

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AQUILES ROSSONI

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

ANÁLISE DE SISTEMA DE PROTEÇÃO INDUSTRIAL

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DE SISTEMA DE PROTEÇÃO INDUSTRIAL
ESTUDO DE CURTO CIRCUITO, COORDENAÇÃO E
SELETIVIDADE

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Arturo Suman Bretas

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AQUILES ROSSONI

**ANÁLISE DE SISTEMA DE PROTEÇÃO INDUSTRIAL
ESTUDO DE CURTO CIRCUITO, COORDENAÇÃO E
SELETIVIDADE**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela Virginia Polytechnic Institute and State University

– Blacksburg, Estados Unidos

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela Virginia Polytechnic Institute and State University - Blacksburg,
Estados Unidos

Luiz Marciano Rosenbach, Braskem S.A

Engenheiro Eletricista pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do
Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Porto Alegre, dezembro de 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, principalmente, aos meus pais e irmãos pelo apoio psicológico e financeiro. Em segundo lugar, aos meus amigos e à minha namorada pelo carinho e atenção. Agradeço também, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica. Entre os professores, um agradecimento especial ao meu orientador neste trabalho, professor Arturo Suman Bretas. No ambiente profissional, fico grato pela oportunidade de estágio provida pela equipe de manutenção e confiabilidade da Braskem S.A, em especial, pela atenção do meu supervisor, engenheiro Luiz Marciano Rosenbach.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de analisar o sistema de proteção de um conjunto de equipamentos fundamentais para uma planta industrial petroquímica. O trabalho consiste na realização de estudos de curto circuito e na avaliação da coordenação e seletividade do sistema. Com base nos estudos, foram analisadas as vulnerabilidades do sistema e foram propostas melhorias.

Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Sistema de Proteção Industrial. Estudo de Curto Circuito. Coordenação e Seletividade.

ABSTRACT

This document aims to analyze the protection system of a fundamental set of equipments for a petrochemical plant. The document consists of performing short circuit studies and of evaluating the system coordination and selectivity. Based on these studies, the vulnerabilities of the system were analyzed and improvements were suggested.

Keywords: Electrical Engineering. Industrial Protection System. Short Circuit Study. Coordination and Selectivity.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	MOTIVAÇÃO DO ESTUDO	12
2.1	RESUMO DO CAPÍTULO 2	15
3	CURTOS CIRCUITOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	17
3.1	TERMOS E DEFINIÇÕES	17
3.1.1	TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS RL SÉRIE	18
3.1.2	CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE CURTO CIRCUITO	20
3.2	FALTAS TRIFÁSICAS SIMÉTRICAS EM MÁQUINAS SÍNCRONAS	21
3.3	COMPONENTES SIMÉTRICOS	24
3.3.1	ANÁLISE POR COMPONENTES SIMÉTRICOS	24
3.3.2	FALTAS ASSIMÉTRICAS TRIFÁSICAS	27
3.4	FALTAS EM UM SISTEMA DE POTÊNCIA	28
3.5	RESUMO DO CAPÍTULO 3	29
4.	ANÁLISE DE CURTO CIRCUITO NO SISTEMA ESTUDADO	31
4.1	CÁLCULO DE CURTO CIRCUITO POR COMPONENTES SIMÉTRICOS	31
4.1.1	LIMITAÇÕES DO MÉTODO	33
4.1.2	PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO	33
4.1.3	CÁLCULO DE CURTO CIRCUITO NO SISTEMA ESTUDADO	39
4.2	ESTUDO DE CURTO CIRCUITO UTILIZANDO SOFTWARE ETAP.....	45
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	48
4.4	RESUMO DO CAPÍTULO 4	50
5	PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA	51
5.1	CONFIABILIDADE E ZONAS DE PROTEÇÃO	51
5.2	PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO	53
5.2.1	PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE TEMPORIZADA E INSTANTÂNEA	54
5.2.2	REQUISITOS E CONSIDERAÇÕES DE PROTEÇÃO	61
5.3	COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE NO SISTEMA ESTUDADO	65
5.3.1	CONSIDERAÇÕES PARA O SISTEMA EXISTENTE.....	71
5.3.2	CONSIDERAÇÕES PARA O NOVO PAINEL.....	74
5.4	RESUMO DO CAPÍTULO 5	78
6	CONCLUSÃO.....	80
7	BIBLIOGRAFIA	82
	APÊNDICE A: DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DA PLANTA	83
	APÊNDICE B: DIAGRAMA UNIFILAR SIMULADO NO PROGRAMA	85

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Configuração do QGDF-31 no momento da falha e sequência de eventos (adaptado de [8])	15
Figura 2: Foto do QGDF-31 após ocorrência do curto circuito (retirado de [8]).....	16
Figura 3: Configuração interna do QGDF-31 (retirado de [8]).....	16
Figura 4: Corrente em função do tempo em um circuito RL (adaptado de [9]).....	19
Figura 5: Corrente de curto circuito nos terminais de um gerador a vazio, sem a componente CC (retirado de [9])	20
Figura 6: a) Curto circuito trifásico com contato com a terra, b) curto circuito trifásico, c) curto circuito entre fases sem contato com a terra, d) curto circuito entre fase e neutro, e) curto circuito entre fases sem contato com a terra, d) curto circuito entre fase e neutro, e) curto circuito entre fase e condutor de proteção, f) curto circuito entre fases com contato com a terra, g) falha dupla para terra, h) curto circuito entre fase e terra (adaptado de [6])	21
Figura 7: Os três conjuntos de fasores que constituem os componentes simétricos dos três fasores desequilibrados (adaptado de [9])	24
Figura 8: Diagrama de reatâncias para o cálculo da corrente de curto circuito subtransitória.....	42
Figura 9: Diagrama de reatâncias para o cálculo da corrente de interrupção de disjuntores ...	43
Figura 10: Diagrama de reatâncias para o cálculo da corrente de curto circuito de regime permanente. a) Lado C do QGDF-31, b) Lado D do QGDF-31.....	44
Figura 11: Método Device Duty para o lado C (QGDF-31-C) e o lado D (QGDF-31-D).....	47
Figura 12: Método 30 cycle Network para o lado C (QGDF-31-C) e o lado D (QGDF-31-D)	48
Figura 13: Curva tempo-corrente característica dos relés (adaptado de [5]).....	56
Figura 14: Curva corrente-tempo típica de dispositivos de atuação eletromagnética (adaptado de [5])	57
Figura 15: Curva corrente-tempo característica de dispositivos com elementos de estado sólido (retirado de [5]).....	58
Figura 16: Coordenação de relés de sobrecorrente temporizados (adaptado de [4]).....	59
Figura 17: Relés de sobrecorrente instantâneos associados com relés de sobrecorrente temporizados (adaptado de [4])	61
Figura 18: Curva de suportabilidade de transformador de óleo (501 a 5000 kVA) (adaptado de [5])	64
Figura 19: Curva de suportabilidade de transformador a seco (501 a 5000 kVA) (adaptado de [5])	65
Figura 20: Unifilar do sistema estudado na configuração do momento da falta	67
Figura 21: Coordenograma da configuração dos elementos de proteção do painel QGDF-31. Alimentação dos motres L-229DM e L-229CM	68
Figura 22: Coordenograma da configuração dos elementos de proteção do painel QGDF-31. Motores L-230DM e L-230CM.....	69
Figura 23: Unifilar da configuração atual do sistema estudado	72
Figura 24: Proposta de alteração da configuração dos elementos de proteção considerando a condição atual do sistema estudado.....	73
Figura 25: Melhorias a serem consideradas no projeto do novo painel	75
Figura 26: Representação gráfica das formas de separação de compartimentos (adaptado de [2])	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reatâncias típicas de máquinas síncronas. Valores em pu da potência nominal da máquina (retirado [9]).....	27
Tabela 2: Valores típicos de reatâncias de máquinas síncronas e de indução. Valores em pu da potência nominal de cada máquina (retirado de [5])	35
Tabela 3: Constantes de condutores de cobre com espaçamento de 0,305m (1ft) (adaptado de [5])	36
Tabela 4: Reatâncias para cálculo de curto circuito subtransitório e para cálculo da corrente de interrupção de disjuntores.....	37
Tabela 5: Fatores de multiplicação para a corrente de interrupção de disjuntores.....	38
Tabela 6: Grandezas base para cada nível de tensão	39
Tabela 7: Cabos do sistema elétrico considerados na elaboração dos diagramas de impedâncias	40
Tabela 8: Resultado dos cálculos de corrente de curto circuito para o painel QGDF-31.....	44
Tabela 9: Comparação entre os resultados obtidos através dos dois métodos utilizados.....	48
Tabela 10: Dados dos disjuntores do painel QGDF-31	49
Tabela 11: Proteção de sobrecorrente máxima para transformadores (adaptado de [5])	62
Tabela 12: Formas de separação para painéis elétricos (adaptado de [2])	78

1. INTRODUÇÃO

A proteção do sistema elétrico de uma planta industrial tem o objetivo de manter o sistema operando de forma segura e de proteger as pessoas e os elementos do sistema [6]. O sistema de proteção deve ser projetado de forma que atue de forma rápida e retire de operação somente os componentes em falha, além de restabelecer o sistema o mais rápido possível. Para garantir estas características, é necessário que os componentes de proteção estejam bem dimensionados e configurados para atuar de acordo com as características da planta. Analisando financeiramente, estas considerações estão relacionadas à necessidade de uma alta disponibilidade dos equipamentos, que resultam em maior produção, e o desejo de se evitar perdas materiais devido aos danos nos elementos do sistema.

As plantas industriais petroquímicas necessitam de um alto consumo de energia elétrica. Portanto, as suas unidades de produção possuem subestações próprias que alimentam equipamentos de alta potência, conforme pode ser observado no diagrama unifilar simplificado do Apêndice A. Para manter em operação e proteger os elementos do sistema elétrico, é necessário um sistema de proteção adequado. As atuações indevidas da proteção do sistema elétrico geram perdas na produção. Adicionalmente, a não atuação ou mau dimensionamento do sistema de proteção resulta em perdas materiais, relacionadas a danos nos equipamentos. Portanto, os dois modos de falha do sistema de proteção estão associados a perdas financeiras. Além do mais, a ausência de proteção pode causar danos às pessoas, cujo valor é imensurável.

Em uma planta industrial, normalmente há equipamentos críticos que requerem atenção prioritária. De forma geral, os equipamentos críticos são os necessários para o funcionamento básico da planta. Uma vulnerabilidade no sistema de proteção destes equipamentos representa uma probabilidade de perda elevada. Este trabalho é motivado por

uma vulnerabilidade encontrada no sistema de proteção de um painel que alimenta equipamentos críticos de uma planta petroquímica. A ocorrência de um curto circuito neste painel gerou uma interrupção longa de produção e causou danos materiais para a empresa.

O trabalho tem os objetivos principais de realizar um estudo de curto circuito no painel danificado, comparando os valores com a capacidade dos elementos de proteção e barramentos, e de verificar a configuração dos dispositivos na ocorrência da falha, realizando uma análise da coordenação e seletividade do sistema de proteção. Adicionalmente, há o objetivo de desenvolver uma metodologia de cálculo de curto circuito para todo o sistema elétrico através do método de componentes simétricos e considerações sobre instalações elétricas industriais. Os resultados da metodologia também são comparados com simulações de um *software* [11] de sistema de potência.

O estudo pretende contribuir para verificar os níveis de curto circuito no painel, comparando com as capacidades dos equipamentos e barramentos existentes, e servir de referência para a obtenção do novo painel. Adicionalmente, o trabalho propõe uma nova configuração dos atuais elementos de proteção e aponta aspectos a serem considerados no projeto do sistema de proteção do novo painel. Além do mais, o trabalho busca contribuir para uma melhor compreensão do sistema elétrico ao apresentar uma forma simples de verificação do nível de curto circuito nas demais barras da planta. Esta simplificação pode ser útil na análise de efeito de substituição ou adição de novas cargas. Para finalizar, a metodologia aplicada para o cálculo de curto circuito pode servir de auxílio para o estudo em demais instalações industriais.

2. MOTIVAÇÃO DO ESTUDO

O painel estudado neste trabalho está inserido em um sistema elétrico de uma planta petroquímica composta por duas unidades. As unidades são independentes e produzem polietileno através de diferentes tecnologias. O Apêndice A demonstra o diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico da planta. A planta é alimentada por duas entradas de 34,5 kV definidas como *LINHA-C* e *LINHA-D*, responsáveis pelo fornecimento de energia para a planta *C* e *D*, respectivamente. Os equipamentos de cada unidade também são diferenciados em seus nomes pelas letras *C* e *D*.

As considerações estruturais são importantes na definição do sistema de proteção. A forma como os barramentos de potência são conectados nas subestações, por exemplo, tem uma profunda influência na proteção do sistema [4].

Um sistema radial é o mais aplicado em complexos industriais, sendo formado por um arranjo com uma fonte e múltiplas cargas. Este é o sistema mais econômico de se construir, mas, ao perder uma única fonte, todos os usuários ficam fora de operação. A proteção dos sistemas de potência radial apresentam uma complexidade menor, em que a corrente de falha somente pode ir em uma direção, da fonte para a falha [4].

A confiabilidade do sistema elétrico na planta petroquímica estudada é aumentada com a utilização de disjuntores de ligação. Caso o fornecimento de uma das linhas seja interrompido ou um transformador de alimentação não possa operar, a potência para as duas unidades é suprida com o uso de apenas um transformador. Para permitir esta configuração, os transformadores são dimensionados para suportar a carga total da planta [5]. Este modelo também é aplicado na alimentação dos demais painéis da planta. De forma geral, os disjuntores de ligação são de contato normalmente aberto e sua posição é alterada caso houver interrupção da alimentação pela fonte principal [4]. Esta configuração é denominada como rede radial com entradas redundantes [6].

Um contato normalmente fechado (*NF*) é o contato que está fechado quando o relé ou disjuntor está desenergizado e um contato normalmente aberto (*NA*) é o que permanece aberto nesta condição. Ao energizar o relé, os contatos alteram seus estados [4].

O painel estudado é o denominado por *QGDF-31*, demonstrado no diagrama unifilar simplificado. O sistema elétrico do painel alimenta dois motores de cada unidade, sendo que a produção de cada unidade é dependente do funcionamento de seus respectivos motores.

O barramento principal da subestação com tensão de *13,8 kV (PNAT-11)* alimenta os transformadores *TRU-CTC* e *TRU-CTD*, que rebaixam a tensão para *680 V* na entrada do painel *QGDF-31*. A baixa tensão alternada fornece energia para os conversores, que fornecem uma alimentação em corrente contínua para os motores *L229-CM* e *L229-DM*. Por outro lado, dois transformadores rebaixam a tensão de *680 V* para *480 V* e alimentam os conversores dos motores *L230-CM* e *L-230DM*. Conforme o padrão de uma rede radial com entradas redundantes, os transformadores *TRU-CTC* e *TRU-CTD*, individualmente, têm a capacidade de fornecer potência para todo o painel. Além do mais, a confiabilidade do sistema é aumentada com a duplicação de todos os conversores. Ao ocorrer uma falha em um dos conversores, o seu respectivo equipamento reserva entra em operação [8].

A motivação para este trabalho foi a última ocorrência de falha neste painel. Neste evento, o transformador *TRU-CTC* estava alimentando isoladamente o painel *QGDF-31*. Além do mais, o motor *L230-CM* estava utilizando o seu conversor reserva por motivos de manutenção do conversor mestre. Nesta data, ocorreu a parada da unidade *D* por atuação do disjuntor do transformador (*TRB-4D*) que alimenta o conversor do motor *L230-DM*. O electricista responsável avaliou visualmente o transformador e os painéis e não verificou nenhuma falha. Posteriormente, o electricista abriu manualmente o disjuntor de entrada do painel onde está localizado o conversor do *L230-DM* e reenergizou o disjuntor do

transformador. Neste momento, houve a explosão deste disjuntor e conseqüente fogo no respectivo cubículo do painel *QGDF-31* [8].

Neste momento, houve a atuação da proteção de retaguarda, localizada no barramento principal da subestação (*PNAT-11*), que alimenta o transformador *TRU-CTC*. A não atuação do disjuntor de ligação do painel *QGDF-31* resultou na interrupção do fornecimento de energia para o motor *L229-CM*. Desta forma, as duas unidades pararam. A Figura 1 mostra a seqüência de eventos da falha, a Figura 2 é uma foto do painel após a ocorrência da falha e a Figura 3 é o desenho interno do painel [8].

O evento gerou perda de produção nas duas unidades e um custo de recuperação parcial do painel. Houve perda total dos cubículos do barramento *D*, alimentados pelo transformador *TRU-CTD*. Atualmente, o painel está sendo alimentado somente pela entrada *C*. A aquisição de um novo painel e dutos de barras para as entradas do transformador está em fase de projeto. O objetivo é retornar a condição com duplicidade de conversores [8].

A análise de falha detectou um problema de refrigeração no painel do transformador (*TRB-4D*) que alimenta o *L230-DM*. Este defeito na refrigeração fez com que o sobreaquecimento danificasse o isolamento deste transformador. Com a evolução da redução do isolamento, foi possível a formação de um curto circuito [8].

A queima do disjuntor motivou um estudo de curto circuito para verificar se as capacidades dos equipamentos de proteção do painel estão de acordo com as correntes máximas de curto circuito. A atuação da proteção de retaguarda no barramento da subestação principal sem a atuação dos disjuntores de ligação e de entrada do painel motivou o estudo de coordenação e seletividade do sistema de proteção. Os estudos serão úteis para a verificação da condição do sistema de proteção que continua operando, bem como, para servir de apoio ao projeto do novo painel.

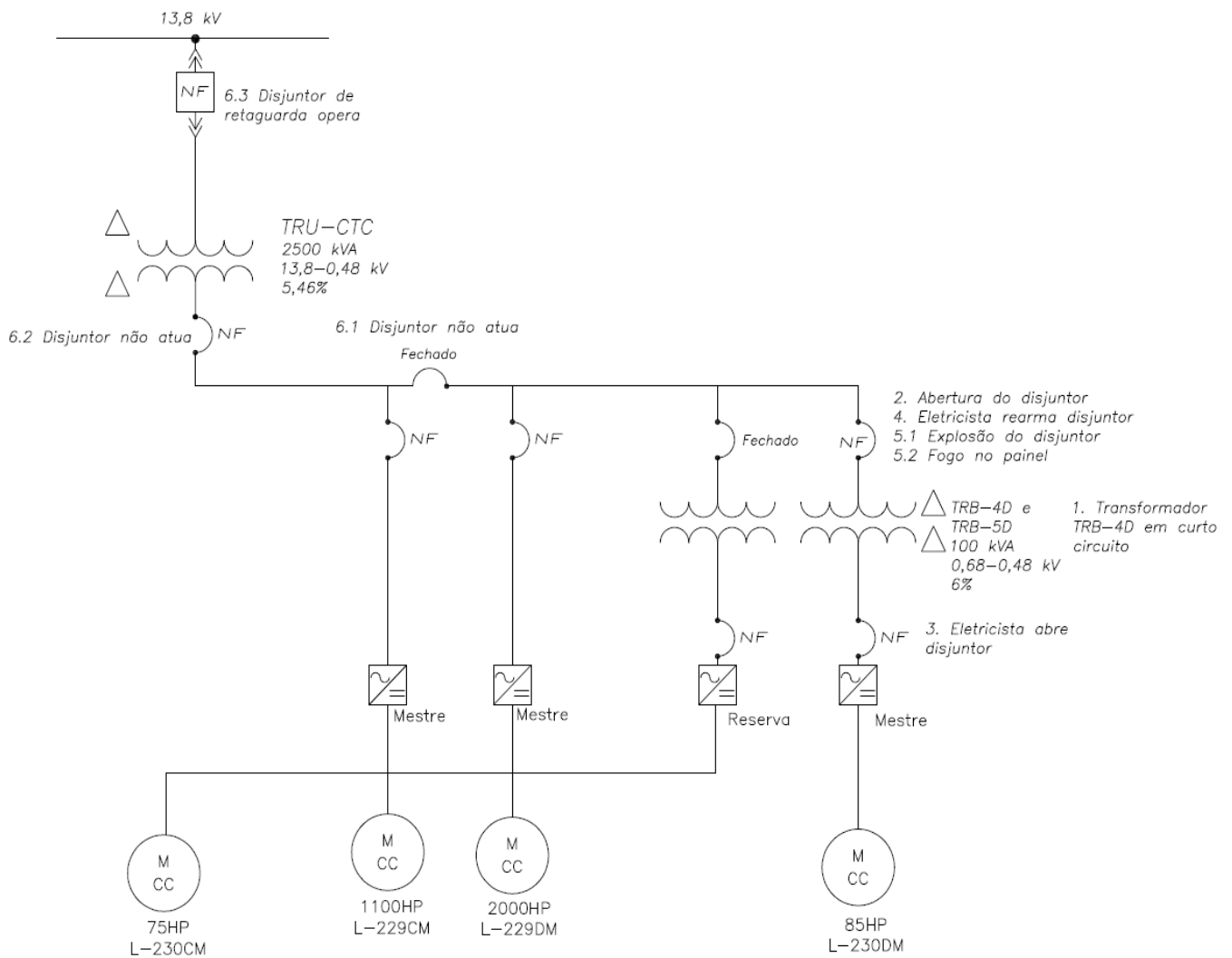


Figura 1: Configuração do QGDF-31 no momento da falha e sequência de eventos (adaptado de [8])

2.1 RESUMO DO CAPÍTULO 2

Neste capítulo, é apresentado o sistema elétrico da planta industrial onde está localizado o sistema de proteção a ser estudado. O sistema de proteção é referente a um painel de baixa tensão que alimenta quatro motores fundamentais para o funcionamento das duas unidades da planta. Posteriormente, é descrita a última ocorrência de falha no painel, motivando estudos de curto circuito e de coordenação e seletividade. O objetivo é verificar a adequação do atual sistema de proteção e servir de referência para a obtenção de um novo painel.



