

ANÁLISE DO SISTEMA ELÉTRICO DE UMA UNIDADE DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Renata Alves Casanova
Wagner Guedes Guimarães Pereira

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Ivan Herszterg, M.Sc.
(Orientador)

Eng. Carlos André Carreiro Cavaliere, D.Sc.
(Co-Orientador)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Prof^a. Maria Karla Vervloet Sollero, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ-BRASIL
AGOSTO DE 2008

Agradecimentos

Ao meu co-orientador Cavaliere, por ter acreditado em mim, pelos seus ensinamentos na área científica e por sua amizade. Sempre disposto a solucionar minhas dúvidas, me incentivou e acreditou no meu potencial. MUITO OBRIGADA POR TUDO!!!

Ao Cerbino, ao Esposte, ao José Mauro, ao Jamil e ao César, pessoas que colaboraram com esse trabalho, disponibilizando material e conhecimento.

A todos os meus amigos, que sempre me apoiaram, em especial ao Rafael, ao Bruno, ao Daniel, ao Israel, à Carol e ao Vitor, pelos conselhos, pela compreensão e diversão.

Ao Maykel, por sempre estar disposto a me ajudar no que for preciso, pelo seu carinho e principalmente sua paciência. Por sua compreensão, palavras de incentivo e pela presença em minha vida.

A todos os meus familiares, pelo carinho e por mostrarem a importância do convívio familiar.

À minha irmã Fabiana, por ser a minha irmã. Ninguém faria este papel melhor do que ela. E por abrir mão do computador na fase final do projeto.

Aos meus pais, por terem acreditado em mim mais do que eu mesma. Por me amarem tanto, por terem se esforçado pela minha educação e criação, sempre me incentivando e apoiando. Palavras não transmitem o quanto agradeço vocês por tudo. Amo vocês!

A Deus, pela minha vida e por tudo que a cerca. Por ter me dado forças, saúde e todo o resto para conseguir enfrentar os obstáculos, e assim, poder chegar até aqui. OBRIGADO!

Renata Alves Casanova

Agradecimentos

A Deus por ter me dado a força necessária para superar as dificuldades enfrentadas ao longo de todos estes anos e não ter permitido que eu desistisse no meio do caminho.

À minha Querida Esposa, Amiga e Namorada, Flávia Cristina Valente, por estar ao meu lado todo o tempo, incentivando, compartilhando momentos tristes ou felizes, e sempre acreditando na minha capacidade de superar mais esta etapa.

À minha filha, Letícia Vitória, que mesmo nascida recentemente contribuiu aumentando minha responsabilidade e vontade de finalizar este curso o mais rápido possível.

Aos meus pais Sra. Luzinete e Sr. Daniel (in memorium), que mesmo diante de todas as dificuldades financeiras, abriram mão do conforto da família para priorizar a educação de seus filhos contribuindo assim, diretamente, para mais esta realização.

Ao Professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Orientador Eng. Ivan Herszterg pelo incentivo dado para a abordagem deste tema e realização deste trabalho.

Ao Engenheiro da Gerência de Instalações de Produção (CENPES) e Co-Orientador Carlos Cavaliere, que contribuiu diretamente no direcionamento dos tópicos abordados com opiniões e dicas que enriqueceram este trabalho aumentando assim nosso entendimento sobre diversos assuntos.

Aos Coordenadores da Unidade de Produção Offshore - Plataforma P-37, Srs. Rômulo Azevedo e Édio Roberto Christ, que contribuíram com dicas do Sistema de Produção e viabilizaram trocas de embarque possibilitando-me realizar provas que coincidiam com períodos de trabalho.

Aos amigos Vitor Luis Bastos, Ulisses de Araújo e Flávio Roni Rosier por estarem presentes nos momentos mais decisivos deste curso, incentivando e esclarecendo dúvidas, contribuindo assim para minha formação acadêmica e conhecimento.

Wagner Guedes Guimarães Pereira

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Histórico	1
1.2. O Petróleo no Brasil	2
1.3. Tipos de Plataformas	3
1.4. Principais Áreas de Operação em uma Plataforma	7
1.5. Objetivo	8
2. O Projeto Elétrico de uma Plataforma	9
2.1. Sistema de Geração Principal e Emergência	9
2.2. Sistema de Distribuição	10
2.2.1. Painéis Elétricos	10
2.3. Sistema de Iluminação	13
2.4. Sistema de Supervisão, Operação e Controle de Processos	14
2.5. Máquinas Especiais	16
2.5.1. Conversores de Frequência (VSD)	16
2.5.2. Soft-Starter	19
2.5.3. Sistema de Distribuição de Energia em Corrente Contínua e UPS	21
2.5.3.1. Circuito com Retificador	22
2.5.3.2. Circuito com UPS	22
3. Proteções do Sistema Elétrico	25
3.1. Aterramento	25
3.2. Tipos de Proteção	29
3.2.1. Curvas de Sobrecorrente	29
3.2.1.1. Curvas ANSI de Sobrecorrente Temporizada	29
3.2.1.2. Curvas IEC de Sobrecorrente Temporizada	31
3.2.1.3. Curva de Sobrecorrente com Tempo Definido	32
3.2.2. Principais Proteções para Geradores	33
3.3. Proteção de Transformadores	37
3.4. Proteção para Painéis Elétricos	38
3.5. Proteção Típica para Motores Elétricos	39

4. Áreas Classificadas	41
4.1. Definição	41
4.2. Classificação de Áreas	41
4.3. Equipamentos Apropriados para Áreas Classificadas	43
4.4. Classe de Temperatura	43
4.5. Classificação em Grupos	44
5. Análise de Cargas	45
5.1. Dimensionamento Elétrico	49
5.2. Filosofia de Operação	51
6. Estudo do Fluxo de Potência	53
6.1. Operação Normal	54
7. Análise de Curto-Circuito	56
7.1. Corrente de Curto-Circuito	56
7.1.1. Corrente Inicial de Curto-Circuito (I_k'')	61
7.1.2. Valor da Potência Inicial de Curto-Circuito (S_k'')	62
7.1.3. Pico de Corrente de Curto-Circuito (i_p)	62
7.1.4. Corrente Simétrica de Curto-Circuito de Interrupção (I_b)	63
7.1.5. Corrente de Curto-Circuito Permanente (I_k)	65
7.2. Análise dos Resultados Obtidos pela Simulação do Curto-Circuito	66
7.2.1. Um gerador Principal Ligado	66
7.2.2. Gerador de Emergência Alimentando as Cargas Essenciais	68
8. Conclusões	70
9. Referências Bibliográficas	71
Anexo A	75
Anexo B	79
Anexo C	80
Anexo D	83
Anexo E	84
Anexo F	85
Anexo G	86

Lista de Ilustrações

Figura 1: Plataformas Fixas

Figura 2: Plataforma Auto-Elevatórias

Figura 3: Plataforma Semi-Submersível

Figura 4: Plataforma de Pernas Atirantadas

Figura 5: Navio Sonda

Figura 6: Plataforma tipo FPSO

Figura 7: Unifilar Geral

Figura 8: Elementos Básicos para um Conversor de Frequência

Figura 9: Forma de Onda PWM

Figura 10: Esquema Típico de uma Célula de Potência

Figura 11: Topologia do Inversor de 6,6 kV

Figura 12: Formas de Onda na Entrada do Inversor Harmony

Figura 13: Soft-Starter

Figura 14: Unidade de Fornecimento Ininterrupto de Energia (UPS)

Figura 15: Representação Monofásica de um Circuito Inversor PWM com Filtro LC

Figura 16: UPS com Chave Estática

Figura 17: Representação do Sistema no Lado de Alta Tensão com Neutro Isolado

Figura 18: Dispositivo de Detecção de Fuga à Terra

Figura 19: Extremamente Inversa

Figura 20: Muito Inversa

Figura 21: Normalmente Inversa

Figura 22: Moderadamente Inversa

Figura 23: Curva IEC A

Figura 24: Curva IEC B

Figura 25: Curva IEC C

Figura 26: Pouco Inversa

Figura 27: Curva de Tempo Definido

Figura 28: Esquema de Proteção Diferencial Aplicada a um Transformador Monofásico

Figura 29: Curva de Magnetização de um Transformador

Figura 30: Exemplos de Áreas Classificadas

Figura 31: Esboço do Diagrama Unifilar

Figura 32: Diagrama Unifilar Simplificado

Figura 33: Corrente de Curto-Circuito Próxima a um Gerador em Curto com um Decaimento de Componente CA

Figura 34: Curto-Circuito Trifásico

Figura 35: Curto-Circuito entre Duas Fases

Figura 36: Curto-Circuito entre uma Fase e a Terra

Figura 37: Curto-Circuito entre Duas Fases e a Terra

Figura 38: Os Gráficos do Comportamento de Correntes de Curto-Circuito

Figura 39: Fator k para Circuito em Série como a Função da Razão R/X

Figura 40: Cálculo do Fator q

Figura 41: Cálculo do Fator μ

Figura 42: Diagrama do Sistema Elétrico de uma Unidade Offshore

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tensões para Sistemas de Geração e Distribuição

Tabela 2: Constantes das Curvas ANSI dos Relés de Proteção Utilizados

Tabela 3: Constantes das Curvas IEC dos Relés de Proteção Utilizados

Tabela 4: Comparação entre as Proteções Configuradas para Geradores Principais e Emergência

Tabela 5: Proteção de Motores Elétricos

Tabela 6: Tipos de Proteção

Tabela 7: Classe de Temperatura

Tabela 8: Classificação dos Gases

Tabela 9: Distribuição das Cargas

Tabela 10: Resultado Obtido na Análise de Cargas

Tabela 11: Demanda Total dos Painéis Usada no Dimensionamento dos Transformadores

Tabela 12: Resumo das Cargas

Tabela 13: Panorama da Geração para Operação Normal

Tabela 14: Tensão em kV e em pu na Simulação

Tabela 15: Fator de Tensão c (IEC 60909)

Tabela 16: Resultados do Estudo de Curto-Circuito

Tabela 17: Estudo de Curto para a Configuração de Operação de Emergência

Lista de Abreviaturas

3F - Trifásico / Sistema Trifásico

A - Valor Inicial da Componente i_{cc}

AT - Alta Tensão

bkW - Potência Mecânica

BT - Baixa Tensão

C - Capacitância

c - Fator de Tensão

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Continua

CCM - Centro de Controle de Motores

CDC - Centro de Distribuição de Cargas

CLP - Controlador Lógico Programável

CNP - Conselho Nacional do Petróleo

COBEI - Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Telecomunicações e Iluminação

ECOS - Estação Central de Operação e Supervisão

ESD - Emergency Shut Down

f - Frequência

FC - Fator de Carga

FI - Fator de Intermitência

FLA - Corrente de Plena Carga

fp - Fator de Potência

FPSO - Floating Production Storage Offloading

FSO - Floating Storage Offloading

GE - Gerador

GEPLAT - Gerente da plataforma

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

I - Corrente de Entrada

I''_{kGi} , I''_{kMj} - são as correntes de curto-circuito inicial simétrica de uma máquina síncrona (i) e de um motor assíncrono (j)

I_b - Corrente Simétrica de Curto-Circuito de Interrupção

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor

I_k - Corrente de Curto-Circuito Permanente

I_k'' - Corrente Inicial de Curto-Circuito

i_p - Pico de Corrente de Curto-Circuito

M - Ajuste Multiplicador

MB - Motor / Moto-Bomba

MGCP - Painel de Controle Principal dos Geradores

n - Rendimento

p - número de par de pólos do motor

PA - Plataforma Auto-Elevatória

PCC - Ponto de Acoplamento Comum

P_d - Potência Ativa Demandada

Pickup - Valor a partir do qual uma Proteção é Sensibilizada

PN - Painel

PWM - Pulse Width Modulation

Q_d - Potência Reativa Demandada

R - Resistência

Shut-Down - Desligamento de um Equipamento ou Sistema pela Atuação de uma Proteção

SS - Semi-Submersível

S_k'' - Valor da Potência Inicial de Curto-Circuito

T - Tempo de Trip

TC - Transformador de Corrente

TF - Transformador

THD - Total Harmonic Distortion

TLP - Tension-Leg Platform

Trip - Desligamento

t_{min} - Tempo de Atraso Mínimo

V_n - Tensão Nominal

VSD - Variable Speed Driver

X - Admitância

Z - Impedância

$\Delta U''_{Gi}$, $\Delta U''_{Mj}$ - são as quedas de tensão inicial no terminal das máquinas síncronas (i) e motores assíncronos (j)

1. Introdução

1.1. Histórico

O petróleo (do latim *petroleum*, *petrus*, pedra e *oleum*, óleo, óleo da pedra) é uma substância oleosa, inflamável, geralmente menos densa que a água, com cheiro característico e coloração que pode variar desde o incolor ou castanho claro até o preto, passando por verde e marrom (castanho). É uma mistura de compostos orgânicos, cujos principais constituintes são os hidrocarbonetos. Os outros constituintes são compostos orgânicos contendo elementos químicos como nitrogênio, enxofre, oxigênio e metais, principalmente níquel e vanádio.

O petróleo é o principal recurso energético do planeta, do qual são extraídos derivados como a gasolina, parafina, gás natural, GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), produtos asfálticos, nafta petroquímica, querosene, solventes, óleos combustíveis, óleos lubrificantes, óleo diesel e combustível de aviação, justificando assim sua importância econômica. Dessa forma, o petróleo torna-se a mais importante substância negociada entre países e corporações e o principal agente causador de crises entre governos, ocasionando, em muitos casos, guerras, massacres e extermínios.

Registros históricos da antiguidade nos dão conta que o petróleo já era conhecido naquela época devido a exsudações e afloramentos constantes no Oriente Médio. Os povos da Mesopotâmia, Egito, Pérsia e Judéia já utilizavam o betume para fabricação de estradas, calefação de grandes construções, aquecimento e iluminação de casas, bem como lubrificantes e até mesmo laxativos. No início da era cristã, os árabes davam ao petróleo fins bélicos e de iluminação. O petróleo de Baku, no Azerbaijão, já era produzido em escala comercial, para os padrões da época, quando Marco Polo viajou pelo norte da Pérsia, em 1271.

A moderna indústria petrolífera data de meados do século XIX. Em 1850, na Escócia, James Young descobriu que o petróleo podia ser extraído do carvão e xisto betuminoso, e criou processos de refinação. Em agosto de 1859, o norte-americano Edwin Laurentine Drake perfurou o primeiro poço para a procura do petróleo (a uma profundidade de 21 metros) na Pensilvânia. O poço revelou-se produtor e a data

passou a ser considerada a do nascimento da moderna indústria petrolífera. A produção de óleo cru nos Estados Unidos, de dois mil barris em 1859, aumentou para aproximadamente três milhões em 1863, e para dez milhões de barris em 1874 [1].

1.2. O petróleo no Brasil

No Brasil, a história do petróleo começou em 1858, quando o Marquês de Olinda concedeu a José de Barros Pimentel o direito de extrair betume em terrenos situados nas margens do rio Marau, na Bahia.

As primeiras concessões e os primeiros poços tinham por objetivo procurar material para iluminação. A primeira sondagem profunda de que se tem notícia foi realizada no final do século XIX, entre 1892 e 1897, na localidade de Bofete, no Estado de São Paulo, pelo fazendeiro de Campinas, Eugênio Ferreira de Camargo. Este, considerado o primeiro poço perfurado para a exploração de petróleo no Brasil, atingiu quase 500 metros de profundidade e deixou uma grande dúvida: relatos da época dizem que o poço teria recuperado dois barris de petróleo, fato que nunca foi confirmado.

Em 1930, depois de vários poços perfurados sem sucesso em alguns estados brasileiros, o engenheiro agrônomo Manoel Inácio Bastos tomou conhecimento que os moradores de Lobato, na Bahia, usavam uma "lama preta", oleosa, para iluminar suas residências. A partir desta informação, várias pesquisas e coletas de amostras da lama oleosa foram realizadas. Contudo, não se obteve êxito em chamar a atenção das pessoas influentes da época. Fato que não o fez desistir, e no ano de 1932, Manoel Inácio Bastos foi recebido pelo presidente Getúlio Vargas, no Rio de Janeiro. Na ocasião, o engenheiro agrônomo entregou ao presidente da República um relatório sobre a presença da substância em Lobato.

Em 1938, toda a atividade petrolífera passou, por lei, a ser obrigatoriamente realizada por brasileiros, e em 29 de abril de 1938, foi criado o Conselho Nacional do Petróleo (CNP), para avaliar os pedidos de pesquisa e lavra de jazidas de petróleo. O decreto que instituiu o CNP também declarou de utilidade pública o abastecimento nacional de petróleo e regulou as atividades de importação, exportação, transporte,

distribuição e comércio de petróleo e derivados e o funcionamento da indústria do refino. Mesmo ainda não localizadas, as jazidas passaram a ser consideradas como patrimônio da União. A criação do CNP marca o início de uma nova fase da história do petróleo no Brasil [1].

Após as descobertas na Bahia, as perfurações prosseguiram em pequena escala. Até que, em 3 de outubro de 1953, depois de uma grande campanha popular, o presidente Getúlio Vargas assinou a Lei 2004, que instituiu o monopólio estatal da pesquisa e lavra, refino e transporte do petróleo e seus derivados criando também a empresa Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobrás. Fase marcante na história do nosso petróleo, pelo fato da Petrobrás ter nascido do debate democrático, atendendo aos anseios do povo brasileiro e defendido por diversos partidos políticos.

Hoje, aos 55 anos de existência, e sempre voltada para os interesses do País, a Petrobrás associou-se a grandes indústrias petrolíferas, reconhecidas e respeitadas em todo o mundo.

No Brasil, atualmente, a maior parte da produção e das reservas provadas de óleo e gás estão localizadas no mar, muitas vezes afastadas da costa e em grandes profundidades. A exploração destas reservas exige um grande investimento em pesquisa e equipamento sendo viabilizada pelo elevado preço do petróleo no mercado internacional.

1.3. Tipos de Plataforma

As plataformas são as unidades marítimas de produção, transferência e armazenamento de petróleo. As plataformas utilizadas são dos seguintes tipos [2]:

Plataformas Fixas - Foram as primeiras unidades utilizadas. Têm sido as preferidas nos campos localizados em lâminas d'água de até 300 metros. Geralmente são constituídas de estruturas modulares de aço, instaladas no local de operação com estacas cravadas no fundo do mar, conforme representado na figura 1. As plataformas fixas são projetadas para receber todos os equipamentos de perfuração, estocagem de

material, alojamento de pessoal, bem como todas as instalações necessárias para a produção dos poços.



Figura 1: Plataformas Fixas

Plataformas Auto-Elevatórias - São constituídas basicamente de uma balsa equipada com estrutura de apoio, ou pernas, que, acionadas mecânica ou hidráulicamente, movimentam-se para baixo até atingirem o fundo do mar, conforme representado na figura 2. Em seguida, inicia-se a elevação da plataforma acima do nível da água, a uma altura segura e fora da ação das ondas. Essas plataformas são móveis, sendo transportadas por rebocadores ou por propulsão própria. Destinam-se à perfuração de poços exploratórios na plataforma continental, em lâmina d'água que varia de 5 a 130 metros.



Figura 2: Plataforma Auto-Elevatória

Plataformas Semi-Submersíveis - As plataformas semi-submersíveis são compostas de uma estrutura de um ou mais conveses, apoiada por colunas em flutuadores submersos, conforme representado na figura 3. Uma unidade flutuante sofre movimentações devido à ação das ondas, correntes e ventos, com possibilidade de danificar os equipamentos a serem descidos no poço. Dois tipos de sistema são responsáveis pelo posicionamento da unidade flutuante: o sistema de ancoragem e o sistema de posicionamento dinâmico.

O sistema de ancoragem é constituído de 8 a 12 âncoras e cabos e/ou correntes, atuando como molas que produzem esforços capazes de restaurar a posição do flutuante quando é modificada pela ação das ondas, ventos e correntes.

No sistema de posicionamento dinâmico, não existe ligação física da plataforma com o fundo do mar, exceto a dos equipamentos de perfuração. Sensores acústicos determinam a deriva, e propulsores no casco acionados por computador restauram a posição da plataforma. Desta forma, apresentam grande mobilidade, sendo as preferidas para a perfuração de poços exploratórios.



Figura 3: Plataforma Semi-Submersível

Plataforma de Pernas Atirantadas - São unidades flutuantes utilizadas para a produção de petróleo. Sua estrutura é bastante semelhante à da plataforma semi-submersível, conforme representado na figura 4. Porém são ancoradas por estruturas tubulares, com os tendões fixos ao fundo do mar por estacas e mantidos esticados pelo excesso de flutuação da plataforma, o que reduz severamente os movimentos da mesma.

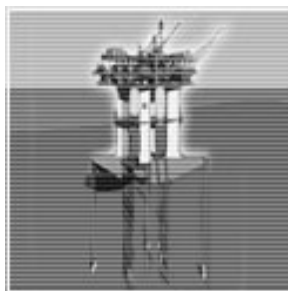


Figura 4: Plataforma de Pernas Atirantadas

Navios-sonda - Navio-sonda é um navio projetado para a perfuração de poços submarinos. Sua torre de perfuração localiza-se no centro do navio, onde uma abertura no casco permite a passagem da coluna de perfuração, conforme representado na figura 5. O sistema de posicionamento do navio-sonda é composto por sensores acústicos, propulsores e computadores, que anula os efeitos do vento, ondas e correntes que tendem a deslocar o navio de sua posição.



Figura 5: Navio Sonda

Plataformas tipo FPSO - Os FPSOs (Floating, Production, Storage and Offloading) são navios com capacidade para processar, armazenar e prover a

transferência do petróleo e/ou gás natural, conforme representado na figura 6. No convés do navio é instalada uma planta de processo para separar e tratar os fluidos produzidos pelos poços. Após a separação água-gás-óleo, o petróleo é armazenado nos tanques do próprio navio, sendo transferido para um navio aliviador periodicamente. O gás comprimido produzido na plataforma é enviado para terra através de gasodutos e/ou re-injetado no reservatório. A água produzida é tratada e descartada para o mar ou re-injetada nos poços para manter a pressão do reservatório. Os maiores FPSOs têm sua capacidade de processamento em torno de 200 mil barris de petróleo por dia, com produção associada de gás de aproximadamente 4 milhões de metros cúbicos por dia.



Figura 6: Plataforma tipo FPSO

1.4. Principais Áreas de Operação em uma Plataforma

Em uma plataforma de produção de petróleo e gás três áreas distintas são fundamentais para sua operação :

- Náutica - Área responsável pelo controle de lastro da unidade e tancagem de óleo bruto.
- Facilidades – Área responsável pela geração/distribuição de energia elétrica, injeção de água nos poços, ar comprimido, ventilação/ar condicionado, controle de estoques de água potável/diesel da unidade e operações de suporte à produção.
- Produção – Área responsável pela elevação do petróleo e estágios de separação de água e gás, exportação do gás separado e tratamento do óleo para armazenamento.

