Massa (estimada)	491	kg
Dimensões (altura x diâmetro) (estimativa reator da GE)	3 x (2549 x 1700)	mm
Refrigeração	AN (Ar Natural)	

Apesar das características físicas do reator, estas não mostram total impedimento para sua instalação em uma plataforma marítima do tipo FPSO, visto que eles podem ser instalados em ambientes não climatizado, com uma área

requerida aproximada de 40 m² e com o peso total na ordem de 5 toneladas, que são grandezas viáveis diante da grandeza estrutural de um FPSO.

Ainda que superficialmente, pretendeu-se analisar a viabilidade econômica de instalação deste arranjo de DLCs no sistema elétrico do FPSO. Superado os requisitos técnicos e físicos, o trabalho buscou analisar o custo de aquisição deste equipamento. Em maio de 2019 o valor orçado para aquisição de um conjunto trifásico de reatores, foi de R\$ 348.000,00 ou US\$ 87.300,00 (considerando a taxa Ptax do Banco Central do Brasil em 13/05/2019). Acrescentando os custos dos serviços e materiais necessários para sua adequação no sistema original, como gabinetes, disjuntores e cabos, pode-se ainda concluir que os custos envolvidos não são representativos no custo total de um FPSO objeto de estudo, que superam o montante de US\$ 1.000.000.000,00.

Conforme mencionado no Capítulo 1 deste trabalho, uma restrição operacional de 25 % na produção plena diária de óleo do FPSO imposta pela abertura do DLC pirotécnico, representa uma perda diária de aproximadamente US\$ 2.500.000,00. Portanto, dado que os valores estimados das perdas financeiras ainda que sejam conservadores e superficiais, um único dia de restrição operacional da plataforma, em função da indisponibilidade do DLC pirotécnico, compensaria o investimento da instalação de um reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico no painel principal da plataforma, que, é importante frisar, somente seria inserido no circuito quando do rompimento ou manutenção do DLC pirotécnico.

6. CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÃO

Com a finalidade de mitigar os prejuízos causados pela restrição operacional dos FPSOs imposta quando da abertura do DLC pirotécnico no painel principal, este trabalho apresentou o estudo da aplicação de uma alternativa à instalação padrão deste tipo de DLC nos sistemas elétricos dos FPSOs. A alternativa proposta foi a instalação de um reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico, a fim de dar continuidade à interligação das semi-barras do painel principal mesmo após a atuação do DLC pirotécnico. Para analisar a viabilidade da alternativa proposta foi modelado um sistema elétrico típico do FPSO na ferramenta computacional ATPDraw e neste modelo foram realizadas simulações de curtos-circuitos e partidas de grandes máquinas.

Nas análises de curto-circuito ficou constatado que apesar da inclusão do reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico ser capaz de manter as correntes de curto-circuito dentro dos limites suportáveis dos equipamentos da instalação, estas apresentam amplitudes maiores quando comparado com a interligação do painel principal se dar exclusivamente pelo DLC pirotécnico. Desta forma, para segurança da instalação, o dimensionamento do reator deve prever as possíveis sobretensões no sistema, como a ativação do modo *field forcing* no controlador dos geradores principais. Para curtos-circuitos ocorridos nos sistemas de 4,16 kV e de baixa tensão não foram observadas alterações significativas nos níveis de curto-circuito do sistema elétrico.

Os afundamentos das tensões no sistema elétrico durante a partida das grandes cargas motóricas nas condições do DLC pirotécnico atuado (aberto) e, por conseguinte, com somente o reator limitador na interligação das semi-barras A e B do painel principal, estiveram abaixo do limite de queda de tensão estabelecido como premissa, o que foi satisfatório. Por meio das análises dos gráficos gerados nos períodos de transitórios das tensões quando das partidas dos motores de maior potência, pode-se observar que o reator limitador acarretou um acréscimo da queda de tensão em torno de 2 % nos painéis do sistema elétrico do FPSO, e ainda assim, não ultrapassou o limite de queda de tensão de 15% estabelecido como parâmetro

de projeto para regulação de tensão.

Com base nas análises realizadas, a confirmação da viabilidade técnica do emprego do reator limitador em paralelo com o DLC pirotécnico, apresenta uma alternativa de arranjo capaz garantir uma maior continuidade e previsibilidade na produção de óleo e gás da planta de processo das plataformas do tipo FPSO que atendem à exploração dos campos do pré-sal brasileiro. Com características de durabilidade, confiabilidade e custo reduzido, a instalação de reatores com núcleo de ar se mostra uma alternativa técnica e financeira viável para compensar os períodos em que a produção ficará interrompida e limitada quando da atuação do DLC pirotécnico.

6.2. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O interesse no desenvolvimento das plataformas do tipo FPSO tem crescido bastante, pelo fato das perspectivas de exploração dos campos do pré-sal e de ser a mais indicada para exploração e produção de petróleo em águas profundas. A seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros relativos ao assunto desenvolvido neste trabalho.

- a) Estudo da viabilidade de instalação de outros tipos de DLCs no painel principal que ao limitar correntes de curto-circuito se restabeleça em curto intervalo de tempo e sem exigência de reparo ou substituição de peças.
- b) Estudo das adequações necessárias no painel principal e de localização dos reatores limitadores no FPSO, levando em consideração as dimensões e pesos reais.
- c) Desenvolvimento de modelos digitais de outros modelos de DLCs para análise do comportamento dinâmico no sistema elétrico do FPSO.
- d) Análise das tensões de restabelecimentos transitórias (TRT) durante a abertura de disjuntores ocorridas com a atuação do DLC pirotécnico e entrada do reator limitador no sistema elétrico do FPSO.

7. REFERÊNCIAS

ABB. Is-Limiter - *The world fastest limiting and switching device*. 2014. Disponível em: <<http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/fault-current-limiting>>. Acesso em: 22 de abril de 2018.

ABB. VD4 *Medium Voltage Vacuum Circuit-Breakers*. Disponível em: <<https://library.e.abb.com/public/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2019.

ANDRADE, Valcimar S. Limitação da Corrente de Curto-circuito através de Dispositivos Supercondutores, Rio de Janeiro, 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ARSÊNIO, Pedro M. L. Desenvolvimento e Análise de um Limitador de Corrente Indutivo baseado em Fita Supercondutora Bi-2223, Lisboa, Portugal, 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2012.

BARROSO, Pedro M. M. Projeto, Ensaio e Comparação de Limitadores de Correntes Supercondutores Trifásicos Indutivos, Lisboa, Portugal, 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.

BP. *British Petroleum Statistical Review of World Energy*. 66º Ed. Londres, Inglaterra, 2017, 52 p.