Figura 2: Foto do QGDF-31 após ocorrência do curto circuito (retirado de [8])



Figura 3: Configuração interna do QGDF-31 (retirado de [8])

3 CURTOS CIRCUITOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

3.1 TERMOS E DEFINIÇÕES

A *IEC 60 909* define um curto circuito como uma conexão condutora através de uma impedância ou resistência relativamente baixa, entre dois ou mais pontos de um circuito, que estão normalmente em potenciais elétricos diferentes [6].

Entre as possíveis causas de curtos circuitos, é possível mencionar o sobreaquecimento devido a correntes excessivas, as descargas parciais devido a sobretensões e os arcos elétricos devido, principalmente, à umidade e à presença de impurezas no ar. As faltas podem gerar interrupções do fornecimento de energia, destruição dos componentes do sistema e desenvolvimento de estresses mecânicos e térmicos não aceitáveis para operação dos equipamentos elétricos [6].

Ao ocorrer uma falha em um 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 elétrica rotativa imediatamente após a ocorrência de uma falta, a corrente que circula alguns ciclos após a falta e a corrente de regime permanente diferem consideravelmente entre si. Essa diferença é função do efeito da corrente de armadura no fluxo que gera a tensão da máquina [9].

Os dispositivos de proteção devem isolar as falhas, evitar dano material e pessoal e proporcionar o menor tempo de interrupção possível do sistema. Para não ocorrer danos materiais nos equipamentos de proteção, é necessário que os mesmos tenham capacidade de suportar as máximas correntes de curto circuito. Analogamente, os cabos e barramentos do sistema devem suportar os estresses mecânicos e térmicos das máximas correntes de curto circuito [5]. Portanto, é necessário determinar o valor inicial da corrente para definir

disjuntores e barramentos com capacidades suficientes de suportar esta carga momentânea [9]. Considerando que as máquinas rotativas têm impedância com característica indutiva, é necessário abordar os transitórios de circuitos RL .

3.1.1 Transitórios em circuitos RL série

Para abordar o problema de cálculo da corrente inicial, é considerada uma tensão alternada aplicada a um circuito com valores constantes de resistência e reatância, definidas pela equação diferencial (Equação 1) [9]:

$$|V_m| \sin(\omega t + \alpha) = R_i + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Cuja solução é dada por (Equação 2):

$$i = \frac{|V_m|}{|Z|} \left[\sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-\frac{Rt}{L}} \sin(\alpha - \theta) \right] \quad (2)$$

Onde $|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ e $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$.

O primeiro termo da Equação 2 varia senoidalmente com o tempo e é considerado o valor de regime permanente da corrente. O segundo termo não é periódico e é conhecido como componente de corrente contínua (CC) da corrente resultante. Este componente decresce exponencialmente com uma constante L/R . O componente CC pode ter qualquer valor desde zero até $|V_m|/|Z|$, dependendo do valor instantâneo da tensão quando o circuito é fechado e do fator de potência do circuito. A Figura 4 mostra o comportamento da corrente no circuito RL com o fechamento da chave em $\alpha - \theta = -\pi/2$. Nesta situação é obtida a máxima corrente transitória CC [9].

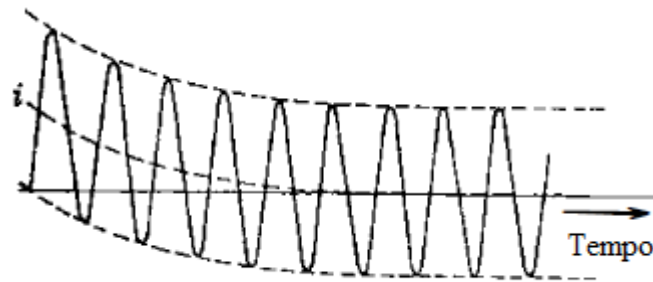


Figura 4: Corrente em função do tempo em um circuito RL (adaptado de [9])

O gerador de corrente alternada (CA) consiste em um campo magnético rotativo que gera uma tensão no enrolamento de armadura, o qual é uma resistência e uma reatância. A corrente que circula quando o gerador é submetido a um curto circuito é análoga àquela quando uma tensão alternada é aplicada subitamente à associação série de uma resistência e uma reatância. As diferenças estão relacionadas ao efeito da corrente de armadura no campo girante [9].

Estando as tensões geradas em uma máquina trifásica defasadas de 120 graus elétricos, ao ocorrer um curto circuito trifásico, as componentes CC de cada fase serão diferentes. A curva da corrente de fase em função do tempo para um gerador a vazio, sem a componente CC, é mostrada na Figura 5 [9].

Em uma máquina síncrona, o fluxo no entreferro é muito maior no instante do curto circuito do que após alguns ciclos da rede. A redução do fluxo é causada pela força magnetomotriz da corrente na armadura, fenômeno conhecido por reação de armadura. O fluxo no entreferro é devido à força magnetomotriz resultante do enrolamento CC e da corrente de armadura. A diminuição do fluxo no entreferro resulta na redução da corrente de armadura [9].

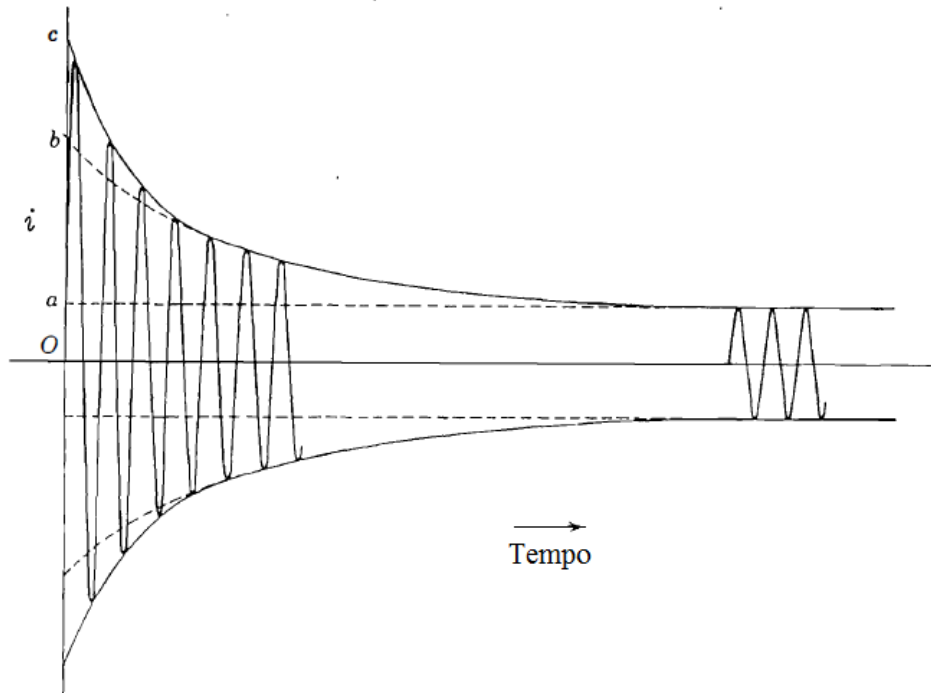


Figura 5: Corrente de curto circuito nos terminais de um gerador a vazio, sem a componente CC (retirado de [9])

3.1.2 Classificação dos tipos de curto circuito

O curto circuito trifásico com contato para a terra é uma falta onde há a conexão de todos os condutores para terra. As três tensões na posição do curto circuito são iguais a zero, havendo um carregamento simétrico dos condutores [6]. Portanto, o curto circuito trifásico é conhecido como uma falta simétrica.

Nos demais tipos de curtos circuitos, não há um carregamento simétrico dos condutores e nem todas as tensões são iguais a zero. Os cálculos dos demais tipos de curtos circuitos exigem a decomposição do sistema com o auxílio dos componentes simétricos. A Figura 6 ilustra os principais tipos de curtos circuitos em redes trifásicas [6].

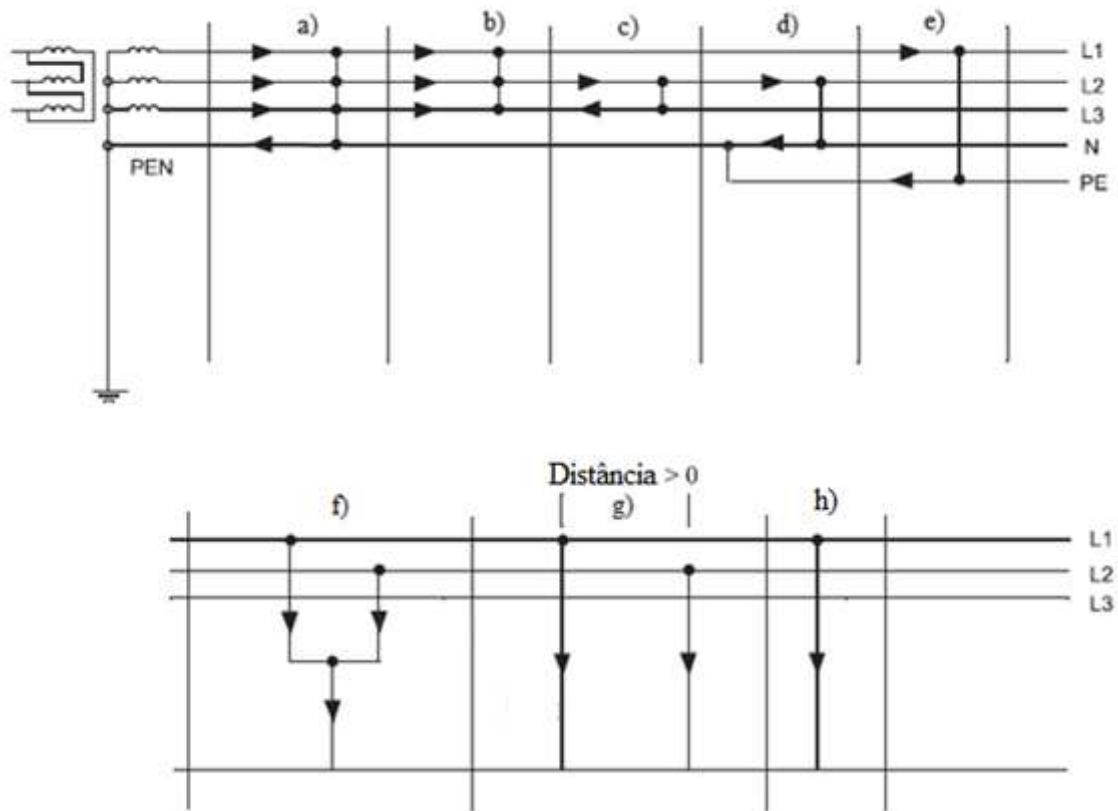


Figura 6: a) Curto circuito trifásico com contato com a terra, b) curto circuito trifásico, c) curto circuito entre fases sem contato com a terra, d) curto circuito entre fase e neutro, e) curto circuito entre fase e condutor de proteção, f) curto circuito entre fases com contato com a terra, g) falha dupla para terra, h) curto circuito entre fase e terra (adaptado de [6])

3.2 FALTAS TRIFÁSICAS SIMÉTRICAS EM MÁQUINAS SÍNCRONAS

As reatâncias utilizadas nos cálculos de curto circuito são as reatâncias do eixo direto. A reatância do eixo direto é utilizada no cálculo das quedas de tensões causadas pela componente da corrente de armadura que está em quadratura (defasagem de 90^0) com a tensão gerada a vazio. Com a resistência pequena em relação à indutância, a corrente sempre está em atraso em relação à tensão com um ângulo próximo de 90^0 [9].

Na Figura 5, a distância Oa é o valor de pico da corrente de curto circuito em regime permanente. Ao valor eficaz desta corrente de regime permanente está associada uma reatância síncrona do gerador, ou uma reatância síncrona de eixo direto [9].

Caso desprezarmos alguns dos primeiros ciclos da corrente na Figura 2, onde o decréscimo da corrente é muito rápido, a corrente no tempo igual a zero é igual à distância Ob . A reatância transitória está associada ao valor eficaz desta corrente. Se considerarmos o rápido decréscimo inicial, obteremos a distância Oc . A reatância subtransitória está associada ao valor eficaz desta corrente. As Equações 3, 4 e 5 resumem as definições [9].

$$|I| = \frac{Oa}{\sqrt{2}} = \frac{|E_g|}{X_d} \quad (3)$$

$$|I'| = \frac{Ob}{\sqrt{2}} = \frac{|E_g|}{X'_d} \quad (4)$$

$$|I''| = \frac{Oc}{\sqrt{2}} = \frac{|E_g|}{X''_d} \quad (5)$$

Onde:

$|I|$: valor eficaz da corrente de regime permanente

$|I'|$: valor eficaz da corrente transitória desconsiderando o componente CC

$|I''|$: valor eficaz da corrente subtransitória desconsiderando o componente CC

X_d : reatância síncrona do eixo direto

X'_d : reatância transitória do eixo direto

X''_d : reatância subtransitória do eixo direto

$|E_g|$: tensão eficaz entre um terminal e o neutro, gerador a vazio

Portanto, a reatância subtransiente determina a corrente nos primeiros ciclos da ocorrência da falha. Este ciclo tem uma duração de aproximadamente 0,1 segundos. A

reatância transiente determina a corrente nos ciclos seguintes, com duração de 0,5 a 2 segundos. A reatância síncrona determina o fluxo de corrente depois que a condição de regime permanente é alcançada. Os dispositivos normalmente atuam após a condição de regime permanente ser alcançada, sendo a reatância síncrona normalmente utilizada no cálculo da corrente de falha para configurar os equipamentos de proteção [5].

As equações acima demonstram o método de determinação da corrente de falta quando são conhecidas as reatâncias. Caso o gerador estiver sem carga, a máquina é representada por sua tensão de fase a vazio e sua impedância. Se houver uma impedância entre os terminais do gerador e o curto circuito, ela deve ser considerada [9].

Os motores síncronos têm reatâncias do mesmo tipo que os geradores. Apesar do motor submetido a um curto circuito não receber mais energia, o seu campo permanece energizado e as inércias do rotor e da carga mantêm sua rotação por certo período. A tensão interna de um motor síncrono faz com que ele contribua para a corrente de curto circuito no sistema de modo análogo ao gerador [9].

O motor de gaiola de esquilo contribui para o curto circuito do sistema de potência de forma semelhante aos geradores. Esta contribuição é devido à inércia do motor que proporciona a geração de um fluxo de campo induzido no estator, análogo ao enrolamento de campo com corrente contínua das máquinas síncronas. O fluxo decai ao perder a tensão da fonte e a contribuição para a falta reduz e desaparece completamente após alguns ciclos. Como a excitação de campo não é mantida, não há um valor contínuo de corrente de falha [5].

Os motores alimentados por conversores e inversores normalmente não contribuem para as correntes de curto circuito. Este fato está associado ao projeto dos equipamentos de estado sólido, que em geral, não permitem um fluxo de corrente no sentido contrário [5].

3.3 COMPONENTES SIMÉTRICOS

3.3.1 Análise por componentes simétricos

Em sistemas trifásicos, três fasores desequilibrados de um sistema trifásico podem ser substituídos por três sistemas equilibrados de fasores, conforme Figura 7. Os conjuntos equilibrados de componentes são [9]:

- Componentes de sequência positiva, três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si e tendo a mesma sequência de fases que os fasores originais [9].
- Componentes de sequência negativa, constituindo de três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si e tendo a sequência de fases oposta à dos fasores originais [9].
- Componentes de sequência zero, constituindo-se de três fasores iguais em módulo e com defasagem zero entre si [9].

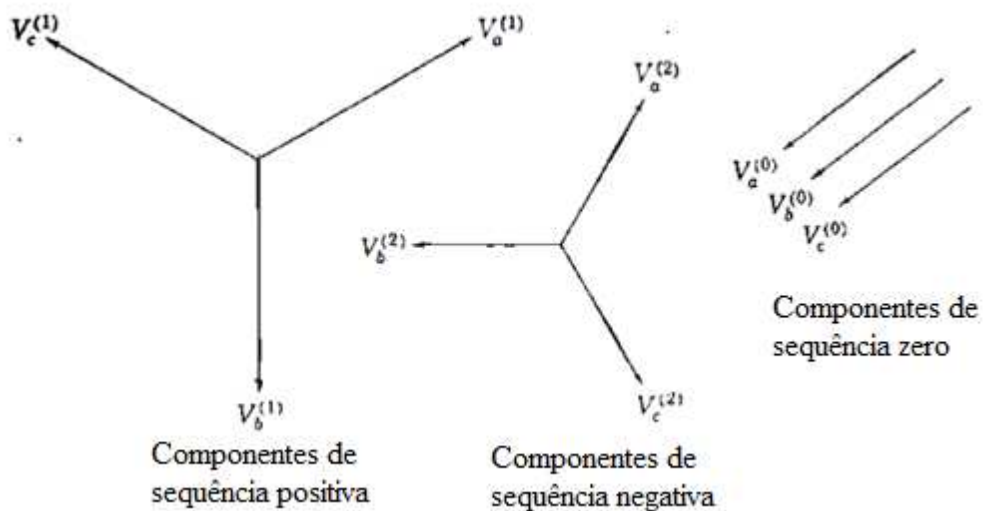


Figura 7: Os três conjuntos de fasores que constituem os componentes simétricos dos três fasores desequilibrados (adaptado de [9])

O método consiste em determinar primeiro os componentes simétricos, posteriormente calculando os valores das correntes de falta através da soma desses componentes. Para isso,

torna-se necessário o uso do operador a . O operador a é um fasor unitário com ângulo de 120° [9].

Na forma matricial, os fasores desequilibrados podem ser determinados pela Equação 6. De forma análoga, os fasores simétricos podem ser obtidos dos fasores assimétricos, conforme Equação 7. Para encontrar os componentes simétricos das outras fases, somente é necessário o uso de forma adequada do operador a . As equações foram demonstradas para valores de tensões, porém são válidas para fasores de corrente [9].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

(6)

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

(7)

Os componentes simétricos de correntes desequilibradas, que circulam em uma carga em Y equilibrada ou em impedâncias em série equilibradas, originam somente quedas de tensão de igual sequência, sempre que não houver acoplamento entre fases. Esta consideração é importante em análises de sistemas normalmente equilibrados e que se tornam desequilibrados apenas quando ocorre uma falta assimétrica [9].

A queda de tensão causada por uma corrente de sequência depende da impedância daquela parte do circuito para a corrente de tal sequência. A impedância referente a correntes de outra sequência pode ser totalmente diferente [9].

A impedância de um circuito pelo qual somente circula a corrente de sequência positiva é chamada de impedância de sequência positiva. Analogamente, há a impedância de sequência negativa e a impedância de sequência zero [9].

A análise de uma falta assimétrica em um sistema simétrico consiste em determinar as componentes simétricas das correntes desequilibradas que circulam em um circuito independente, constituído somente pelas impedâncias daquela sequência. O circuito equivalente, composto pelas impedâncias e forças eletromotrizes de cada sequência, é definido como circuito de sequência [9].

As impedâncias de sequência positiva (Z_1) e negativa (Z_2) para circuitos lineares, estáticos e simétricos são idênticas. Porém, a impedância de sequência zero (Z_0) difere das demais [9].

As impedâncias de máquinas rotativas para correntes das três sequências são, em geral, diferentes para cada sequência. A reatância de sequência negativa é frequentemente definida como a média das reatâncias subtransitórias dos eixos diretos e em quadratura. A reatância de sequência zero normalmente apresenta valores menores que as reatâncias de sequência positiva e negativa. A Tabela 1 apresenta alguns valores característicos [9].

Para transformadores, é costume considerar que as impedâncias em série de todas as sequências sejam iguais, independente do tipo do transformador. A impedância de sequência zero para cargas equilibradas ligadas em Y e Δ é igual às impedâncias de sequência positiva e negativa [9].