1.5. Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar a geração e a distribuição de energia elétrica de uma plataforma de exploração de petróleo, assim como a configuração do sistema elétrico, suas proteções e intertravamentos e as particularidades de alguns equipamentos indispensáveis para o processamento do óleo e gás. Além disso, verificar-se, por meio de simulações, o fluxo de potência e a corrente de curto circuito dos painéis, comparando-os com os valores de projeto existentes em uma unidade de produção, no caso a plataforma P-37.

2. O Projeto elétrico de uma Plataforma

2.1. Sistema de Geração Principal e Emergência

Na fase inicial do projeto de uma plataforma de petróleo faz-se o estabelecimento da quantidade de petróleo e gás que se deseja produzir. A partir daí, realiza-se uma análise inicial de cargas e calcula-se a demanda de potência ao longo dos anos de operação da unidade. Este estudo possibilita, levando-se em conta aspectos econômico-financeiros, qualitativos e a demanda de energia, a emissão de um mapa de análise das alternativas para o sistema de geração. Este mapa define a quantidade de geradores principais e de emergência, tensão e potência nominais, tipo de acionamento e combustível utilizado.

Sistema de Geração Principal – É constituído por dois ou mais geradores, acionados turbinas, que utilizam o gás como principal combustível devido à sua disponibilidade e o diesel como combustível alternativo na falta do gás, capazes de atender a demanda de energia de todos os sistemas da plataforma, em condições normais de operação.

Sistema de Geração de Emergência – É constituído por um ou mais geradores, acionados por motores diesel, capazes de atender a demanda de energia dos sistemas essenciais da plataforma no caso de emergência ou sem a geração principal.

Segundo os “Critérios Gerais para Projeto Básico em Eletricidade” [3], em Unidades Marítimas de Produção que utilizam turbogeradores na geração principal, devem existir 2 (dois) meios diferentes e independentes para a partida das turbinas quando todos os geradores principais estiverem desligados. Os sistemas periféricos da geração principal incluindo a tensão de controle, sistema de partida e UPS's (Sistema Ininterrupto de Fornecimento de Energia) devem ser alimentados por 2 grupos motogeradores independentes e ambos com partida a ar e compressor de ar de partida dedicado.

O grupo gerador de emergência é capaz de partir manual ou automaticamente e assumir a carga até a sua capacidade nominal, em tempo inferior a 45 segundos em caso de falha da geração principal. A partida automática do grupo gerador ocorre por falta de tensão simultânea nas barras do “Centro de Distribuição de Cargas de Emergência”, ao qual o gerador deve estar conectado. A queda de tensão provocada pela partida do maior motor ou grupo de cargas, não deve ultrapassar 15% da tensão nominal na barra do gerador. Caso seja necessária a redução da corrente de partida dos grandes motores devem ser utilizados dispositivos do tipo “Soft-Starter” ou VSD`s (Conversor de frequência) que possuem ajustes na velocidade do motor [3].

2.2. Sistema de Distribuição

2.2.1. Painéis Elétricos

O sistema de distribuição é constituído por um painel de distribuição de alta tensão (CDC de alta ou “Switchgear”), que recebe a alimentação direta dos geradores principais. Este painel alimenta cargas de alta tensão, o CCM de alta tensão (PN-02) e transformadores abaixadores de tensão que alimentam CDC's de baixa tensão [3] [4].

A alimentação das cargas de baixa tensão de maior potência é feita diretamente pelos painéis de distribuição (CDC's) e das cargas de menor potência através dos CCM's (Centro de Controle de Motores), conforme apresentado na Tabela 1 [3] e ilustrado na figura 7 [4].

O sistema de distribuição deve ser concebido 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 deve causar a indisponibilidade de outros consumidores por longo tempo [3].

Tabela 1: Tensões para Sistemas de Geração e Distribuição

Tensão	Tipo de Aplicação	Demanda
13,8 kVCA (3 F)	Geração Principal (CDC de alta)	- Utilizados em sistemas com demandas superiores a 15 MW
	Motores	- Utilizados em motores de grande porte (acima de 1200 kW).
6,6 ou 4,16 kVCA (3 F)	Geração Principal (CDC de alta)	- Utilizados em sistemas com demandas entre 3 e 15 MW.
	Motores (CDC / CCM de alta)	- Utilizados em motores de potência entre 150 e 1200 kW.
480 VCA (3 F)	Geração Principal ou Emergência (CDC de baixa)	- Utilizados na geração de emergência ou em sistemas com demanda inferior a 3 MW.
	Motores (CDC / CCM de baixa)	- Utilizados em motores de até 150 kW, cargas resistivas (acima de 4kW) e máquinas de solda.
220 VCA	Motores de pequeno porte (3F)	- Motores da lavanderia, freezers, e fogão da cozinha.
	Iluminação e tomadas	- Para iluminação normal e essencial - Tomadas de uso geral, resistência de aquecimento de motores,
127 VCA	Iluminação e tomadas	- Para tomadas e consumidores de pequeno porte
	Circuito de controle	- Circuitos de controle e sinalização; - Tensão de comando interno em CCM's.

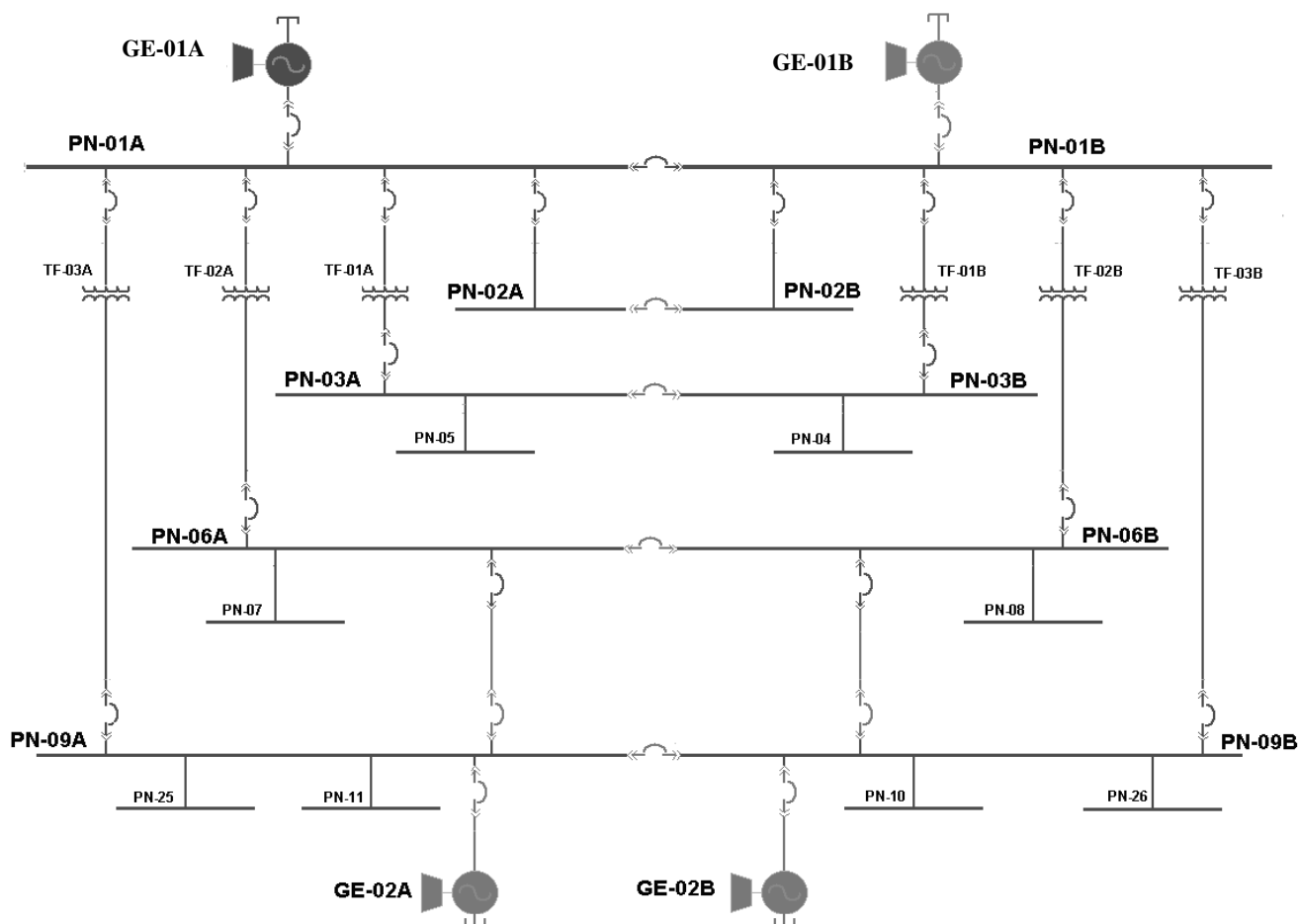


Figura 7 – Unifilar Geral

Na análise de cargas (mostrada adiante) realizada para a unidade a ser projetada, a potência demandada encontrada foi de 14 MW, aproximadamente. Portanto, baseando-se na tabela anterior o nível de tensão primária mais adequado é o de 6,6 kV. Portanto, podemos tomar como referência em nosso estudo a unidade de produção P-37, que possui um carregamento aproximado ao levantamento realizado, trabalhando assim em um nível de tensão primária também de 6,6 kV. Utilizaremos transformadores abaixadores de tensão 6600 / 480 V (Delta / Estrela-neutro suspenso).

Na figura 7 os painéis têm as seguintes funções:

Centro de Distribuição e Controle – CDC (6600 V)

PAINEL	FUNÇÃO
PN-01	CDC DE ALTA TENSÃO - PAINEL PRINCIPAL

Centro de Controle de Motores - CCM (6600 V)

PAINEL	FUNÇÃO
PN-02	CCM DE ALTA TENSÃO – PRODUÇÃO/UTILIDADES

Centro de Distribuição e Controle – CDC (6600 V)

PAINEL	FUNÇÃO
PN-03	CDC DE BAIXA TENSÃO – PRODUÇÃO
PN-06	CDC DE BAIXA TENSÃO - UTILIDADES / NÁUTICA
PN-09	CDC ESSENCIAL / EMERGÊNCIA

Centro de Controle de Motores – CCM (480 V)

PAINEL	FUNÇÃO
PN-04 e PN-05	CARGAS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO
PN-07 e PN-08	CARGAS DO SISTEMA DE UTILIDADES
PN-10 e PN-11	CARGAS ESSENCIAIS / EMERGÊNCIA
PN-25 e PN-26	CARGAS ESSENCIAS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO

2.3. Sistema de Iluminação

Existem 3 (três) sistemas de iluminação:

- **Iluminação Normal**

A alimentação da iluminação normal é proveniente do sistema de distribuição normal, ficando, portanto, desligada enquanto a Geração Principal estiver desligada.

- Iluminação Essencial

É aquela que, em caso de falha da geração principal, é alimentada pela geração de emergência. Durante o tempo de falta da geração principal e partida da geração de emergência estes circuitos permanecem desenergizados.

- Iluminação Essencial Crítica

É alimentada através do sistema essencial via UPS (Sistema Ininterrupto de Fornecimento de Energia). Este circuito é alimentado a partir de um conjunto retificador-inversor, e na ocorrência de falta de energia passa a ser suprido, sem interrupção, por um banco de baterias. A configuração inicial é restabelecida assim que a geração de emergência ou principal sejam restabelecidas

2.4. Sistema de Supervisão, Operação e Controle de Processos

Podemos definir o Sistema Supervisório como o “Cérebro de uma Plataforma”, uma vez que este sistema gerencia e monitora todos os processos de produção, geração de energia elétrica e segurança da unidade, possibilitando também a interface com o operador na alteração de parâmetros de referência, geração de gráficos e atuação de alarmes.

Os componentes físicos de um sistema de supervisão podem ser resumidos em sensores e atuadores, rede de comunicação, estações remotas (aquisição e controle de dados) e estações de monitoramento central (ECOS).

- Sensores - Dispositivos conectados aos equipamentos controlados e monitorados pelos sistemas ECOS, que convertem parâmetros físicos, tais como velocidade, nível de água, temperatura, tensão e corrente para sinais digitais legíveis pela estação remota.
- Atuadores - Dispositivos utilizados para atuar sobre o sistema, ligando ou desligando equipamentos e abrindo ou fechando válvulas.

- Rede de Comunicação - É a plataforma por onde as informações são transmitidas dos CLPs (Controladores Lógico-Programáveis) para o sistema ECOS, levando-se em consideração os requisitos do sistema e a distância a cobrir, pode ser implementada através de cabos ethernet, fibras óticas, linhas dedicadas, rádio, modem, etc.
- Estações de monitoramento central - São as unidades principais dos sistemas ECOS, sendo responsáveis por recolher a informação gerada pelas estações remotas e agir em conformidade com os eventos detectados, podendo ser centralizadas num único computador ou distribuídas por uma rede de computadores, de modo a permitir o compartilhamento das informações coletadas.

Todos os sistemas da plataforma são monitorados através da ECOS e possuem sua matriz de “Causa e Efeito”, na qual ficam estabelecidas as ações que o CLP da ECOS tomará caso ocorra um determinado evento. Estas ações podem variar de um simples alarme sonoro e visual nos computadores da ECOS até a parada total do processo de produção de óleo e gás podendo ou não retirar de operação a geração principal, acompanhado de alarme sonoro de emergência em toda a plataforma. Os níveis de ESD (Emergency Shut Down) estão contemplados abaixo:

ESD-1 - Parada individual de um equipamento ou parada parcial de um sistema;

ESD-2 - Parada total da produção e parcial das utilidades;

ESD-3 - Parada total da produção e das utilidades não essenciais;

3P (Parcial) permanecendo a geração e distribuição elétrica principal;

3T (Total) - Parada da geração e distribuição elétrica principal e partida da geração de emergência;

ESD-4 - Parada total da plataforma e preparação para abandono.

No nível ESD-4 haverá a preparação para abandono, que ocorrerá após acionamento de botoeiras instaladas na Sala de Controle ou Sala de Rádio ou ECOS.

Para acionamento destas botoeiras deverá haver a comunicação verbal do GEPLAT (gerente da plataforma) da unidade.

2.5. Máquinas Especiais

2.5.1. Conversores de Frequência (VSD)

Um motor pode operar com velocidade variável quando alimentado com uma fonte de frequência variável.

O tipo mais comum usado é um conversor de frequência que trabalha em conjunto com um motor de indução. O conversor é constituído basicamente por um retificador, um elo de corrente contínua e um inversor.

O diagrama de blocos da figura 8 [5] mostra as partes componentes de um conversor. No retificador a tensão (CA) é retificada, sendo transformada em contínua. A tensão CC obtida possui perturbações “ripples” que são suavizadas pelo circuito do elo CC, composto por uma combinação de indutores e capacitores. O inversor converte a retificação produzindo uma tensão CA de amplitude e frequência variável. Retificadores e inversores são compostos por chaves semicondutores. No retificador, o mais comum é o uso de tiristores e no inversor, o mais comum é o uso de IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Essas chaves semicondutoras são acionadas por um sistema de controle.

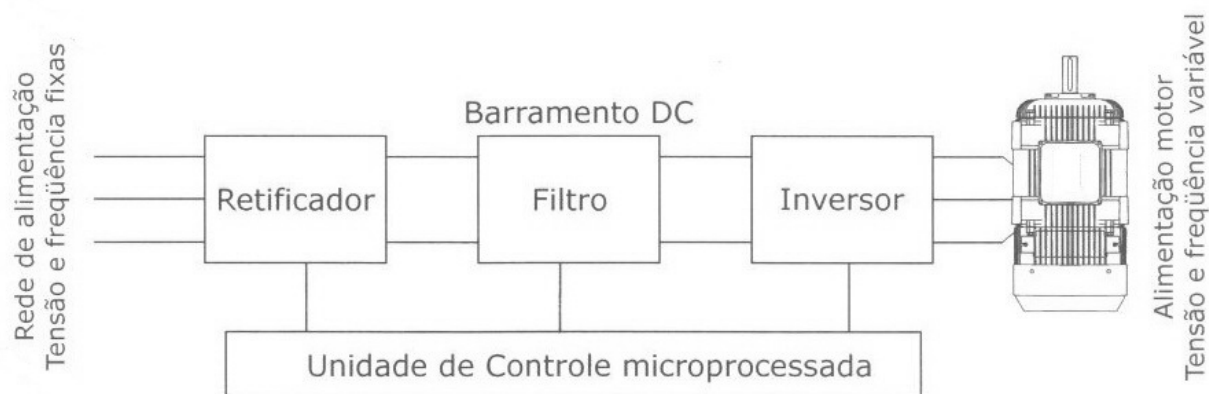


Figura 8: Elementos Básicos para um Conversor de Frequência

A técnica que iremos abordar para o acionamento dos inversores é a Modulação por Largura de Pulso, ou em inglês Pulse Width Modulation (PWM). O princípio da PWM é gerar um pulso pela alternância entre o positivo e o negativo do link CC, para obter a tensão necessária e a frequência desejada, como mostrado na figura 9:

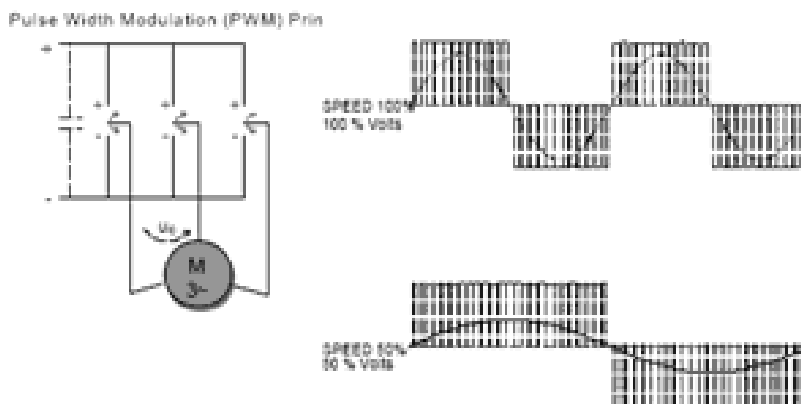


Figura 9: Forma de Onda PWM

Dentre os diversos tipos de conversores de frequência utilizados, analisamos o “Perfect Harmonic” da Robicon, que alimenta as bombas de transferência de óleo dos tanques da plataforma para o navio aliviador. Cada fase do motor é alimentada por 6 células de potência conectadas em série. Cada célula é um conversor estático de potência e é alimentada por um enrolamento secundário isolado do transformador de isolamento, interno ao painel do inversor [6]. O esquema típico de uma célula de potência é mostrado na figura 10. Neste exemplo, um retificador trifásico a diodos, alimentado pelo secundário de 480 VCA, carrega um banco de capacitores CC a aproximadamente 600 VCC. A tensão CC alimenta uma ponte monofásica de transistores IGBT. Na figura 11 é mostrado como se comporta as 6 células juntas.

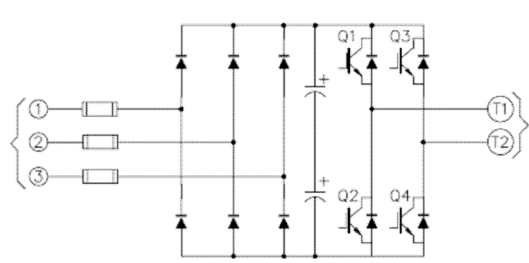


Figura 10: Esquema Típico de uma Célula de Potência

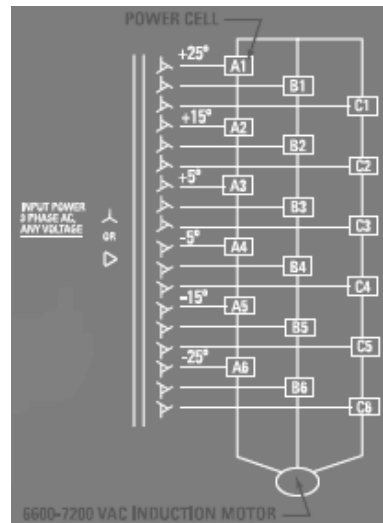


Figura 11: Topologia do Inversor de 6,6 KV

Com 6 células por fase, são disponíveis 13 níveis de tensão distintos. A habilidade de gerar muitos níveis de tensão diferentes permite produzir formas de onda de tensão de saída muito próximas da senoidal [6].

A figura 12 mostra as formas de onda da tensão e corrente na entrada do inversor, sob as mesmas condições. A senóide perfeita na figura 12 é a tensão na entrada do transformador, medida entre a fase A e o neutro do primário conectado na estrela. A outra forma de onda é a corrente na fase A.

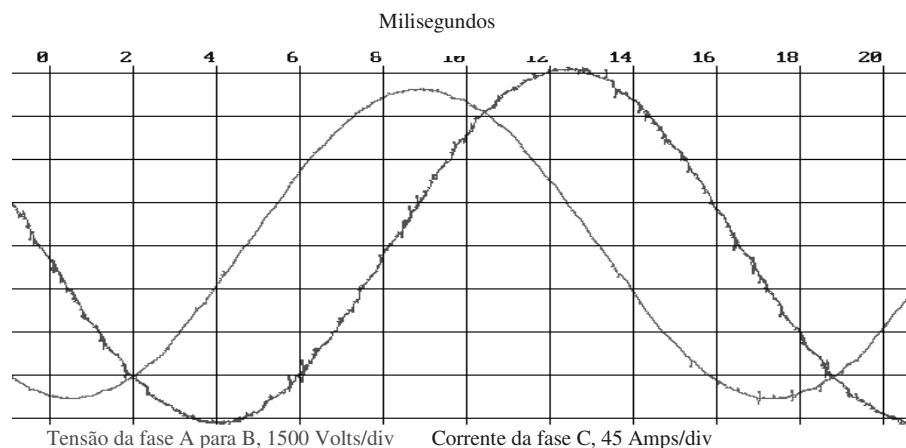


Figura 12: Formas de Onda na Entrada do Inversor Harmony

Independentemente da técnica de controle utilizada, todos os conversores de frequência produzem harmônicos. Os níveis máximos de perturbação de harmônicos dos conversores de frequência no ponto de acoplamento comum (PCC) devem estar de acordo com a norma IEEE 519-1992 [7]:

- Distorção Harmônica Total (THD) para tensão e corrente - 5%.
- Distorção para harmônicos individuais de tensão e corrente - 3%.

A profundidade máxima para os “notchs” de comutação deve limitar-se a 20% e a área máxima de 47,5 p.u. x μ s, conforme especificado para “sistemas gerais”.

Em alguns casos, para o atendimento destes níveis nos barramentos de geração é necessária a instalação de filtros passivos. Estes deverão ser dimensionados de forma tal que a ocorrência de um único evento/defeito mantenha o THD em 8% e cada componente individual limitado a 5%.

2.5.2. Soft-starter

Utiliza-se o soft-starter quando o acionamento elétrico não exige variação da velocidade do motor, e deseja-se apenas a partida suave, de forma que limita-se a corrente de partida evitando-se queda de tensão da rede de alimentação.