CARARRO, Lauro O.; OLIVEIRA, Angelo R. et al. Comparações das topologias de FCL utilizando supercondutores. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Goiânia, Brasil, 2012.

CARVALHO, Antônio C.; CARVALHO, Carlos C. et al. Diretrizes para a elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão. Notas Técnicas, ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

CASANOVA, Renata A.; PEREIRA, Wagner G. G. Análise do Sistema Elétrico de uma Unidade de Produção de Petróleo. Rio de Janeiro, 2008. 100 f. Trabalho de Conclusão

de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2008.

COSTA, Paulo F.; BOREL, José Eustáquio V. et al. Inovações Tecnológicas no aterramento do neutro através de resistores em sistemas industriais de média e baixa tensão, *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference* - p. 39-42, Brasil, 2014.

DIAS, Thiago Carvalho. Aplicação de Limitadores de correntes de curto-circuito pirotécnicos em sistemas elétricos industriais, Itajubá, 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2016.

DIDIER, Gaetan; BONNARD, Charles H. et al. *Comparison between inductive and resistive SFCL in terms of current limitation and power system transient stability*. *Electric Power System Research*, Elsevier, n. 125, p. 150-158, 2015.

ETT, Gerard; SAIKI, Gerson Y. et al. Alternativas não Convencionais para Transmissão de Energia Elétrica – Estado da Arte, Projeto Transmitir, ELETROBRAS, Brasília, 1 ed., 2011, 452 p.

ETXEGARAI, A.; ITURREGI, A. et al. *Modelling and Parameterization of Resistive Superconducting Fault Current Limiters*, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Málaga - Espanha, 2017.

FERREIRA, Ricardo B. A. Construção e Ensaio de um Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico do Tipo Indutivo de Blindagem Magnética, Lisboa, Portugal, 2013. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.

FONSECA, Hugo L. C. A.; LEAL, Márcio F. Análise de Transitórios Eletromagnéticos utilizando ATPDraw, Brasília, 2003. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2003.

GE – General Electric. *Grid Solutions*. Reatores com Núcleo de Ar. Disponível em: <https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/Grid-PEA-L3-ACR-0585-2017_04-PT.pdf>. Acesso em: 15 abril de 2018.

G&W CLIP, *Information Sheet CL1, Why would I want to use a TRIGGERED CURRENT LIMITER?* Disponível em: <<https://www.gwelec.com/documents/pdfs/APPLIC.pdf>>. Acesso em: 18 de março de 2019.

JAKOBSEN, P.; PECK, G.; SNOW, E. *Electrical power system challenges during the expansion of offshore oil & gas facilities*. In: PCIC Europe, 2012, Prague. Anais... New York: IEEE, 2012. 9 p.

HAZEL, Terence. *Limiting Short-circuit Currents in Medium-Voltage Applications*. Schneider Electric, França, 2002. 6 p.

HAZEL, Terence; LAVAUD, Jacques; LEFORGEAIS, Bruno. *Using Pyrotechnic Current-Limiting Devices*, IEEE Industry Applications Magazine, setembro/outubro 2017.

HIBBERT, Mark; SMITH, Kenneth; *Analysis of Unexpected Fault Current Limiter Operation using EMT Programs*, International Conference on Power System Transients, Montreal – Canadá, 2005.

IBT – Indústria Brasileira de Transformadores Ltda. Reatores a núcleo de ar. Disponível em: <<http://www.ibt.com.br/produtos05.pdf>>. Acesso em: 28 de julho de 2018.

IEC – International Electrotechnical Commission. IEC-60909-0 – *Short-circuit Currents in Three Phase A.C. Systems*. 2ª Ed. 154 p. 2016.

IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. *IEEE recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. New York: IEEE, 2005. 95 p.

IEEE C 57.16 - IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors, 2011.

IEEE Std C37.48 - *IEEE Guide for the Application, Operation, and Coordination of High-Voltage (> 1000 V) Current-Limiting Fuses*, 2011.

IEEE 242 2001 – Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems, 2001. Disponível em: <<https://standards.ieee.org/standard/242-2001.html>>. Acesso em: 18 de março de 2019.

ISIDORO, Leandro P. Estudos Elétricos para um Sistema Industrial de uma Unidade de Produção Offshore, Rio de Janeiro, 2006. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2006.

KARADY, G. G. *Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit, Generation, Transmission and Distribution*. IEEE Proceedings C, v. 139, p. 1-6, 1992.

LANES, Matusalém M. Limitador Eletrônico de Corrente de Curto-circuito baseado em Circuitos Ressonantes Controlado por Dispositivo Semicondutor de Potência, Juiz de Fora, 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora – MG, 2006.

LEMAY, J.; BROCHU, J.; BEAUREGARD, F. *Interphase Power Controllers*. Citeq, Hydro Québec and ABB. Polytechnic International Press. 2001. 7 p.

MACROTENS LLC. *Crude Oil Prices - 70 Year Historical Chart*. Disponível em: <<https://www.macrotrends.net/>>. Acesso em: 18 de março de 2019.

MAFRA, Gabriel Ricardo F. Q. Aplicação de Limitadores de Corrente de Curto-circuito Supercondutor em Sistemas Elétricos de Distribuição e Plataformas de Produção de Petróleo e Gás Natural, Niterói, 2016. 135 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Montagem Industrial) – Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ, 2016.

MAMEDE, João F. Manual de Equipamentos Elétricos, 4ª ed., LTC, 2013, 686 p.

MENDROCK, Oswald. *Short-circuits Current Limitation by series reactors*, EE Publishers, Transmission and Distribution, Energize. p. 45 - 49, outubro 2009.

MONTEIRO, Andréia M. Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito com Ênfase no IPC (*Interphase Power Controller*), Rio de Janeiro, 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2005.

MORAES, Íris de Jesus. Aplicação de TCSC na Distribuição Primária: Estudo de Caso. Vitória, 2016. 76 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

MOREIRA, Carlos C. L. Análise de Curto-Circuito Simétrico. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal. Notas de aula. 2009. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~ee06226/images/bibliografia/17.pdf>>. Acesso em: 05 de junho de 2019.

NAVARRO, Leonardo C. Sistema de geração e distribuição de energia elétrica em uma embarcação de suporte as plataformas de perfuração, Rio de Janeiro, 2015. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2015.

NOE, Mathias. *Superconducting Fault Current Limiters*. In: EUCAS – Short Course Power Applications, Genebra. Karlsruhe Institute of Technology, setembro 2017.

OLIVEIRA, Flávio Duarte C. Limitador de Corrente de Falta Supercondutor, Vitória, 2005. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2005.