Tabela 1: Reatâncias típicas de máquinas síncronas. Valores em pu da potência nominal da máquina (retirado [9])

Máquina	X_d	X'_d	X''_d	X_q	X_2	X_0
Geradores e motores de pólos salientes (com amortecedores)	1,2 (0,95 a 1,45)	1,16 (0,92 a 1,42)	0,15 (0,12 a 0,21)	0,70 (0,40 a 0,80)	0,20 (0,13 a 0,32)	0,18 (0,03 a 0,23)
Geradores e motores de pólos salientes (sem amortecedores)	1,25 (0,6 a 1,5)	0,70 (0,40 a 0,80)	0,30 (0,20 a 0,50)	0,70 (0,40 a 0,80)	0,48 (0,35 a 0,65)	0,19 (0,03 a 0,24)

X_q : reatância do eixo em quadratura

X_2 : reatância de sequência negativa

X_0 : reatância de sequência zero

3.3.2 Faltas assimétricas trifásicas

Um gerador a vazio, ligado em Y e com o neutro aterrado, com uma falta na fase a para a terra, faz com que a corrente de sequência positiva seja igual à corrente das demais sequências e definida pela Equação 8.

Para as mesmas condições, uma falta entre a linha b e c , faz com que a corrente de sequência positiva seja definida pela Equação 9. A corrente de sequência zero é nula e a corrente de sequência negativa é o inverso da corrente de sequência positiva para esta falta.

Para uma falta entre linha b e c com conexão para a terra, a corrente de sequência positiva é definida pela Equação 10. A corrente total na fase é igual ao somatório das correntes de sequência positiva, negativa e zero ($I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$) [9].

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (8)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (9)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \quad (10)$$

I_{a1} : corrente de sequência positiva da fase a

I_{a2} : corrente de sequência negativa da fase a

I_{a0} : corrente de sequência zero da fase a

E_a : tensão de fase do gerador a vazio

Z_1 : impedância de sequência positiva

Z_2 : impedância de sequência negativa

Z_0 : impedância de sequência zero

3.4 FALTAS EM UM SISTEMA DE POTÊNCIA

Na análise de um sistema de potência, os diagramas de sequência são esquematizados para a sequência positiva, negativa e zero. Os diagramas de impedância de todo o sistema são substituídos por circuitos equivalentes Thevenin entre a barra de referência e o ponto da falta. A impedância de sequência positiva (Z_1), negativa (Z_2) e zero (Z_0) são as impedâncias

equivalentes de todo o diagrama de impedâncias no local da falta. A tensão do circuito equivalente, presente somente no diagrama de sequência positiva, é a tensão de fase anterior à ocorrência da falta. O valor de Z_1 também depende do estudo realizado, ou seja, da utilização da reatância subtransitória, transitória ou síncrona [9].

Portanto, as correntes de curto circuito apresentadas para as faltas simétricas (Equação 3 a Equação 5) e para as faltas assimétricas (Equação 8 a Equação 10), podem ser aplicadas em sistemas de potência com a substituição da tensão de fase do gerador a vazio pela tensão de pré-falta do local do curto circuito e a substituição da impedância do gerador pela impedância equivalente do sistema, ambas no ponto de ocorrência da falta [9].

A corrente de curto circuito em cada ponto do sistema é dependente da impedância dos equipamentos. Ao alterar um sistema, substituindo equipamentos ou adicionando novas cargas, as correntes de curto circuito normalmente sofrem alterações, sendo necessário avaliar se houve mudanças nos níveis de curto circuito e se há uma correta utilização dos dispositivos de proteção. Conforme mencionado anteriormente, o cálculo da máxima corrente de curto circuito é necessário para comparar com a capacidade dos elementos do sistema. Por outro lado, o cálculo da menor corrente de curto circuito normalmente está ligado com a verificação dos requisitos de sensibilidade dos dispositivos de proteção [5].

3.5 RESUMO DO CAPÍTULO 3

O Capítulo 3 apresenta as definições de curto circuito e os seus diversos modos de falta em um sistema trifásico. Adicionalmente, é demonstrado o comportamento típico transitório em circuitos RL e sua analogia com as faltas em máquinas elétricas rotativas, definindo assim, o comportamento característico da corrente de curto circuito em sistemas de potência.

O capítulo também aborda as faltas simétricas e assimétricas, apresentando a ferramenta de componentes simétricos para a análise de sistemas desequilibrados. Para finalizar, é abordada a utilização do método de componentes simétricos na determinação das correntes de curto circuito dos sistemas elétricos de potência.

4. ANÁLISE DE CURTO CIRCUITO NO SISTEMA ESTUDADO

O tamanho e a complexidade dos sistemas industriais modernos tornaram os cálculos manuais utilizando componentes simétricos normalmente inviáveis. Os computadores com *softwares* especializados são normalmente utilizados nos estudos. Porém, o conhecimento da natureza das correntes de curto circuito e os procedimentos de cálculo são essenciais para conduzir estes estudos [5].

Apesar de ser um estudo de caso industrial, este é um trabalho de nível acadêmico e há o objetivo de desenvolver uma metodologia de cálculo manual através de componentes simétricos. Portanto, os níveis de curto circuito são obtidos para o painel estudado utilizando os conceitos apresentados e considerações práticas da indústria. A análise de curto circuito também é realizada utilizando um *software* especializado. O objetivo é fazer comparações entre os resultados obtidos [3]. Para finalizar, os dois métodos de obtenção das correntes de curto circuito são comparados com a capacidade dos equipamentos de proteção e utilizados no estudo de coordenação e seletividade.

4.1 CÁLCULO DE CURTO CIRCUITO POR COMPONENTES SIMÉTRICOS

A corrente de curto circuito é determinada pela tensão de pré-falta e pela impedância equivalente no local da falta, conforme definido no capítulo anterior.

O cálculo exato da corrente de curto circuito torna-se difícil devido à complexidade dos equipamentos e sistemas, principalmente com a falta de parâmetros precisos. O método de cálculo proposto fornece uma precisão razoável para os limites de máximo e mínimo curto circuito, que são os motivos da realização dos cálculos [5].

Conforme demonstrado no capítulo anterior, as correntes de curto circuito dependem do tipo de falta e dos valores das impedâncias de sequência positiva, negativa e zero.

Em sistemas industriais, o curto circuito trifásico é frequentemente o único considerado, sendo que matematicamente resulta na maior corrente de curto circuito [5]. Este fato está principalmente relacionado às baixas reatâncias subtransitórias de sequência positiva. Esta afirmação pode ser observada através das equações que definem os curto circuitos trifásicos (Equação 3 a Equação 5), através das equações que definem os curto circuitos assimétricos (Equação 7 a Equação 10) e através dos dados da Tabela 1.

A condição de curto circuito trifásico também simplifica os cálculos. O sistema, incluindo o curto circuito, permanece simétrico em relação ao ponto neutro. A corrente de curto circuito trifásica balanceada pode ser calculada usando o circuito equivalente monofásico, que tem apenas a tensão de pré-falta e a impedância de sequência positiva [5].

Além da contribuição das máquinas rotativas locais para os curtos circuitos, também devem ser considerados os geradores remotos conectados ao sistema através da concessionária. A contribuição da rede representa um aumento na corrente de falta do sistema elétrico da planta que tende a permanecer constante. A contribuição do sistema de fornecimento de energia é representada por uma impedância equivalente no ponto de conexão da alimentação [5].

A maioria dos elementos precisam ser incluídos no cálculo de corrente de curto circuito, como impedância de transformadores, cabos, condutores e máquinas rotativas. É de prática comum desconsiderar a presença de cargas estáticas, apesar de suas impedâncias estarem associadas a ramos da rede. As resistências normalmente são desconsideradas, principalmente em redes de alta e média tensão, frente aos altos valores das reatâncias. Porém, a relação X/R pode ser utilizada na análise das correntes de interrupção de disjuntores [5].

4.1.1 Limitações do método

No método, é considerada uma falta trifásica sem impedância entre linhas ou entre linha e terra. Porém, a impedância raramente é nula. A impedância depende de alguns fatores, como a resistência do arco e a resistência da terra. Considerando a falta sem impedância, são obtidos os maiores valores de corrente [9].

A análise também assume que o chaveamento transiente ocorre em apenas uma etapa do fluxo de corrente de curto circuito. Porém, oscilogramas demonstram que os transientes de corrente contínua e alternada são reinseridos na corrente várias vezes durante a ocorrência e interrupção de um curto circuito [5].

Além do mais, a simplificação do circuito exclui o efeito de impedâncias mútuas, considerando que cada fase do circuito apresenta um carregamento igual [5].

4.1.2 Procedimentos de cálculo

A parte mais importante do procedimento de cálculo é estabelecer a impedância de cada elemento do circuito de forma que a impedância equivalente no local da falta possa ser obtida. A rede de impedâncias de fase e a tensão de fase normalmente são representadas em valores “por unidade” (*pu*) [5].

Em sistemas *pu*, são utilizadas quatro bases: potência aparente, tensão, corrente e impedância. A definição de valor *pu* é demonstrada na Equação 11 [5].

$$valor_{pu} = \frac{valor\ atual}{valor\ base} \quad (11)$$

Um valor conveniente é selecionado para o valor da potência aparente, normalmente em *MVA*. As bases de tensão são adotadas conforme os valores nominais dos transformadores, em *kV*. Para sistemas trifásicos, com tensões de linha em *kV* e potência

aparente em *MVA*, as correntes e impedâncias base são determinadas pela Equação 12 e Equação 13 [5].

$$I_{base}(kA) = \frac{S_{base}(MVA)}{\sqrt{3}E_{base}(kV)} \quad (12)$$

$$Z_{base}(\Omega) = \frac{E_{base}^2(kV)}{S_{base}(MVA)} \quad (13)$$

Algumas impedâncias, como reatâncias de motores, podem ser fornecidas com valores por unidade da sua potência nominal, sendo necessário converter para a base do sistema através da Equação 14 [5].

$$Z_{pu} = X_{punominal} \frac{S_{base}}{S_{nominal}} \quad (14)$$

Na ausência de informação de valores dos equipamentos da planta, a Tabela 2 apresenta valores típicos para as reatâncias de máquinas rotativas [5].

O cálculo da máxima corrente de curto circuito para selecionar os equipamentos de proteção elétrica é realizado com o sistema industrial carregado completamente, ou seja, com todos os motores conectados contribuindo para a corrente de curto circuito. Da mesma forma, as resistências são consideradas nos cálculos com seus valores nominais sob carga ou à temperatura quente. A Tabela 3 apresenta os valores típicos de resistência e reatância para condutores de cobre. O valor de resistência demonstrado na tabela é para a temperatura de 50^o C, sendo que, para obter o valor de temperatura sob carga (75^o C), é utilizado um fator de multiplicação de 1,087 [5].

Tabela 2: Valores típicos de reatâncias de máquinas síncronas e de indução. Valores em pu da potência nominal de cada máquina (retirado de [5])

Máquina rotativa	Reatância subtransitória X''_d	Reatância transitória X'_d
Geradores de turbinas		
2 pólos	0,09	0,15
4 pólos	0,15	0,23
Geradores de pólos salientes com enrolamentos de amortecimento		
12 pólos ou menos	0,16	0,33
14 pólos ou menos	0,21	0,33
Motores síncronos		
6 pólos	0,15	0,23
8-14 pólos	0,2	0,3
16 pólos ou mais	0,28	0,4
Compressor síncrono	0,24	0,37
Conversores síncronos		
600 V corrente contínua	0,2	
250 V corrente contínua	0,33	
Motores de indução grandes, acima de 600 V	0,17	

O cálculo da corrente subtransitória ou simétrica inicial de curto circuito e o cálculo da corrente de interrupção de disjuntores são baseados em fatores definidos em diversas normas. A sua aplicação, através das reatâncias das máquinas rotativas, é simplificado na Tabela 4 [5].

Assim que a rede de impedâncias para os primeiros ciclos é obtida, é possível obter a impedância equivalente em pu (Z_{pu}) para cada ponto de interesse. Normalmente para o cálculo da corrente simétrica inicial as resistências são ignoradas, sendo consideradas apenas as reatâncias. A corrente de curto circuito simétrica inicial rms (I'') é calculada pela divisão da tensão pré-falta ($E_{pu} = 1 pu$) pela impedância no local da falta. Este valor é multiplicado pela corrente de base, conforme Equação 15. [5].

$$I'' = \frac{E_{pu}}{X_{pu}} I_{base}$$

(15)

Tabela 3: Constantes de condutores de cobre com espaçamento de 0,305m (1ft) (adaptado de [5])

Secção transversal do condutor		Resistência a 50 C	Reatância a 60 Hz
1mm ² = 1.970 cmil		(Ω /condutor/1000ft)	(Ω /condutor/1000ft)
cmil	AWG No	1ft = 0,305 m	1ft = 0,305 m
1000000		0,0130	0,0758
900000		0,0142	0,0769
800000		0,0159	0,0782
750000		0,0168	0,0790
700000		0,0179	0,0800
600000		0,0206	0,0818
500000		0,0246	0,0839
450000		0,0273	0,0854
400000		0,0307	0,0867
350000		0,0348	0,0883
300000		0,0407	0,0902
250000		0,0487	0,0922
211600	4/0	0,0574	0,0953
167800	3/0	0,0724	0,0981
133100	2/0	0,0911	0,1010
105500	1/0	0,1150	0,1030
83690	1	0,1450	0,1060
66370	2	0,1810	0,1080
52630	3	0,2270	0,1110
41740	4	0,2880	0,1130
33100	5	0,3620	0,1160
26250	6	0,4530	0,1210
20800	7	0,5700	0,1230
16510	8	0,7200	0,1260

A corrente subtransitória é a corrente eficaz simétrica inicial, portanto não inclui o componente *CC* da corrente de curto circuito. O cálculo exato do valor eficaz da corrente de falta em um sistema de potência é demasiadamente complicado, sendo que métodos aproximados são mais práticos e fornecem resultados precisos [9].

Tabela 4: Reatâncias para cálculo de curto circuito subtransitório e para cálculo da corrente de interrupção de disjuntores

Tipo de máquina rotativa	Reatância para corrente simétrica inicial	Reatância para corrente de interrupção de disjuntores
Gerador a turbina	$1X''_d$	$1X''_d$
Hidrogerador com enrolamento amortecedor		
Compressor		
Hidrogerador sem enrolamento amortecedor	$0,75X''_d$	$0,75X''_d$
Motor síncrono	$1X''_d$	$1,5X''_d$
Motor de indução acima de 1000 HP com 1800 RPM ou menos	$1X''_d$	$1,5X''_d$
Motor de indução acima de 250 HP com 3600 RPM	$1X''_d$	$1,5X''_d$
Motor de indução acima de 50 HP	$1,2X''_d$ ou 0,20	$3X''_d$ ou 0,5
Motor de indução abaixo de 50 HP	$1,67X''_d$ ou 0,28	Desprezível

Na determinação da corrente que um disjuntor deve suportar logo após uma falta (carga instantânea do disjuntor), a corrente inicial simétrica é multiplicada por um fator de 1,6 para tensões acima de 5 kV ou de 1,5 para tensões abaixo de 5 kV [9]. Em [5] é utilizado o fator 1,6 para todas as tensões. O último valor será utilizado, pois apresenta um resultado mais conservador.

Analogamente, é definida uma corrente de pico máximo de curto circuito que ocorre no primeiro ciclo após a ocorrência da falta. O multiplicador definido em [5], baseado em normas, é de 2,7.

A Equação 16 define o valor da corrente rms assimétrica inicial e a Equação 17 determina a máxima corrente de pico que ocorre durante o primeiro ciclo de um curto circuito trifásico [5].

$$I''_{ass} = 1,6 \frac{E_{pu}}{X_{pu}} I_{base}$$

(16)

$$i_{pico} = 2,7 \frac{E_{pu}}{X_{pu}} I_{base} \quad (17)$$

Para o cálculo de corrente de interrupção de disjuntores, são utilizados os valores apresentados na Tabela 4. O valor rms da corrente de curto circuito de interrupção é obtido pela Equação 18 [5]. Os fatores de multiplicação sugeridos dependem da velocidade do disjuntor, conforme Tabela 2 [9].

$$I_{int} = \text{fator de multiplicação} \frac{E_{pu}}{X_{pu}} I_{base} \quad (18)$$

Tabela 5: Fatores de multiplicação para a corrente de interrupção de disjuntores

Disjuntor de 8 ciclos ou mais lento	1
Disjuntor de 5 ciclos	1,1
Disjuntor de 3 ciclos	1,2
Disjuntor de 2 ciclos	1,4

Os quatro valores calculados de curto circuito (corrente inicial simétrica, corrente inicial assimétrica, corrente de pico de primeiro ciclo e corrente de interrupção para disjuntores) devem ser comparados com os equipamentos do sistema.

Para a aplicação em proteções instantâneas, o valor da corrente de curto circuito determinado para os primeiros ciclos deve ser utilizado. Porém, a aplicação em relés temporizados desconsidera os efeitos transitórios (aproximadamente seis ciclos da rede) e considera apenas os geradores e elementos passíveis como transformadores e cabos. Portanto, a contribuição dos motores deve ser omitida. A corrente de curto circuito após os efeitos transientes é obtida pela mesma Equação 15, com a devida alteração da reatância equivalente [5].

4.1.3 Cálculo de curto circuito no sistema estudado

O Apêndice A apresenta um diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico da planta industrial com os dados para a obtenção das redes de impedâncias.

A potência base do sistema foi considerada 10 MVA e as tensões bases são as tensões nominais dos barramentos. Através da Equação 12 e Equação 13, é possível elaborar a Tabela 6 com as correntes e impedâncias bases.

Tabela 6: Grandezas base para cada nível de tensão

Sbase (MVA)	10				
Vbases (kV)	34,5	13,8	4,16	0,68	0,48
Ibases (kA)	0,1673	0,4184	1,3879	8,4904	12,0281
Zbases (Ω)	119,025	19,044	1,73056	0,04624	0,02304

Os principais cabos, considerados na elaboração das redes de impedâncias, são apresentados na Tabela 7. Os dados dos cabos foram obtidos através de diagramas unifilares da planta e as impedâncias em pu foram calculadas através da Tabela 3, Tabela 6 e da Equação 11.

A contribuição para a corrente de curto circuito da rede de fornecimento de energia, *LINHA-C* e *LINHA-D*, é representada nos diagramas de sequência positiva através de uma impedância equivalente por linha. Esta impedância foi obtida através de informações concedidas pela CEEE em um estudo do ano de 2008 [10].

Os transformadores obtiveram suas informações retiradas de diagramas elétricos da planta. As impedâncias em pu foram calculadas através da Equação 14.

As características dos motores foram obtidas de diagramas elétricos locais e, na ausência de informação das impedâncias, utilizaram-se os valores padrões da Tabela 2. As impedâncias em pu foram calculadas através da Tabela 4 e da Equação 14.

Tabela 7: Cabos do sistema elétrico considerados na elaboração dos diagramas de impedâncias

Cabo	Origem	Destino	N ^o de condutores	Secção transversal (AWG ou kcmil)	Comprimento (m)
1	PNAT-11	TRB-3C	1x3	4/0	500
2	PNAT-11	TRB-2C	1x3	4/0	190
3	PNAT-11	TRM-2C	1x3	350	510
4	PNAT-11	TRU-CTC	1x3	4/0	510
5	PNAT-11	C-201CM	1x3	4/0	265
6	PNAT-11	C-202CM	1x3	500	260
7	PNAT-11	C-202DM	3x3	500	170
8	PNAT-11	C-201DM	1x3	4/0	180
9	PNAT-11	TRU-CTD	1x3	4/0	505
10	PNAT-11	TRM-2D	1x3	350	185
11	PNAT-11	TRB-2D	1x3	4/0	190
12	PNAT-11	TRB-3D	1x3	4/0	495
13	PNMT-21	W-201D-3M	1x3	50	230
14	PNMT-21	W-201-1M	1x3	4/0	220
15	PNMT-21	C-301A-3M	1x3	1/0	70
16	PNMT-21	J-303A-1M	1x3	4/0	285
17	PNMT-21	J-303A-3M	1x3	4/0	275
18	PNMT-21	F-201C-CM	1x3	1/0	140
19	PNMT-21	F-201D-CM	1x3	1/0	300
20	PNMT-21	C-301A-2M	1x3	1/0	70
21	PNMT-21	J-304A-1M	1x3	4/0	130
22	PNMT-21	J-303A-2M	1x3	4/0	280
23	PNMT-21	W-201D-2M	1x3	4/0	215
24	PNMT-21	W-246-DM	1x3	35	250
25	PNMT-21	W-247D-2M	1x3	35	255
26	PNMT-21	W-247D-3M	1x3	35	260

Os motores de baixa tensão do *PNBT-21* e *PNBT-31* apresentam características semelhantes (motores de indução entre 50 e 250 HP). Portanto, cada conjunto de motores destes painéis (*CM-2C*, *CM-1D*, *CM-3C* e *CM-2D*) foram representados através de motores equivalentes.

O efeito dos motores alimentados por conversores ou inversores foi desconsiderado, levando em consideração a limitação imposta pelos equipamentos.