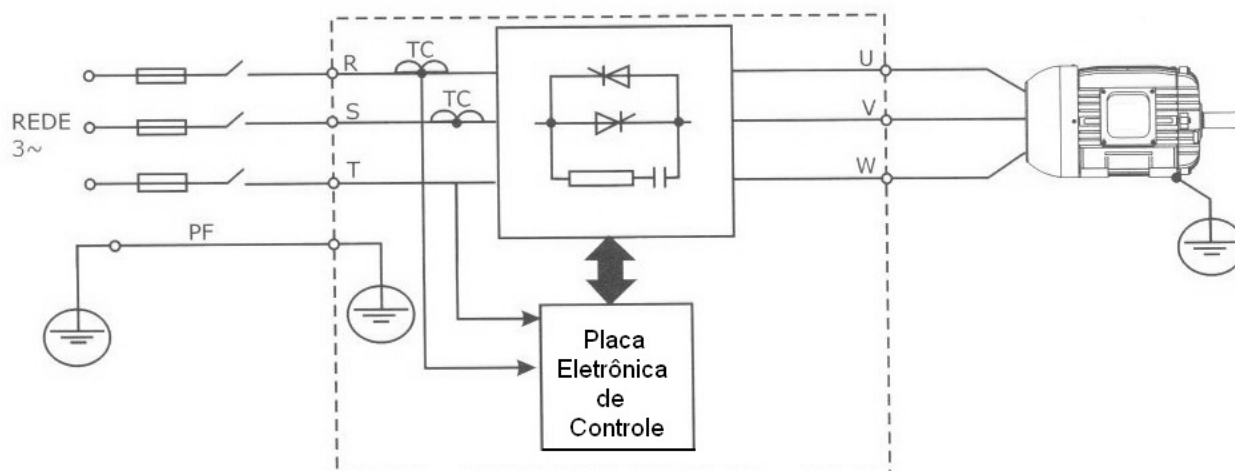


Figura 13: Soft-Starter

A figura 13 nos mostra um diagrama simplificado de um soft-starter. O funcionamento dos soft-starters está baseado na utilização de tiristores, ou melhor, de uma ponte tiristorizada na configuração anti-paralelo, que é comandada através de uma placa eletrônica de controle, a fim de ajustar a tensão de saída [5].

O circuito RC representado na figura 13 é conhecido como circuito snubber, e tem como função fazer a proteção dos tiristores contra $\frac{dv}{dt}$ (degrau de tensão). A capacitância é uma oposição à variação de tensão e, portanto, o capacitor conectado aos terminais dos tiristores reduz a taxa na qual a tensão no dispositivo varia. Quando o tiristor estiver bloqueado, o capacitor se carregará até o instante em que o dispositivo entrar em condução. Quando o tiristor for acionado, o capacitor descarregará. Portanto, uma resistência deve ser colocada em série com o capacitor para amortecer a descarga e limitar a corrente transitória no disparo [8].

Os painéis com soft-starter têm coordenação da proteção, com disjuntor na entrada, para proteção de contactor de by-pass e relés de proteção em série. São previstos fusíveis na entrada do soft-starter para proteção do módulo eletrônico de potência.

Na especificação de soft-starter e conversores de frequência (VSD) são observados os níveis de curto-circuito máximo especificado pelo fabricante, na entrada desses equipamentos. Onde o nível de curto-circuito disponível na instalação

alimentadora for maior que o tolerável pelo equipamento, devem ser previstos dispositivos limitadores de corrente de defeito, devidamente coordenados, de modo a prevenir danos nos módulos eletrônicos de potência [3].

2.5.3. Sistema de Distribuição de Energia em Corrente Contínua e UPS

Alguns equipamentos de um sistema elétrico industrial precisam ser alimentados ininterruptamente seja por corrente contínua seja corrente alternada. Estes equipamentos são denominados críticos devido ao grau de importância e os prejuízos que podem vir a causar às pessoas, ao meio ambiente ou ao processo, caso venham a falhar ou sofrer desligamentos.

Quando as cargas críticas são distribuídas, podem ser usadas as UPS modulares, de acionamento imediato e capazes de manter a operação dos equipamentos por um tempo determinado para que seja restabelecida a fonte de energia principal.

Podemos citar como exemplos de cargas críticas em uma planta industrial de exploração e produção de petróleo os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), luminárias de emergência, Computadores da rede ECOS, malha de instrumentação de equipamentos e redes de comunicações.

Fundamentando-se na norma IEC e nos conceitos da eletrônica de potência estaremos, a seguir, realizando uma análise da filosofia de funcionamento de um retificador e de uma unidade de fornecimento ininterrupto de energia (UPS), que está representado na figura 14 [9].

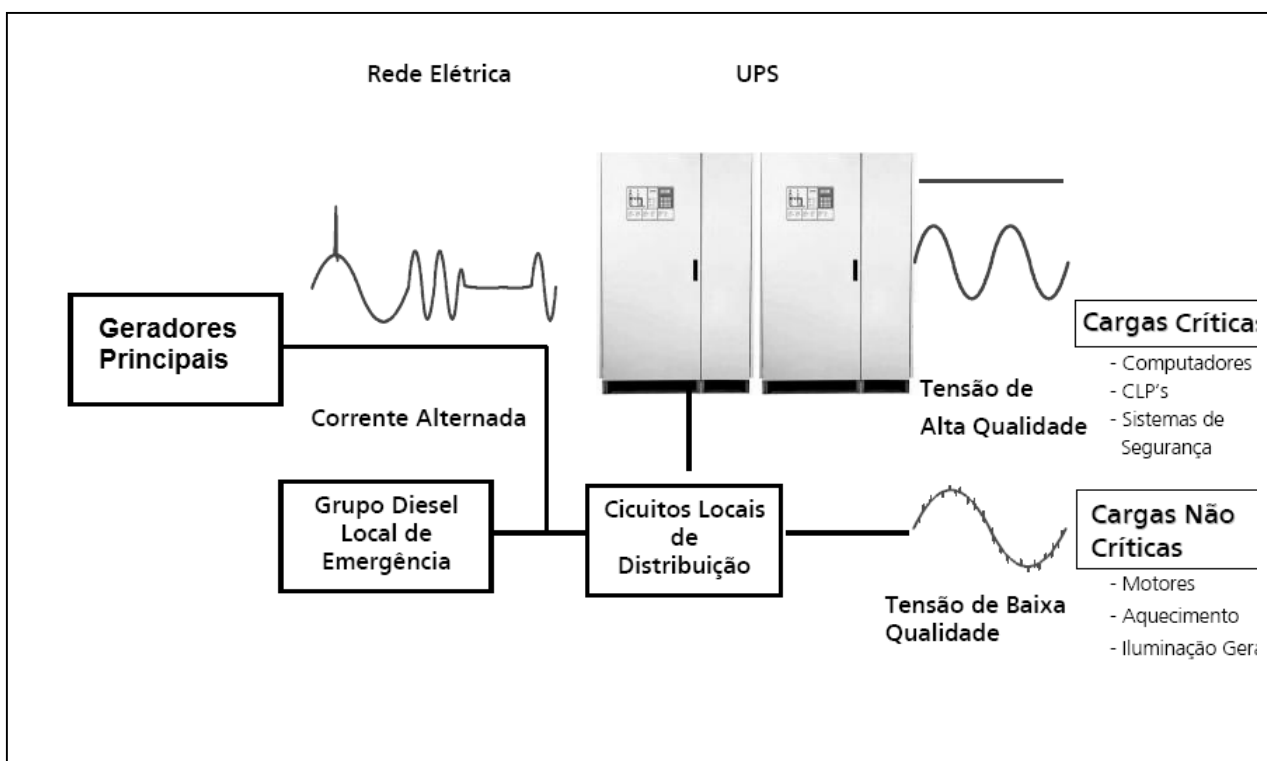


Figura 14: Unidade de Fornecimento Ininterrupto de Energia (UPS)

2.5.3.1. Circuito com Retificador ou Carregador de Baterias

Este sistema é composto por dois retificadores, operando em paralelo, que executam a conversão do sinal de CA em CC, alimentando assim um banco de baterias e a barra de distribuição. No caso de falta de energia da fonte principal o banco de baterias supre a demanda dos consumidores por um tempo determinado para a normalização da geração principal.

2.5.3.2. Circuito com UPS

Este equipamento consiste de um conversor de energia CA/CC – CC/CA e de um ramo CA alternativo. A unidade retificadora fornece o nível de tensão necessário para carregar baterias em regime de flutuação ou carga, e suprir a unidade inversora, cujo

funcionamento é realizado por um inversor na configuração ponte. Este equipamento opera pelo ramo retificador/inversor, e na ocorrência de falha neste ramo os consumidores CA são transferidos automaticamente para o ramo alternativo através da chave estática [9].

- Inversor

A unidade inversora opera baseada no chaveamento de 4 IGBT's, montados na configuração ponte, representada na figura 15, funcionando aos pares de modo a colocar o transformador (1 : n) sob tensão, ora positiva ora negativa definida a partir do sistema de controle onde o indutor L_1 e C_2 colaboram na filtragem da tensão tornando-a estabilizada e livre de ruídos.

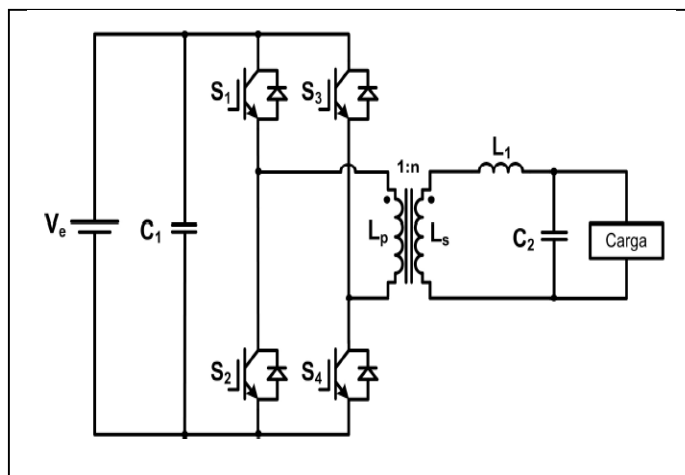


Figura 15: Representação Monofásica de um Circuito Inversor PWM com Filtro LC

- Chave Estática

Outro elemento eletrônico (ou eletromecânico) constituinte de uma UPS é a chave estática, mostrada na figura 16. Sua função é permitir a comutação da tensão de saída do inversor para a rede e vice-versa em caso de falha ou manutenção no inversor ou banco de baterias, sem que haja interrupção no fornecimento de energia para os consumidores.

Basicamente existem 2 possibilidades de implementar tal chave: usando tiristores ou relés eletromecânicos. Soluções de baixo custo usam, em geral, relés. Sua comutação deve ser rápida, de modo a não interromper a alimentação por mais de 1/2 ciclo.

Quando a potência cresce, o uso de tiristores é o ideal. Uma preocupação, neste caso, é garantir que as tensões da UPS e da rede tenham a mesma fase e amplitude no momento da comutação, para evitar a existência de uma corrente que circule de uma fonte para outra. Como o desligamento de um tiristor se dá quando sua corrente vai à zero, este deve ser o momento de inibir os pulsos que acionam o tiristor que conecta a UPS à carga e de acionar aquele que a conecta a rede.

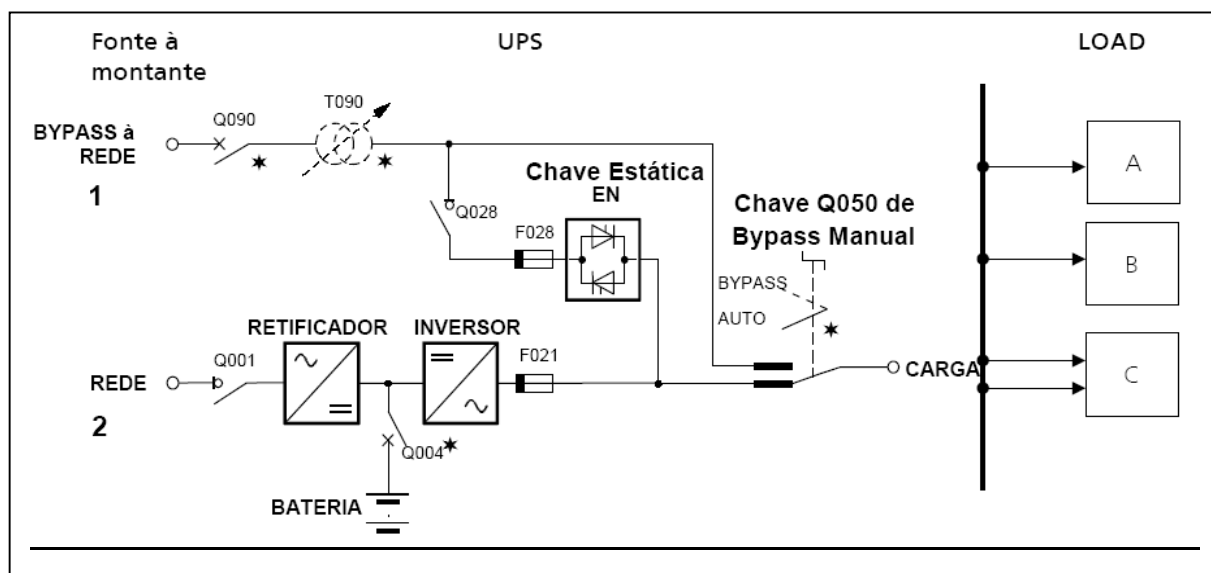


Figura 16: UPS com Chave Estática

3. Proteções do Sistema Elétrico

A escolha de um sistema de proteção para os equipamentos elétricos deve levar em consideração aspectos operacionais, econômicos, segurança dos equipamentos e pessoas, além do tipo de operação desejada, ou seja, assistida por operadores, semi-automática ou automática.

No caso de plantas automáticas ou semi-automáticas a ausência do operador torna necessário que na ocorrência de qualquer falha ou anormalidade ocorrer o desligamento da carga. Isto é ao contrário das plantas assistidas, onde na ocorrência de uma anormalidade que não comprometa nem o equipamento nem o processo, o operador poderá decidir sobre a continuidade ou não da operação ou solicitar à manutenção a correção da falha.

3.1. Aterramento

O tipo de aterramento a ser adotado para um sistema ou equipamento elétrico deve ser considerado como uma forma de proteção, pois objetiva-se com isso manter a integridade das pessoas evitando a ocorrência de choques elétricos e a parada do equipamento na ocorrência de uma falta para a terra (dependendo do tipo de aterramento adotado). O foco do estudo é uma unidade de produção tipo FPSO (Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência de Óleo e Gás) e precisamos garantir que em hipótese alguma ocorra a passagem de corrente elétrica através do casco da embarcação, o que seria extremamente perigoso devido aos tanques de armazenagem de petróleo [10].

A solução adotada no sistema elétrico com tensão de 6,6 kV é manter o neutro do gerador isolado da massa da embarcação e configurou-se para atuação instantânea os relés de proteção de terra para desligar, imediatamente, o circuito em falta e os relés de deslocamento de neutro como proteção de retaguarda para a função de alarme [3][11][12].

No lado com nível de tensão de 480 V adotou-se manter o casco da unidade isolado do restante do sistema elétrico permitindo assim a operação normal de um

equipamento (carga ou painel) que venha a apresentar uma falta fase-terra durante tempo suficiente para que a equipe de manutenção localize e corrija a falha [3][11][12].

Deve-se estar atento que, se durante o tempo de ocorrência de uma falha para a massa, uma segunda fase do mesmo ramo alimentador também vier a sofrer uma falha para a massa, este evento geraria um curto bifásico no sistema elétrico. Com o objetivo de identificar o ramo do circuito elétrico que está em falha, são utilizados dispositivos detectores de falta para a massa tanto no lado de alta tensão quanto no de baixa tensão.

- Alta Tensão

No sistema de 6,6 kV a corrente para o contato a terra é totalmente capacitiva e depende da configuração do isolamento dos equipamentos e dos capacitores de surto de sobretensão dos geradores principais em operação. A corrente para a terra é detectada por meio de TC's toroidais instalados nas saídas dos alimentadores.

Como suplemento para o sistema de detecção de falta à terra, as unidades de detecção de deslocamento de neutro dos relés dos geradores foram habilitadas, emitindo assim, quando sensibilizadas, apenas um sinal de alarme, por se tratar de elemento sem capacidade de seleção da área em falta.

A corrente para a terra (corrente capacitiva), representada na figura 17, é monitorada individualmente em cada circuito de saída dos PN-01 e PN-02 através da função "sensitive ground sensor" (51GS) dos relés de proteção de cada circuito [3][13].

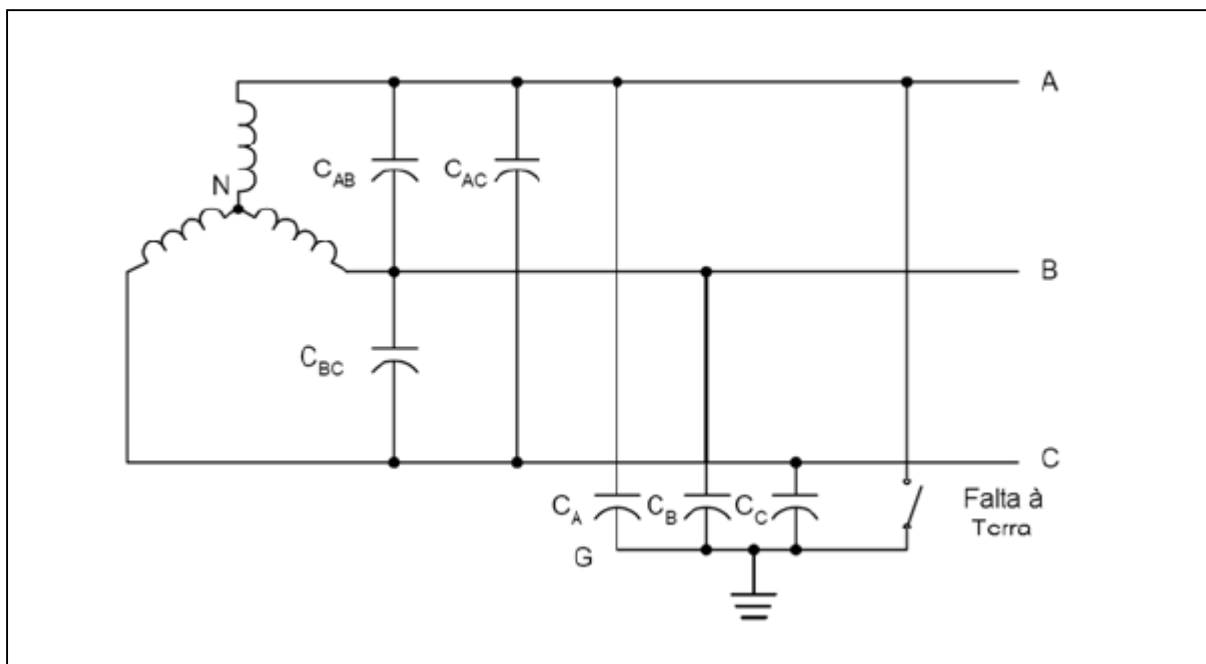


Figura 17: Representação do Sistema no Lado de Alta Tensão com

- Baixa Tensão

O isolamento para a terra nos setores de 480 V é supervisionado por meio de um dispositivo de injeção de sinal com ajuste de sensibilidade, conforme figura 18. Um sinal de baixa frequência é permanentemente injetado nas entradas dos barramentos dos CDC's por um relé que está simultaneamente em contato com a massa e o barramento. Na ocorrência de uma falha de isolamento para a massa no barramento, o relé que está conectado à massa e ao barramento, capta o retorno do sinal por ele injetado na barra, alarmando em seguida e enviando um sinal de alarme para a ECOS. Caso a falha ocorra no ramo de um dos consumidores, tanto o relé injetor/receptor de sinal quanto o relé apenas receptor, instalado em cada ramo consumidor, serão sensibilizados, identificando assim o ramo do consumidor em falha e enviando um sinal de alarme para a ECOS [3][4][13].

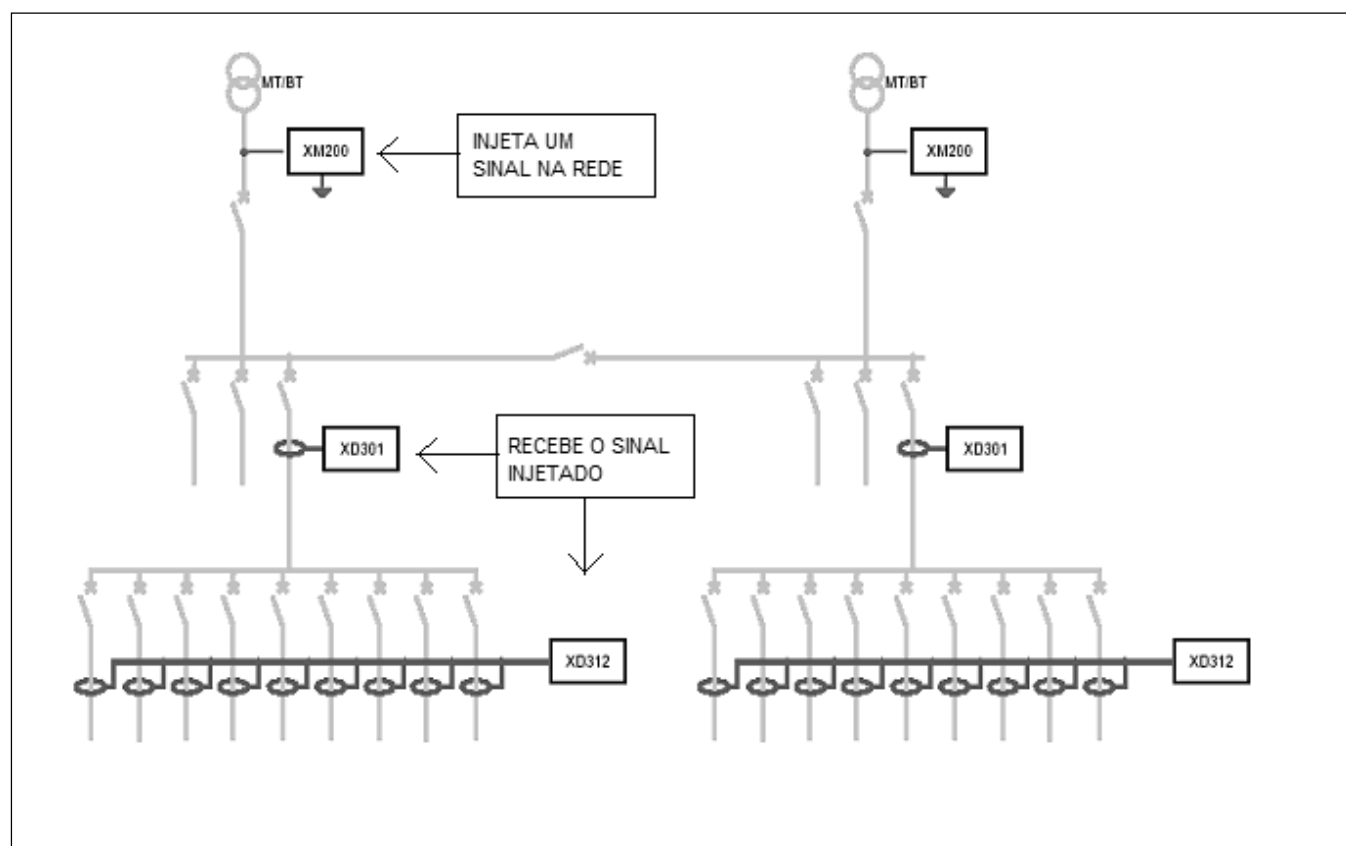


Figura 18: Dispositivo de Detecção de Fuga à Terra

3.2. Tipos de Proteção

3.2.1. Curvas de Sobrecorrente

Os relés utilizados na análise desta unidade de produção são dos tipos digitais e multifuncionais e consta no Anexo A seu diagrama trifilar de ligação. Isto permite a parametrização dos ajustes e curvas de proteção de acordo com a necessidade, e pode-se prosseguir na análise de proteção escolhendo as curvas de sobrecorrente adotadas para a proteção dos equipamentos, conforme a função e característica da carga, tempo necessário para atuação, corrente de pickup e tempo de reset [14][15][16].