PETIT, Andre; JEAN, Guy; FECTEAU, Gilles. *Empirical Model of a Current-Limiting Fuse using EMTP*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, No. 1, pp. 335-341, 1989.

PETROBRAS. Pré-Sal. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>> Acesso em: 22 de abril de 2019.

PINHEIRO, Tiago F. L. Sistemas de Aterramento em Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2013. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2013.

ROSE-INNES, Alistair C.; RHODERICK, E. C (1696). *Introduction to Superconductivity*, 2ª Ed. Oxford: Pergamon Press, 1994, 241 p.

SANTOS, Bruna Gonçalves. Análise comparativa de reatores shunt para Alta Tensão com núcleo de ar e núcleo de ferro imerso em óleo. Itajubá, 2015. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá – MG, 2015.

SANTOS, Vanessa Malaco. Estudo de caso de curto-circuito em sistema elétrico industrial. São Carlos, 2009. 131 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP, 2009.

SARMIENTO, Hector G. *A Fault Current Limiter Based on an LC Resonant Circuit: Design, Scale Model and Prototype Field Tests*. 2007 iREP Symposium – Bulk Power System Dynamics and Control, IEEE, Charleston, SC, EUA, 2007.

SCHNEIDER ELECTRIC. Proteção de Redes Elétricas, SEPAM Série 80, Manual de Utilização. Disponível em <<http://sepam.schneider-electric.com.br/files/download>>. Acessado em: 15 de janeiro de 2019.

SEIVER, J. R.; PASCHAL, J. *Short Circuit Calculations “The Easy Way”*, Intertec Publishing, 1999, 121 p.

SILVA, Tiago A. S. Construção, Ensaio e Modelização de um Limitador de Corrente Supercondutor, Lisboa, Portugal, 2013. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.

SIMÕES, Micael F. O. Estudo de Gerador Síncrono com Excitação em Enrolamentos Supercondutores, Lisboa, Portugal, 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Universidade Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.

SOUZA, André Santos. Contribuição à Estabilidade Transitória de Sistemas Elétricos Industriais de Unidades Estacionárias de Produção de Petróleo, Brasília, 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2015.

SOUZA, Wescley T. B.; POLASEK, Alexander et al. Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores: principais conceitos e testes. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 4, 2012.

SCHAFFER, John S. *Triggered Current Limiters for closing bus ties, bypassing Reactors and Improving Power Quality*, G&W Electric Company, IEEE, Agosto 2002.

VERMA, Manish. *A comprehensive overview, behavioral model and simulation of a Fault Current Limiter*. Virgínia, 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Virgínia, 2009.

YADAV, Sushma; CHOUDHARY, GK; MANDAL, Rajab. *Review on Fault Current Limiters*, National Institute of Technology. IJERT – International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 3, abril 2014.

8. APÊNDICES

8.1. CARGAS DO SISTEMA DE 13,8 kV

Identificação do Equipamento	Descrição	Potência (kW)
TF-5143001A	Transformador 13,5 MVA / 13,8 kV - 4,16 kV Sistema de Produção	5.738
TF-5143002A	Transformador 3,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema de Produção	1.449
TF-5143501A	Transformador 4,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema do Casco	1.960
M-B-1251002A	Bomba de injeção de água	6.205
M-B-UT-1251001-01-A	Bomba <i>booster</i> de remoção de sulfato	1.135
M-C-UC-1231001A	Compressor de Gás Principal	11.000
M-C-UC-1231001C	Compressor de Gás Principal (reserva)	11.000
M-C-UC-1231002A	Compressor de Gás Exportação	11.000
M-C-UC-1252001A	Compressor de Injeção de Gás	11.000
M-C-UC-1225001	Moto-compressor do VRU	3.400
TF-P-UT-1233001-01A	Transformador 2,5 MVA / 13,8 kV – 0,69 kV – Aquecimento para Regeneração de Gás	2.440
TF-5143001B	Transformador 13,5 MVA / 13,8 kV - 4,16 kV – Sistema de Produção	5.738
TF-5143002B	Transformador 3,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema de Produção	1.228
TF-5143501B	Transformador 4,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema do Casco	1960
M-B-1251002B	Bomba de Injeção de Água	6.205
M-B-5133002	Bomba de serviço - poços	1.230
M-B-UT-1251001-01B	Bomba <i>booster</i> de remoção de sulfato	1.135
M-C-UC-1231001B	Compressor de Gás Principal	11.000
M-C-UC-1231002B	Compressor de Gás Exportação	11.000
M-C-UC-1231002C	Compressor de Gás Exportação (reserva)	11.000
M-C-UC-1252001B	Compressor de Injeção de Gás (reserva)	11.000
TF-P-UT-1233001-01B	Transformador 2,5 MVA / 13,8 kV – 0,69 kV – Aquecimento para Regeneração de Gás (reserva)	2.440