A Figura 8 representa o diagrama de reatâncias para o cálculo do valor *rms* da corrente de curto circuito subtransitória. A Figura 9 apresenta o diagrama de reatâncias para o cálculo do valor *rms* da corrente de curto circuito de interrupção. A Figura 10 demonstra os diagramas para o cálculo da corrente de curto circuito após o decaimento dos componentes transitórios para o lado *C* e *D* do painel *QGDF-31*.

É possível observar que, para o cálculo da corrente de curto circuito no painel, foram omitidas todas as barras com cargas estáticas ou com motores alimentados por conversores.

Caso seja necessário realizar o cálculo de curto circuito para um dos elementos omitidos, é possível adaptar os diagramas. Por exemplo, no caso de ser necessário calcular a corrente de curto circuito no secundário do transformador *TRB-4D*, na entrada do painel do conversor do motor *L-230DM*. Para obter este valor, somente é necessário adicionar a impedância deste transformador no diagrama. Para este caso, seria adicionada uma impedância de $5,82 pu$ abaixo da impedância do transformador *TRU-CTD*. Ao aplicar uma tensão de $1 pu$ no secundário deste transformador, é obtido o valor em *pu* da corrente de curto circuito subtransitória neste local do sistema. Para os demais casos, os valores podem ser obtidos de forma análoga.

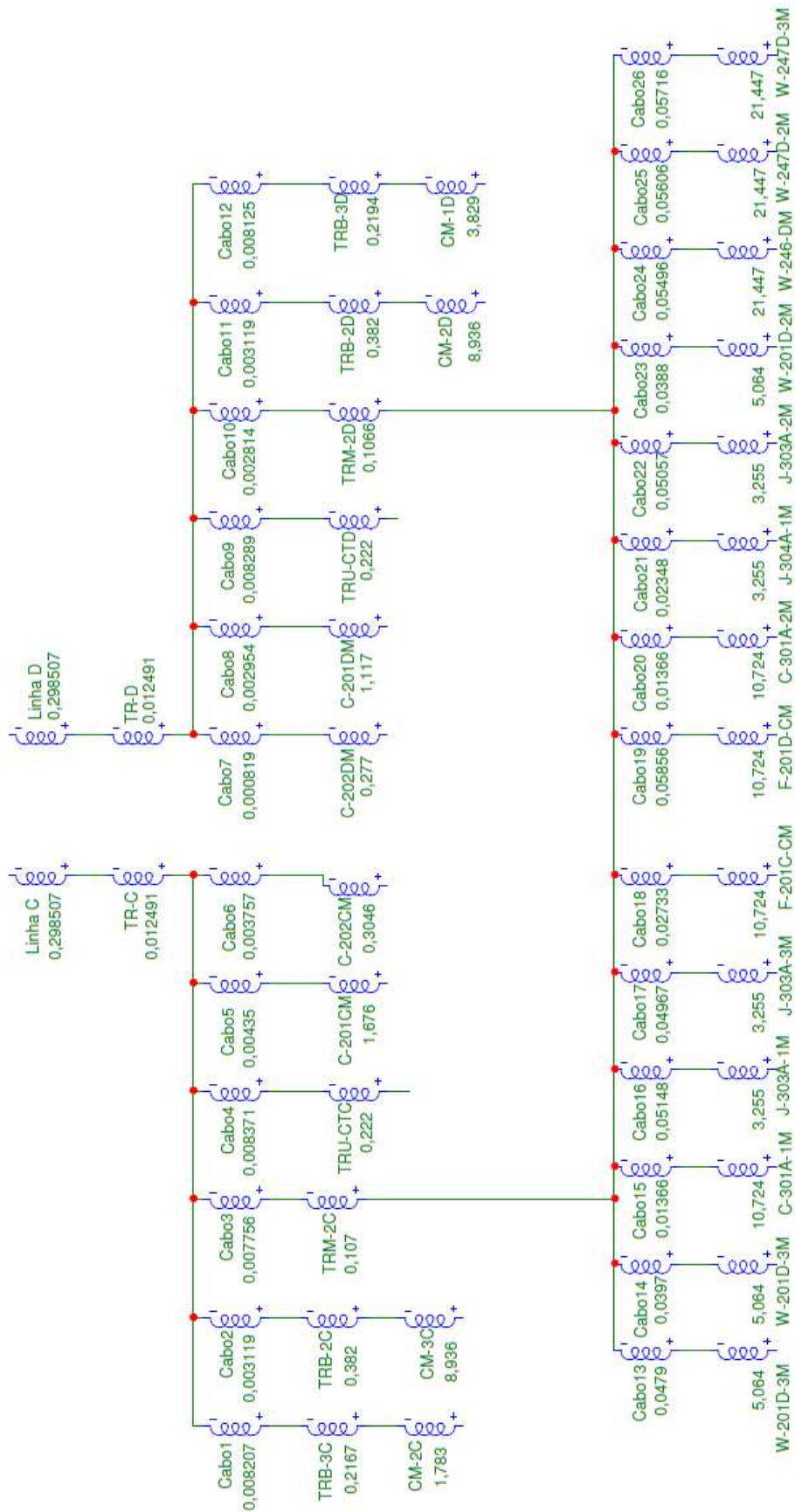


Figura 8: Diagrama de reatâncias para o cálculo da corrente de curto circuito subtransitória

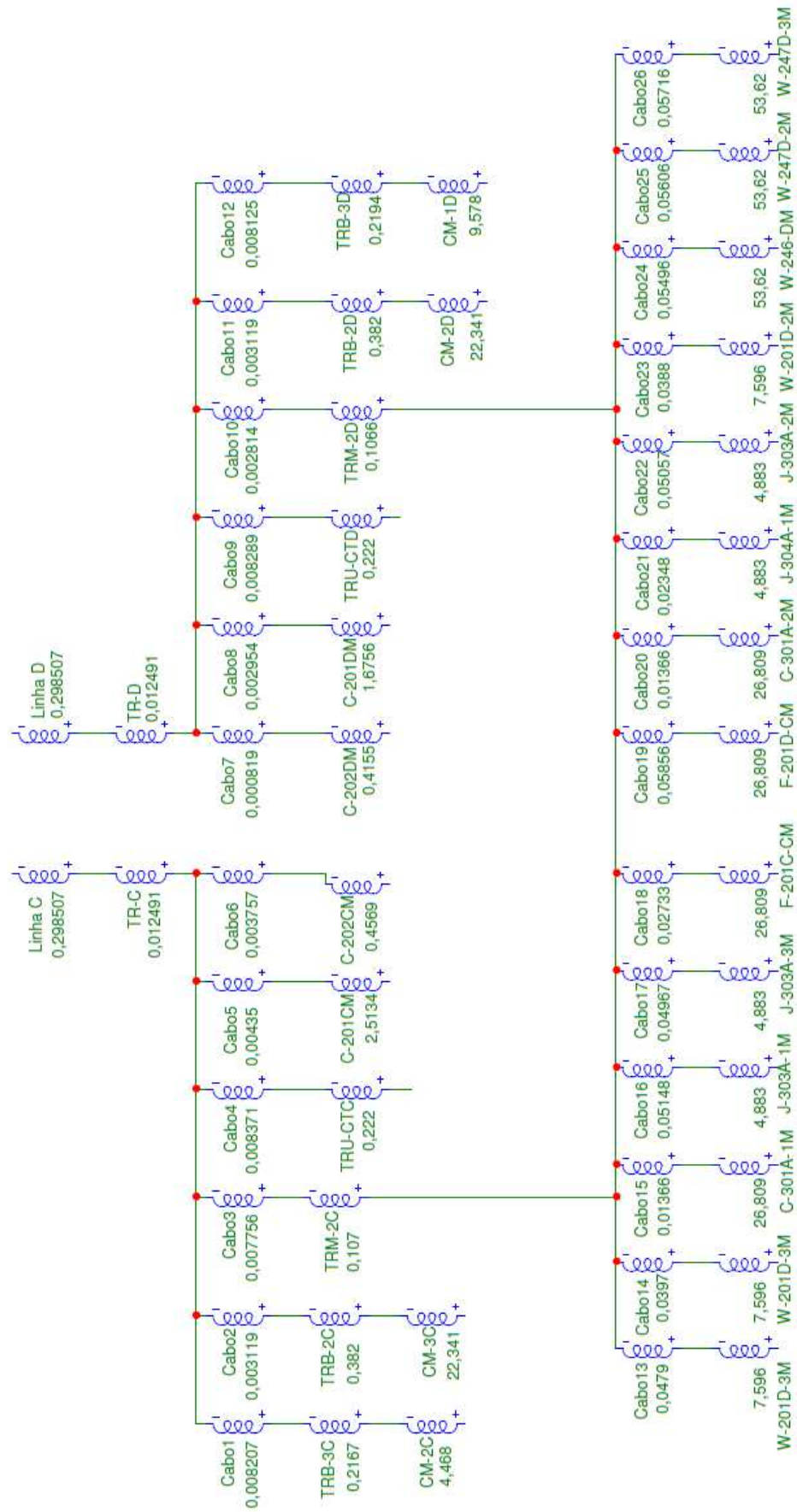


Figura 9: Diagrama de reatâncias para o cálculo da corrente de interrupção de disjuntores

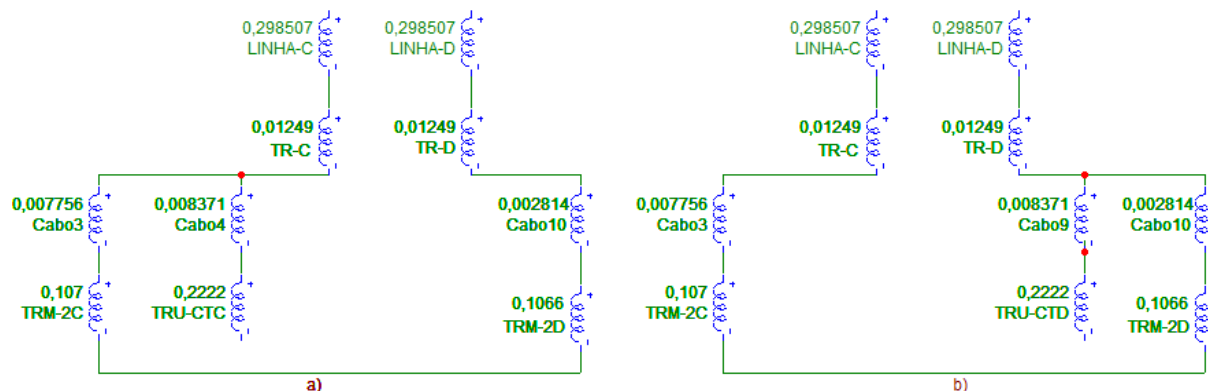


Figura 10: Diagrama de reatâncias para o cálculo da corrente de curto circuito de regime permanente. a) Lado C do QGDF-31, b) Lado D do QGDF-31

A Tabela 8 resume os resultados para a ocorrência de curto circuito no lado C e no lado D do painel QGDF-31 na condição de alimentação através das duas linhas de entrada. Os resultados obtidos, para a alimentação através de apenas uma entrada do painel, foram semelhantes aos apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultado dos cálculos de corrente de curto circuito para o painel QGDF-31

Diagrama das reatâncias subtransientes - Figura 8							
Lado C				Lado D			
Xpu equivalente	I'' (kA) rms	I''_{ass} (kA) rms	i_{pico} (kA)	Xpu equivalente	I'' (kA) rms	I''_{ass} (kA) rms	i_{pico} (kA)
0,316	26,86	42,98	72,52	0,313	27,14	43,42	73,28
Diagrama das reatâncias para a corrente de interrupção (Tabela 3) - Figura 9							
Lado C				Lado D			
Xpu equivalente		I_{int} (kA) rms		Xpu equivalente		I_{int} (kA) rms	
0,334		25,44		0,330		25,72	
Diagramas das reatâncias síncronas (desconsiderando os efeitos transitórios) - Figura 10							
Lado C				Lado D			
Xpu equivalente		I_k (kA) rms		Xpu equivalente		I_k (kA) rms	
0,428		19,86		0,427		19,87	
Principais resultados							
Lado	I_k (kA) rms	I'' (kA) rms	I_{int} (kA) rms	I''_{ass} (kA) rms	i_{pico} (kA)		
C	19,86	26,86	25,44	42,98	72,52		
D	19,87	27,14	25,72	43,42	73,28		

I_k (kA) rms: corrente de curto circuito após o decaimento dos componentes transitórios.

I'' (kA) rms: corrente de curto circuito simétrica inicial.

I_{int} (kA) rms: corrente de interrupção de curto circuito para disjuntores sem o fator de multiplicação

I''_{ass} (kA) rms: corrente de curto circuito assimétrica inicial.

i_{pico} (kA): pico de corrente de curto circuito inicial.

A corrente de interrupção demonstrada na tabela está com o seu valor sem a multiplicação pelo fator da Tabela 5, pois este valor varia para cada tempo de abertura de disjuntor.

4.2 ESTUDO DE CURTO CIRCUITO UTILIZANDO SOFTWARE ETAP

O *software* [3] utilizado permite a representação de diagramas elétricos e realiza diversos tipos de cálculos para sistemas de potência, como estudos de curto circuito, fluxo de carga, aceleração de motores, entre outros. O apêndice B demonstra o diagrama do sistema de potência da planta industrial representado no programa. Os dados dos equipamentos como transformadores e motores, bem como de cabos e linhas de entrada de energia foram baseados em diagramas elétricos locais. Nos casos onde não foram inseridos os dados reais, o programa utiliza valores padrões baseados em seu banco de dados.

O programa realiza estudo de curto circuito baseado em normas *IEC* e *ANSI* e emite relatórios com os valores dos barramentos selecionados. Há diversas opções de simulações. Para o estudo, foram escolhidas duas formas de simulação: *3-Phase Faults – Device Duty* e *3-Phase Faults – 30 cycle Network*. Segundo o manual do programa:

3-Phase Faults – Device Duty: Estudo de falta trifásica de acordo a norma *ANSI C37*.

O estudo calcula a corrente de curto circuito inicial simétrica e assimétrica rms, o pico inicial assimétrico, o valor para interrupção simétrica rms e o valor para interrupção simétrica rms com o uso do fator de multiplicação [3]. A Figura 11 apresenta os dados finais do relatório para este estudo.

3-Phase Faults – 30 cycle Network: Estudo de falta trifásica com uso de normas *ANSI*.

O estudo calcula as correntes de curto circuito em seus valores rms após 30 ciclos da rede [3]. A Figura 12 apresenta os dados finais do relatório para este estudo.

MOMENTARY DUTY Summary Report

3-Phase Fault Currents: (Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage)

Bus		Device		Momentary Duty					Device Capability		
ID	kV	ID	Type	Symm. kA rms	X/R Ratio	M.F.	Asymm. kA rms	Asymm. kA Crest	Symm. kA rms	Asymm. kA rms	Asym. kA C
QGDF-31-C	0.680	QGDF-31-C	Bus	28.780	11.1	1.462	42.067	71.382	65.000		
QGDF-31-D	0.680	QGDF-31-D	Bus	29.650	9.9	1.434	42.532	72.425	65.000		

Method: IEEE - X/R is calculated from separate R & X networks.

HV CB interrupting capability is adjusted based on Bus nominal voltage

INTERRUPTING DUTY Summary Report

3-Phase Fault Currents: (Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage)

Bus		Device		Interrupting Duty				Device Capability			
ID	kV	ID	Type	Symm. kA rms	X/R Ratio	M.F.	Adj. Sym. kA rms	kV	Test PF	Rated Int.	Adjusted Int.
QGDF-31-C	0.680	CB 24	Molded Case	28.780	11.1	1.172	33.738	0.680	20.00	100.000	100.000
	0.680	CB 33	Molded Case	28.780	11.1	1.172	33.738	0.680	20.00	65.000	65.000
	0.680	CB 79	Molded Case	28.780	11.1	1.172	33.738	0.680	20.00	70.000	70.000
QGDF-31-D	0.680	CB 35	Molded Case	29.650	9.9	1.150	34.111	0.680	20.00	100.000	100.000
	0.680	CB 17	Molded Case	29.650	9.9	1.150	34.111	0.680	20.00	70.000	70.000
	0.680	CB 30	Molded Case	29.650	9.9	1.150	34.111	0.680	20.00	65.000	65.000

Method: IEEE - X/R is calculated from separate R & X networks.

HV CB interrupting capability is adjusted based on bus nominal voltage

Protective device duty is calculated based on total fault current

* Indicates a device with interrupting duty exceeding the device capability

CB 24: Disjuntor da entrada C do painel
 CB 33: Disjuntor de alimentação do L-229CM
 CB 79: Disjuntor de alimentação do L-230CM
 CB 35: Disjuntor da entrada D do painel
 CB 17: Disjuntor de alimentação do L-229DM
 CB 30: Disjuntor de alimentação do L-230DM

Figura 11: Método Device Duty para o lado C (QGDF-31-C) e o lado D (QGDF-31-D)

30-CYCLE Summary Report

3-Phase Fault Currents: (Prefault Voltage = 100.00 % of the Bus Nominal Voltage)

Bus		3-Phase 30-Cycle
ID	kV	Symmetrical kA
QGDF-31-C	0.680	19.758
QGDF-31-D	0.680	19.765

Figura 12: Método 30 cycle Network para o lado C (QGDF-31-C) e o lado D (QGDF-31-D)

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A comparação entre os cálculos por componentes simétricos e os resultados obtidos com a simulação é demonstrada na Tabela 9. Podemos observar a compatibilidade do cálculo com os valores obtidos na simulação.

Tabela 9: Comparação entre os resultados obtidos através dos dois métodos utilizados

Valores obtidos com o cálculo através de componentes simétricos					
Lado	I_k (kA) rms	I'' (kA) rms	I_{int} (kA) rms	I''_{ass} (kA) rms	i_{pico} (kA)
C	19,86	26,86	25,44	42,98	72,52
D	19,87	27,14	25,72	43,42	73,28
Valores obtidos com o uso de software de estudo de curto circuito					
Lado	I_k (kA) rms	I'' (kA) rms	I_{int} (kA) rms	I''_{ass} (kA) rms	i_{pico} (kA)
C	19,76	28,78	28,78	42,06	71,38
D	19,77	29,65	29,65	42,53	72,42

O painel estudado apresenta três modelos diferentes de disjuntores de baixa tensão. A tabela 10 resume as capacidades dos disjuntores de acordo com os manuais [1]. A capacidade do barramento do painel, de acordo com o documento de projeto do fabricante, é de 65 kA.

Tabela 10: Dados dos disjuntores do painel QGDF-31

Elemento	Icu (kA)	Ics (kA)	Icw (kA)	Icm (kA)	Abertura (ciclos da rede)
Disjuntores de entrada, lado C e D do QGDF-31, e disjuntor de ligação do painel	85	85	100	187	5
Disjuntores de alimentação do conversor do L-229DM e do L-229CM	65	65	65	187	5
Disjuntores de alimentação do conversor do L-230DM e do L-230CM	70	70	70	154	1

Icu: (*Rated ultimate short-circuit breaking capacity*): capacidade nominal de interrupção máxima sob curto circuito [1]. Comparar com os valores obtidos de I_{int} .

Ics (*Service short circuit capacity*): capacidade nominal de interrupção de curto circuito em serviço [1].

Icw (*Rated short-time withstand current*): Corrente de falta que o disjuntor resiste em um determinado período de tempo, neste caso, um segundo [1]. Comparar com os valores obtidos para I''_{ass} (kA) rms.

Icm (*Rated short-circuit making capacity – peak value*): Corrente de pico que o disjuntor suporta [1]. Comparar com os valores obtidos para i_{pico} (kA).

A corrente de interrupção para os disjuntores é obtida com auxílio da Tabela 5. Os disjuntores de entrada do painel, o disjuntor de ligação entre a barra *C* e *D* e os disjuntores que alimentam os conversores do motor *L-229DM* e do motor *L-229CM* necessitam suportar uma corrente de interrupção aproximada de 28 kA. Os disjuntores que alimentam os transformadores para os conversores dos motores *L-230DM* e *L-230CM* necessitam suportar uma corrente de interrupção aproximada de 36 kA.

O estudo das correntes de curto circuito, através de dois métodos, comprovou que os valores máximos de corrente para o painel *QGDF-31* são inferiores à capacidade nominal dos

disjuntores, não explicando o dano no disjuntor. A empresa entrou em contato com o fabricante, mas ainda não há uma explicação para a falha do disjuntor.

4.4 RESUMO DO CAPÍTULO 4

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para o estudo de curto circuito no painel analisado.

Primeiramente, é realizado o cálculo das correntes de curto circuito através da aplicação do método de componentes simétricos, considerando somente as faltas trifásicas no sistema. Posteriormente, são apresentados os resultados da análise de curto circuito através de um programa de análise de sistemas de potência. Os resultados obtidos foram semelhantes, comprovando a possibilidade de utilização da metodologia de cálculo por componentes simétricos no ambiente industrial.

Para finalizar, foram comparados os valores das correntes de curto circuito com as capacidades nominais dos disjuntores do *QGDF-31*, comprovando que os disjuntores foram selecionados de forma adequada.