Deste modo apresentam-se abaixo algumas características dos principais tipos de curvas adotadas na instalação elétrica industrial de uma plataforma.

3.2.1.1. Curvas ANSI de Sobrecorrente Temporizada [17]

Os formatos de curva de sobrecorrente temporizada ANSI são classificadas como extremamente inversa, muito inversa, normalmente inversa e moderadamente inversa, conforme as figuras 19, 20, 21 e 22, respectivamente. O tempo de trip (desligamento) do disjuntor do circuito em função da corrente de entrada no equipamento pode ser calculado conforme a equação (2).

$$T = M \times \left[A + \frac{B}{\left(\frac{I}{I_{pu}} - C \right)} + \frac{D}{\left(\frac{I}{I_{pu}} - C \right)^2} + \frac{E}{\left(\frac{I}{I_{pu}} - C \right)^3} \right] \quad (2)$$

Onde:

T = Tempo de Trip (segundos)

M = Ajuste Multiplicador

I = Corrente de Entrada

I_{pu} = Ajuste de Corrente de Pickup

A, B, C, D, E = Constantes, cujos valores encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Constantes das Curvas ANSI dos Relés de Proteção Utilizados

Constantes da Curva ANSI	A	B	C	D	E
Extremamente Inversa	0,0399	0,2294	0,5000	3,0094	0,7222
Muito Inversa	0,0615	0,7989	0,3400	-0,2840	4,0505
Normalmente Inversa	0,0274	2,2614	0,3000	-0,1899	9,1272
Moderadamente Inversa	0,1735	0,6791	0,8000	-0,0800	0,1271

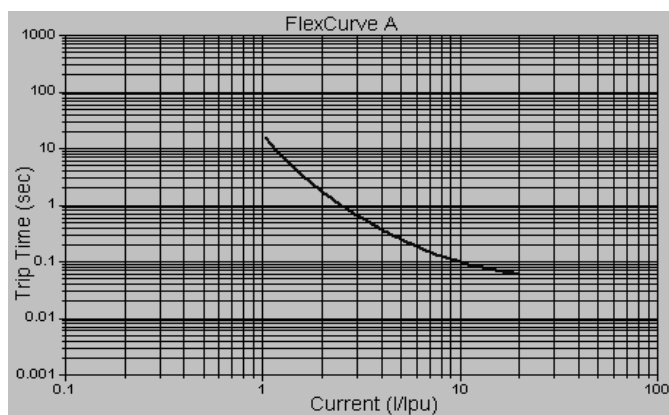


Figura 19: Extremamente Inversa

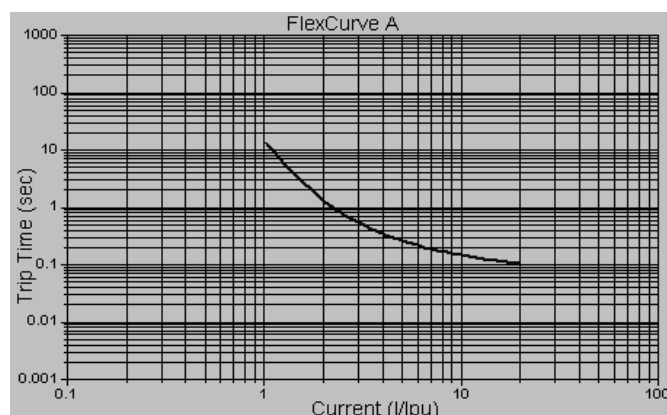


Figura 20: Muito Inversa

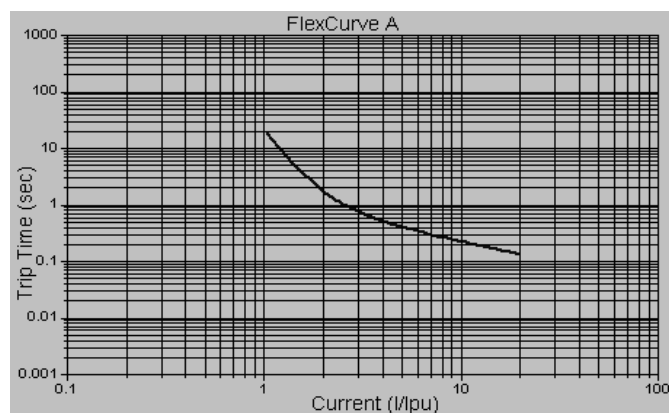


Figura 21: Normalmente Inversa

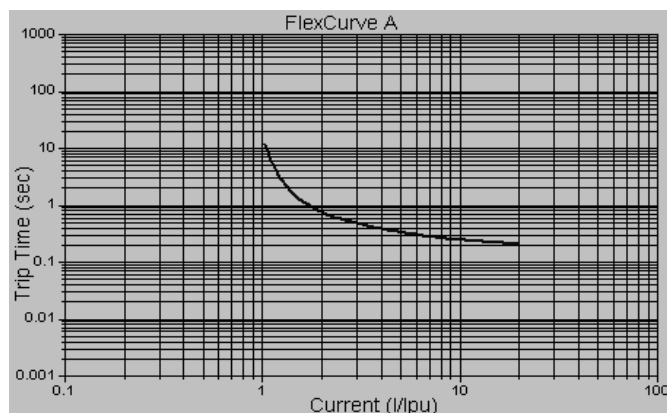


Figura 22: Moderadamente Inversa

3.2.1.2. Curvas IEC de Sobrecorrente Temporizada [18]

A norma IEC 255-4 define o formato de 4 curvas de sobrecorrente utilizadas para a função de sobrecarga, que são Curva IEC A, Curva IEC B, Curva IEC C, e Pouco Inversa, ilustradas nas figuras 23, 24, 25 e 26. O tempo para desligamento do disjuntor do circuito em função da corrente de entrada no equipamento pode ser calculado conforme a equação abaixo.

$$T = M \times \left[\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{pu}} \right)^E - 1} \right] \quad (3)$$

Onde:

T = Tempo para desligamento (segundos)

M = Ajuste Multiplicador

I = Corrente de Entrada

I_{pu} = Ajuste de Corrente de Pickup

K, E = Constantes cujos valores encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Constantes das Curvas IEC dos Relés de Proteção Utilizados

Constantes da Curva IEC	K	E
CURVA IEC A	0.140	0,020
CURVA IEC B	13,500	1,000
CURVA IEC C	80,000	2,000
POUCO INVERSA	0,050	0,040

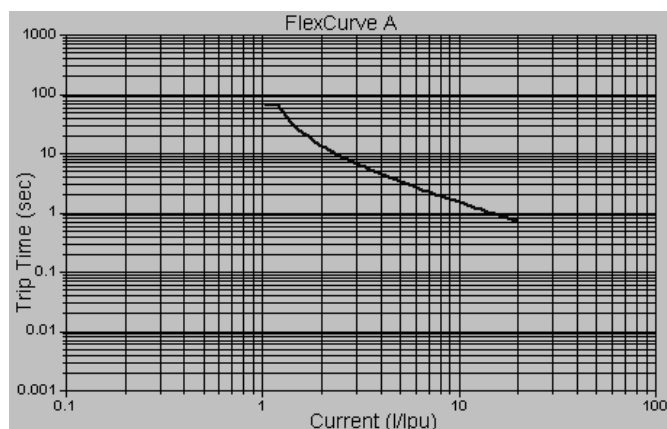


Figura 23: Curva IEC A

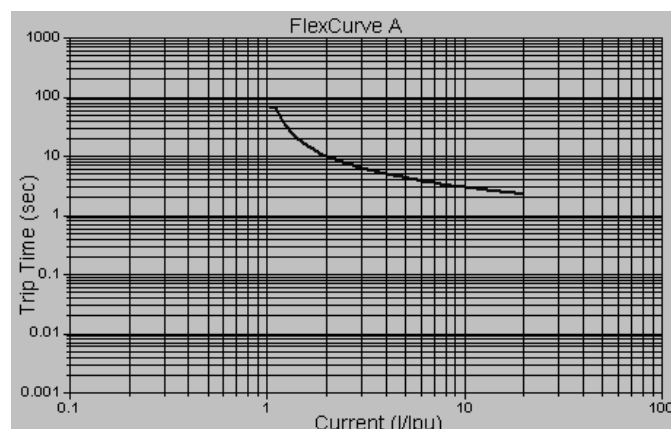


Figura 24: Curva IEC B

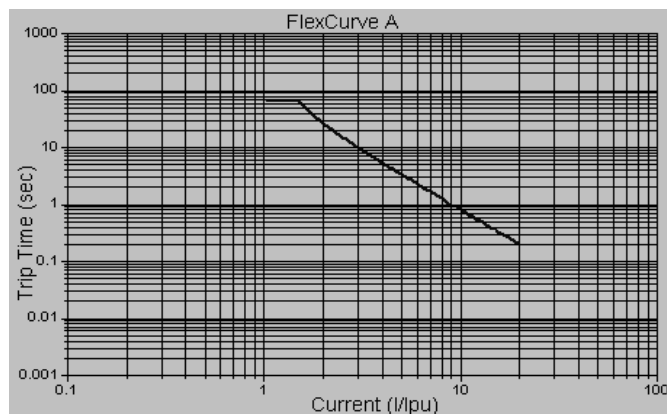


Figura 25: Curva IEC C

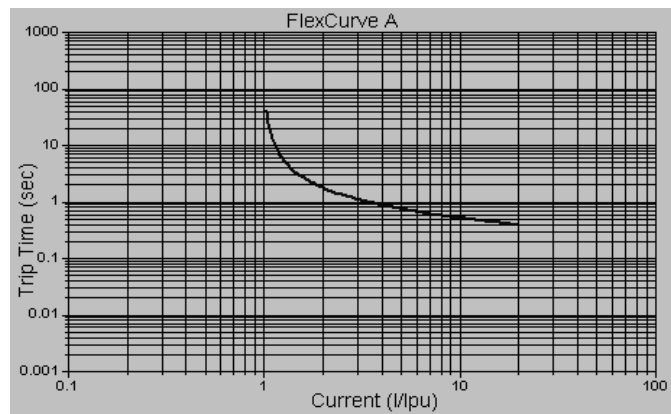


Figura 26: Pouco Inversa

3.2.1.3. Curva de Sobrecorrente com Tempo Definido

A curva de tempo definido é utilizada para a proteção de curto-circuito causando o desligamento do disjuntor tão logo a razão entre a corrente instantânea da carga e a corrente de pickup configurada seja maior que 1, conforme ilustrado na figura 27.

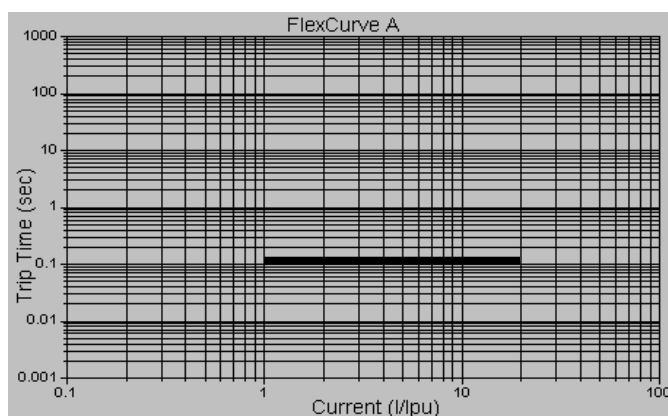


Figura 27: Curva de Tempo Definido

3.2.2. Principais Proteções para Geradores

A proteção dos geradores devem atender a requisitos de coordenação e seletividade conforme as normas ANSI/IEEE[11][12][19].

Conforme mostrado na Tabela 4, em uma unidade de produção as proteções configuradas para os geradores de emergência deverão ser mais simples que as dos geradores principais, já que sua operação deve ser garantida nas condições mais adversas encontradas.

Tabela 4: Comparação entre as Proteções Configuradas para Geradores
Principais e Emergência

Função	Trip do Disjuntor		Corte da excitação		Alarme		Trip da Turbina /	
	Princ	Emer	Princ	Emer	Princ	Emer	Princ	Emer
Relé Diferencial 87	x		x		x		x	
Sobrecorrente (51V)	x	x	x	x	x	x	x	x
Falta à Terra (59G)	x		x		x			x
Direcional de Terra (67G)	x		x		x		x	
Falha AVR	x				x			
Estator RTD alta temperatura hi (49)					x			x
Estator RTD alta temperatura hi hi (49)	x				x			x
Reversão de potência ativa (32)	x	x			x			x
Falta de campo (40)	x	x			x			x
Desequilíbrio de corrente (seq. Negativa) (46)	x				x			
Balanco de tensão (60)					x			x
Sobretensão (59)	x		x					
Subtensão (27)	x							
Sobrefrequência (81)	x				x		x	x
Subfrequência (80)	x				x			
Sobreexcitação	x		x		x			
Falha dos diodos rotativos (58)					x			
Alta temp. mancais ou rolamentos (38) hi					x			x
Alta temperatura mancais / rolamentos (38) hi hi	x						x	x
Alta vibração (39)	x				x		x	
Falha no sistema de lubrificação dos mancais	x				x		x	x

Especificamos abaixo as principais proteções para geradores de unidades marítimas de produção de Óleo e Gás [11][20], consta no Anexo B a tabela com todos os códigos de proteções segundo a norma ANSI.

- Proteção Diferencial (87G)

Faltas internas no gerador geralmente se desenvolvem como uma falta à terra numa das fases do enrolamento e podem ocasionalmente envolver mais de uma fase. A proteção mais efetiva para falta entre fases é realizada pelos relés diferenciais. A

utilização destes relés somente é possível quando os terminais de neutro de cada uma das fases forem acessíveis para a instalação dos transformadores de corrente.

- Proteção de Desequilíbrio de Corrente (46)

A ocorrência de faltas assimétricas externas à máquina, principalmente quando ocorre falha nas proteções de outros equipamentos, pode causar a circulação de correntes de seqüência negativa no estator da máquina. Estas correntes induzem correntes de frequência dupla no rotor do gerador que causam sobreaquecimento e em casos mais severos danos à estrutura do rotor. A proteção para esta condição pode ser realizada por meio de relés de sobrecorrente de seqüência negativa.

- Proteção de Perda de Campo ou Excitação (40)

Quando ocorre a perda de excitação, a máquina passa a operar como um gerador de indução, girando abaixo da velocidade síncrona e absorvendo reativos do sistema. Esta situação pode causar colapso da tensão e tornar instável o sistema ao qual está conectada. Os relés para perda de excitação costumam utilizar unidades de impedância (tipo off-set mho), direcional ou subtensão.

- Proteção Anti-Motorização ou Potência Reversa (32)

Quando dois geradores estão operando em paralelo há a possibilidade de que um deles venha a se comportar como um consumidor de potência ativa. Para que isso não ocorra faz-se necessário a implementação desta proteção a fim de garantir a integridade e operacionalidade do sistema elétrico.

- Proteção de Sobrecorrente com Restrição de Tensão (51V)

Esta proteção funciona como retaguarda para as proteções de sobrecorrente no caso de não operação do relé de proteção primária. Quando ocorrer uma falta, em qualquer das fases, a proteção de sobrecorrente do relé será sensibilizada, porém o mesmo apenas atuará se a tensão monitorada no barramento estiver abaixo da nominal de acordo com os parâmetros de ajuste para pickup, ou seja, deve haver uma sobrecorrente e uma subtensão no barramento para sua atuação.

- Proteção de Falta para Terra (51GN ou 59GN)

A proteção contra faltas para terra está diretamente relacionada com o método de aterramento do neutro. Para aterramento de baixa resistência com resistor no neutro a proteção é feita por relé de sobrecorrente (51GN). Para aterramento de alta resistência com resistor no neutro ou aterramento de alta impedância com transformador de distribuição a proteção é feita por relé de sobretensão (59GN).

- Proteção de Sobrevelocidade (12)

Os geradores estão sujeitos a aceleração na ocorrência de rejeição de carga. A aceleração depende da inércia do gerador, da carga perdida e da dinâmica do regulador de velocidade. A proteção contra sobrevelocidade é dada por relés de velocidade normalmente associados ao regulador de velocidade.

- Proteção de Sobretensão (59)

Um gerador de pequena potência em relação ao sistema ao qual está interligado pode ficar sujeito às sobretensões oriundas do sistema devido à incapacidade do regulador de tensão em modificar a tensão do sistema. Sobretensões também podem ocorrer durante uma rejeição de carga devido a uma falha do regulador de tensão. A proteção sob estas condições é dada para o primeiro caso por um relé de sobretensão temporizado com ajuste acima de 105% da tensão nominal e para o segundo caso por um relé de sobretensão instantâneo com ajuste acima da máxima sobretensão limitada pelo regulador de tensão.

- Proteção de Sobrecarga (49)

A proteção contra sobrecarga pode ser realizada por meio de relés que estimam o comportamento térmico do gerador pela medição da corrente de carga ou por meio de detectores resistivos de temperatura embutidos nos pontos críticos do gerador.

3.3. Proteção de Transformadores

Os transformadores são equipamentos que requerem cuidados especiais de manutenção e operação devido a sua importância para o sistema elétrico como um todo.

Para proteção contra faltas internas adotou-se a proteção diferencial de corrente, cujo esquema representativo encontra-se na figura 28, com ajustes e demais características adotadas atendendo a norma ANSI/IEEE [21]. Nesta análise será adotado transformadores do tipo seco e ligação delta-estrela com neutro isolado.

A fim de mantermos a seletividade no sistema elétrico durante a magnetização de um transformador (figura 29), os ajustes de tempo para a atuação da proteção de sobrecorrente no lado primário devem levar em consideração o tempo necessário para a sua magnetização (corrente de “inrush”), pois do contrário poderia haver atuação desnecessária da proteção.

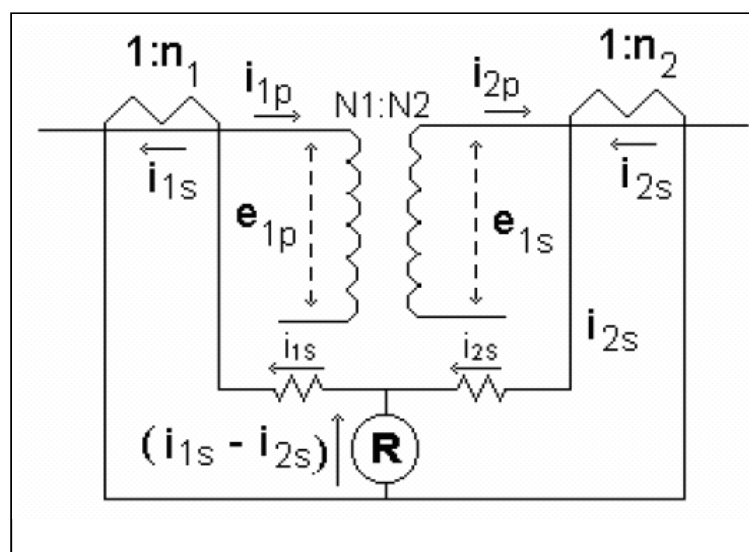


Figura 28: Esquema de Proteção Diferencial Aplicada a um Transformador Monofásico

Na figura 28:

- $N1/N2$ é a relação de transformação entre o primário e o secundário do transformador;
- e_{1p} e e_{1s} são os valores das tensões no lado primário e o secundário do transformador, respectivamente.

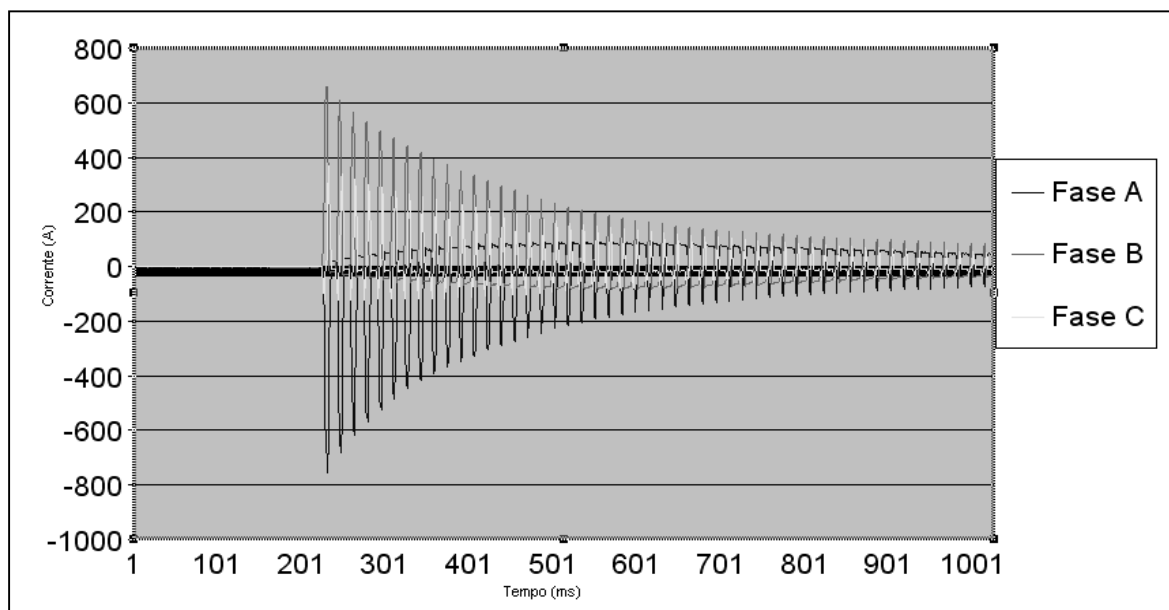


Figura 29: Curva de Magnetização de um Transformador

3.4. Proteção para Painéis Elétricos

Os painéis elétricos de uma unidade de produção marítima seguem os critérios elétricos estabelecidos pela norma ANSI/IEEE [14], apresentando dispositivos detectores de arco elétrico e reatores limitadores de corrente, localizados na entrada de cada fase com a função de limitar a corrente de curto-circuito, relés detectores de falta para terra além das proteções de subtensão e sobrecorrente temporizada e instantânea.