8.2. CARGAS DO SISTEMA DE 4,16 kV

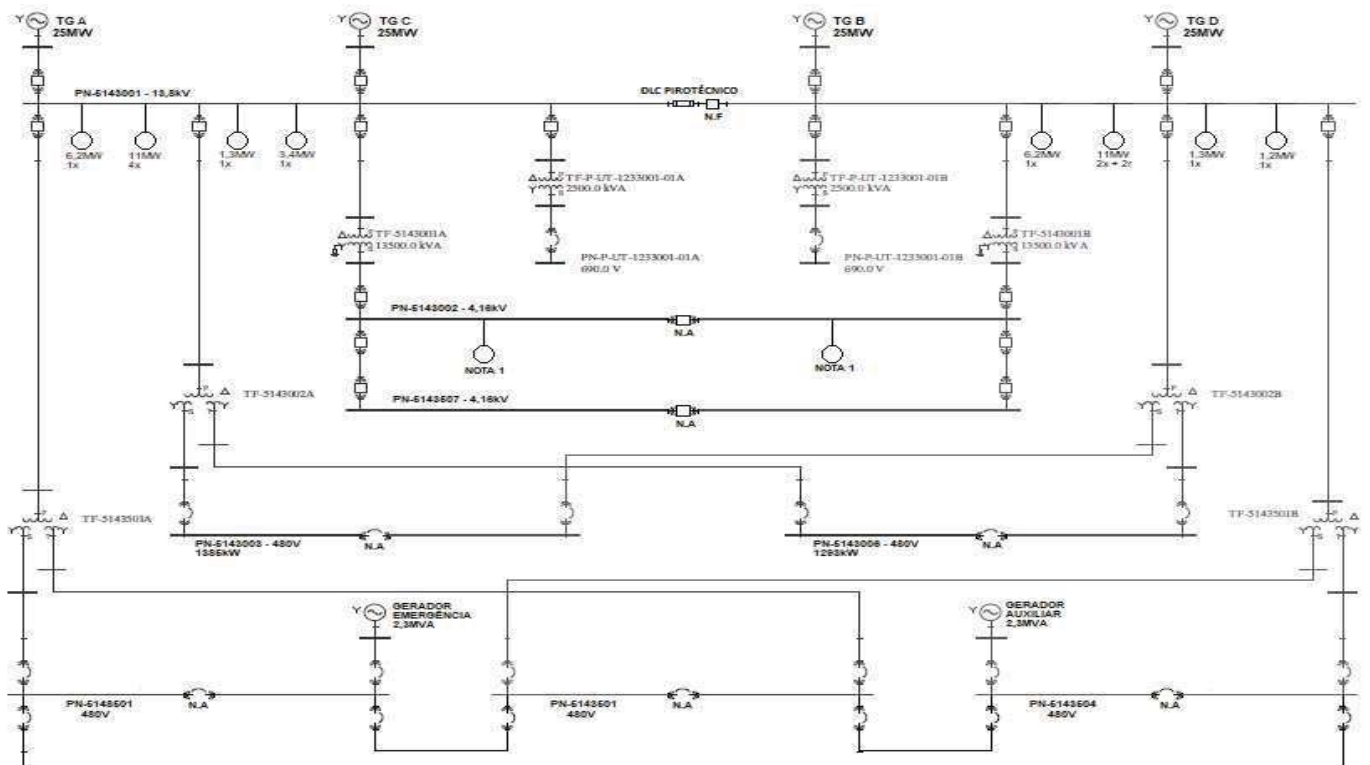
Identificação do Equipamento	Descrição	Potência (kW)
PN-5143507 Barramento A	CDC de 4,16 kV - Sistemas do Casco	3.894
M-B-1223001A	Bomba de recirculação de água do desidratador de pré-óleo	400
M-B-1251001A	Bomba <i>booster</i> de injeção de água	370
M-B-5111001A	Bomba de captação de água do mar	960
M-B-5111001C	Bomba de captação de água do mar	960
M-B-5124001A	Bomba de circulação de água de resfriamento	870
M-B-5124002A	Bomba de circulação de água de resfriamento	300
M-B-5125001A	Bomba de circulação de água quente	220
M-UC-Z-5412001A	Sistema de recuperação de gás do <i>flare</i>	400
M-B-5125001C	Bomba de circulação de água quente (reserva)	220
PN-5143507 Barramento B	CDC de 4,16 kV - Sistemas do Casco (reserva)	3.894
M-B-1223001B	Bomba de recirculação de água do desidratador de pré-óleo (reserva)	400
M-B-1251001B	Bomba <i>booster</i> de injeção de água	370
M-B-1251001C	Bomba <i>booster</i> de injeção de água (reserva)	370
M-B-5111001B	Bomba de captação de água do mar	960
M-B-5111001D	Bomba de captação de água do mar (reserva)	960
M-B-5124001B	Bomba de circulação de água de resfriamento	870
M-B-5124001C	Bomba de circulação de água de resfriamento (reserva)	870
M-B-5124002B	Bomba de circulação de água de resfriamento (reserva)	300
M-B-5125001B	Bomba de circulação de água quente	220
M-UC-Z-5412001B	Sistema de recuperação de gás do <i>flare</i> (reserva)	400

8.3. DEMANDA DO FPSO TÍPICO EM OPERAÇÃO PLENA

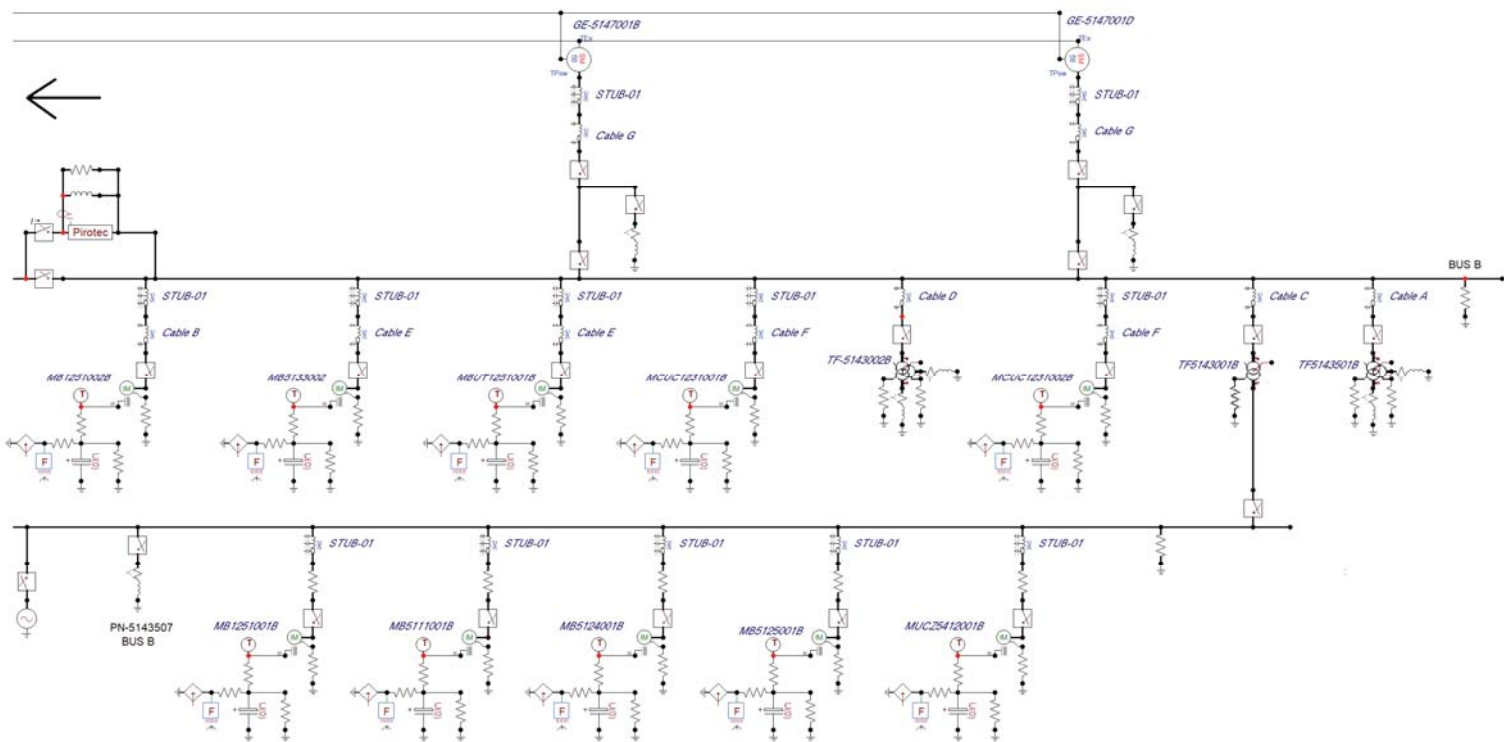
Equipamento	Descrição	Tensão (kV)	Demanda Máxima (kW)
M-B-1251002A	Bomba de Injeção de Água	13,8	6.250
M-B-1251002B	Bomba de Injeção de Água	13,8	6.250
M-B-5133002	Bomba de serviço - poços	13,8	1.230
M-B-UT-1251001-01A	Bomba <i>booster</i> de Remoção de Sulfato	13,8	1.135
M-B-UT-1251001-01B	Bomba <i>booster</i> de Remoção de Sulfato	13,8	1.135
M-C-UC-1225001	Moto-compressor do VRU	13,8	3.400
M-C-UC-1231001A	Compressor de Gás Principal	13,8	11.000
M-C-UC-1231001B	Compressor de Gás Principal	13,8	11.000
M-C-UC-1231001C	Compressor de Gás Principal (reserva)	13,8	-
M-C-UC-1231002A	Compressor de Gás Exportação	13,8	11.000
M-C-UC-1231002B	Compressor de Gás Exportação	13,8	11.000
M-C-UC-1231002C	Compressor de Gás Exportação (reserva)	13,8	-
M-C-UC-1252001A	Compressor de Injeção de Gás	13,8	11.000
M-C-UC-1252001B	Compressor de Injeção de Gás (reserva)	13,8	-
TF-5143002A	Transformador 3,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema de Produção	13,8	1.449
TF-5143002B	Transformador 3,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema de Produção	13,8	1.228
TF-5143501A	Transformador 4,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema do Casco	13,8	1.960
TF-5143501B	Transformador 4,5 MVA / 13,8 kV - 0,48 kV - 0,48 kV – Sistema do Casco	13,8	1.960
TF-P-UT-1233001-01A	Transformador 2,5 MVA / 13,8 kV – 0,69 kV Aquecimento para Regeneração de Gás	13,8	2.440
TF-P-UT-1233001-01B	Transformador 2,5M VA / 13,8 kV – 0,69 kV Aquecimento para Regeneração de Gás (reserva)	13,8	-
M-B-1223001A	Bomba de recirculação de água do desidratador de pré-óleo	4,16	400
M-B-1223001B	Bomba de recirculação de água do desidratador de pré-óleo (reserva)	4,16	-
M-B-1251001A	Bomba <i>booster</i> de injeção de água	4,16	370