5 PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

O propósito do sistema de proteção é proteger o sistema elétrico contra perdas de materiais, falhas e perigos pessoais [5]. A função da proteção é retirar de operação um elemento do sistema de potência que começa a operar de maneira anormal. Portanto, normalmente a proteção não evita a falha do equipamento, ela opera depois da detecção de uma situação do erro. O propósito da atuação é limitar um dano maior ao equipamento, minimizar o perigo para as pessoas, reduzir o estresse em outros equipamentos, e principalmente, remover o equipamento sobre falha do sistema de potência. A remoção deve ser a mais rápida possível, para manter a estabilidade e integridade do sistema [4].

A função dos sistemas elétricos de proteção somente é compreendida quando há uma familiarização com a natureza e com os modos de operação dos sistemas elétricos. Para atingir estes objetivos, é necessário examinar todas as possibilidades de falhas ou condições anormais que podem ocorrer nos sistemas de potência, mensurar a resposta requerida para cada um dos eventos e projetar dispositivos capazes de proporcionar estas respostas. Também é necessário considerar que há a possibilidade dos elementos de proteção não operarem corretamente e, portanto, faz-se necessária uma proteção de retaguarda [4].

5.1 CONFIABILIDADE E ZONAS DE PROTEÇÃO

A confiabilidade é definida como a probabilidade de um equipamento desempenhar a sua função esperada. Os elementos de proteção têm duas maneiras de não serem confiáveis: deixar de atuar quando necessário e atuar quando não for necessário. Assim, a confiabilidade do sistema de proteção é medida por duas características: a dependência e a segurança. A dependência é a certeza de que o relé irá atuar para todos os distúrbios que ele foi projetado e

a segurança é a certeza de que ele não irá operar incorretamente para qualquer tipo de falha [4].

A maioria dos sistemas de proteção prioriza a dependência, levando em consideração que os sistemas de potência proporcionam diversos caminhos para o fluxo de potência, sendo assim, perder um elemento devido a uma atuação indevida é menos prejudicial que a presença de uma falha constante. Porém, esta filosofia é inadequada onde o número de alternativas para a transferência de potência é limitada, como ocorre nos complexos industriais [4].

Algumas considerações sobre a planta devem ser feitas para adequar o sistema de proteção. O alto custo dos equipamentos e o tempo necessário para reparar ou substituir os equipamentos danificados fazem com que sérias considerações sejam feitas aos projetos de sistema de proteção. A determinação dos equipamentos de proteção deve considerar os seus limites de suportabilidade e os limites dos equipamentos do sistema de potência. O estresse mecânico e térmico, acompanhado de altas correntes de falta, deve ser suportado por todo o sistema durante o tempo necessário para a atuação da proteção [5].

Por outro lado, uma parada indevida gera perda de produção e dos produtos envolvidos no processo. Portanto, para que isto seja evitado, é necessário tolerar uma condição de sobrecarga de curto tempo e, associado a isto, uma possível redução da vida útil dos aparelhos elétricos. Um número de faltas é tolerado na operação do sistema, de outra maneira não seria prático nem econômico o projeto de um sistema de proteção. A natureza de operação da indústria é uma das considerações a serem feitas na definição do grau de proteção [5].

As zonas de proteção definem o espaço onde o elemento de proteção deve atuar. Para um sistema de proteção adequado, todos os elementos do sistema de potência devem ser englobados pelo menos por uma zona de proteção. É aconselhável que os elementos mais importantes sejam englobados em mais de uma zona de proteção. Além do mais, as zonas de

proteção devem sobrepor-se para evitar que a fronteira entre duas zonas fique desprotegida. Por outro lado, a sobreposição não deve ser grande, pois falhas dentro da sobreposição removem de serviço uma parcela maior do sistema [4].

O sistema de proteção principal de uma determinada zona, conhecido também por sistema de proteção primária, deve atuar o mais rápido possível e retirar de operação a menor quantidade possível de equipamentos. O sistema de proteção pode falhar em sua operação e deixar de eliminar uma falha do sistema, sendo assim, é comum o uso de sistemas de retaguarda. Este sistema é mais lento que a proteção primária e retira de operação um número maior de equipamentos. Porém, a relação de resposta e seu nível de certeza costumam ser inversamente proporcionais. O modo de atuação dos elementos de proteção é classificado de acordo com a sua velocidade [4].

No modo de atuação instantâneo, o elemento de proteção opera assim que uma decisão segura é tomada. Nenhuma temporização intencional para diminuir a velocidade de atuação é adicionada. No modo de atuação temporizado, uma temporização é adicionada entre o tempo de decisão e o início da atuação [4].

5.2 PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO

Os elementos de proteção são responsáveis por avaliar uma variedade grande de parâmetros e estabelecer uma ação corretiva necessária. O problema principal envolvendo o sistema de proteção é quantificar a diferença entre a condição normal e anormal dos sistemas de potência, sendo que uma condição normal pode somente significar que o distúrbio está fora da zona de proteção. A atuação do sistema de proteção é ditada pelos fenômenos transientes gerados na ocorrência de distúrbios no sistema de potência, assim sendo, para que um

elemento de proteção seja projetado é necessário estar clara a tarefa que pode ser realizada no sistema [4].

Em geral, quando falhas ocorrem (curtos circuitos), as magnitudes das correntes aumentam e as tensões diminuem. Adicionalmente, pode ocorrer alteração em outros parâmetros. O princípio de operação dos elementos de proteção é baseado na detecção e identificação dessas alterações, havendo a possibilidade que ela possa existir na zona de proteção [4].

A detecção de nível é o princípio de operação mais simples de todas as proteções. A magnitude das correntes de falha geralmente são maiores que as correntes de operação de um sistema de potência. A corrente de *pickup* (ou corrente de atuação) é obtida considerando-se a corrente de plena carga de um equipamento e multiplicando esse valor por uma porcentagem permitida de sobrecarga, que corresponde às operações normais do motor. As correntes acima deste valor significam uma falha ou condição anormal dentro da zona de proteção, necessitando de atuação [4].

Os diversos tipos de elementos de proteção e muitos requisitos de proteção são bem definidos em [4], [6], [5]. Neste trabalho, não há a intenção de descrevê-los com detalhes, somente serão ressaltadas as características importantes para análise de coordenação e seletividade do sistema estudado.

5.2.1 Proteção de sobrecorrente temporizada e instantânea

A principal aplicação da proteção de sobrecorrente temporizada é na proteção de fase e terra de sistemas radiais. Há duas configurações aplicadas para todos as proteções de sobrecorrente temporizadas: a corrente de *pickup* e o tempo de atuação. A corrente de *pickup* é a menor corrente de atuação do relé e a sua configuração geralmente está em uma faixa acima da corrente normal de operação e abaixo das mínimas correntes de falta. Se possível, a

configuração deve servir de proteção de retaguarda para a linha ou equipamento adjacente. Portanto, é necessário conhecer as correntes de máxima carga e as correntes de falta para a configuração da corrente de *pickup* [4].

O tempo de atuação é um parâmetro que pode ser obtido de diversas formas, dependendo do modelo do elemento de proteção [4]. Em instalações industriais acima de 600 V, normalmente o relé é alimentado através de um transformador de corrente e tem a função de detectar a corrente de falta. O relé atua e aciona o disjuntor, que tem a finalidade de interromper a passagem da corrente de falta [5].

As curvas de atuação de relé eletromecânicos podem ser observado na Figura 13. O tempo de atuação pode ser configurado do parâmetro 1/2 (mais rápido) até o 10 (mais lento) e a forma da curva em inversa, muito inversa e extremamente inversa [5]. A velocidade de atuação é dependente da magnitude da corrente, ou seja, há uma relação inversa entre o tempo de atuação e a corrente [4].

Em relés de estado sólido, essa temporização é obtida com circuitos *RLC*, enquanto que, em relés digitais, são usados algoritmos com clock interno ou timers externos. A forma das curvas varia de acordo com fabricante e modelo, porém, muitos adotam as curvas padrões definidas na Figura 13 [4].

Em dispositivos de baixa tensão, é comum o uso de disjuntores que detectam e eliminam a falta do sistema. Os disjuntores de atuação eletromecânica têm um comportamento de atuação corrente-tempo característico de acordo com a Figura 14, enquanto que os dispositivos de estado sólido têm como curva característica a demonstrada na Figura 15, onde os parâmetros para os dois dispositivos são indicados nas figuras. A curva dos dispositivos de estado sólido apresenta uma linha reta na região de trabalho [5].

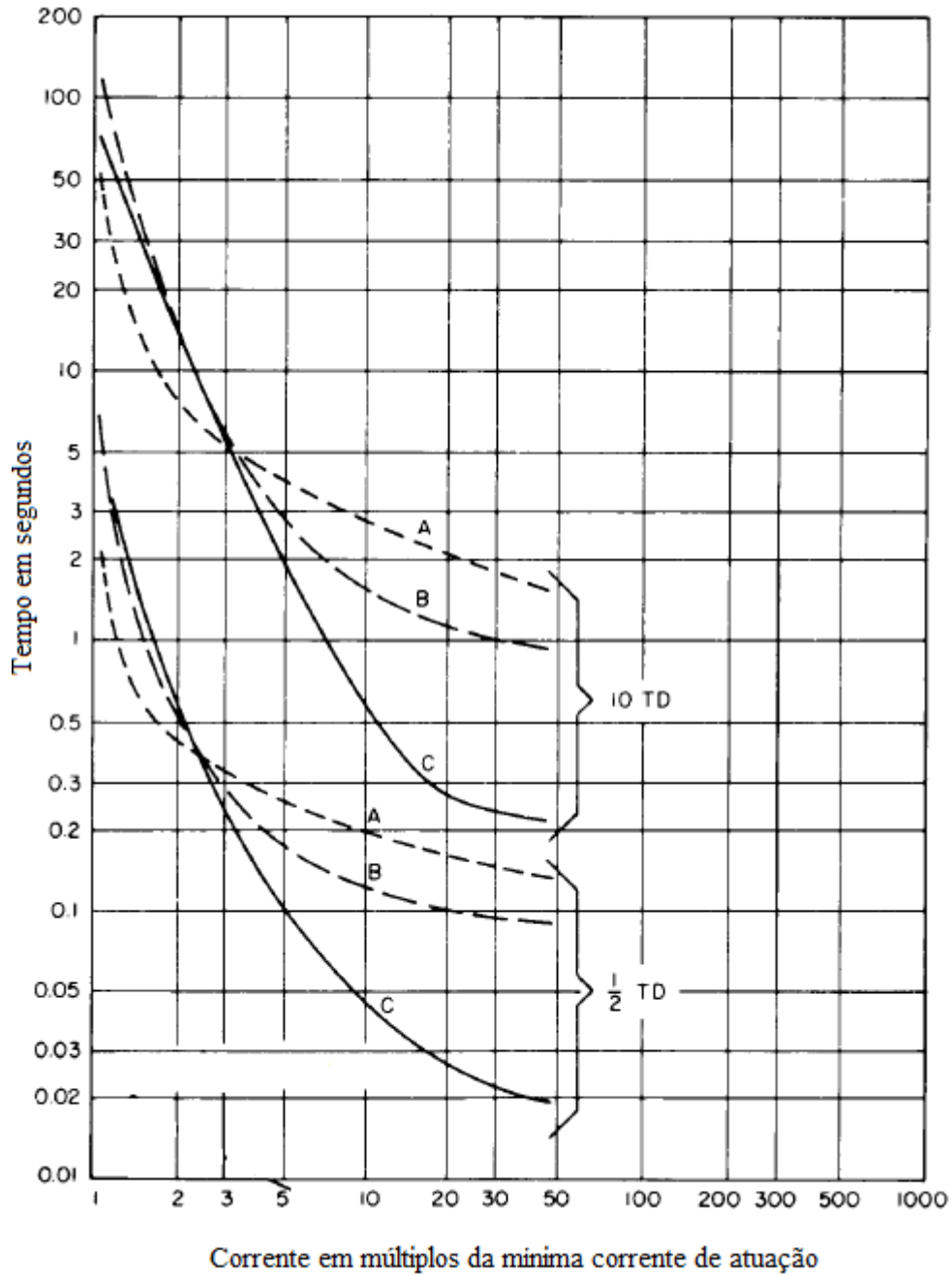


Figura 13: Curva tempo-corrente característica dos relés (adaptado de [5])

O propósito da configuração da temporização é possibilitar a coordenação dos elementos de proteção. As diferentes proteções podem detectar a mesma falha, definida por múltiplos da corrente de *pickup*, e devem atuar em tempos diferentes [4]. O uso de relés e disjuntores com características de atuação iguais facilita a coordenação dos elementos de proteção em sistemas radiais [5].

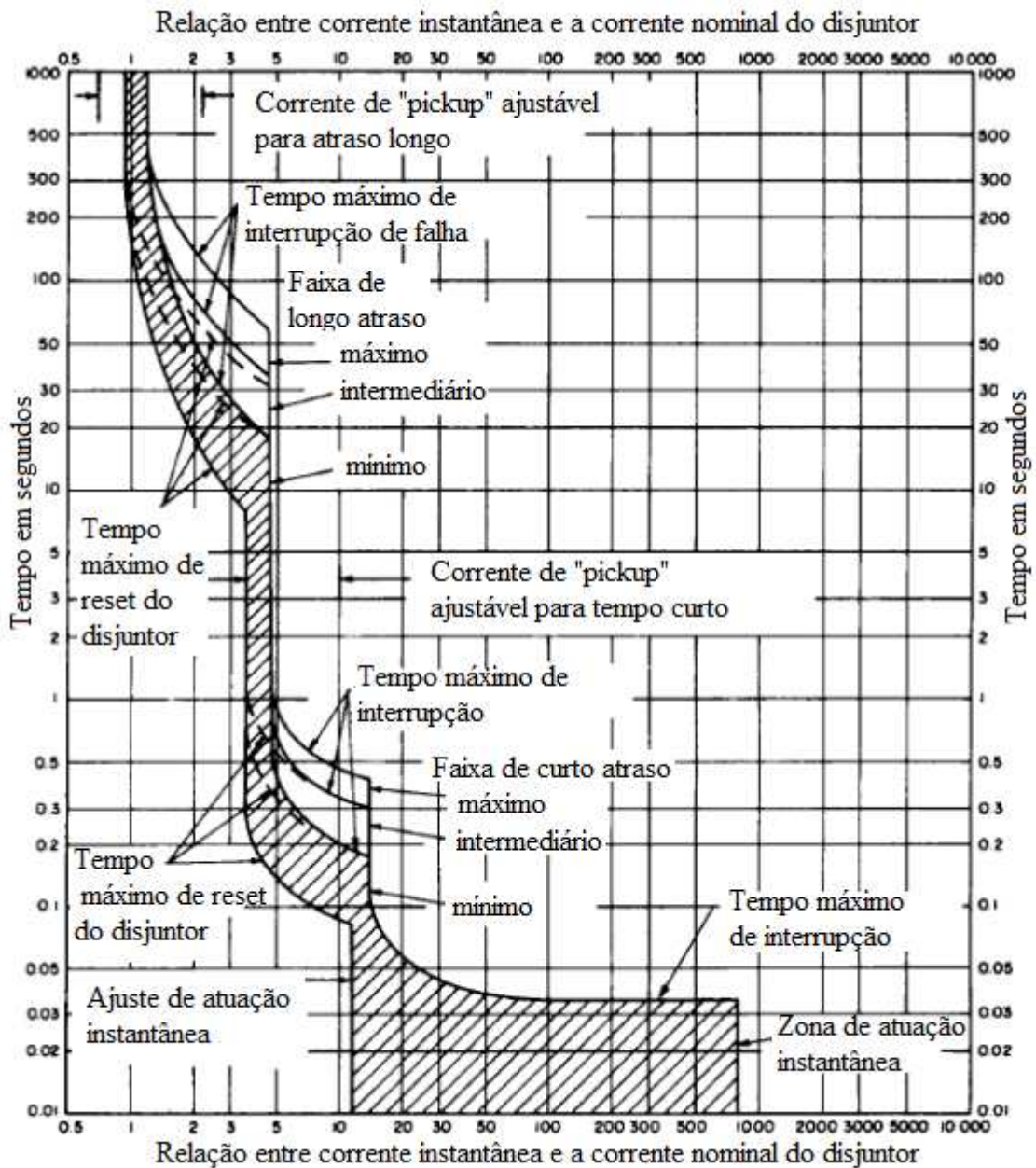


Figura 14: Curva corrente-tempo típica de dispositivos de atuação eletromagnética (adaptado de [5])

O princípio de coordenação pode ser explicado pela Figura 16. A figura mostra uma linha radial e as características de tempo e distância de uma associação de relés temporizados. As curvas dos relés estão representadas pelo tempo de atuação em função da distância do relé. Como a magnitude da corrente diminui ao se afastar da fonte, a curva em função da distância tem uma característica inversa da curva tempo e corrente [4].

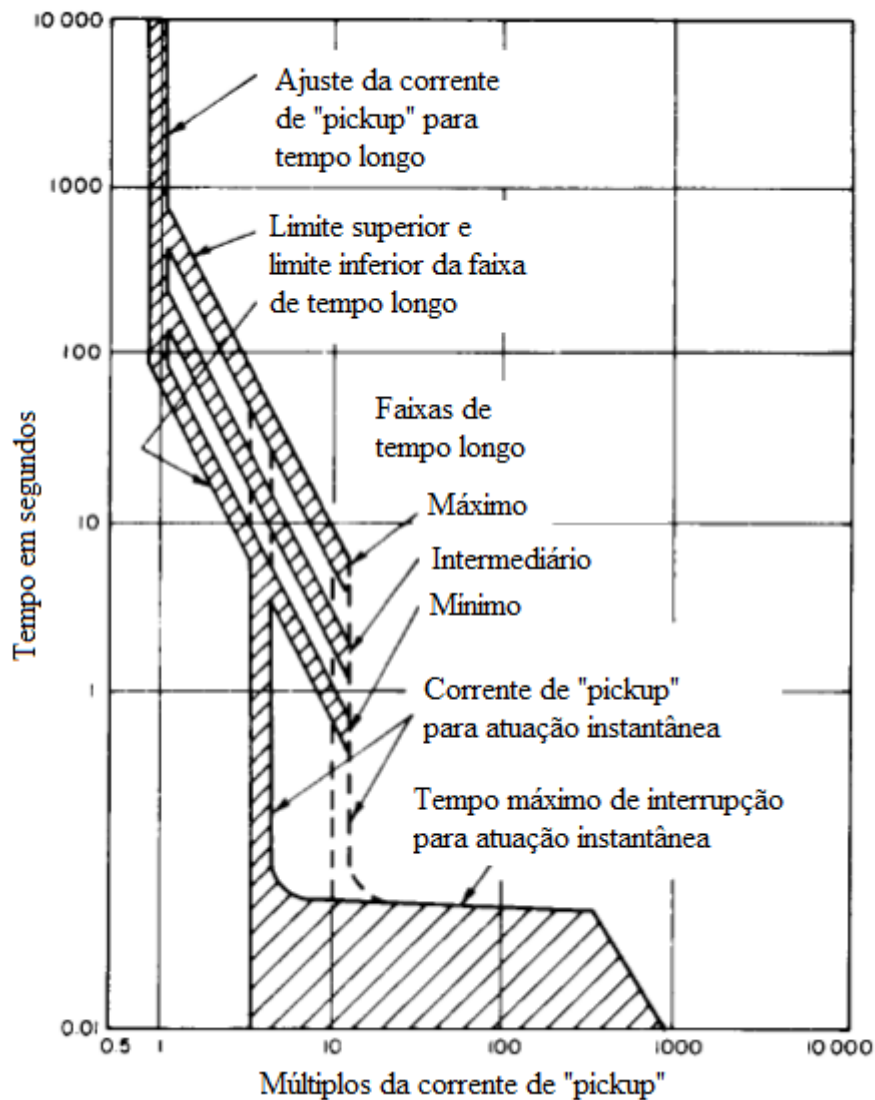


Figura 15: Curva corrente-tempo característica de dispositivos com elementos de estado sólido (retirado de [5])

Ao ocorrer uma falha em F_1 , o relé R_d deve ser o primeiro a atuar. Após um determinado tempo, o relé R_{cd} atua, fornecendo uma proteção de retaguarda para o relé R_d . A mesma lógica de coordenação segue para os próximos relés, sendo assim, a atuação de R_{ab} somente ocorre caso nenhum dos outros relés atue. No caso de ocorrer uma falha entre b e c , a corrente somente será vista pelos relés R_{bc} e R_{ab} , que devem atuar nesta mesma ordem [4].