Suas entradas e seus disjuntores de interligação são permanentemente monitorados por relés digitais que, na ocorrência de uma falta em uma de suas cargas ou no próprio barramento, são sensibilizados atuando de acordo com a seletividade lógica implementada, isolando totalmente o circuito ou barramento em falta.

3.5. Proteção Típica para Motores Elétricos

Os ajustes das proteções analisadas abaixo estão de acordo com especificações técnicas e recomendações da norma da ANSI/IEEE [3][4][22].

Proteções adotadas:

- Proteção de rotor bloqueado

O valor de ajuste adotado é de 1,5 vezes a corrente nominal do motor com tempo de atuação de 5 segundos.

- Subtensão

Ocorrendo uma falta de tensão de alimentação dos motores os relés emitem comando de desligamento do disjuntor, com ajuste de 75% da FLA (corrente de plena carga) e atraso de 2s.

- Sobretensão

Se a tensão do sistema elevar-se 5% acima da tensão nominal do sistema por mais de 3 segundos, deverá ocorrer um alarme. Caso esta elevação seja maior que 10% da tensão nominal deve ocorrer o desligamento deste motor.

- Curto-Circuito

A atuação da proteção de curto-circuito está condicionada a um valor de corrente cerca de 10 vezes maior que a corrente nominal do motor, o que impede a atuação indevida desta proteção durante a partida do equipamento, pois a corrente de partida é cerca de 7 vezes o valor da corrente nominal.

Na Tabela 5 podemos observar que quanto maior for a potência do motor, maior será o grau de complexidade de suas proteções.

Tabela 5: Proteção de Motores Elétricos

FUNÇÃO	Baixa tensão		Alta tensão	
	CCM ou demarrador	CDC	CCM	CDC
Potência (kW)	< 55	55 < P < 150	150 < P < 1200	> 1200
Proteção ou acionamento típico	Disjuntor + Contator + Relé térmico	Disjuntor com relé digital	Fusível + Contator + Relé Multifuncional	Disjuntor + Relé Multifuncional
Imagem térmica (49)	Desliga	Desliga	Desliga	Desliga
Curto circuito (50)	Desliga	Desliga	Fusível	Desliga
Falta à terra (50 G)	Alarme ou Desliga	Alarme ou Desliga	Desliga	Desliga
Diferencial (87)				Desliga
Desequilíbrio de corrente (46)		Desliga	Desliga	Desliga
Rotor travado	Desliga	Desliga	Desliga	Desliga
Temperatura alta (49)			Alarme	Alarme
Temperatura muito alta (49)			Desliga	Desliga
Temperatura no Mancal (38)			Desliga	Desliga
Observações: D: Desliga A: Alarme (ECOS)				

4. Áreas Classificadas

4.1. Definição

Podemos definir como área classificada uma região onde há a presença de gás ou na qual é provável sua ocorrência a ponto de exigir precauções especiais para a construção, instalação e utilização de equipamento elétrico.

As normas brasileiras sobre atmosferas explosivas são elaboradas pelo subcomitê SC-31 do COBEI (Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Telecomunicações e Iluminação), formado por cerca de 60 profissionais envolvidos em equipamentos e instalações elétricas em atmosferas explosivas. Sua função é elaborar e manter as normas brasileiras referentes aos equipamentos e instalações onde exista o risco devido à possibilidade de presença de atmosferas explosivas de gases, vapores, névoas ou poeiras combustíveis [23].

Assim, áreas classificadas são todos aqueles espaços ou regiões tridimensionais onde pode ocorrer presença de gases e líquidos inflamáveis, que podem formar uma atmosfera inflamável (explosiva).

Tais atmosferas explosivas podem surgir a partir de operações de perfuração ou testes de produção em poços e, também, em torno de equipamentos e instalações de produção onde gases e líquidos inflamáveis são armazenados, processados ou manuseados.

4.2. Classificação de Áreas

Segundo a norma internacional da IEC [24], as áreas classificadas são divididas em zonas, como podemos visualizar na figura 30, conforme a probabilidade de ocorrência de uma mistura explosiva em:

- Continuamente Presente ou Zona 0 - Onde uma mistura explosiva está continuamente presente ou presente por longos períodos.

Ex.: Interior de vaso separador e superfície de líquido inflamável em tanques.

- Freqüentemente Presente ou Zona 1 - Onde é provável ocorrer uma mistura explosiva durante operação normal.
Ex.: Respiro de equipamento de processo.
- Acidentalmente Presente ou Zona 2 - Onde é pouco provável ocorrer uma mistura explosiva em condições normais de operação ou, caso ocorra, será por um breve período de tempo.
Ex.: Válvulas, flanges e acessórios de tubulação para líquidos ou gases inflamáveis.

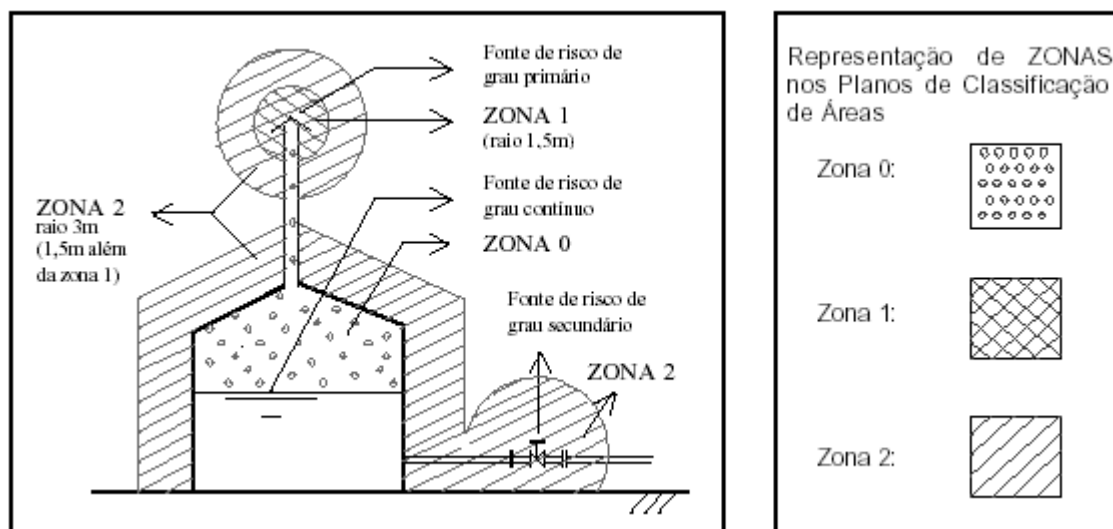


Figura 30: Exemplos de Áreas Classificadas

4.3. Equipamentos Apropriados para Áreas Classificadas

- Ex-d: É todo equipamento que está encerrado em um invólucro capaz de suportar a pressão de explosão interna sem se romper, não permitindo que a explosão se propague para o meio externo. Este método de proteção baseia-se no conceito de confinamento da explosão [25].
- Ex-p: Consiste em manter presente no interior do invólucro, um gás de proteção com uma pressão positiva superior à pressão atmosférica, de modo que se houver presença de mistura inflamável ao redor do equipamento esta

não entre em contato com partes que possam causar uma ignição. Esta técnica de proteção é baseada no conceito de segregação[26].

- Ex-e: São equipamentos que em condições normais de operação não produzem centelhamento ou altas temperaturas e que são dotados de medidas construtivas adicionais de modo a aumentar a sua segurança. Este método de proteção é baseado no conceito de supressão da fonte de ignição[27].

São previstas as seguintes proteções de acordo com área na Tabela 6:

Tabela 6: Tipos de Proteção

TIPO DE PROTEÇÃO	SÍMBOLO	ZONA
Segurança intrínseca – categoria “ia”	Ex-ia	0, 1 e 2
Segurança intrínseca – categoria “ib”	Ex-ib	1 e 2
À Prova de explosão	Ex-d	1 e 2
Pressurizado	Ex-p	1 e 2
Segurança aumentada	Ex-e	1 e 2
Imersão em óleo	Ex-o	1 e 2
Imerso em areia	Ex-q	1 e 2
Encapsulado (imerso em resina)	Ex-m	1 e 2
Não-acendível	Ex-n	2

4.4. Classe de Temperatura

Indica a máxima temperatura de superfície que um equipamento elétrico pode atingir, de forma a não exceder a temperatura de ignição da atmosfera explosiva do gás

para o qual ele foi projetado. A Tabela 7 representa a classe de temperatura em função da temperatura máxima na superfície de um equipamento [23][24].

Tabela 7: Classe de Temperatura

Classe	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Máx. Temp. superfície e (°C)	450	300	200	135	100	85

4.5. Classificação em Grupos

Na classificação em grupos os gases são agrupados pelo grau de periculosidade que proporcionam, conforme ilustra a Tabela 8 [23][24].

Tabela 8: Classificação dos Gases

Grupo	Descrição
I	Ocorre em minas onde prevalecem os gases da família do metano e poeiras de carvão
II	Ocorre em indústrias de superfície (químicas, petroquímicas e farmacêuticas) subdividindo-se em IIA, IIB e IIC
IIA	Ocorre em atmosferas explosivas onde prevalecem os gases da família do propano (plataformas de perfuração e produção)
IIB	Ocorre em atmosferas explosivas onde prevalecem os gases da família do etileno
IIC	Ocorre em atmosferas explosivas onde prevalecem os gases da família do hidrogênio (incluindo o acetileno), grupo de maior periculosidade.

5. Análise de Cargas

A análise de cargas é um estudo que tem por finalidade principal dimensionar os painéis, transformadores e a geração de energia da plataforma. Todos os setores envolvidos no projeto da plataforma elaboram uma lista de equipamentos que devem ser utilizados nesta. A partir desta lista, separam-se os equipamentos que necessitam de acionamento elétrico. Estes são considerados na análise de cargas.

As cargas elétricas da Unidade de Produção, de acordo com a sua finalidade, classificam-se em:

Cargas Normais - são as cargas alimentadas pela geração principal e que devem permanecer desenergizadas caso a geração principal esteja desligada.

Cargas Essenciais – são as cargas que normalmente são alimentadas pela geração principal e que passam a ser alimentadas pela geração de emergência no caso de falha da geração principal.

Cargas Essenciais Críticas – são as cargas que permanecem alimentadas por baterias após falhas da geração principal e a partida da geração de emergência.

A análise de cargas do sistema elétrico leva em consideração os seguintes fatores:

- Fator de Carga (FC): este fator é definido como a razão da demanda média pela demanda máxima ocorrida no mesmo intervalo de tempo especificado.
- Fator de Intermitência (FI): o fator de intermitência de uma carga expressa periodicidade de operação desta carga em relação a um determinado intervalo de tempo e ao regime de operação das demais cargas.

Na figura 31 temos um esboço do diagrama do sistema elétrico da plataforma tal como a P-37. Os dois geradores principais conectados ao PN-01, fornecem a energia para a plataforma, enquanto que dois outros geradores, PN-09, são os de emergência. A redução de tensão é feita através dos transformadores, que suprem os painéis CDCs e CCMs.

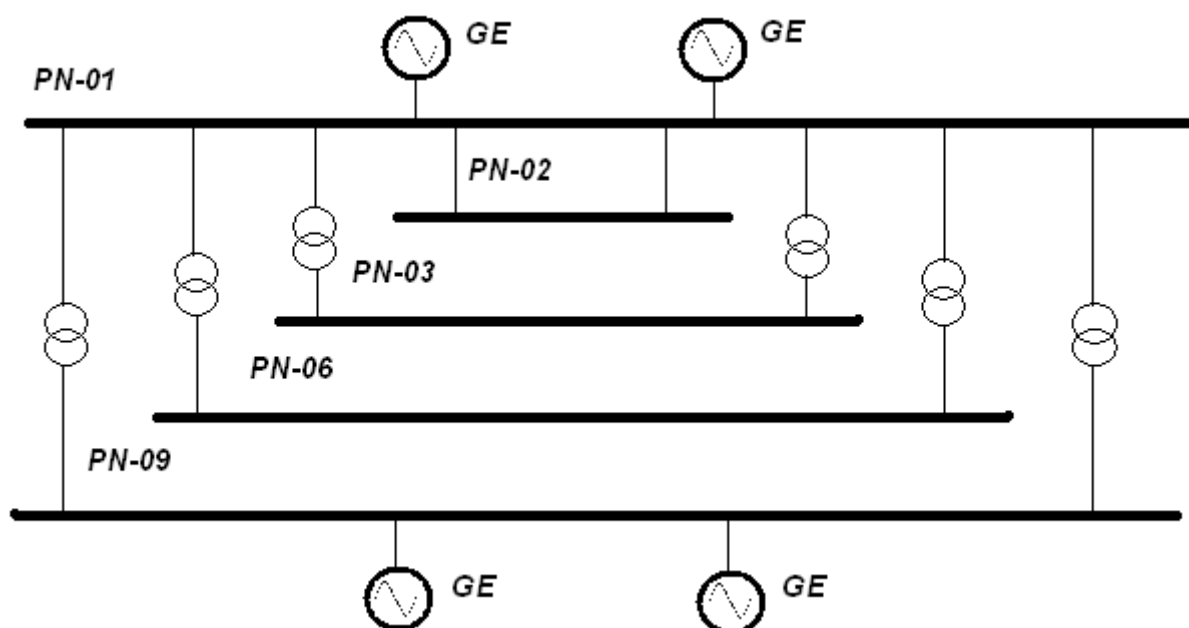


Figura 31: Esboço do Diagrama Unifilar

A tabela 9 apresenta a distribuição das cargas nos principais painéis da plataforma [4].

Tabela 9: Distribuição das Cargas

Tag do equipamento	Função na Plataforma	Potência
PN-01	Definição	kW
M-B-122302A/B/C	Bomba de Transferência de Óleo	1700
M-B-125102A/B/C/D	Sistema de Injeção de Água - Bombas de Injeção	2700
PN-02	Definição	kW
M-B-511101A/B/C/D	Bomba de Captação de Água do Mar	463
M-B-512401A/B/C/D	Bomba de Água de Resfriamento	294
M-C-UC-122302	Compressor de Gás Booster	600
PN-03	Definição	kW
PN-UC-122301A-01/B-01	Turbo Compressor de Gás	245
PN-P-Z 123301 02	Painel das Resistências de Glicol	300
PN-TF-TO 122301 A/B	Painel do Tratador de Óleo	300
PN-05	Centro de Controle de Motor	390
PN-04	Centro de Controle de Motor	394
GD- 526001/2/3	Guindastes	145
M-B-512501A/B	Bombas de Água Quente	90

PN-06	Definição	kW
PN-VE-GG-524101A/B	Gerador de Gás Inerte	125
PN-08	Centro de Controle de Motor	501
PN-07	Centro de Controle de Motor	350
M-B-511102A/B/C/D	Bomba Desaeradora	132
TF-514401A/B	Iluminação Normal – Iluminação Naval	150
PN-UE-512101	Gerador de Hipoclorito de Sódio	330
PN-09	Definição	kW
PN-GE-01A-03/B-03	Geração Principal – Painéis / Equipamentos Auxiliares do GE-01A/B	112,5
PN-C-UC-513401A/B	Compressores de ar	155
M-B-500001	Sistema de Lastro, Esgotamento	110
M-B-511103	Bomba de Captação de Água do Mar - Emergência	75
M-B-512402	Bomba de Água de Resfriamento - Emergência	90
M-B-512501C	Água Quente – Emergência	90
M-B-533611	Sistema de Lastro, Esgotamento - Bomba de Dreno	185
M-B-GG-524102	Bombas para Sistema de Resfriamento do Gerador de Gás Inerte	110
PN-11	Centro de Controle de Motor	280
PN-10	Centro de Controle de Motor	258
PN-25	Centro de Controle de Motor	227
PN-26	Centro de Controle de Motor	140

Os cálculos realizados são baseados nas informações de potência ativa e reativa provenientes da lista de equipamentos da P-37. As cargas elétricas se distribuem entre cargas motóricas e não-motóricas.

Ao analisar cargas motóricas, deve-se ter em mãos a potência mecânica que será fornecida pelo equipamento, o chamado bkW . A partir do bkW é feita uma conversão para obtenção de potência nominal da carga, obedecendo à norma API-RP-610 [30], que estabelece:

$$\text{Se } bkW < 16,5 \rightarrow kW = 1,25 \times bkW$$

$$\text{Se } 16,5 \leq bkW < 50,5 \rightarrow kW = 1,15 \times bkW$$

$$\text{Se } bkW \geq 50,5 \rightarrow kW = 1,10 \times bkW$$

A partir do valor obtido pela conversão, deve-se escolher um motor com potência nominal próxima à carga dimensionada. Para as cargas não-motóricas, este procedimento não se aplica, considerando-se somente a potência nominal do equipamento.

Na planilha de cálculo da análise de cargas (Anexo C), devem ser inseridas ainda as informações de fator de potência (fp) e rendimento (n). Os cálculos realizados, tanto para demanda normal quanto essencial, são os seguintes:

- Para potência ativa demandada

$$Pd = \frac{bkW \times FC \times FI}{n} \quad (4)$$

- Para potência reativa demandada

$$Qd = Pd \times \tan(a \cos(fp)) \quad (5)$$

A tabela 10 apresenta o resumo da energia demandada por todos os painéis, incluindo a demanda de cada barramento, exceto do painel principal, que mesmo tendo o seu barramento dividido em dois, apresenta a potência demandada como um único barramento. Nesta tabela os dados de potência ativa e reativa foram obtidos diretamente da planilha de análise de cargas. Os dados de potência aparente e fator de potência foram obtidos das equações básicas de circuitos trifásicos:

$$kVA = \sqrt{(kW)^2 + (kVar)^2} \quad (6)$$

$$fp = \frac{kW}{kVA} \quad (7)$$

Tabela 10: Resultado Obtido na Análise de Cargas

TAG	Demanda Normal			
	kW	kVar	kVA	fp
PN-01	14058,30	8281,17	16316,1	0,86
PN-02A	1529,27	1074,00	1868,7	0,82
PN-02B	606,06	269,02	663,1	0,91
PN-03A	1355,20	937,93	1648,1	0,82
PN-03B	1029,91	696,78	1243,5	0,83
PN-06A	766,67	489,05	909,4	0,84
PN-06B	514,67	349,05	621,9	0,83
PN-09A	689,78	689,99	975,6	0,71
PN-09B	786,21	848,41	1156,7	0,68

A Tabela 11 apresenta a demanda total de cada painel e foi usada para o dimensionamento dos transformadores. Do lado esquerdo da tabela está o painel em questão, com o total de energia demandada obtida através da soma da demanda das barras A e B do respectivo painel. Isto se dá ao fato de que cada transformador deve ser dimensionado para o atendimento total da demanda do painel (caso ocorra uma falha em um transformador, o outro deve ser capaz de suprir todo o painel). Chamada ligação em “L”.

Tabela 11: Demanda Total dos Painéis Usada no Dimensionamento dos Transformadores

	kW	kVar	kVA	fp	TRAFO		
PN-03	2385,12	1634,71	2891,55	0,825	3000	kVA	TF-01 A/B
PN-06	1308,33	838,11	1553,76	0,842	2000	kVA	TF-02 A/B
PN-09	1475,99	1538,40	2131,95	0,692	2200	kVA	TF-03 A/B

Para a análise das cargas essenciais, a plataforma foi colocada em modo de emergência. Nessa condição apenas o painel PN-09 ficou funcionando. No Anexo D temos a análise de cargas essenciais, que pode ser vista também na Tabela 12 aonde se encontra o resumo das cargas normais e essenciais.

Tabela 12: Resumo das Cargas

RESUMO DAS CARGAS				
Carga	kW	kVar	kVA	fp
Normal	14058,30	8281,17	16316,10	0,86
Essencial	1994,17	1832,07	2707,99	0,736

5.1. Dimensionamento do Sistema Elétrico

Geração Principal – O sistema de geração de energia elétrica de uma plataforma é constituído por dois turbogeradores, mas somente um fica em funcionamento, o outro fica em “standy by”. Foi obtida da análise de cargas uma demanda total da plataforma de 16316,10 kVA. Adotamos então dois turbogeradores de 26000 kVA, 6600 V, 60 Hz, com o objetivo de haver uma certa folga.

Geração de Emergência – O sistema de geração de emergência é constituído por dois diesel-geradores, com os dois em funcionamento. A demanda de energia pelas cargas essenciais, obtida a partir da análise de cargas, foi de 2707,99 kVA. O gerador adotado para suprir esta demanda tem a potência nominal de cada diesel-gerador de 1500 kVA, em 480 V, 60Hz.

Distribuição dos painéis - Todos os barramentos no nosso projeto são separados por um disjuntor denominado *tie*. Essa configuração é útil para manobra, pois não é necessário tirar todo o painel de operação para realizar manutenção, além de suportar o curto circuito.

O sistema de distribuição é constituído basicamente por um painel de distribuição de alta tensão de 6,6 kV (PN-01) que recebe a alimentação direta dos geradores principais (GE-01A/B). Este painel alimenta as cargas de alta tensão: CCM de alta tensão (PN-02), painéis das bombas de carga, painéis das bombas de injeção e transformadores de 6,6 / 0,48 kV.

A alimentação das cargas de baixa tensão de 0,48 kV de maior potência é feita diretamente pelos painéis de distribuição (CDC's) e as cargas de menor potência através dos CCM's.

Os transformadores abaixadores de tensão (6,6-0,48 kV) são alimentados pelo painel de distribuição de alta tensão e alimentam os CDCs de baixa tensão. Estes transformadores são os relacionados a seguir, conforme o calculado na análise de cargas:

- TF-01A/B - 3000 kVA, 6600 / 480 V, estes transformadores alimentam o PN-03 (CDC de produção, 1935 kW);
- TF-02A/B - 2000 kVA, 6600 / 480 V, estes transformadores alimentam o PN-06 (CDC de facilidades, 1653 kW);
- TF-03A/B - 2200 kVA, 6600 / 480 V, estes transformadores alimentam o PN-09 (CDC de cargas essenciais e de emergência, 1604 kW).

Todos os painéis de controle, distribuição, CDC, CCM e outros, devem ter apenas um nível de tensão de controle (principal, proveniente de fonte externa ou

derivação interna), admitindo-se uma segunda fonte externa, opcional, apenas para comunicação com ECOS e sistema de *shut-down*. Tensões diferentes para componentes específicos internos ao painel devem ter tensão de controle derivada da tensão de controle principal. A tensão para alimentação de resistores de aquecimento interno de geradores ou motores elétricos de alta tensão e motores de baixa tensão importantes e essenciais, deve ser derivada a partir do painel de iluminação essencial.