M-B-1251001B	Bomba <i>booster</i> de injeção de água	4,16	370
M-B-1251001C	Bomba <i>booster</i> de injeção de água (reserva)	4,16	-
M-B-5111001A	Bomba de captação de água do mar	4,16	960
M-B-5111001B	Bomba de captação de água do mar	4,16	960
M-B-5111001C	Bomba de captação de água do mar	4,16	960
M-B-5111001D	Bomba de captação de água do mar (reserva)	4,16	-
M-B-5124001A	Bomba de circulação de água de resfriamento	4,16	870
M-B-5124001B	Bomba de circulação de água de resfriamento	4,16	870
M-B-5124001C	Bomba de circulação de água de resfriamento (reserva)	4,16	-
M-B-5124002A	Bomba de circulação de água de resfriamento	4,16	300
M-B-5124002B	Bomba de circulação de água de resfriamento (reserva)	4,16	-
M-B-5125001A	Bomba de circulação de água quente	4,16	220
M-B-5125001B	Bomba de circulação de água quente	4,16	-
M-B-5125001C	Bomba de circulação de água quente (reserva)	4,16	-
M-UC-Z- 5412001A	Sistema de recuperação de gás do <i>flare</i>	4,16	400
M-UC-Z- 5412001B	Sistema de recuperação de gás do <i>flare</i> (reserva)	4,16	-
PN-5143507	CCM de 4,16 kV Equipamentos do Casco	4,16	3.894
TOTAL			94.241

8.4. DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO



NOTA 1: relação de moltores em cada barramento (1x220kW) + (1x300kW) + (1x370kW) + (1x400kW) + (1x570kW) + (1x860kW).



Barramento B

8.6. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DOS EQUIPAMENTOS

8.6.1. GERADORES SÍNCRONOS

Equipamento	Tensão (kV)	Pe (kW)	Pa (kVA)	In (A) linha	Zb (Ω)	F.P.	nº pares polo	M (kg.m ²)	Ra (Ω)	X ₁ (Ω)	X ₀ (Ω)	Ia (A)	Freq. (Hz)	Ws (rpm)
GE-TG-5147001 A/B/C/D	13,8	25.000	31.500	1.307	6,09	0,8	2	3.973	0,0152	0,75	0,43	108,77	60	1.800

Dados para o Eixo Direto e Eixo em Quadratura:

Eixo Direto (Xd)					Eixo em quadratura (Xq)					T'd0	T'q0	T" d0	T" q0
Subtransitório		Transitório		Permanente	Subtransitório		Transitório		Permanente	(s)	(s)	(s)	(s)
(Ω)	t (s)	(Ω)	t (s)	(Ω)	(Ω)	t (s)	(Ω)	t (s)	(Ω)	(s)	(s)	(s)	(s)
1,25	0,016	1,52	3,85	10,60	1,46	0,024	1,52	1,93	10,42	3,8521	1,9294	0,016	0,024

Notas e legenda:

- Todas as conexões em estrela.
- Pe: potência elétrica
- Pa: potência aparente.
- In: corrente nominal.
- T'd0: Constante de tempo transitório, circuito aberto, de eixo direto.
- T"q0: Constante de tempo Subtransitório, circuito aberto, em quadratura.
- Zb: impedância de base.
- F.P.: fator de potência indutivo.
- M: momento de inércia.
- Ra: resistência de armadura.
- T'q0: Constante de tempo transitório, circuito aberto, em quadratura.
- X₁: reatância de dispersão.
- X₀: reatância de sequência zero.
- Ia: corrente de armadura.
- Ws: velocidade síncrona.
- T" d0: Constante de tempo subtransitório, circuito aberto, de eixo direto.