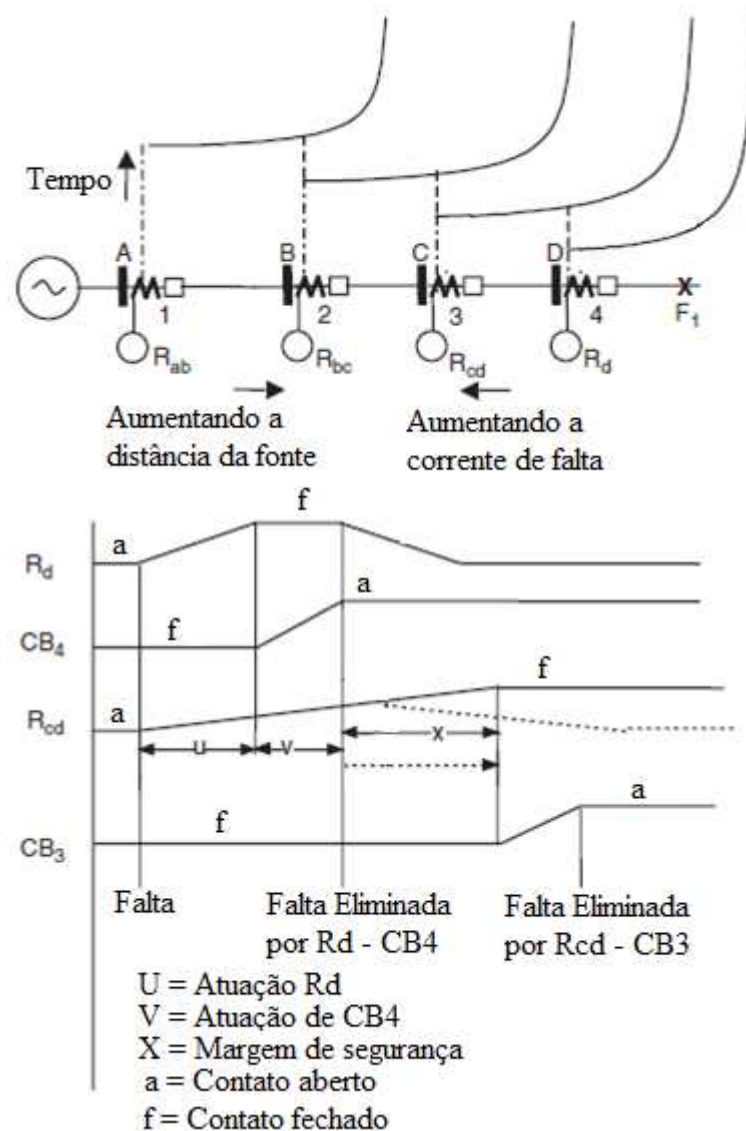


Figura 16: Coordenação de relés de sobrecorrente temporizados (adaptado de [4])

A sequência de tempo é demonstrada para a falha F_1 . Esta falha no final da linha deve sensibilizar o relé R_d e ser eliminada pelo disjuntor CB_4 . Após a detecção pelo relé, o disjuntor é acionado para mover seus contatos e interromper a falha. O disjuntor movimenta seus contatos somente quando a corrente instantânea passa pelo valor zero. Neste momento há uma corrida entre o estabelecimento de uma resistência dielétrica do meio de interrupção e a taxa com que a tensão entre os terminais reaparece. Caso o reaparecimento de tensão for suficiente para vencer a resistência dielétrica, forma-se um arco elétrico entre os terminais. Normalmente, dois ou três ciclos da rede são necessários para eliminar a falha [4].

Neste período, antes da atuação do disjuntor CB_4 , o relé R_{cd} começa a perceber a falta e, considerando um relé eletromecânico, ele começa a se movimentar no sentido de fechar os seus contatos. Após eliminada a falta, o relé R_{cd} começa a retornar para a sua posição inicial. Considerando um relé de disco, este tempo será o mesmo tempo que demorou para chegar nesta posição. Caso a falta não seja eliminada, o disjuntor CB_3 irá atuar [4].

Observando a figura, torna-se claro que o tempo de atuação de R_{cd} , para esta determinada corrente de falta, deve ser maior que o tempo de atuação de $R_d(U)$ mais o tempo de eliminação de falha no disjuntor $CB_4(V)$ e um fator de segurança (X).

A proteção de sobrecorrente instantânea deve ser configurada para fornecer uma proteção de alta velocidade para uma porção apreciável do circuito. A Figura 16 demonstra que quanto mais longe a falta estiver da fonte, a corrente de atuação torna-se menor e o tempo de atuação maior. A detecção destas faltas pelos elementos de proteção mais próximos da fonte pode ser inviabilizada por esta característica [4].

A adição de proteção de sobrecorrente instantânea torna o sistema mais viável, conforme Figura 17. Caso o elemento instantâneo seja configurado para ver uma parte considerável do barramento ou da zona de proteção, os tempos de atuação podem ser reduzidos [4].

Os estudos de curtos circuitos apresentam um nível de incerteza e, como a proteção instantânea não deve atuar para fora da sua zona de proteção, deve-se ter cuidado na seleção do valor desta corrente [4].

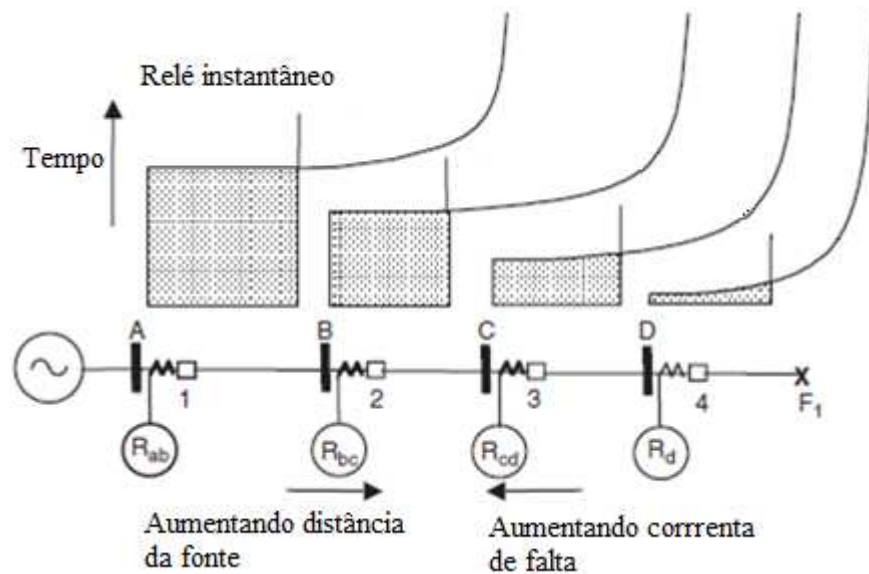


Figura 17: Relés de sobrecorrente instantâneos associados com relés de sobrecorrente temporizados (adaptado de [4])

5.2.2 Requisitos e considerações de proteção

Em resumo, as configurações das proteções devem ser escolhidas de modo que a corrente de *pickup* e os menores tempos de atuação permitam as correntes transitórias do sistema, como a corrente de *inrush* para energizar transformadores e partir motores, e protejam os equipamentos em situações de sobrecarga e de curto circuito. Adicionalmente, os dispositivos devem ser configurados para proteções seletivas, ou seja, a proteção mais próxima interrompe a falta antes dos elementos de proteção de retaguarda. Portanto, os elementos de proteção mais próximos da fonte devem ter correntes de *pickup* maiores e curvas de atuação mais lentas. Para elementos em série com a mesma curva de atuação, somente a corrente de *pickup* é responsável pela seletividade [5].

Em sistemas de potência, considerando diretrizes gerais, a corrente de *pickup* das proteções temporizadas deve ser configurada entre duas vezes a corrente de máxima carga e um terço da corrente de mínima falta. A corrente de atuação instantânea deve ser configurada para as máximas correntes de curto circuito trifásico dos elementos em sua zona de proteção.

Além do mais, a atuação instantânea deve estar preferencialmente acima das configurações instantâneas dos elementos de proteção a jusante, permitindo seletividade das atuações [4].

Para manter a seletividade entre as proteções, os relés devem permitir uma margem de tempo entre as interrupções, evitando que atuem sem necessidade. O tempo nominal de abertura de disjuntores é de 5 a 8 ciclos da rede e, para alguns relés, após a abertura do disjuntor, há um tempo de aproximadamente 0,1 segundo para que os contatos voltem a sua configuração inicial [5]. Na prática, é comum manter uma diferença de tempo de 0,3 a 0,5 segundo na atuação [4]. Para elementos de proteção que não envolvam a inércia de discos, é possível adotar uma margem de 0,2 a 0,25 segundo [5].

De acordo com o artigo 450-3 da NEC [7], na proteção de transformadores com o primário acima de 600 V, quando somente há proteção no primário, a corrente de *pickup* do disjuntor não deve exceder 300% da corrente de máxima carga. Para transformadores com proteção no primário e secundário, os máximos valores são definidos pela Tabela 11.

Tabela 11: Proteção de sobrecorrente máxima para transformadores (adaptado de [5])

Impedância nominal do transformador	Transformador com proteção no primário e no secundário				
	Primário acima de 600 V		Secundário		
			Acima de 600 V		600 V ou menos
	Configuração do disjuntor	Configuração do fusível	Configuração do disjuntor	Configuração do fusível	Configuração do disjuntor / fusível
$Z < 6\%$	600	300	300	250	250
$6\% < Z < 10\%$	400	300	250	225	250

Para transformadores com tensão nominal do primário inferior a 600 V e com proteção somente no primário, recomenda-se um nível máximo de proteção de 125% da corrente de plena carga do transformador. Havendo proteção no primário e no secundário, as configurações máximas são de 250% e 125% da corrente de plena carga, respectivamente [5].

Há o conhecimento que os danos nos transformadores são resultado de efeitos térmicos e mecânicos associados à ocorrência de faltas. De acordo com normas IEEE, as curvas de suportabilidade dos transformadores consideram o fato que o dano devido aos efeitos mecânicos e térmicos é cumulativo. O número de faltas que o transformador é exposto depende de sua aplicação. A primeira curva considera aplicações com uma exposição a faltas frequentes, tipicamente mais de dez vezes durante a vida útil do transformador, enquanto que a segunda curva considera aplicações com uma frequência de faltas menor que este valor [5].

As curvas dos transformadores trifásicos de 501 a 5000 kVA são apresentadas na Figura 18 (transformador a seco) e Figura 19 (transformador a óleo) [5].

Para transformadores de 15 a 500 kVA, é definida como curva de suportabilidade uma linha reta. A linha varia de 2 a 100 segundos tendo I^2t constante no valor de 1250 [5]. Sendo I a corrente instantânea no transformador e t o tempo máximo que o transformador suportar esta corrente.

Uma boa coordenação com a curva de suportabilidade é obtida com o uso de relés e disjuntores com curvas semelhantes à curva de suportabilidade do transformador. Em termos gerais, recomenda-se o uso da corrente de *pickup* da proteção temporizada com valor de 150% a 200% da corrente de plena carga do transformador, tanto para o primário como para o secundário. A corrente de *pickup* da proteção instantânea deve ser configurada entre 150% e 160% da corrente de curto circuito simétrica trifásica [5].

A corrente de magnetização do transformador normalmente é de 8 a 12 vezes a corrente de plena carga durante um período de 0,1 segundos. A representação desta corrente de *inrush* é demonstrada no gráfico de coordenação por um ponto [5].

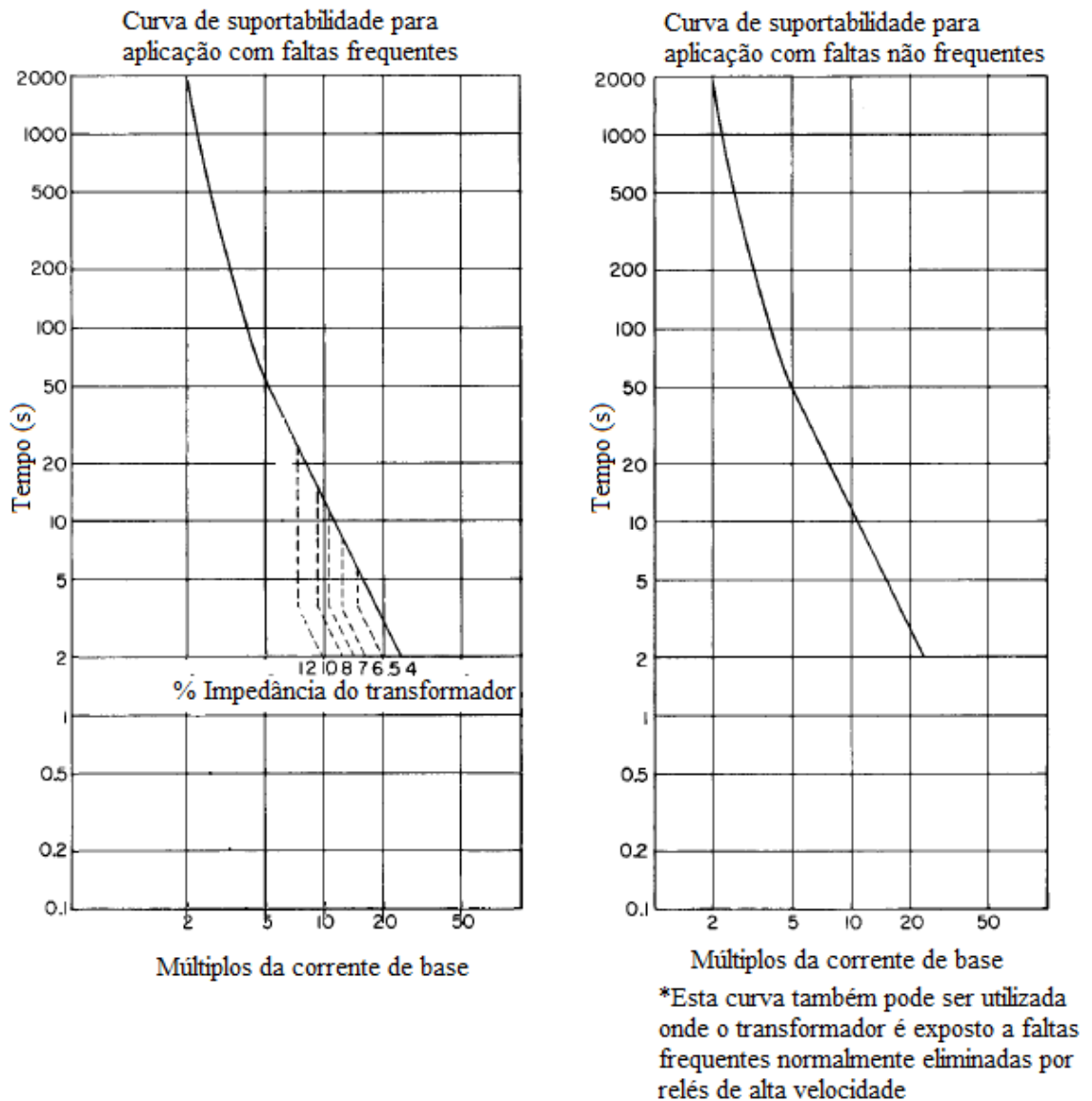


Figura 18: Curva de suportabilidade de transformador de óleo (501 a 5000 kVA) (adaptado de [5])

De acordo com o artigo 430-52 da NEC [7], as configurações máximas para a proteção de motores de corrente contínua é de 250% da corrente de plena carga para a proteção instantânea e 150% da corrente de plena carga para a corrente de atuação temporizada. O valor aconselhado para a corrente de *pickup* da proteção temporizada é de 115% da corrente de plena carga para motores com fator de serviço igual a 1 e 125% para motores com fator de serviço superior 1,15 e temperaturas abaixo de 40⁰ C.

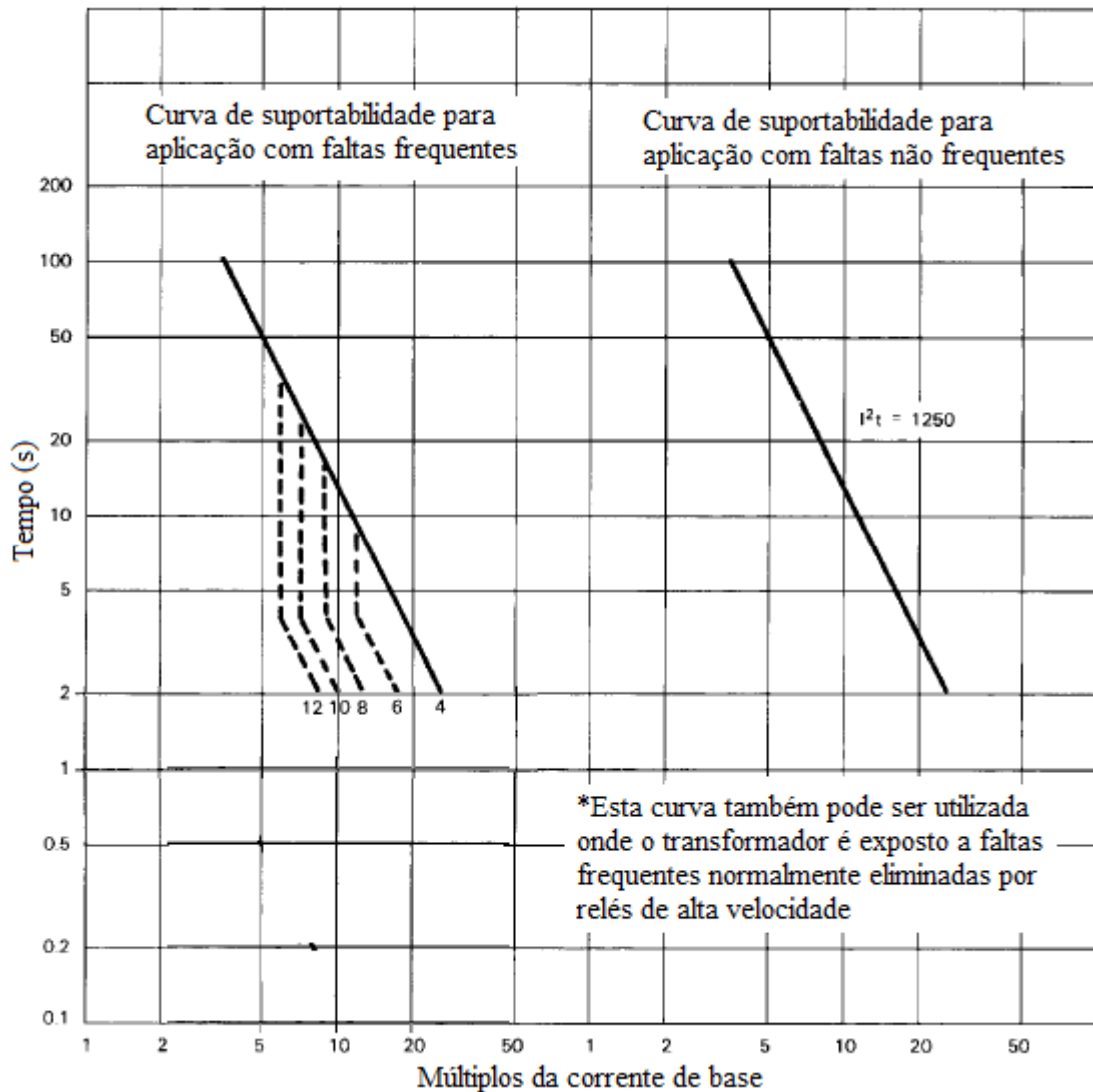


Figura 19: Curva de suportabilidade de transformador a seco (501 a 5000 kVA) (adaptado de [5])

5.3 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE NO SISTEMA ESTUDADO

O propósito principal de um estudo de coordenação é determinar satisfatoriamente as capacidades e configurações dos dispositivos de proteção do sistema. O gráfico de coordenação é apresentado em escala logarítmica e representa um registro permanente das relações de operação corrente e tempo. É aconselhado que o gráfico seja demonstrado na menor tensão de operação [5].

Para a análise do sistema estudado, foi utilizado o mesmo software de análise de sistema de potência utilizado nas análises de curto circuito. O programa tem modelos de

curvas de atuação padrão que podem ser editadas de acordo com os relés e disjuntores do sistema estudado. O diagrama unifilar foi simplificado com a omissão da duplicidade de conversores. Porém, isto não representa uma alteração na análise de coordenação e seletividade, pois todos disjuntores foram mantidos, permitindo a alimentação de todos os motores por ambas as barras.

Os disjuntores de entrada do painel, o disjuntor de ligação entre a barra C e D e os disjuntores que alimentam os conversores do motor L-229DM e do motor L-229CM têm curvas de atuação semelhantes à Figura 15, porém não possuem a configuração da curva rápida. Os disjuntores do primário e do secundário dos transformadores que alimentam os conversores dos motores L-230DM e L-230CM têm curva análoga à Figura 14. O relé de retaguarda do painel PNAT-11 tem curva semelhante à curva da Figura 13.

Na Figura 20, é representado um diagrama unifilar com a configuração do sistema no momento da falha. A Figura 21 e a Figura 22 analisam a coordenação e seletividade do sistema.

O primeiro coordenograma demonstra os elementos de proteção dos motores L-229DM e L-229CM. A segunda figura mostra as curvas para o sistema de alimentação dos motores L-230DM e L-230CM.

Os conversores permitem uma configuração de limitação de corrente de armadura para os motores de corrente contínua. Esta limitação de corrente e as curvas de suportabilidade dos transformadores são demonstradas juntamente com as curvas de atuação dos elementos de proteção.