5.2. Filosofia de Operação

A condição de operação normal é a que será predominante durante a maior parte do tempo. Consiste em um gerador principal suprindo toda a demanda da plataforma.

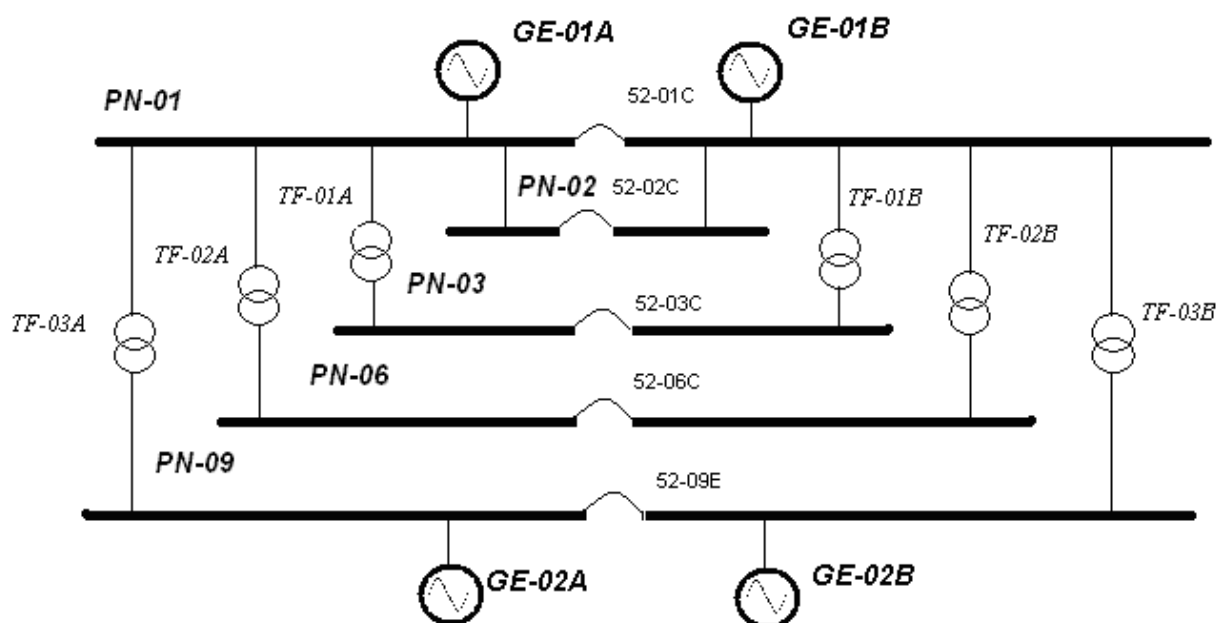


Figura 32: Diagrama Unifilar Simplificado

A geração principal da plataforma é composta por dois geradores de 26000 kVA cada (GE-01A e GE-01B) que geram a uma tensão nominal de 6,6 kV e alimentam o Centro de Distribuição de Cargas (CDC) principal da plataforma, PN-01. Em condições normais opera-se com apenas um gerador enquanto o outro permanece como reserva.

O CDC principal alimenta cargas de elevada potência, com destaque para as bombas de injeção de água de 2,7 MW. Deste painel parte todo o suprimento de energia da plataforma.

Quando em operação normal o disjuntor de interligação do PN-01 (52-01C) estará normalmente fechado. Em função disto, os disjuntores de interligação de barras de todos os outros painéis operam normalmente abertos.

No caso de falha ou manutenção em um dos disjuntores alimentadores de qualquer painel (CDC), o outro está dimensionado para suportar toda a demanda de energia do painel. Neste caso, o disjuntor *tie* irá funcionar fechado. Este tipo de ligação recebe o nome de “L aberto”.

Cada CDC de baixa tensão é alimentado por 2 (dois) transformadores, um para a barra A e outro para a barra B, com relação de transformação de 6,6 : 0,48 kV. No caso de falha em um dos alimentadores o outro transformador está dimensionado para suportar toda a demanda de energia do painel, o que é muito importante para o caso de uma falha em um dos transformadores.

A geração de emergência é composta por dois geradores de 1500 kVA cada (GE-02 A e GE-02 B) que geram a uma tensão nominal de 480 V. O gerador é ligado ao painel de cargas essenciais PN-09 que alimenta as cargas que não podem ficar sem energia tais como os carregadores de bateria, painéis de iluminação e UPS do sistema de controle. Em condições normais de operação, a geração de emergência fica desligada e a energia é suprida ao painel PN-09 pelo PN-01, através dos transformadores TF-03 A/B. Em caso de perda da geração principal, a geração de emergência deve entrar em operação automaticamente e no menor tempo possível. Faz parte da filosofia de operação a redundância da alimentação de todos os equipamentos relevantes à produção e operação da plataforma, desta forma todos os painéis CDC's apresentam dois ramos alimentadores.

6. Estudos do Fluxo de Potência

O estudo do fluxo de potência tem uma grande importância na determinação de condições ótimas de operação do sistema e nas ampliações de um sistema de potência. As informações obtidas de um estudo de fluxo de potência são o módulo e a fase da tensão em cada barra e a potência ativa e reativa que flui em cada linha, também pode estar incluída a corrente na forma polar ou cartesiana.

A complexidade que apresenta a obtenção de uma solução formal do problema do fluxo de potência num sistema advém das diferenças no tipo de dados especificados para as diferentes barras do sistema. Na barra *swing* são especificados o módulo e a fase da tensão. Nas barras dos geradores são, em geral, dadas a potência ativa fornecida e ao módulo da tensão. As cargas geralmente são descritas em termos de potência ativa e reativa.

Para solucionar esse sistema, utilizaremos o software DigSilent PowerFactory - versão 3.2, através dele é possível calcular o fluxo de potência, o curto circuito, os harmônicos. As soluções do Digsilent seguem um processo que vai atribuindo valores estimados às tensões desconhecidas e calculando uma das tensões de barra a partir dos valores estimados nas outras e das potências ativa e reativa especificadas. Dessa maneira, obtém-se um valor corrigido para uma barra, e que é usado para realizar outros cálculos análogos e obter uma tensão corrigida na próxima barra. Assim são percorridas todas as tensões do sistema até que todas estejam corrigidas, repetindo-se depois o processo até que as correções em cada barra sejam menores que um valor mínimo especificado [31].

Como essas equações são não lineares, uma solução iterativa é usada. O DigSilent usa o método Newton-Raphson completo e desacoplado [32].

O método de Newton-Raphson completo tem a vantagem de ser robusto, pois converge quase sempre e com poucas interações. Além disso, a convergência independe da dimensão do sistema. O método desacoplado é uma particularização do método de Newton-Raphson em que se deixa apenas a dependência entre a tensão e a potência (V e Q) e entre a potência ativa e o ângulo da tensão da barra (P e θ) [33]. Como a convergência do método Newton-Raphson depende dos valores iniciais dos

vetores desconhecidos, o método para a estimação desses valores desconhecidos são elaborados e implementados no Digsilent.

Para análise do fluxo de potência foi utilizada apenas operação normal.

6.1. Operação Normal

O gerador principal tem um fluxo de potência ativa de 12,62 MW e de potência reativa 4,72 MVar, o que confere com os dados da análise de cargas realizada através do Digsilent, tendo um carregamento de 27,92%.

A Tabela 13 mostra os valores de tensão dos barramentos dos painéis (potência ativa e reativa) obtidos da simulação da configuração em questão. Os resultados completos, assim como os diagramas unifilares montados no programa, podem ser encontrados no Anexo E.

Tabela 13: Panorama da Geração para Operação Normal

Painel	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Potência Aparente (MVA)
PN – 01	12,62	4,72	13,47
PN – 02 A	0,69	0,39	0,79
PN – 02 B	0,55	0,29	0,62
PN – 03 A	1,27	0,65	1,43
PN – 03 B	0,83	0,42	0,93
PN – 06 A	0,36	0,19	0,41
PN – 06 B	0,88	0,35	0,95
PN – 09 A	0,88	0,36	0,95
PN – 09 B	0,68	0,39	0,78

Conforme podemos observar na Tabela 14, os valores de tensão obtidos no fluxo de potência ficam dentro das margens de projeto (2% até 5%).

Tabela 14: Tensão em kV e em pu na Simulação

Painel	Tensão (kV)	Tensão (pu)
PN – 01	6,60	1,00
PN – 02 A	6,60	1,00
PN – 02 B	6,60	1,00
PN – 03 A	0,47	0,98
PN – 03 B	0,47	0,99
PN – 06 A	0,48	0,99
PN – 06 B	0,47	0,99
PN – 09 A	0,47	0,99
PN – 09 B	0,47	0,99

7. Análise de Curto-Circuito

O cálculo do curto-circuito é realizado durante todo o desenvolvimento do sistema de potência, considerando a fase do dimensionamento do sistema até a fase de seleção e topologia dos equipamentos. Os curtos-circuitos são perturbações severas, que ocorrem em decorrência da ruptura da isolamento entre as fases ou entre a fase e a terra. A magnitude das correntes de curtos-circuitos depende de vários fatores, dentre eles:

- tipo de curto-circuito;
- capacidade do sistema de geração;
- tipo de aterramento dos equipamentos;
- tipos de cargas.

7.1. Correntes de Curto-Circuito

A determinação das correntes de curtos-circuitos do sistema elétrico é fundamental para o:

- Dimensionamento das capacidades de interrupção ou ruptura dos equipamentos interruptores (chaves-fusíveis, disjuntores, religadores);
- Dimensionamento de transformadores de corrente;
- Ajustes de relés de proteção;
- Estudo de seletividade e coordenação.

Quando ocorre uma falta num circuito de potência, a corrente que circula é determinada pelas forças eletromotrizes internas das máquinas do circuito, por suas impedâncias e pelas impedâncias do circuito situadas entre as máquinas e a falta. A corrente que circula numa máquina síncrona imediatamente após a ocorrência de uma falta, a que circula algum poucos ciclos após, e a que persiste, ou corrente de regime permanente, diferem consideravelmente por causa do efeito da corrente de armadura no fluxo que gera a tensão na máquina. A corrente varia desde seu valor inicial até o valor de regime permanente. O comportamento de uma máquina síncrona durante o

curto-circuito pode ser descrito por três valores crescentes sucessivos da reatância do enrolamento do estator:

- A reatância subtransitória x_d'' e x_q'' que determina a corrente circulando durante os primeiros ciclos.
- A reatância transitória x_d' e x_q' que é condizente ao segundo ou mais ciclos, dependendo da construção da máquina.
- A reatância síncrona x_d e x_q que determina a corrente de curto-circuito circulando no estado permanente.

De acordo com a variação de reatância se define os valores de decaimento sucessivos da corrente de curto-circuito:

- I_k'' a corrente de curto-circuito subtransitória
- I_k' a corrente de curto-circuito transitória
- I_k a corrente de curto-circuito em regime permanente

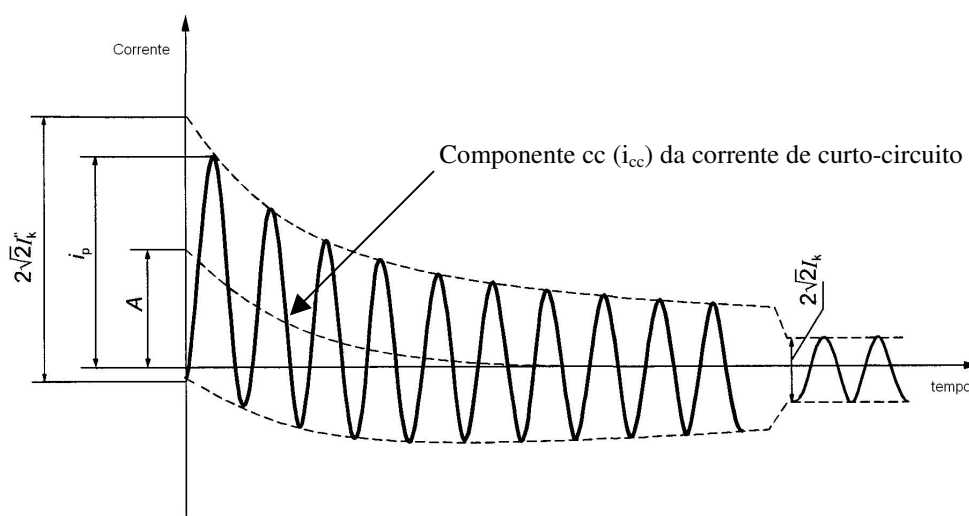


Figura 33: Corrente de Curto-Circuito Próxima a um Gerador em Curto com um Decaimento de Componente CA

I_k'' = Corrente inicial de curto-circuito

i_p = Pico de corrente de curto-circuito

I_k = Corrente de curto-circuito em regime permanente

A = Valor inicial da componente i_{cc}

A maioria das faltas que ocorrem no sistema de potência é assimétrica e pode consistir de curtos-circuitos, de faltas assimétricas através de impedâncias ou de condutores abertos. A falta simétrica ocorre na figura 34, já as faltas assimétricas ocorrem entre linhas (figura 35), entre linha e a terra (figura 36), ou podem ser entre duas linhas e a terra (figura 37). O caminho da corrente de falta de linha a linha ou de linha a terra pode ou não conter impedância. Um ou dois condutores abertos resultam em faltas assimétricas, seja pelo rompimento de um ou de dois condutores, seja pela ação de fusíveis ou outros dispositivos que podem não abrir as três fases simultaneamente.

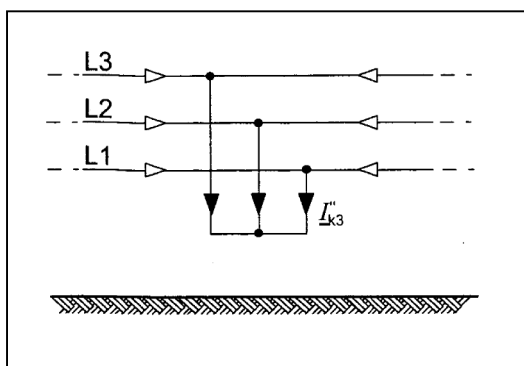


Figura 34: Curto-Circuito Trifásico

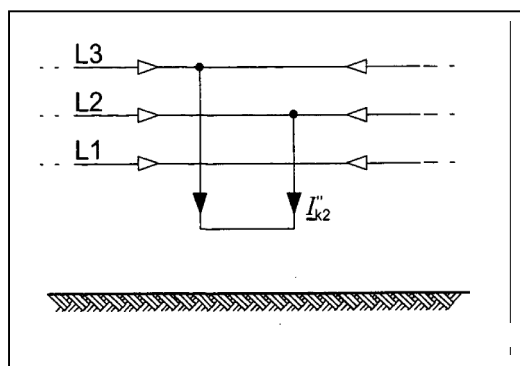


Figura 35: Curto-Circuito entre Duas Fases

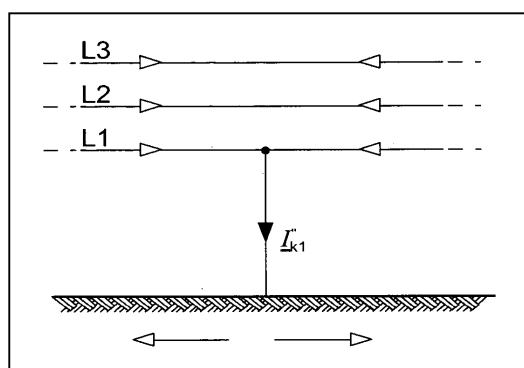


Figura 36: Curto-Circuito entre uma Fase e a Terra

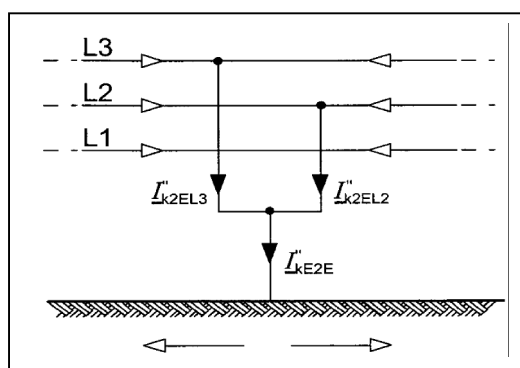


Figura 37: Curto-Circuito entre Duas Fases e a Terra

Geralmente, a magnitude da corrente assimétrica é empregada para determinar a capacidade de interrupção de chaves e disjuntores de proteção. Já o valor eficaz da componente simétrica é usado nos estudos de seletividade e coordenação.

Em sistemas de distribuição, os elementos que contribuem para o total da corrente de curto-circuito são as máquinas rotativas: geradores, as máquinas síncronas e os motores de indução [34].

Os geradores são acionados por uma fonte primária de movimento, tais como turbinas (neste projeto os geradores principais possuem este tipo de acionamento) e motores diesel (como é o acionamento do gerador de emergência). Quando um curto-circuito ocorre em um sistema alimentado por um gerador, o gerador continua a produzir tensão, pois a sua excitação de campo (corrente contínua que produz fluxo magnético constante no rotor) é mantida e o acionador continua a girar o eixo do gerador com velocidade considerável, próxima da nominal. Esta tensão produz uma corrente de curto-circuito que flui do gerador em direção à falta. Esta corrente de curto é limitada apenas pela impedância do gerador e pela impedância entre os terminais do gerador e o ponto da falta.

Os motores síncronos, por terem aspectos construtivos similares aos dos geradores, produzem corrente de curto em casos de falta. Em operação normal, os motores “puxam” da rede tensão e corrente alternadas. Quando há a ocorrência da falta e o motor deixa de ser alimentado, a inércia do eixo do motor faz com que seja produzida tensão nos enrolamentos da armadura, assim como acontece com os geradores. Desta forma, os motores síncronos atuam como geradores entregando corrente de curto-circuito por alguns ciclos após a falta. A magnitude desta corrente depende da potência do motor, do nível de tensão, da impedância da máquina e do sistema entre os terminais do motor e o ponto da falta.

Os motores de indução também contribuem para o total da corrente de curto-circuito. A diferença da contribuição deste tipo de máquina para as máquinas síncronas 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 ocorre com um transformador. Quando ocorre um curto-circuito no sistema e o motor deixa de ser alimentado, o fluxo induzido no rotor não pode desaparecer 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 corrente de curto-circuito proveniente da contribuição do motor

de indução decai muito mais rapidamente que a corrente produzida pelas máquinas síncronas devido à excitação de campo das máquinas síncronas ser constante e a excitação de campo dos motores de indução desaparecer alguns ciclos após o corte de alimentação pela rede. Na figura 38, os gráficos mostraram o comportamento da corrente de curto-circuito aplicado nos geradores, motores síncronos e de indução. O último gráfico mostra a corrente de curto-circuito total, que é a soma das contribuições dos três gráficos imediatamente acima.

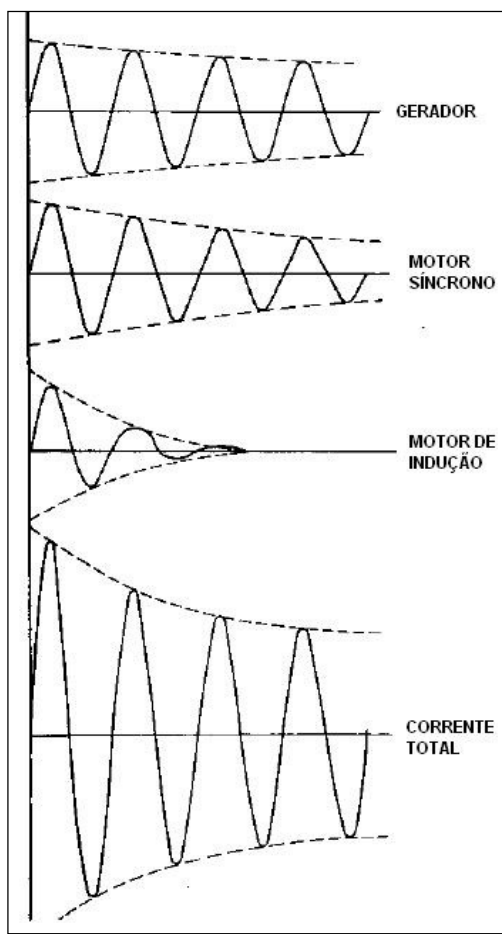


Figura 38: Os Gráficos do Comportamento de Correntes de Curto-Circuito

Através do cálculo do software DigSilent, que segue a norma IEC 60909 [29], foi analisado o cálculo das correntes de curto-circuito. Esse programa nos fornece a corrente inicial de curto-circuito (I_k''), o valor inicial da potência de curto-circuito (S_k''), o pico de corrente de curto-circuito (i_p), corrente simétrica de curto-circuito de interrupção (I_b) e corrente de curto-circuito permanente (I_k).

7.1.1. Corrente Inicial de Curto-Circuito (I_k'')

Nos casos práticos, é possível determinar a corrente de curto-circuito no local da falta com ajuda de uma fonte equivalente de tensão, que é a única tensão ativa no local da falta. Todos os alimentadores, máquinas síncronas e assíncronas são substituídos por suas impedâncias internas. Em complemento a isso, todas as linhas capacitivas e admitâncias paralelas dos sistemas não rotativos, com exceção da seqüência zero do sistema, são desprezadas.

O uso da fonte equivalente de tensão, usando um fator de tensão retirado da Tabela 15, é:

$$\frac{1}{\sqrt{3}} c V_n \quad (8)$$

Onde na equação 8:

c = fator de tensão

V_n = tensão nominal

Tabela 15: Fator de Tensão c (IEC 60909)

Tensão Nominal (V_n)	Corrente Máxima de Curto-Circuito (c_{max})	Corrente Mínima de Curto-Circuito (c_{min})
Baixa tensão (100 V até 1000 V)		
a) 230V / 400V	1.00	0.95
b) Acima de 400V até 1000V	1.05	1.00
Média Tensão (1kV a 35kV)	1.10	1.00
Alta Tensão (acima de 35 kV)	1.10	1.00

7.1.2. Valor da Potência Inicial de Curto-Circuito (S_k'')

Segundo a norma IEC 60909, a potência inicial do curto-circuito pode ser calculada como:

- No caso de ser uma falta simétrica:

$$S_k'' = \sqrt{3} \times V_n \times |I_k''| \quad (9)$$

- No caso de ser uma falta assimétrica:

$$S_k'' = \frac{V_n \times |I_k''|}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

7.1.3. Pico de Corrente de Curto-Circuito (i_p)

O pico de corrente no curto-circuito é o máximo possível que a corrente de curto-circuito pode alcançar. É definida como sendo na equação 11:

$$i_p = k \times \sqrt{2} \times I_k'' \quad (11)$$

O fator k por ser um razão R/X pode ser obtido da figura 39 ou calculado a partir da seguinte expressão:

$$k = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (12)$$

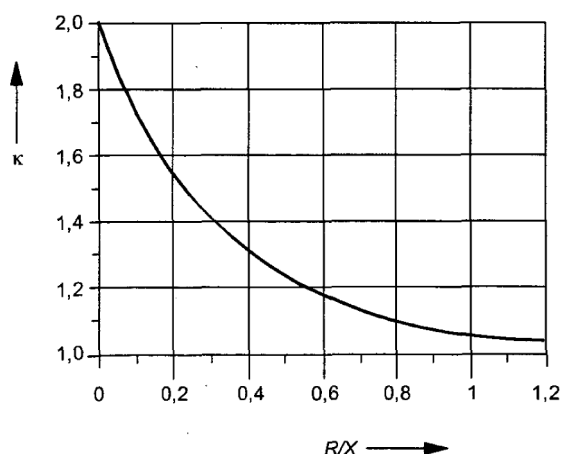


Figura 39: Fator k para Circuito em Série como Função da Razão R/X

Em sistema de potência, a razão R/X é calculada com o método de frequência equivalente:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \times \frac{f_c}{f} \quad (13)$$

$Z_c = R_c + jX_c$ é a impedância vista pelo local de curto-circuito a uma dada frequência f_c .