8.6.2. MOTORES DE INDUÇÃO

Equipamento	Tensão (kV)	Pm (kW)	Pa (kVA)	Perda (Ω)	In (A) Fase	Zb (Ω)	F.P.	η (%)	n° pares polo	M (kg.m²)	Xm (H)	Re (Ω)	Xe (H)	Rr (Ω)	Xr (H)	Wn (rpm)	Tn (N.m)	s (%)
M-B-1251002A/B	13,8	6205	7429,4	1,08	179,5	25,63	0,87	96	1	89,437	0,5030	0,154	0,0134	0,205	0,0109	3568	16607	0,890
M-B-UT-1251001-01A/B	13,8	1135	1364,8	4,22	33,0	139,53	0,88	94,5	1	53,14	2,1403	1,546	0,0627	0,446	0,0263	3564	3041	1,000
M-C-UC-1231001A/B/C	13,8	11000	12807,8	0,18	309,4	14,87	0,89	96,5	2	670	0,3257	0,092	0,0064	0,117	0,0063	1785	58847	0,833
M-C-UC-1252001A/B	13,8	11000	12807,8	0,18	309,4	14,87	0,89	96,5	2	670	0,3257	0,092	0,0064	0,117	0,0063	1785	58847	0,833
M-C-UC-1225001	13,8	3400	3962,9	0,56	95,7	48,06	0,89	96,4	2	348,7	0,5263	0,336	0,0111	0,144	0,0159	1794	18098	0,333
M-B-5133002	13,8	1230	1501,1	0,68	36,3	126,87	0,85	96,4	3	114,50	1,1626	0,850	0,0349	0,735	0,0484	1193	9845	0,583
M-C-UC-1231002A/B/C	13,8	11000	12807,8	0,18	309,4	14,87	0,89	96,5	2	670	0,3257	0,092	0,0064	0,117	0,0063	1785	58847	0,833
M-B-1223001A/B	13,8	400	455,7	14,46	38,0	35,11	0,92	95,4	1	7,104	0,5297	0,484	0,0105	0,310	0,0133	3566	1071	0,944
M-B-5124001A/B/C	4	870	1040,7	1,52	86,7	15,37	0,88	95	2	23,817	0,1752	0,151	0,0042	0,135	0,0053	1783	4659	0,944
M-B-5124002A/B	4	300	397,2	1,74	33,1	40,28	0,8	94,4	3	25,871	0,3075	0,5737	0,0105	0,471	0,0240	1187	2413	1,083
M-B-5125001A/B/C	4	220	273,3	4,62	22,8	58,54	0,86	93,6	2	6,544	0,5552	0,91	0,0152	0,647	0,0613	1780	1180	1,111
M-UC-Z-5412001A/B	4	400	528,0	1,38	44,0	30,30	0,8	94,7	3	118,5	0,1265	0,2871	0,0035	0,178	0,0059	1187	3218	1,083
M-B-1251001A/B/C	4	370	458,7	3,51	38,2	34,88	0,85	94,9	2	11,6	0,3253	0,33	0,0083	0,296	0,0169	1785	1979	0,833
M-B-5111001A/B/C /D	4	960	1302,4	0,32	108,5	12,29	0,81	91	3	27,4	0,0903	0,137	0,0049	0,196	0,0171	1170	7835	2,500

M-B- 5111001A/B/C /D	4	960	1302,4	0,32	108,5	12,29	0,81	91	3	27,4	0,0903	0,137	0,0049	0,196	0,0171	1170	7835	2,500
----------------------------	---	-----	--------	------	-------	-------	------	----	---	------	--------	-------	--------	-------	--------	------	------	-------

Notas e legenda:

- Todas as conexões em estrela.
- Frequência padrão: 60 Hz.
- Pm: potência mecânica.
- Pa: potência aparente.
- In: corrente nominal.
- Zb: impedância de base.
- F.P.: fator de potência indutivo.
- η : rendimento.
- M: momento de inércia.
- Xm: reatância de magnetização.
- Re: resistência do estator.
- Xe: reatância do estator.
- Rr: resistência do rotor.
- Xr: reatância do rotor.
- Wn: velocidade nominal rotor.
- Tn: torque nominal.
- s: escorregamento.

8.6.3. TRANSFORMADORES

a) Transformadores de dois enrolamentos (Ligação delta / estrela)

Equipamento	S (MVA)	V _p (kV)	V _s (kV)	I _p fase (A)	I _s (A)	I _o (%)	Perdas no Cobre (W)	Perdas no Ferro (W)	Z _{base} (delta) (Ω)	Z _{base} (estrela) (Ω)	Z (pu)	R (pu)	X (pu)	R _{mp} (Ω)
TF-5143001 A/B	13,5	13,8	4,16	326,09	1873,6	0,49	68.900	24.000	42,32	1,28	0,1	0,0051	0,10	23.805
TF-P-UT-1233001-01 A/B	2,5	13,8	0,69	60,39	2091,8	0,35	32.000	6.350	228,53	0,19	0,11	0,0128	0,109	89.972

b) Transformadores de três enrolamentos (Ligação delta / estrela)

Equipamento	S _p (MVA)	S _s (MVA)	S _t (MVA)	V _p (kV)	V _s (kV)	V _t (kV)	I _p fase (A)	I _s (A)	I _t (A)	I _o (%)	Perdas no Cobre (W)	Perdas no Ferro (W)	Z _{base} (delta) (Ω)	Z _{base} (estrela) (Ω)
TF-5143002 A/B	3,5	1,75	1,75	13,8	0,48	0,48	84,54	2104,9	2104,9	0,5	36000	7000	163,23	0,13
TF-5143501 A/B	4,5	2,25	2,25	13,8	0,48	0,48	108,70	2706,3	2706,3	0,41	143478	8438	126,96	0,10

Equipamento	Z _p (pu)	R _p [pu]	X _p (pu)	Z _s e Z _t (pu)	R _s e R _t (pu)	X _s e X _t (pu)	R _{mp} (Ω)
TF-5143002 A/B	0,03	0,0275	0,00046	0,4	0,00760	0,36423	81.617
TF-5143501 A/B	0,1	0,0319	0,05228	0,2	0,00586	0,16714	67.712

Legenda:

- S: potência nominal.
- V: tensão nominal.
- I: corrente nominal.
- Z: impedância.
- R: resistência.
- X: reatância.
- Subscritos: p (primário), s (secundário), t (terciário), o (vazio) e m (magnetização).
- Todas as ligações: Delta (primário) / Estrela (secundário e terciário).