A Figura 21 e a Figura 22 demonstram a configuração das curvas de atuação, tornando mais fácil a análise do sistema de proteção. Algumas vulnerabilidades foram encontradas.

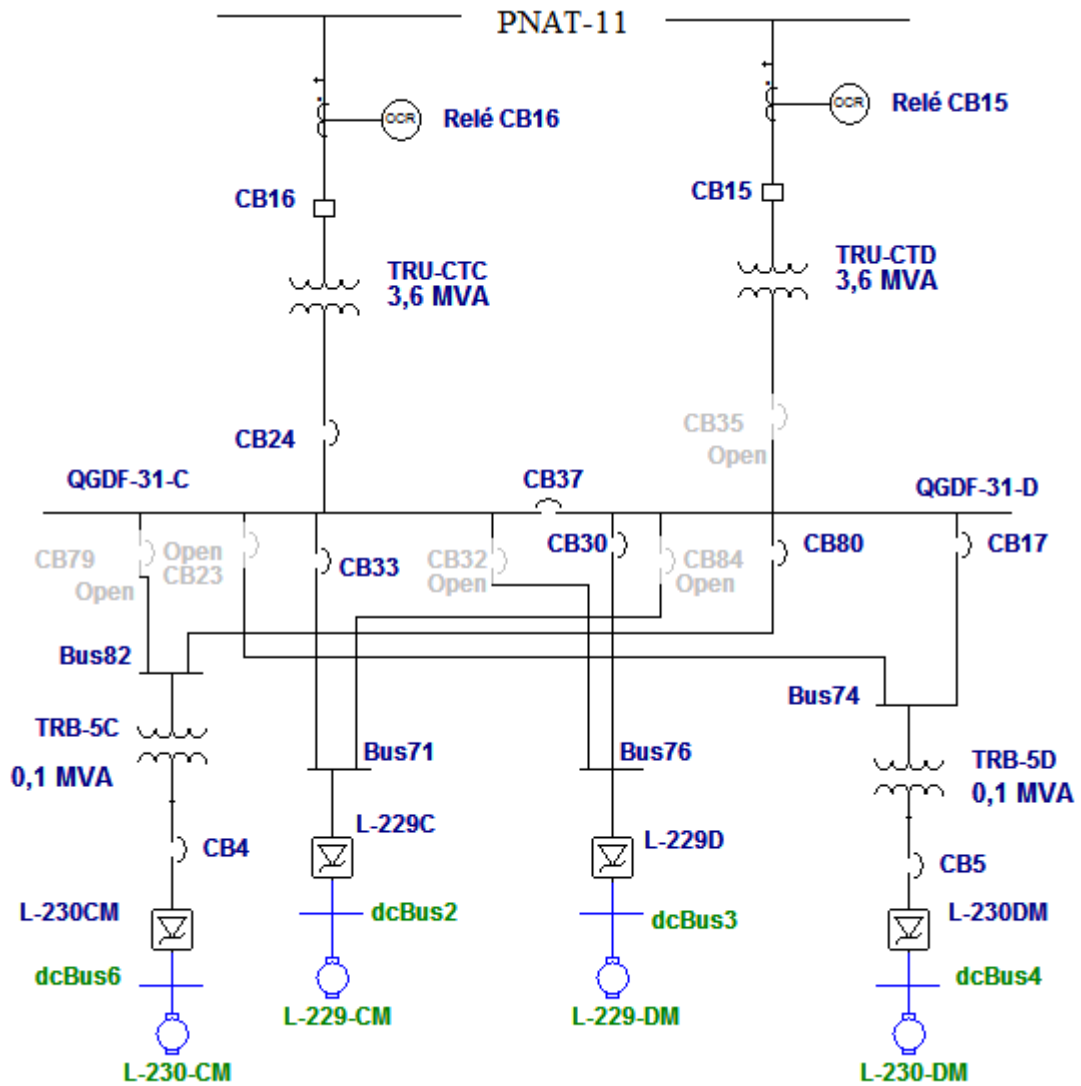


Figura 20: Unifilar do sistema estudado na configuração do momento da falta

Primeiramente, o relé de proteção de retaguarda no PNAT-11 estava coordenado com os disjuntores de entrada do painel e de ligação entre as barras somente até aproximadamente 230% da máxima carga do painel. Assim, para sobrecargas no painel maiores que 230% da corrente de plena carga e para correntes de faltas, o relé de retaguarda atuava antes do disjuntor de entrada do painel e antes do disjuntor de interligação. Esta atuação não seletiva foi verificada na ocorrência da última falta.

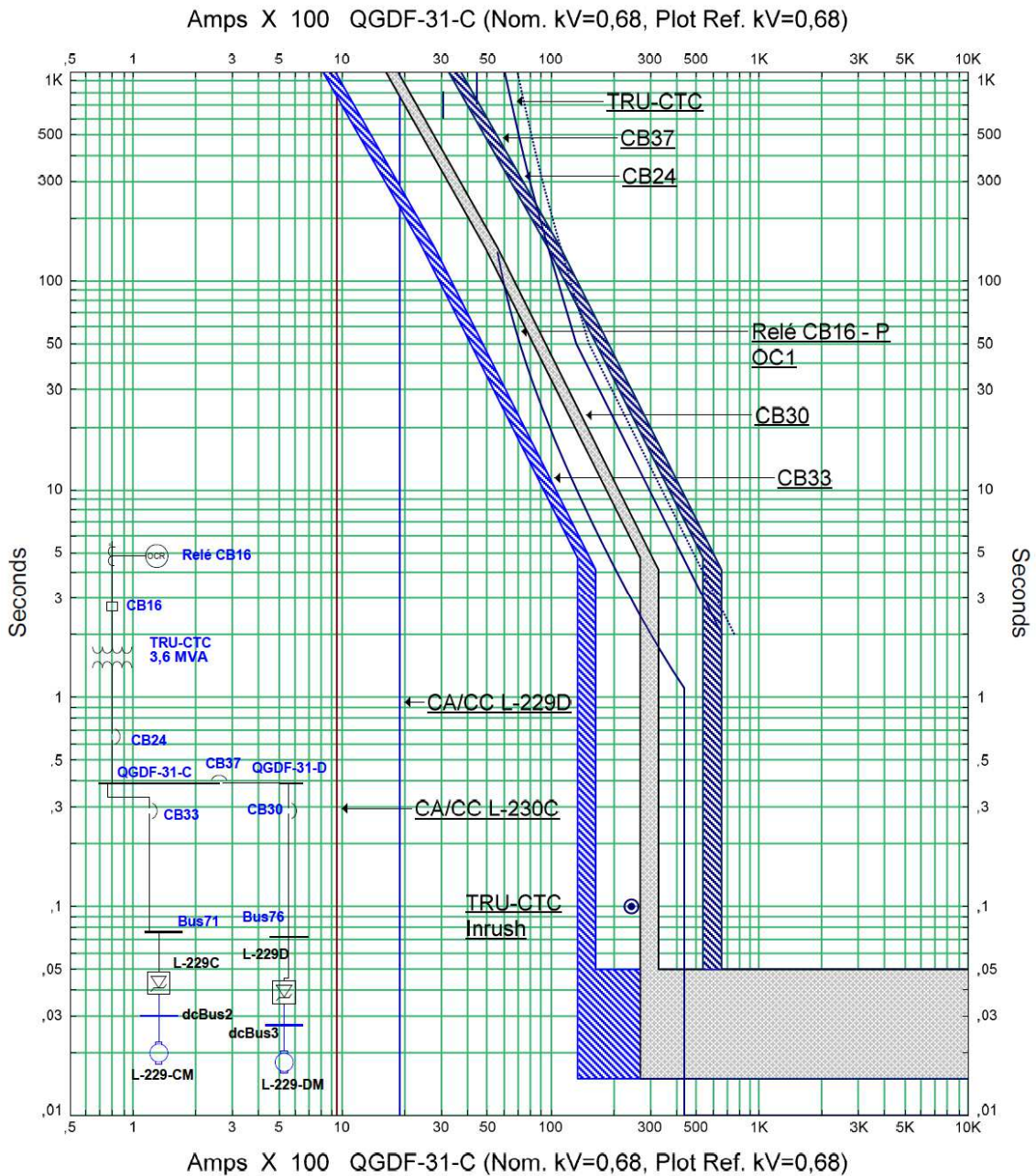


Figura 21: Coordenograma da configuração dos elementos de proteção do painel QGDF-31. Alimentação dos motores L-229DM e L-229CM

Adicionalmente, para correntes superiores a aproximadamente 500% da corrente de máxima carga do motor L-229DM, ou seja, para correntes de falta na linha que alimenta este motor, o relé de retaguarda do PNAT-11 atuava antes do disjuntor do conversor deste motor. Desta forma, faltas na linha de alimentação do motor L-229DM interromperiam o

fornecimento de energia para as duas plantas, caso o painel estivesse sendo alimentado somente por uma de suas entradas.

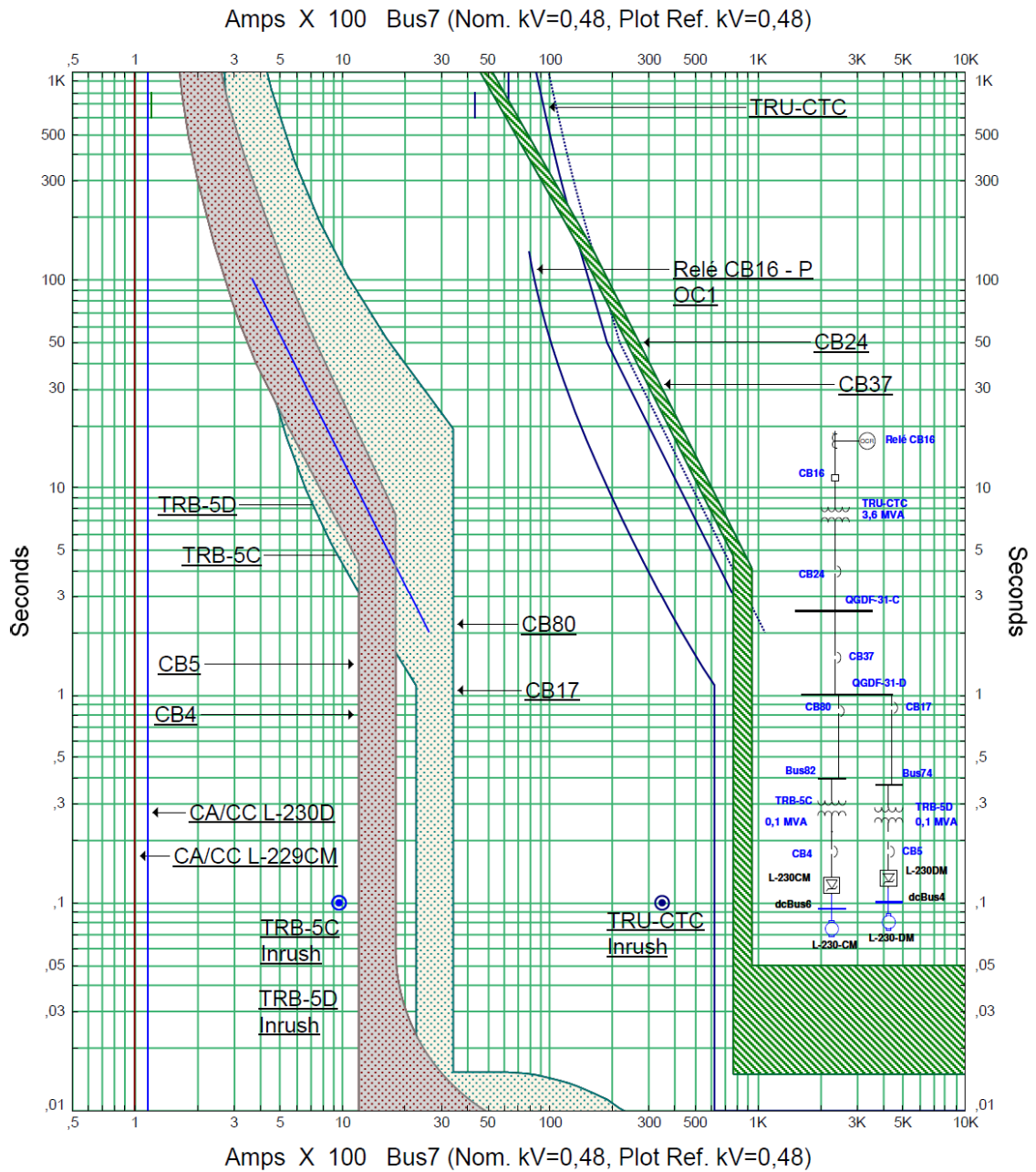


Figura 22: Coordenograma da configuração dos elementos de proteção do painel QGDF-31. Motores L-230DM e L-230CM

Outro ponto a ser ressaltado é a mesma configuração das curvas de atuação do disjuntor de entrada do painel e do disjuntor de interligação entre as barras C e D. Por

exemplo, se o painel estivesse sendo alimentado somente pelo transformado TRU-CTC, como no momento do último evento, e ocorresse uma falta no barramento QGDF-31-D, não seria possível determinar qual disjuntor atuaria primeiro. Caso o disjuntor de entrada do painel atuasse primeiro, ocorreria a interrupção do fornecimento de energia para ambas as barras.

A limitação da corrente de armadura definida pelos conversores dos motores L-229CM e L-229DM estava no valor máximo especificado para motores de corrente contínua (150% da corrente de plena carga para a corrente de atuação temporizada). O valor da corrente de *pickup* temporizada dos disjuntores que alimentam estes conversores também estava configurado em aproximadamente 150% da corrente de plena carga do motor. Com esta configuração, o conversor possibilita que o disjuntor atue de forma indevida em caso de sobrecarga no motor.

Os disjuntores do primário e do secundário dos transformadores que alimentam os conversores dos motores L-230DM e L-230CM estão com sua corrente de *pickup* temporizada em, respectivamente, 200% e 125% da corrente de máxima carga do transformador. Portanto, a configuração do disjuntor secundário está no máximo valor permitido, podendo ser observado uma sobreposição da curva de suportabilidade do transformador.

Considerando a carga dos motores L-230DM e L-230CM, a corrente de *pickup* temporizada para os disjuntores do primário e do secundário está, respectivamente, em aproximadamente 320% e 200% da corrente de máxima carga do motor. Portanto, os disjuntores dos secundários dos transformadores que alimentam os conversores dos motores L-230DM e L-230CM estão com a corrente de atuação temporizada acima do valor máximo aconselhado para motores de corrente contínua (150% da corrente de plena carga).

Adicionalmente, as curvas de atuação dos disjuntores dos primários destes mesmos transformadores têm uma característica mais inversa que os disjuntores dos secundários. Esta

diferença nas curvas de atuação faz com que não ocorra coordenação entre os disjuntores para correntes acima de 650% da corrente de máxima carga dos motores L-230DM e L-230CM.

Neste trabalho, são apresentadas algumas propostas de melhorias para o sistema. Primeiramente, são apresentadas alternativas para a situação atual do painel (após o evento). Posteriormente, são feitas considerações para o projeto do novo painel, que substituirá o sistema existente.

5.3.1 Considerações para o sistema existente

Depois da ocorrência do último evento, o painel está sendo alimentado somente pelo transformador TRU-CTC e todas as cargas estão conectadas na barra QGDF-31-C. Esta configuração é adotada pois os cubículos do painel da barra QGDF-31-D estão fora de operação. A Figura 23 demonstra esta configuração.

A corrente de *pickup* do relé localizado no PNAT-11 está em 150% da máxima corrente do transformador, portanto sua configuração deve ser mantida.

A corrente de *pickup* do disjuntor de entrada do painel está configurado como 160% da carga máxima do painel. Este valor será mantido com uma alteração na curva de tempo longo do disjuntor. O motivo da alteração é obter coordenação com o relé do PNAT-11. A corrente de atuação instantânea é configurada em 36 kA. Este valor está acima da corrente subtransitória de curto circuito das linhas alimentadas pelo painel, aproximadamente 28 kA. Para esta corrente, o disjuntor tem uma temporização de 0,5 segundo, ou seja, acima da margem de tempo de 0,25 segundo necessária para a coordenação entre disjuntores deste modelo.

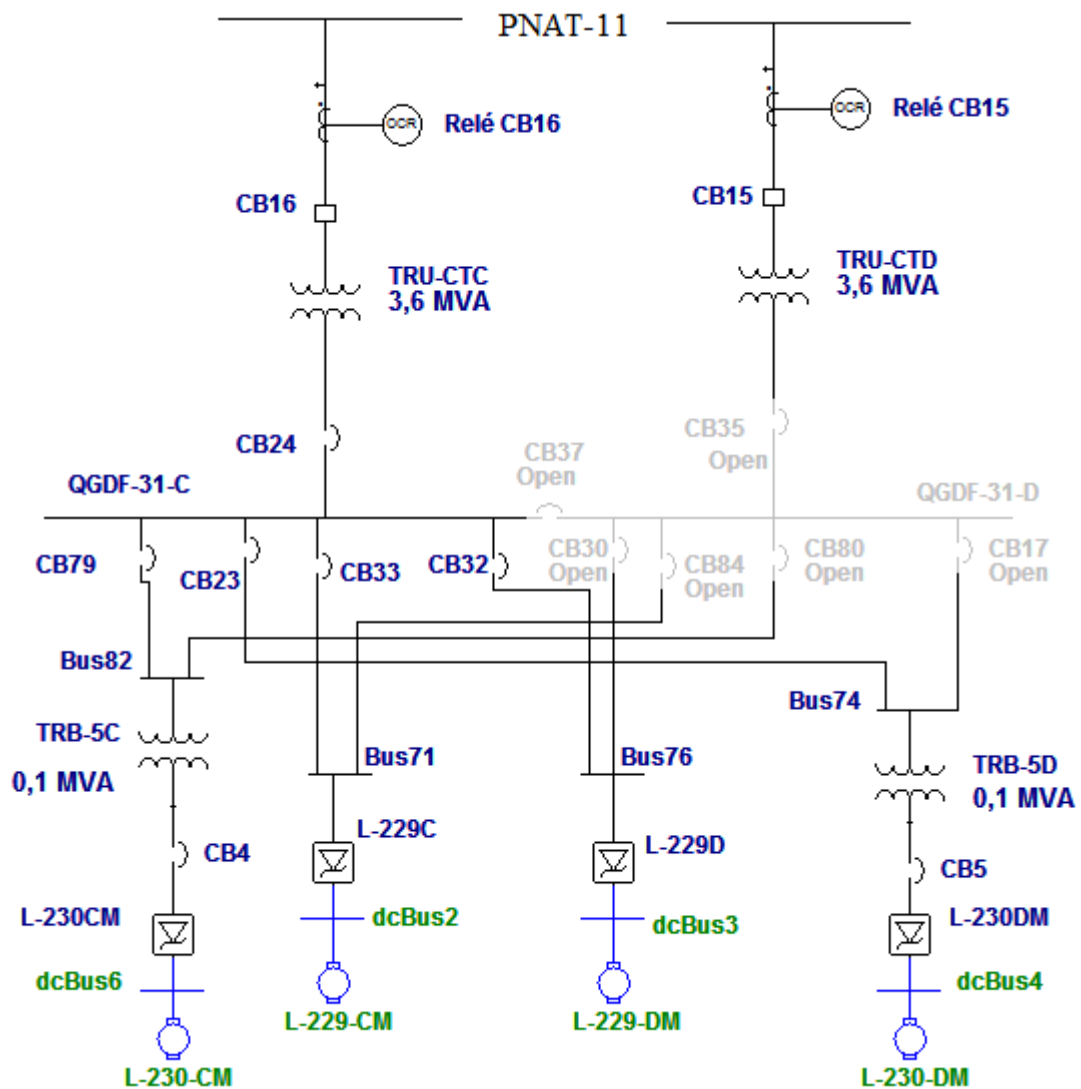


Figura 23: Unifilar da configuração atual do sistema estudado

A limitação de corrente dos conversores é definida pelo valor típico de 115% da máxima corrente de carga do motor. A corrente de atuação temporizada dos disjuntores dos conversores para os motores L-229DM e L-229CM permanece na mesma configuração de 150% da corrente de plena carga do motor. Dessa forma, o disjuntor somente atua quando houver uma falha no conversor. O valor máximo para atuação instantânea é 250% da corrente carga máxima. O valor selecionado para a atuação instantânea foi de 240% da corrente de plena carga do motor. A Figura 24 demonstra as alterações.