R_c = é a parte real do Z_c .

X_c = é a parte imaginária do Z_c .

f = frequência

f_c = * 20 Hz para frequência nominal 50 Hz

* 24 Hz para frequência nominal 60 Hz

7.1.4. Corrente Simétrica de Curto-Circuito de Interrupção (I_b)

É o valor eficaz de um ciclo da componente alternada simétrica no instante da separação dos contatos do dispositivo de seccionamento.

A corrente simétrica de curto-circuito de interrupção é calculada da seguinte forma:

$$\underline{I}_b = \underline{I}''_k - \sum_i \frac{\Delta U''_{Gi}}{cU_n / \sqrt{3}} (1 - \mu_i) \underline{I}''_{kGi} - \sum_j \frac{\Delta U''_{Mj}}{cU_n / \sqrt{3}} (1 - \mu_j q_j) \underline{I}''_{kMj} \quad (14)$$

Onde:

- μ_i, μ_j são os valores obtidos através da figura 40 para máquina síncrona (i) e assíncrona (j).
- $cU_n / \sqrt{3}$ é a fonte de tensão equivalente no local do curto-circuito
- $\Delta U''_{Gi}, \Delta U''_{Mj}$ são as quedas de tensão inicial no terminal das máquinas síncronas (i) e motores assíncronos (j)
- I''_{kGi}, I''_{kMj} são as correntes de curto-circuito inicial simétrica de uma máquina síncrona (i) e de um motor assíncrono (j)
- q_j é o valor dado pelo gráfico abaixo para motores assíncronos (j)

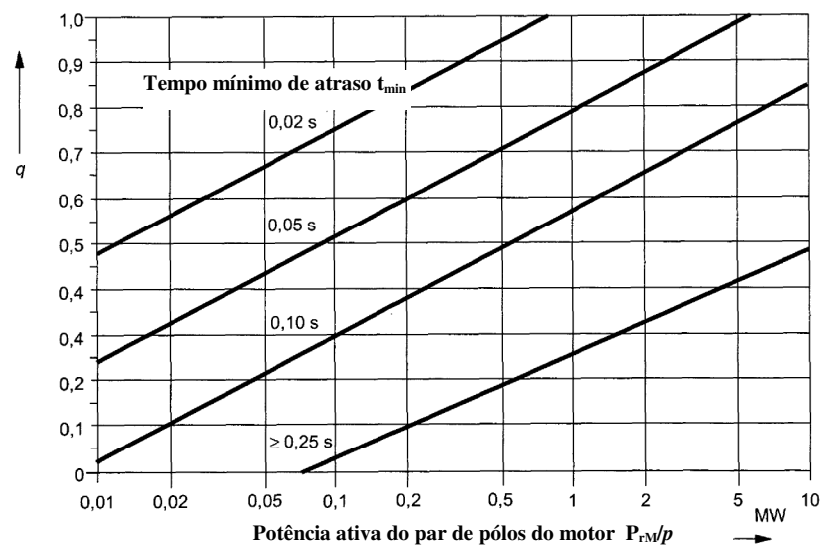


Figura 40: Cálculo do Fator q

Onde:

P_{rM} é a potência ativa em MW e p é o número de par de pólos do motor.

Na equação 14, o segundo e o terceiro termo da direita são influenciados pelas correntes do gerador e do motor.

Os parâmetros μ_i e μ_j dependem do tempo de atraso mínimo t_{\min} e a razão I_k''/I_{rG} , conforme mostrado na figura 41:

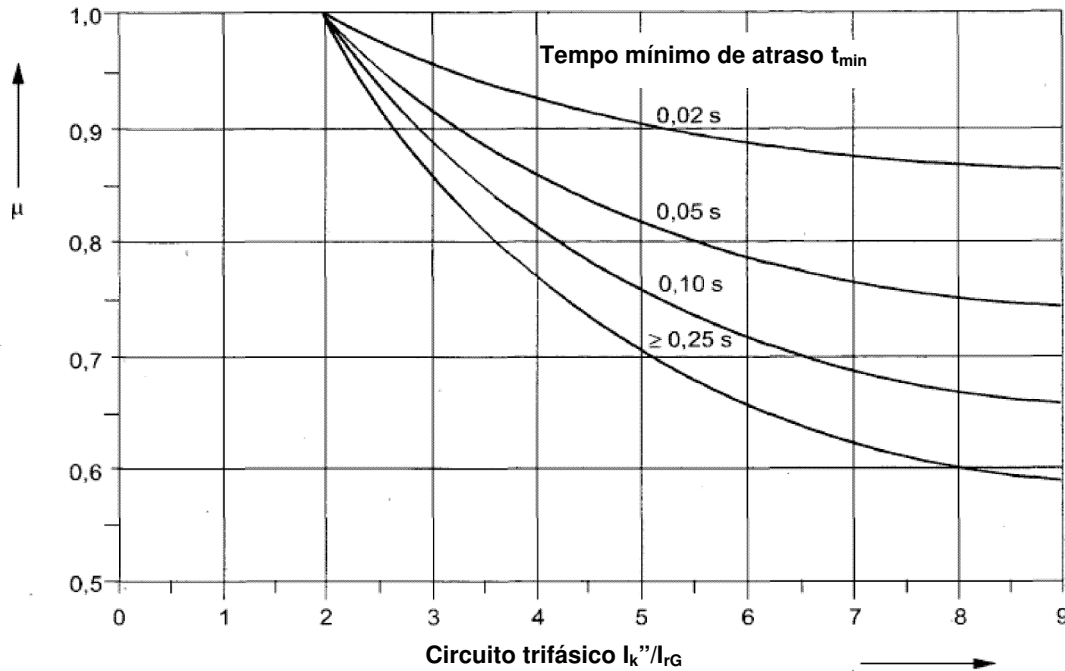


Figura 41: Cálculo do Fator μ

7.1.5. Corrente de Curto-Circuito Permanente (I_k)

O cálculo da corrente permanente de curto-circuito é menos exato do que para corrente inicial de curto-circuito.

Para o sistema de potência, existem duas opções para o cálculo da corrente permanente (I_k), uma de acordo com as normas IEC e outra pelo método DigSilent.

O método IEC 60909 calcula a corrente permanente como sendo:

$$I_k = I_k'' \text{ (sem motores)}$$

I_k'' é a corrente de curto simétrica inicial, calculada sem motores.

O método do DigSilent negligencia todos os motores assíncronos. A corrente de curto-circuito permanente é calculada como sendo:

$$I_k = I_k'' - \sum_i \frac{\Delta U''_{Gi}}{c U_n / \sqrt{3}} (1 - \mu_i) I''_{kGi} - \sum_j \frac{\Delta U''_{Mj}}{c U_n / \sqrt{3}} I''_{kMj} \quad (15)$$

Onde μ_i é calculada com $t_{\min} > 0.25$ segundos.

De acordo com o método IEC, a corrente permanente I_k pode ser maior do que a corrente de interrupção I_b . Este é, às vezes, o caso em sistema de potência com carga relativamente baixa de motores assíncronos.

O método usado neste trabalho para análise de curto-circuito será o da IEC 60909.

7.2. Análise dos Resultados Obtidos pela Simulação do Curto-Circuito

Para os estudos do curto-circuito trifásico foram adotadas as seguintes configurações:

- Um gerador principal ligado e sistema a operação normal
- Gerador de emergência alimentando as cargas essenciais e sistema em operação de cargas essencial

7.2.1. Um Gerador Principal Ligado

A primeira configuração levou aos resultados apresentados de forma resumida na Tabela 16.

Tabela 16: Resultados do Estudo de Curto-Circuito Trifásico

Painel	S_k'' (MVA)	I_k'' (kA)	I_p (kA)
PN-01	361,491	31,622	80,584
PN-02 A	361,491	31,622	80,584
PN-02 B	361,491	31,622	80,584
PN-03 A	37,467	45,065	125,752
PN-03 B	37,467	45,065	125,752
PN-06 A	30,252	36,387	101,631
PN-06 B	30,990	37,275	103,795
PN-09 A	30,157	36,273	101,353
PN-09 B	30,175	36,273	101,353

Onde,

I''_k Corrente inicial simétrica de falta trifásica;

I_p Corrente de Pico de curto-circuito;

S_k Valor da potência inicial de curto-circuito

Obs.: conforme mencionado acima, os resultados foram apresentados da maneira mais objetiva possível. Os dados detalhados de todas as configurações do estudo de curto-circuito, assim como os diagramas unifilares usados na simulação, podem ser encontrados no Anexo F. O painel PN-03 e o painel PN-09 tiveram suas cargas agrupadas em “painéis equivalentes” e “motores”, respectivamente, simplificando a entrada de dados do programa, o tamanho do banco de dados e mantendo-se fiel à realidade do projeto, pois as potências ativa e reativa demandadas da rede são as empregadas na Análise de Cargas.

Analisando os níveis de curto-circuito pode-se ver que a corrente de curto-circuito inicial simétrica trifásica nos painéis PN-01 e PN-02 se mantiveram sempre abaixo de 31,7 kA e nos painéis de baixa tensão não excedeu 50 kA, o valor limitante dos painéis de baixa tensão. Estes valores são importantes para determinar o nível de curto dos painéis elétricos e influencia diretamente sobre o custo do mesmo. Os fabricantes possuem normalmente disjuntores que suportam este nível de curto. Existem disjuntores que suportam níveis de curto mais elevados como 65 kA, por exemplo. Porém, adotar um sistema com níveis de curto maiores que 50 kA torna-se perigoso, pois a energia envolvida na ocasião de uma falta é muito elevada e encarece consideravelmente a fabricação do painel. Portanto, para este projeto, foi determinado que os níveis máximos para corrente de curto-circuito simétrica foram de 35 kA e 50 kA para os painéis de alta e baixa tensão, respectivamente.

7.2.2. Gerador de Emergência Alimentando as Cargas Essenciais

A outra condição de operação considera somente o painel de emergência (PN-09) alimentado pelo gerador de emergência e fornecendo energia às cargas essenciais. Para tanto, todos os disjuntores que não fazem parte desta configuração foram abertos, permanecendo fechado somente o disjuntor *tie* do barramento do PN-09. Na simulação que se encontra no Anexo G, não foi possível fazer o paralelismo entre os dois geradores de emergência. Para simular os dois geradores de emergência foi utilizado apenas um, mas com a potência nominal duplicada e a reatância pela metade.

A Tabela 17 mostra os resultados obtidos para a simulação:

Tabela 17: Estudo de Curto para a Configuração de Operação de Emergência

Painel	S_k'' (MVA)	I_k'' (kA)	I_p (kA)
PN-09 A	27,861	33,512	78,599
PN-09 B	27,861	33,512	78,582

Analisando os resultados obtidos, vê-se que a primeira configuração (operação com um gerador ligado) apresenta os maiores níveis de curto-circuito, devendo portanto ser a utilizada para dimensionar os dispositivos do sistema conforme mencionado anteriormente.

Na figura 42, estão os resultados obtidos na análise de carga e das simulações.

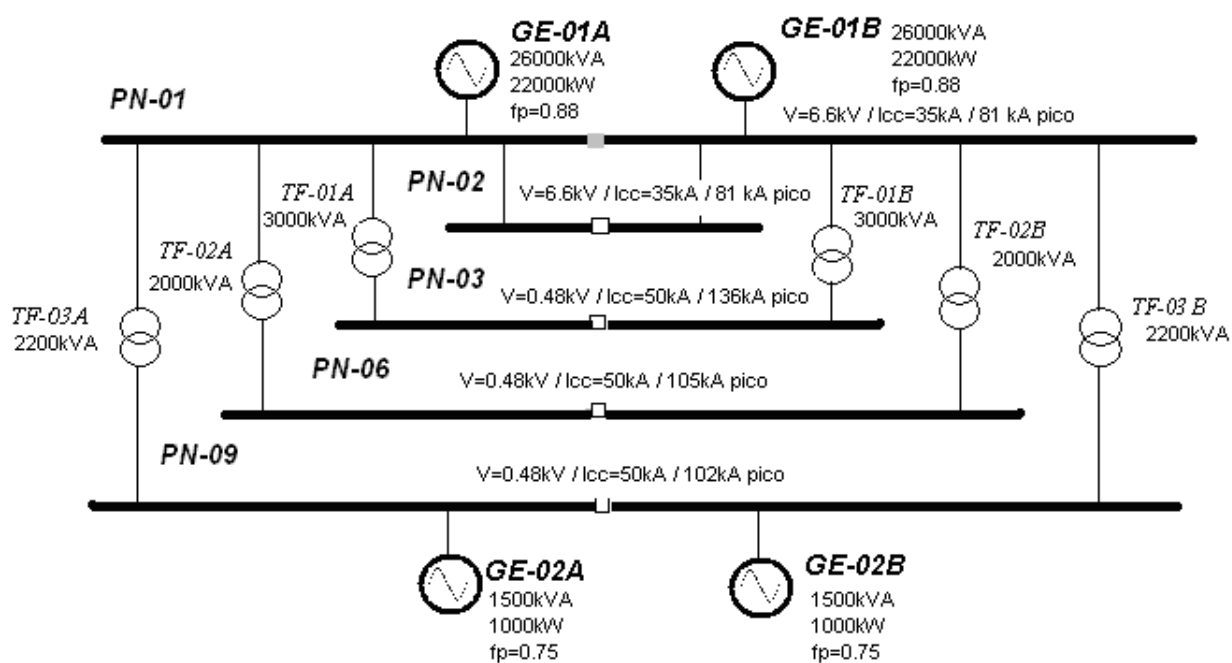


Figura 42: Diagrama do Sistema Elétrico de Uma Unidade Offshore

8. Conclusão

Este trabalho atingiu seu objetivo de mostrar um projeto de Sistema Elétrico de uma unidade de produção de Óleo e Gás Offshore quanto a sua operação, proteções elétricas, análise das cargas, níveis de tensão e o monitoramento do comportamento do fluxo de potência em condições normais de operação, emergência e curto-circuito.

Foram abordadas também algumas máquinas especiais, que utilizam os princípios da eletrônica de potência para sua operação tais como o VSD e as UPS's. Além de mostrar a classificação de áreas e os tipos de equipamentos elétricos adequados para operar nestas áreas.

Os resultados obtidos nas simulações realizadas estão de acordo com o projeto existente e próximo à realidade da unidade de produção offshore P-37.

9. Referências Bibliográficas

- [1] Thomas, José Eduardo. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.
- [2] Internet.Petrobrás
Endereço:http://www2.petrobras.com.br/Petrobras/portugues/plataforma/pla_tipo_plataforma.htm.
- [3] Especificação Técnica, E&P, Diretrizes para Projetos de Instalação Marítimas de Produção. Título: **Critérios Gerais para Projeto Básico em Eletricidade**, n° ET – 3000.00-5140-700-PCI-001.
- [4] Technical Specification, E&P. Unit: New Builing Semi-Submersible Unit P-37 – Brasoil Design. Title: **General Specification for Electrical System**, n° ET – 3000.00-5140-700-PPC-001.
- [5] Mascheroni, José M. (M. Eng°.); Lichtblau, Marcos (M. Eng°.); Gerardi, Denise (Eng^a). **Guia de Aplicação de Inversores de Freqüência**. Florianópolis: WEG Automação, 2004.
- [6] Shutts, David. **Perfect Harmonic**: Manual do usuário. Versão 2. São Paulo: ASI Robicon,1997.
- [7] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc (IEEE) Std 519. **Recommended Practice and Requirement for Harmonic Control in Electric Power Systems**. New York: 1992.
- [8] Mussoi, Fernando Luiz Rosa. **Tiristor SCR**: Disciplina Eletrônica de Potência Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Gerência Educacional de Eletrônica, 2002.

- [9] International Electrotechnical Commission. **UPS - Method of Specifying the Performance and Tests**: IEC-62040-3, 1999.
- [10] Dutra, Diógenes; Diniz, Helena. **Programa Trainees Petrobrás – 2003**: Proteção Sistemas Elétricos das Plataformas Marítimas. Rio de Janeiro: 2003. Revisão 1.
- [11] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Guide for Generator Ground Protection**: Std C37.101, 2006.
- [12] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc (IEEE) Std 242. **Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems**. New York: 2001.
- [13] Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. **Análise dos Métodos de Proteção Contra Falhas à Terra nos Sistemas de Distribuição Aterrados, Não Aterrados e Compensados**. Pullman, WA USA.
- [14] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses**: Std C37.97, 1979.
- [15] International Electrotechnical Commission. **Electrical Relays**: IEC-60255, 2000.
- [16] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus**: Std C37.90, 2005.
- [17] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays**: Std 37.112-1996.
- [18] International Electrotechnical Commission. **Single Input Energizing Quantity Measuring Relays with Dependent Specified Time**: IEC-255-4, 1979.
- [19] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Guide for AC Generator Protection**: Std C37.102, 2006.

- [20] ELETROBRÁS. **Diretrizes do Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 2007.
- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers**: Std C37.91, 2000.
- [22] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Guide for AC Motor Protection**: Std C37.96, 2000.
- [23] Internet. **Sítio do Subcomitê SC-31 do COBEI (Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Telecomunicações e Iluminação)**. Endereço <http://cobei-sc-31-atmosferas-explosivas.blogspot.com/>
- [24] International Electrotechnical Commission. **Electrical apparatus for explosive Gas atmospheres**: IEC-60079-0, 2000.
- [25] International Electrotechnical Commission. **Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres - Part 1: Flameproof Enclosures**: IEC-60079-1, 2000.
- [26] International Electrotechnical Commission. **Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres - Part 2: Pressurized or Purged**: IEC-60079-2, 2000.
- [27] International Electrotechnical Commission. **Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres - Part 7: Increased Safety**: IEC-60079-7, 2000.
- [28] International Electrotechnical Commission. **Electrical installations in ships**: IEC-60092-502, 1999.
- [29] International Electrotechnical Commission. **Short-Circuit Current in Three Phase AC Systems**: IEC 60909-0, 1988.

- [30] API-RP-610, "Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries". Washington, DC: American Petroleum Institute
- [31] **DigSilent PowerFactory Manual**. Versão 13.2. Germany: 2007
- [32] Stevenson, William D. Jr.. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. EUA: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1978.
- [33] Borges, Carmen Lucia Tancredo. **Análise de Sistemas de Potência**. Rio de Janeiro: EE-UFRJ, Departamento de Eletrotécnica, 2005.
- [34] Beeman, Donald. **Industrial Power Systems Handbook**. New York.

Anexo A

Tabela ANSI de Identificação de Componentes Elétricos

Nr	Denominação
1	Elemento Principal
2	Função de partida/ fechamento temporizado
3	Função de verificação ou interbloqueio
4	Contator principal
5	Dispositivo de interrupção
6	Disjuntor de partida
7	Disjuntor de anodo
8	Dispositivo de desconexão da energia de controle
9	Dispositivo de reversão
10	Chave de sequência das unidades
11	Reservada para futura aplicação
12	Dispositivo de sobrevelocidade
13	Dispositivo de rotação síncrona
14	Dispositivo de subvelocidade
15	Dispositivo de ajuste ou comparação de velocidade ou frequência
16	Reservado para futura aplicação
17	Chave de derivação ou descarga
18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração
19	Contator de transição partida-marcha
20	Válvula operada eletricamente
21	Relé de distância
22	Disjuntor equalizador
23	Dispositivo de controle de temperatura
24	Relé de sobreexcitação ou Volts por Hertz
25	Relé de verificação de Sincronismo ou Sincronização
26	Dispositivo térmico do equipamento
27	Relé de subtensão
28	Reservado para futura aplicação
29	Contator de isolamento
30	Relé anunciador
31	Dispositivo de excitação
32	Relé direcional de potência

33	Chave de posicionamento
34	Chave de sequência operada por motor
35	Dispositivo para operação das escovas ou curto-circuitar anéis coletores
36	Dispositivo de polaridade
37	Relé de subcorrente ou subpotência
38	Dispositivo de proteção de mancal
39	Reservado para futura aplicação
40	Relé de perda de excitação
41	Disjuntor ou chave de campo
42	Disjuntor/ chave de operação normal
43	Dispositivo de transferência manual
44	Relé de sequência de partida
45	Reservado para futura aplicação
46	Relé de desbalanceamento de corrente de fase
47	Relé de sequência de fase de tensão
48	Relé de sequência incompleta/ partida longa
49	Relé térmico
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
51	Relé de sobrecorrente temporizado
52	Disjuntor de corrente alternada
53	Relé para excitatriz ou gerador CC
54	Disjuntor para corrente contínua, alta velocidade
55	Relé de fator de potência
56	Relé de aplicação de campo
57	Dispositivo de aterramento ou curto-circuito
58	Relé de falha de retificação
59	Relé de sobretensão
60	Relé de balanço de tensão/ queima de fusíveis
61	Relé de balanço de corrente
62	Relé temporizador
63	Relé de pressão de gás (Buchholz)
64	Relé de proteção de terra
65	Regulador
66	Relé de supervisão do número de partidas
67	Relé direcional de sobrecorrente
68	Relé de bloqueio por oscilação de potência
69	Dispositivo de controle permissivo

70	Reostato elétricamente operado
71	Dispositivo de detecção de nível
72	Disjuntor de corrente contínua
73	Contator de resistência de carga
74	Função de alarme
75	Mecanismo de mudança de posição
76	Relé de sobrecorrente CC
77	Transmissor de impulsos
78	Relé de medição de ângulo de fase/ proteção contra falta de sincronismo
79	Relé de religamento
80	Reservado para futura aplicação
81	Relé de sub/ sobrefrequência
82	Relé de religamento CC
83	Relé de seleção/ transferência automática
84	Mecanismo de operação
85	Relé receptor de sinal de telecomunicação
86	Relé auxiliar de bloqueio
87	Relé de proteção diferencial
88	Motor auxiliar ou motor gerador
89	Chave seccionadora
90	Dispositivo de regulação
91	Relé direcional de tensão
92	Relé direcional de tensão e potência
93	Contator de variação de campo
94	Relé de desligamento
95 à 99	Usado para aplicações específicas