8.6.4. CABOS ELÉTRICOS

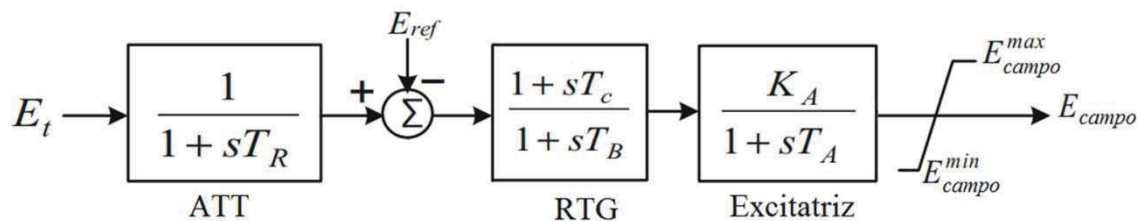
De	Para	Distância (km)	Formação (mm ²)
GERADORES A / B / C / D	PAINEL 13,8 kV	0,12	3 x (3x1C#300)
PAINEL 13,8 kV	M-B-1251002 A / B	0,16	2 x (3C#95)
	M-B-UT-1251001-01 A / B	0,16	1 x (3C#120)
	M-C-UC-1231001 A / B / C	0,268	3 x (3C#95)
	M-C-UC-1231002 A / B / C	0,298	3 x (3C#95)
	M-C-UC-1252001 A / B	0,228	3x (3C#95)
	M-U-C-1225001	0,261	1 x (3C#120)
	M-B-5133002	0,254	1 x (3C#120)
	TF-5143001 A / B	0,050	4 x (3C#120)
	TF-5143002 A / B	0,022	2 x (3C#95)
	TF-5143501 A / B	0,110	2 x (3C#70)
	TF-P-UT-1233001-01 A / B	0,045	2 x (3C#95)

8.7. DADOS DE ENTRADA DA MODELAGEM NO ATPDRAW

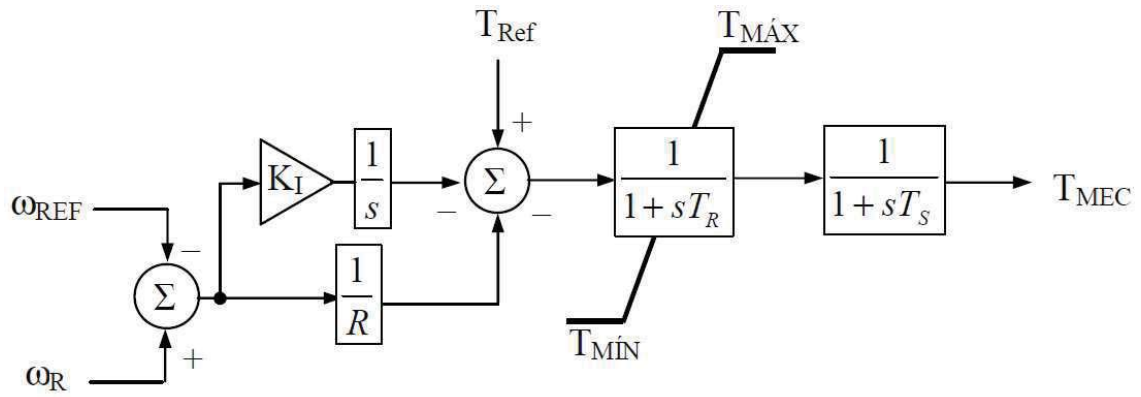
8.7.1. GERADORES E CONTROLADORES

Potência (MVA)	Tensão (kV _{rms})	Número pólos	Ra (pu)	Xd (pu)	Xq (pu)	Xl (pu)	Xd' (pu)	Xq' (pu)	Xd'' (pu)
31,25	13,8	4	0,002	1,63	0,81	0,09	0,26	0,54	0,13
Xq'' (pu)	Tdo (s)	Tqo (s)	Tdo'' (s)	Tqo'' (s)	X0 (pu)	RN (pu)	XN (pu)	XCAN (pu)	
0,13	8,756	6	0,1276	0,319	0,07	87,16	0	0,12	

O regulador automático de tensão (do inglês, *Automatic Voltage Regulator - AVR*) aplicado no modelo foi baseado em sistemas de excitação estático (do inglês, *Static Excitation System - ST*), que fornecem corrente contínua ao enrolamento de campo do gerador através de retificadores alimentados por transformadores ou enrolamentos de máquinas auxiliares. Uma versão simplificada do modelo IEEE Tipo ST1A foi utilizada, conforme o diagrama de bloco apresentado abaixo, que consiste em um Atraso do Transdutor de Tensão (ATT), Redução Transitória do Ganho (RTG) e a Excitatriz (IEEE, 2005).



O modelo de regulador de velocidade utilizado, representado em diagrama de blocos abaixo, é composto por um bloco que representa o sistema de controle de velocidade e um bloco que representa a turbina de gás (SOUZA, 2015). A combinação destes blocos permite que a turbina possa operar no modo isócrono ou no modo *droop*. Para este modelo, o modo *droop* foi aplicado, no qual K_i é igual a 0 e T_{REF} é diferente de 0. Esta simplificação não compromete as análises deste estudo, uma vez que os fenômenos observados apresentam constantes de tempo de ordem de grandeza inferior às mecânicas.



8.7.2. MOTORES DE INDUÇÃO

Equipamento	Pares de pólos	Estator						Rotor			
		R (Ω)			L (H/pu)			R (Ω)		L (H/pu)	
		0	d	q	0	d	q	d	q	d	q
Motor de 11 MW	2	0,092	0,003195	0,00639	0,117	0,006273					
Motor de 6,205 MW	1	0,154	0,006695	0,01339	0,205	0,01095					
Motor de 3,4 MW	2	0,336	0,005545	0,01109	0,144	0,01593					
Motor de 1,23 MW	3	0,8503	0,01747	0,03494	0,736	0,08287					
Motor de 1,13 MW	1	1,546	0,03123	0,06246	0,446	0,02629					
Motor de 960 kW	3	0,137	0,00244	0,00489	0,196	0,01711					
Motor de 870 kW	2	0,151	0,00212	0,00424	0,135	0,00535					
Motor de 400 kW	1	0,484	0,00524	0,01048	0,31	0,01334					
Motor de 370 kW	2	0,330	0,00414	0,00828	0,296	0,01699					
Motor de 300 kW	3	0,574	0,00524	0,01048	0,471	0,02405					
Motor de 220 kW	2	0,910	0,00759	0,01519	0,647	0,06127					

8.7.3. TRANSFORMADORES

Equipamento	Primário			Secundário e Terciário (onde aplicável)			Rm (Ω)	Im (A)
	U(V)	R (Ω)	L (mH)	U(V)	R (Ω)	L (mH)		
Transformadores de 13,5 MVA	13800	0,1111	5,8805	2401,78	0,0039	0,1781	28213	0,9223
Transformadores de 4,5 MVA	13800	2,024	8,8035	277,13	0,0003	0,0227	67712	0,6341
Transformadores de 3,5 MVA	13800	2,2443	2,5957	277,13	0,0005	0,0632	108823	0,3945
Transformadores de 2,5 MVA	13800	1,3271	34,2511	398,37	0,001106	0,0285	152352	0,2818

Notas e Legendas:

- Ligação dos enrolamentos dos transformadores: D (prim) / Y (sec) / Y (ter).
- Rm: resistência de magnetização.
- Im: corrente de magnetização.