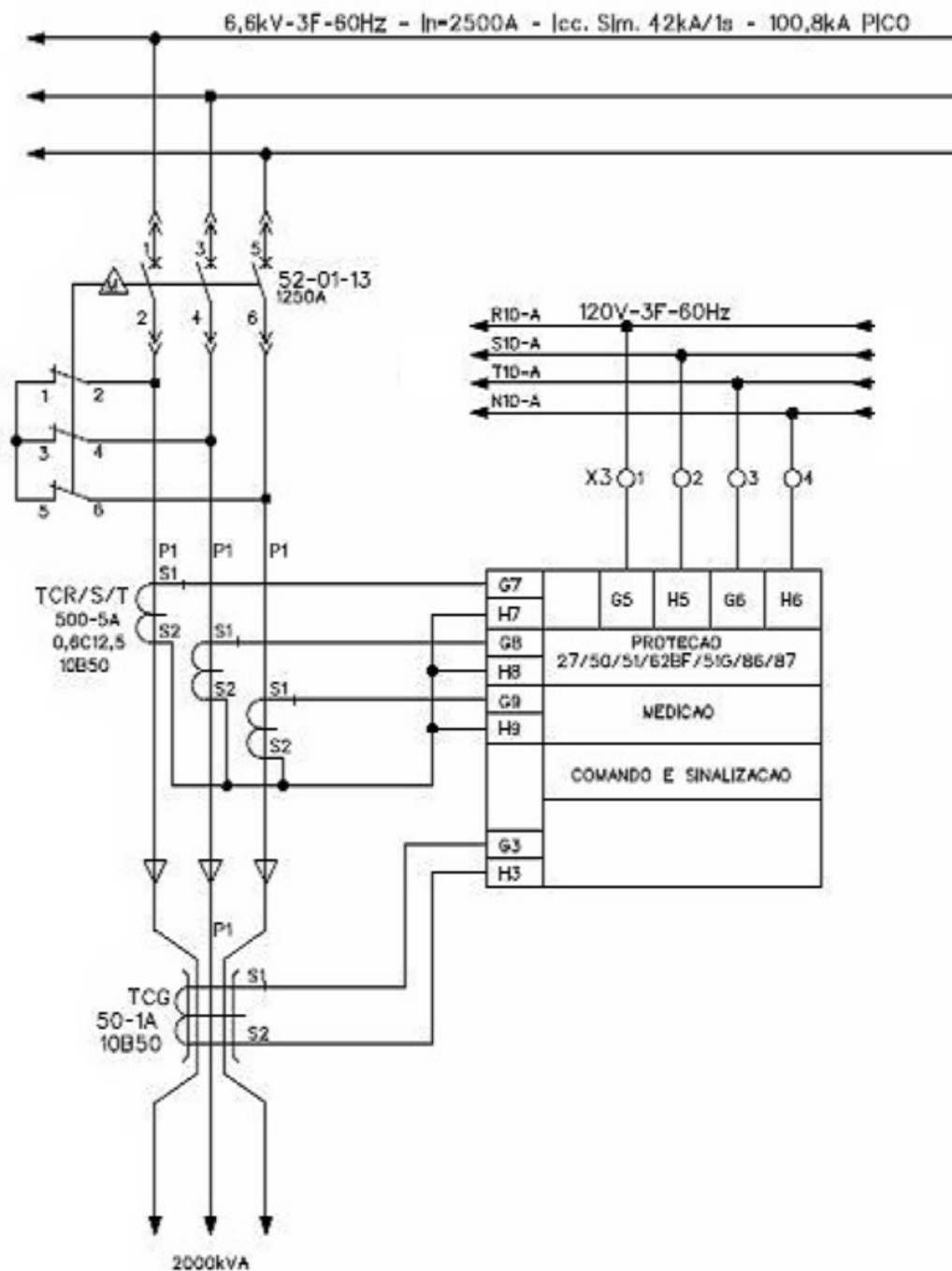
COMPLEMENTO DA TABELA ANSI:

- **50N** Sobrecorrente instantâneo de neutro;
- **51N** Sobrecorrente temporizado de neutro;

- **50G** Sobrecorrente instantâneo de terra (comumente chamado 50GS);
- **51G** Sobrecorrente temporizado de terra (comumente chamado 51GS e com tempo definido ou curvas inversas);
- **50BF** Relé de proteção contra falha de disjuntor (também chamado de 50/62 BF);
- **51Q** Relé de sobrecorrente temporizado de seqüência negativa com tempo definido ou curvas inversas;
- **51V** Relé de sobrecorrente com restrição de tensão;
- **51C** Relé de sobrecorrente com controle de torque;
- **59Q** Relé de sobretensão de seqüência negativa;
- **59N** Relé de sobretensão residual ou sobretensão de neutro (também chamado de 64G);
- **64** Relé de proteção de terra pode ser por corrente ou por tensão. Os diagramas unifilares devem indicar se este elemento é alimentado por TC ou por TP, para que se possa definir corretamente. Se for alimentado por TC, também pode ser utilizado como 51 ou 61. Se for alimentado por TP, pode-se utilizar uma unidade 59N ou 64G. A função 64 também pode ser encontrada como proteção de carcaça, massa-cuba ou tanque, sendo aplicada em transformadores de força até 5 MVA;
- **67 N** Relé de sobrecorrente direcional de neutro (instantâneo ou temporizado);
- **67 G** Relé de sobrecorrente direcional de terra (instantâneo ou temporizado);
- **67Q** Relé de sobrecorrente direcional de seqüência negativa;
- **87T** Diferencial de transformador (pode ter 2 ou 3 enrolamentos);
- **87G** Diferencial de geradores;
- **87GT** Proteção diferencial do grupo gerador-transformador;
- **87 B** Diferencial de barras;
- **87M** Diferencial de motores.

Anexo B

Representação da Ligação do Relé de Medição e Proteção



Anexo C

Análise de cargas normais

Tag do equipamento	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal	
							Pd (kW)	Qd (kVar)
PN-11							280	210
PN-514022							61	306
PN-25							227	170,25
PN-GE-01A-03								
PN-C-UC-513401A							155	294
M-B-500001	100	110	0,87	0,90	1,00	0,10	11,11111	6,296957
M-B-511103	68,18	75	0,87	0,90	1,00	0,10	7,575556	4,293265
M-B-512402	81,82	90	0,87	0,90	1,00	0,10	9,091111	5,15217
						Total	689,7778	689,9924

PN-09 - 0,48 kV -CDC Essencial/Emergência - Barra B								
Tag do equipamento	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal	
							Pd (kW)	Qd (kVar)
PN-10							258	193,5
PN-26							140	105
PN-GE-01B-03							112,5	187,5
PN-C-UC-513401B							155	294
M-B-512501C	81,82	90	0,87	0,90	1,00	1,00	90,91111	51,5217
M-B-533611	168,18	185	0,87	0,90	1,00	0,10	18,68667	10,59022
M-B-GG-524102	100	110	0,87	0,90	1,00	0,10	11,11111	6,296957
						Total	786,2089	848,4089

Anexo D

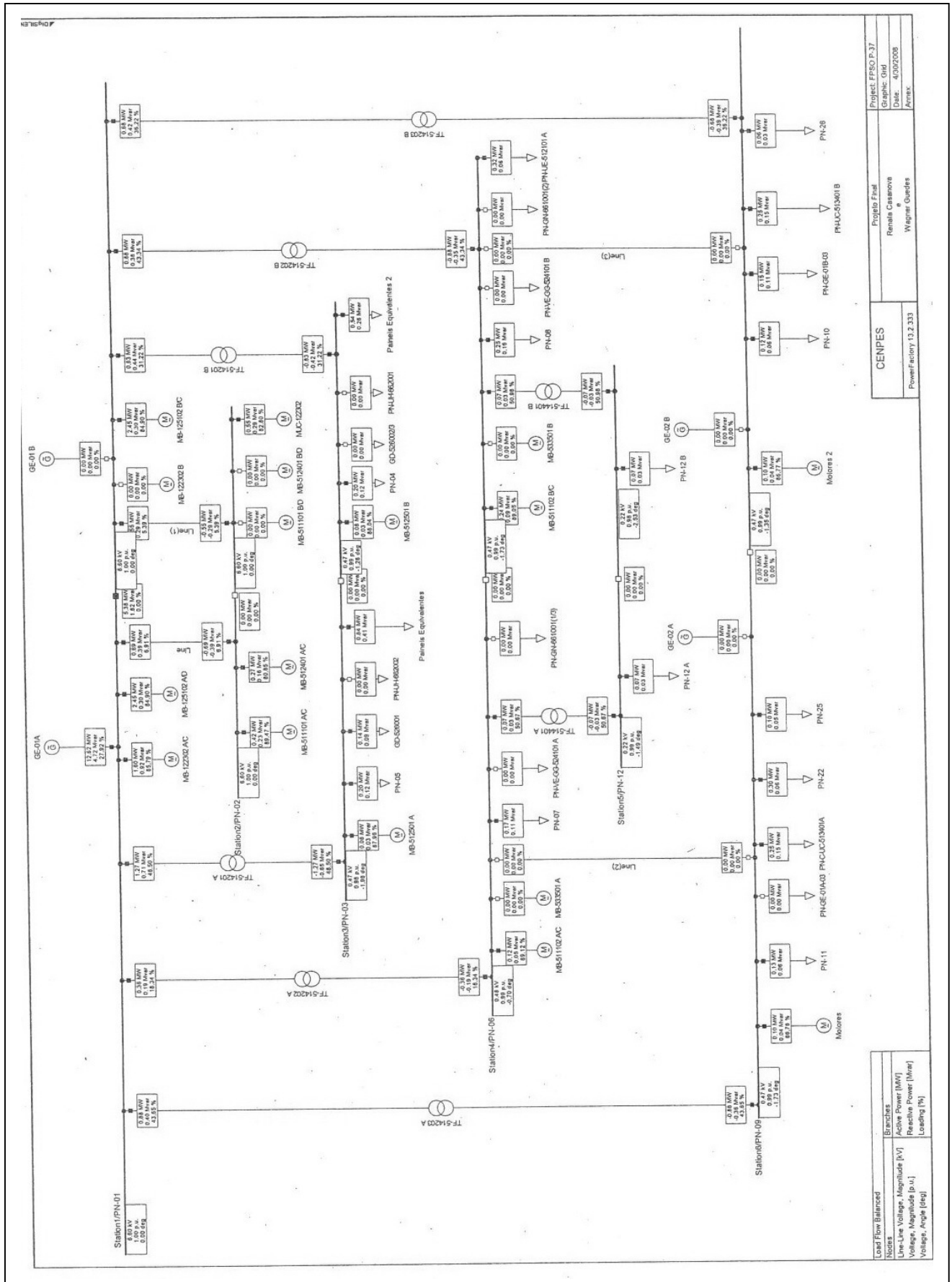
Análise de cargas essenciais

Nota: cargas indicadas pela cor cinza estão em stand-by

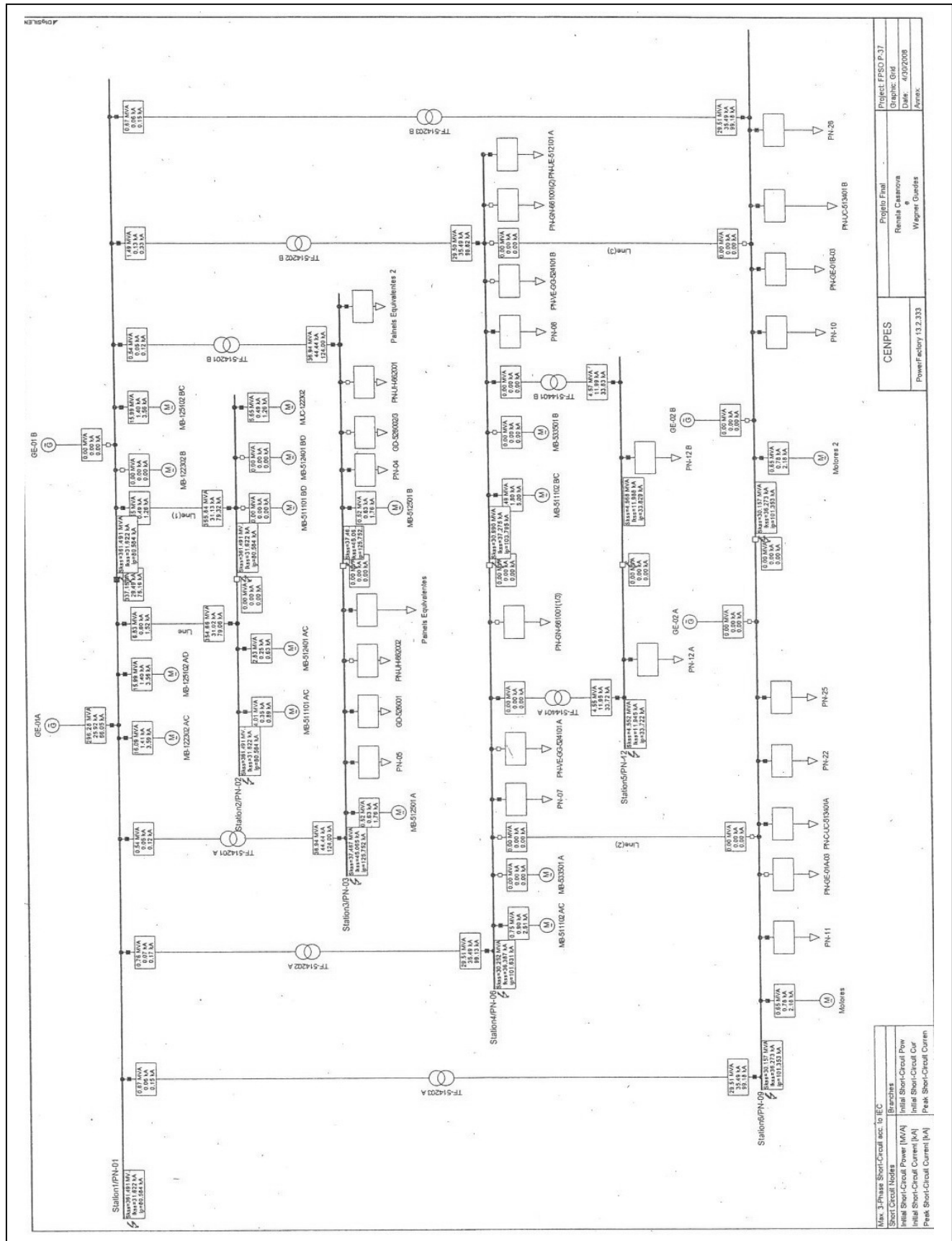
PN-09 - 0,48 kV –CDC Essencial/Emergência - Barra A								
Tag do equipamento	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal	
							Pd (kW)	Qd (kVar)
PN-11							280	210
PN-514022							61	306
PN-25							227	170,25
PN-GE-01A-03								
PN-C-UC-513401A							155	294
M-B-500001	100	110	0,87	0,90	1,00	1,00	111,111	62,970
M-B-511103	68,18	75	0,87	0,90	1,00	1,00	75,756	42,933
M-B-512402	81,82	90	0,87	0,90	1,00	1,00	90,911	51,522
						Total	939,778	831,674

PN-09 - 0,48 kV –CDC Essencial/Emergência - Barra B								
Tag do equipamento	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal	
							Pd (kW)	Qd (kVar)
PN-10							258	193,5
PN-26							140	105
PN-GE-01B-03							112,5	187,5
PN-C-UC-513401B							155	294
M-B-512501C	81,82	90	0,87	0,90	1,00	1,00	90,911	51,522
M-B-533611	168,18	185	0,87	0,90	1,00	1,00	186,867	105,902
M-B-GG-524102	100	110	0,87	0,90	1,00	1,00	111,111	62,970
						Total	1054,389	1000,393

Anexo E

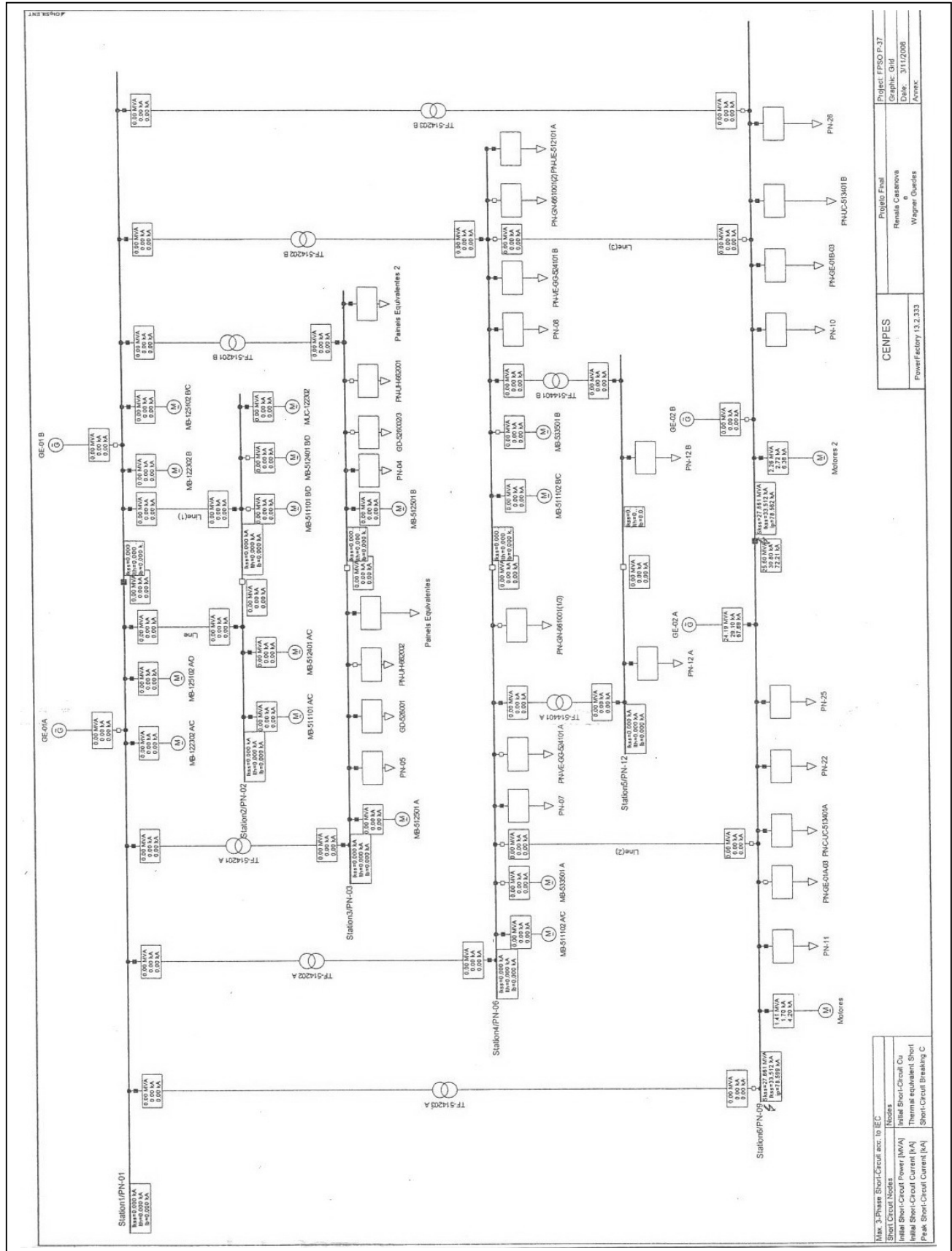


Anexo F



Grid: Grid	System Stage: Grid				Annex:				/ 2		
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	C- Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA]	Ik" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
PN-06 S3.0 TF-514202 A Station1 TF-514401 A Stations5 MB-511102 A/C	0.48 PN-06(1) Station1 Stations5	0.00	0.00	1.05	36.39 kA 0.00 kA 35.49 kA 0.00 kA 0.00 kA 0.75 MVA	-89.50 0.00 90.37 0.00 95.71	101.63 kA 0.00 kA 99.13 kA 0.00 kA 2.51 kA	35.66	29.65	29.15	41.94
PN-06(1) S3.0 TF-514202 B Station1 TF-514401 B Stations5 MB-511102 B/C	0.48 PN-06 Station1 Stations5	0.00	0.00	1.05	37.27 kA 0.00 kA 35.49 kA 0.00 kA 1.80 kA 1.49 MVA	-89.37 0.00 90.37 0.00 95.71	103.80 kA 0.00 kA 98.82 kA 0.00 kA 5.00 kA	35.83	29.78	29.21	39.09
PN-12 S3.0 TF-514401 A	0.22 PN-12(1) Station4	0.00	0.00	1.05	11.95 kA 0.00 kA 11.95 kA 4.55 MVA	-89.92 0.00 90.08	33.72 kA 0.00 kA 33.72 kA	11.95	4.55	9.57	18.16
PN-12(1) S3.0 TF-514401 B Station4 Station6	0.22 PN-12 Station4	0.00	0.00	1.05	11.99 kA 0.00 kA 11.99 kA 4.57 MVA	-89.91 0.00 90.09	33.83 kA 0.00 kA 33.83 kA	11.99	4.57	9.39	17.12
PN-09 S3.0 TF-514203 A Motores	0.48 PN-09(1) Station1	0.00	0.00	1.05	36.27 kA 0.00 kA 35.49 kA 0.65 MVA	-89.52 0.00 90.37 95.71	101.35 kA 0.00 kA 99.18 kA 2.18 kA	35.63	29.62	29.15	41.97
PN-09(1) S3.0 TF-514203 B Motores 2	0.48 PN-09 Station1	0.00	0.00	1.05	36.27 kA 0.00 kA 35.49 kA 0.65 MVA	-89.52 0.00 90.37 95.71	101.35 kA 0.00 kA 99.18 kA 2.18 kA	35.63	29.62	29.15	41.97

Anexo G



		DIGILENT PowerFactory 13.2.333		Project: Date: 3/11/2008						
Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation according to IEC										
Asynchronous Motors always considered		Grid Identification automatic		3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents						
Decaying Aperiodic Component Using Method B		Conductor Temperature Userdefined No		Short-Circuit Duration Breaker Time Fault Clearing Time (ith) c-Voltage Factor Userdefined No						
Grid: Grid		System Stage: Grid		Annex: / 1						
rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	C- Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
Station6 PN-09 S3.0 Motores GE-02 A	0.48 0.00 PN-09(1)	0.00 0.00 1.05	27.86 MVA 2.26 MVA 1.41 MVA 24.19 MVA	33.51 kA 2.72 kA 1.70 kA 29.10 kA	-81.84 95.71 95.71 -81.47	78.60 kA 6.72 kA 4.20 kA 67.69 kA	21.63 17.99	13.67	22.68	
PN-09(1) S3.0 Motores 2	0.48 0.00 PN-09	0.00 0.00 1.05	27.86 MVA 25.60 MVA 2.26 MVA	33.51 kA 30.80 kA 2.72 kA	-81.84 98.38 95.71	78.58 kA 72.21 kA 6.38 kA	21.90 18.21	29.10	33.84	