8.7.4. CABOS ELÉTRICOS

De	Para	L (km)	R ₀ (Ω/km)	X ₀ (mH/km)	C ₀ (μF/km)	R ₁ (Ω /km)	X ₁ (mH/km)	C ₁ (μF/km)
GERADORES A / B / C / D	PAINEL PRINCIPAL	0,12	0,0424	0,2668	1,017	0,0266	0,1049	1,017
	M-B-1251002 A / B	0,16	0,1963	0,466	0,4562	0,1255	0,1631	0,466
	M-B-UT-1251001-01 A / B	0,16	0,3122	0,8347	0,241	0,1988	0,3156	0,241
	M-C-UC-1231001 A / B / C	0,268	0,1309	0,2887	0,699	0,08367	0,10875	0,699
	M-C-UC-1231002 A / B / C	0,298	0,1309	0,2887	0,699	0,08367	0,10875	0,699
	M-C-UC-1252001 A / B	0,228	0,1309	0,2887	0,699	0,08367	0,10875	0,699
PAINEL PRINCIPAL	M-U-C-1225001	0,261	0,3122	0,8347	0,241	0,1988	0,3156	0,241
	M-B-5133002	0,254	0,3122	0,8347	0,241	0,1988	0,3156	0,241
	TF-5143001 A / B	0,050	0,07798	0,23004	0,964	0,0497	0,09283	0,964
	TF-5143002 A / B	0,022	0,19625	0,4733	0,466	0,1254	0,1923	0,466
	TF-5143501 A / B	0,110	0,2722	0,456	0,4	0,1734	0,1724	0,40
	TF-P-UT-1233001-01 A / B	0,045	0,19625	0,4733	0,466	0,1254	0,1923	0,466

8.8. MODELAGEM DO DISPOSITIVO PIROTÉCNICO

O descritivo abaixo descreve o código MODELS elaborado para o controle das chaves e do resistor não linear na modelagem do dispositivo pirotécnico.

MODEL CONTROLEFUS

DATA DERIVADA, IMAX, IMIN, I2T, V, ATRASO

INPUT I[1..3],V1[1..3],V2[1..3]

OUTPUT R3[1..3],CHA,CHB,CHC,CH0[1..3],CH1[1..3],CH2[1..3],CH3A,CH3B,CH3C

VAR R3[1..3],CHA,CHB,CHC,CH0[1..3],CH1[1..3],CH2[1..3],CH3A,CH3B,CH3C,X[1..43]

HISTORY X[28]{DFLT:0},X[29]{DFLT:0},X[30]{DFLT:0}

INIT

R3[1..3]:=1 / CH0[1..3]:=1 / CH1[1..3]:=0 / CH2[1..3]:=0 / X[1..43]:=0 / X[37]:=1 / X[38]:=1 / X[39]:=1

-- FLAG[(A),(B),(C)] = X[(1,4,7,10),(2,5,8,11),(3,6,9,12)]

-- DER[A,B,C] = X[13,14,15]

-- I2TC[A,B,C] = X[16,17,18]

-- I2[A,B,C] = X[19,20,21]

-- VC[(A),(B),(C)] = X[(22,25),(23,26),(24,27)]

-- DLY[A,B,C] = X[28,29,30]

-- ct[A,B,C] = X[31,32,33]

-- AUX[A,B,C] = X[34,35,36]

-- CH[A,B,C] = X[37,38,39]

-- CH3[A,B,C] = X[40,41,42]

-- Contador de fase = X[43]

ENDINIT

EXEC

X[43]:=1

WHILE X[43]<=3 **DO**

IF t>0.01 **THEN**

X[X[43]+12]:=abs((I[X[43]]-prevval(I[X[43]]))/timestep)

X[X[43]+18]:=abs(I[X[43]]*I[X[43]])

IF (X[X[43]+12]>=DERIVADA) **AND** (abs(I[X[43]])>=IMIN) **AND** (abs(I[X[43]])<=IMAX) **AND** (X[X[43]]=0) **THEN**

X[X[43]]:=1

CH0[X[43]]:=0

CH1[X[43]]:=1

integral(X[X[43]+18]):=0

ENDIF

IF (X[X[43]]=1) **AND** (X[X[43]+3]=0) **THEN**

X[X[43]+15]:=integral(X[X[43]+18])

```

IF (X[X[43]+15]>=I2T) THEN
  X[X[43]+3]:=1
  CH1[X[43]]:=0
  CH2[X[43]]:=1
ENDIF
ENDIF
IF (X[X[43]+3]=1) AND (X[X[43]+6]=0) THEN
  X[X[43]+21]:=abs(V1[X[43]]-V2[X[43]])
  IF (X[X[43]+21]>V) THEN
    X[X[43]+39]:=1
    X[X[43]+27]:=X[X[43]+27]+timestep
    IF (X[X[43]+27]>ATRASO) THEN
      X[X[43]+6]:=1
      CH2[X[43]]:=0
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF (X[X[43]+6]=1) AND (X[X[43]+9]=0) THEN
  X[X[43]+39]:=0
  X[X[43]+36]:=0
  X[X[43]+9]:=1
ENDIF
ENDIF
X[X[43]+24]:=V1[X[43]]-V2[X[43]]
IF (CH0[X[43]]=0) THEN
  IF X[X[43]+24]>=0 THEN
    X[X[43]+30]:=-974+(0.0917*X[X[43]+24])+(0.000015*(X[X[43]+24]**2))
  ELSE
    X[X[43]+30]:=974+(0.0917*X[X[43]+24])-(0.000015*(X[X[43]+24]**2))
  ENDIF
  X[X[43]+33]:=abs(X[X[43]+24])
  IF X[X[43]+33]>=6000 THEN
    R3[X[43]]:=abs(X[X[43]+24]/X[X[43]+30])
  ENDIF
ENDIF
X[43]:=X[43]+1
ENDWHILE
CHA:=X[37] / CHB:=X[38] / CHC:=X[39] / CH3A:=X[40] / CH3B:=X[41] / CH3C:=X[42]
ENDEXEC
ENDMODEL

```

8.9. DIAGRAMA UNIFILAR - CASOS DO ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO