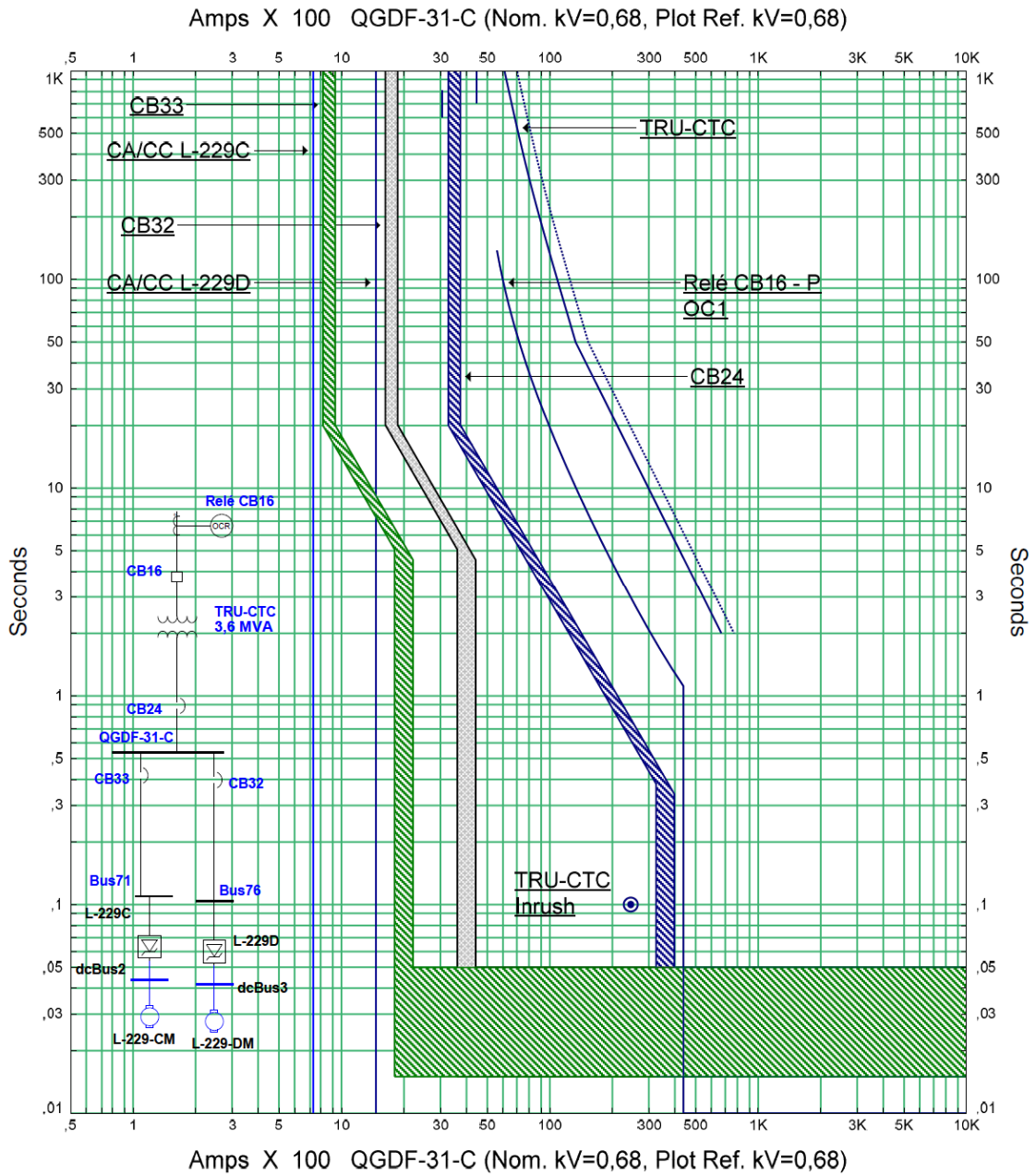


Figura 24: Proposta de alteração da configuração dos elementos de proteção considerando a condição atual do sistema estudado

Atualmente, a única alteração possível para os disjuntores que alimentam os conversores do L-230DM e L-230CM é o aumento da corrente de atuação dos disjuntores localizados nos primários dos transformadores. Apesar desta alteração proporcionar uma melhor coordenação entre os disjuntores do primário e secundário, não é aconselhável que ela seja realizada. A curva do disjuntor do primário já está envolvendo a curva de

suportabilidade do transformador, um aumento na corrente de atuação comprometeria ainda mais a proteção deste elemento.

5.3.2 Considerações para o novo painel

O novo painel está em fase de projeto e não estão definidos os itens a serem adquiridos, portanto somente algumas considerações iniciais podem ser feitas.

Com relação aos elementos de proteção, uma proposta de mudança é nas curvas de atuação dos disjuntores de entrada do painel e do disjuntor de interligação. O objetivo é que eles atuem de forma seletiva, ou seja, o disjuntor de ligação tenha uma atuação mais rápida que o disjuntor de entrada do painel, tanto na curva temporizada como na atuação instantânea. Esta alteração permite uma coordenação entre estes disjuntores quando o painel é alimentado por somente uma de suas entradas.

A outra idéia com relação aos elementos de proteção é a substituição dos disjuntores do transformador de alimentação dos motores L-230DM e L-230CM. A proposta é utilizar disjuntores com uma corrente de *pickup* menor e com curvas iguais ou semelhantes entre as proteções do primário e do secundário. O secundário e o primário podem adotar uma corrente de *pickup* de 200% e 150% da corrente de plena carga do motor, respectivamente.

Adicionalmente, para estes mesmos disjuntores, é aconselhável a adição de um modelo de disjuntor com ajuste da corrente de atuação instantânea. Deste modo, o disjuntor de proteção dos conversores pode ser regulado para uma atuação instantânea próxima de 250% da corrente de plena carga do motor e o disjuntor do primário do transformador pode ser configurado com uma atuação instantânea acima da corrente de curto circuito trifásico dos conversores.

A Figura 25 demonstra estas considerações. A figura considera os mesmos disjuntores atualmente utilizados para alimentação do L-229CM e L-229DM e um modelo de disjuntor semelhante aos utilizados na alimentação do L-230DM e L-230CM.

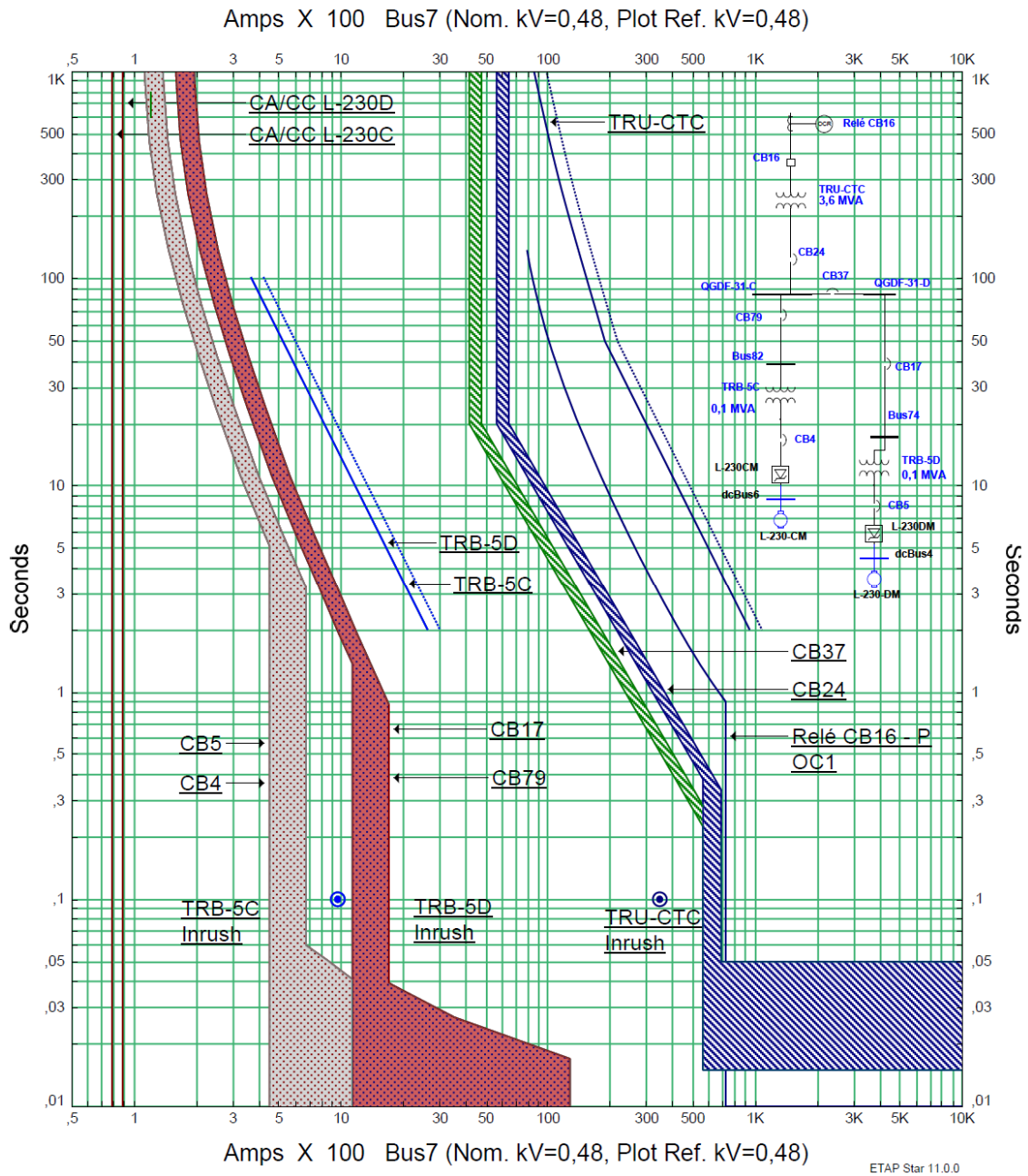


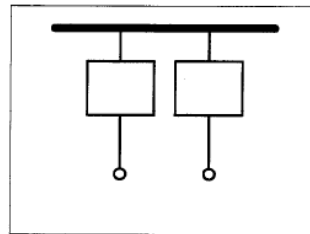
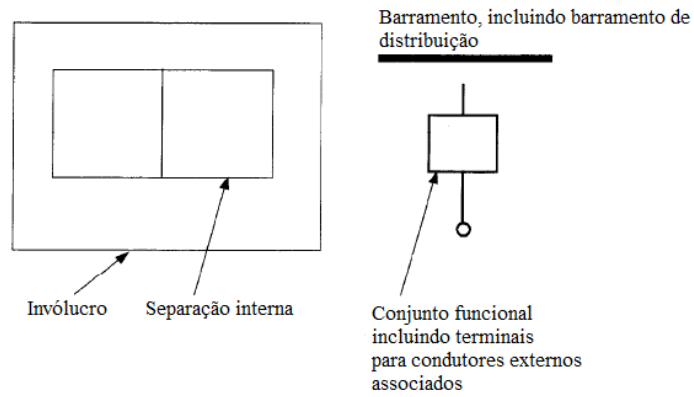
Figura 25: Melhorias a serem consideradas no projeto do novo painel

Além destas propostas para o projeto do novo painel, devem ser consideradas as alterações mostradas no item anterior. Considerando que o fogo no disjuntor se espalhou para os conjuntos mais próximos, também é aconselhável a adoção de um método mais robusto de separação interna dos conjuntos do painel.

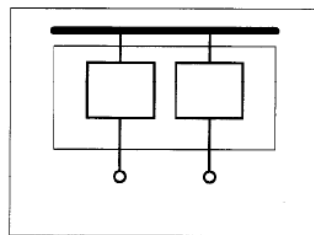
Segundo a IEC 60439-1 [2], os conjuntos podem ser divididos internamente em ambientes protegidos fechados ou em compartimentos separados. O objetivo é proteger contra

o contato com partes perigosas que pertençam aos compartimentos mais próximos e proteger contra a passagem de materiais sólidos entre os compartimentos. Para isto, são adotadas divisões ou barreiras, normalmente metálicas. A Figura 26 e a Tabela 12 resumem as formas definidas na norma. O projeto deve adotar a forma 3b ou superior, garantindo separação entre o barramento e as unidades funcionais, separação entre as unidades funcionais e separação dos condutores externos das unidades funcionais e do barramento.

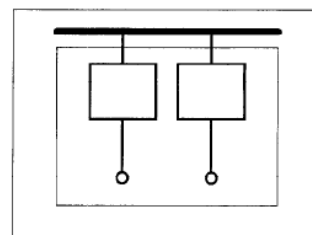
Símbolos



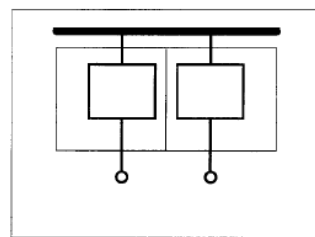
Forma 1



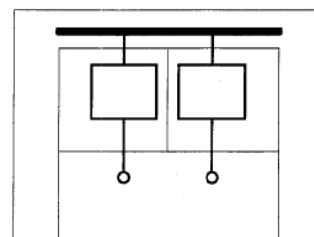
Forma 2a



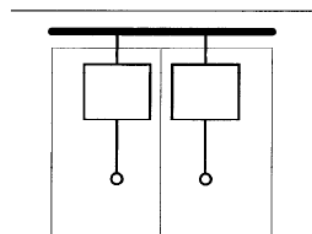
Forma 2b



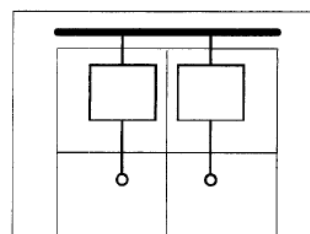
Forma 3a



Forma 3b



Forma 4a



Forma 4b

Figura 26: Representação gráfica das formas de separação de compartimentos (adaptado de [2])

Tabela 12: Formas de separação para painéis elétricos (adaptado de [2])

Critério Principal	Subcritério	Forma
Nenhuma separação		Forma 1
Separação do barramento das unidades funcionais	Terminais para condutores externos não separados do barramento	Forma 2a
	Terminais para condutores externos separados do barramento	Forma 2b
Separação do barramentos das unidades funcionais e separação de todas as unidades funcionais entre si. Separação dos terminais para condutores externos das unidades funcionais, mas não entre si	Terminais para condutores externos não separados do barramento	Forma 3a
	Terminais para condutores externos separados do barramento	Forma 3b
Separação de barramentos das unidades funcionais e separação de todas as unidades funcionais entre si, inclusive os terminais para condutores externos que são partes integrantes da unidade funcional	Terminais para condutores externos no mesmo compartimento, bem como a unidade funcional associada	Forma 4a
	Terminais para condutores externos não no mesmo compartimento que a unidade funcional associada, mas em espaços protegidos ou compartimentos individuais, separados e fechados	Forma 4b

5.4 RESUMO DO CAPÍTULO 5

O capítulo define o objetivo do sistema de proteção, apresenta conceitos de confiabilidade em sistemas de proteção, zonas de proteção e condições aconselhadas para a

configuração dos elementos. Estes itens devem ser analisados para se obter uma boa coordenação e seletividade no sistema de proteção.

Analisando o sistema estudado, foram demonstrados os coordenogramas do sistema de proteção no momento da falha e foram apontadas algumas vulnerabilidades encontradas nesta configuração. Posteriormente, considerando a condição atual do sistema, uma nova configuração para os elementos de proteção foi determinada. Para finalizar, foram feitas algumas recomendações referentes ao projeto do novo painel a ser adquirido.

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi verificar os níveis de curto circuito para um painel do sistema elétrico de uma planta industrial petroquímica e avaliar a coordenação e seletividade dos seus elementos de proteção.

Na análise de curto circuito, foi utilizada a metodologia de componentes simétricos com o auxílio de considerações práticas de sistemas elétricos industriais. Com o uso desta metodologia, foram desenvolvidos diagramas de impedâncias para a obtenção das correntes de curto circuito trifásicas. As correntes de curto circuito são calculadas de forma simples através dos diagramas de impedância. O efeito no nível de curto circuito resultante da alteração de um equipamento ou expansão do sistema elétrico da planta pode ser mensurado com uma simples alteração ou adição das impedâncias associadas aos novos elementos.

Os resultados obtidos através da metodologia por componentes simétricos foram comparados com um *software* de análise de sistema de potência. A comparação comprovou que a metodologia aplicada é válida e resulta em valores muito semelhantes aos valores obtidos com simulações computacionais. Portanto, os diagramas de impedância são uma contribuição do trabalho, sendo que ele pode ser utilizado para análise de curto circuito de outros pontos do sistema ou na avaliação de efeito de alterações na carga. Adicionalmente, este trabalho serve de auxílio para cálculos de curto circuito em demais sistemas elétricos industriais.

A análise de curto circuito no painel estudado contribui para comprovar que os barramentos e os disjuntores estavam dimensionados para suportar as máximas correntes de curto circuito. A empresa entrou em contato com o fabricante do disjuntor, que falhou em sua operação, e ainda aguarda uma resposta. Apesar de não ocorrer com frequência, é cogitada a possibilidade de ter ocorrido uma falha espúria neste equipamento de proteção.

A análise de coordenação e seletividade encontrou algumas vulnerabilidades na configuração do sistema de proteção do painel estudado. O motivo da não atuação do disjuntor de interligação entre as barras e do disjuntor de entrada do painel foi demonstrado de forma clara através dos coordenogramas dos elementos de proteção. Os coordenogramas também foram fundamentais para observar outras possíveis vulnerabilidades do sistema.

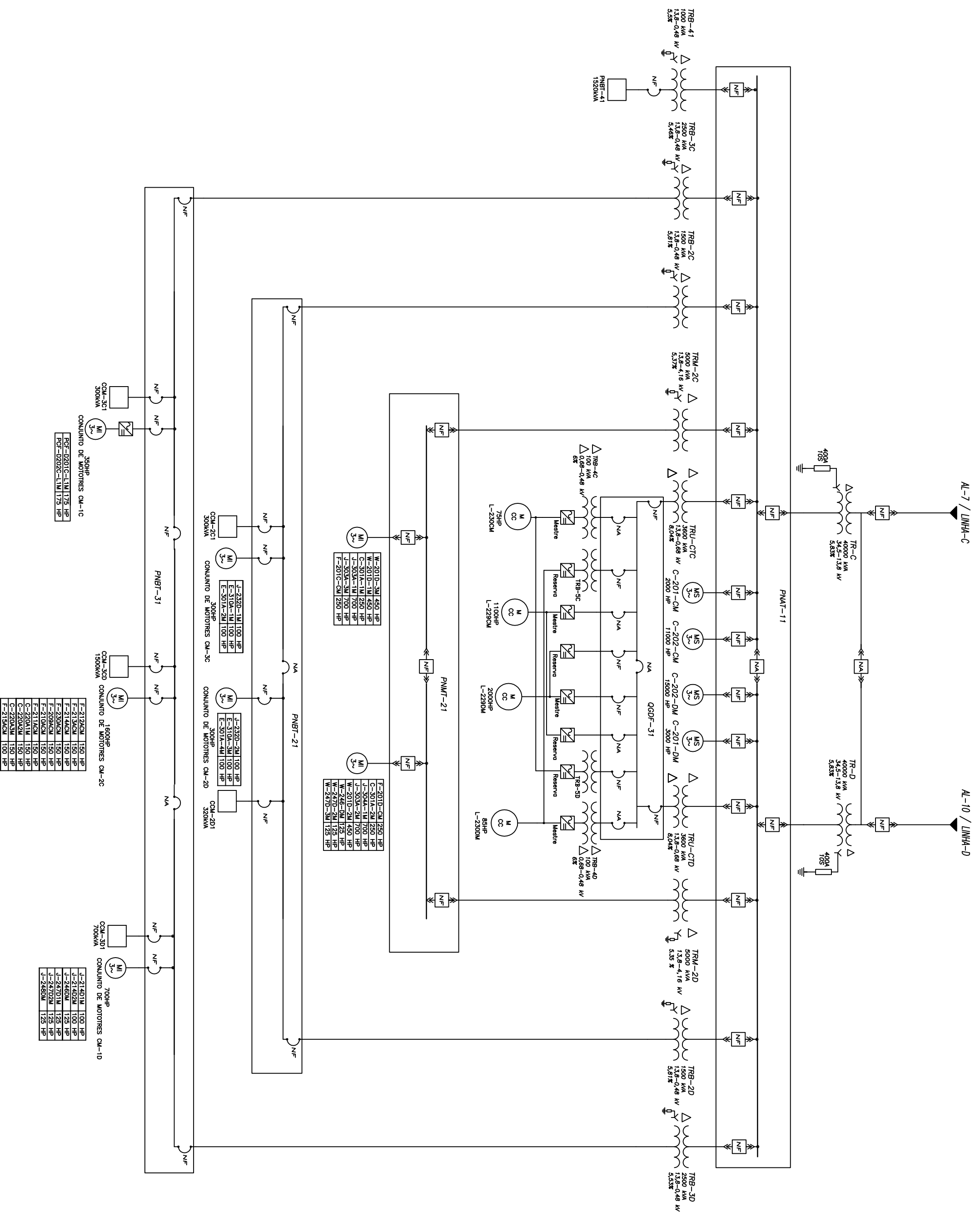
A análise de coordenação e seletividade possibilitou que contribuições fossem feitas para a melhoria do sistema de proteção, considerando a condição atual e considerando o projeto do novo painel.

O trabalho contribui para uma melhor compreensão do painel *QGDF-31*, considerando os níveis de curto circuito e a configuração do sistema de proteção. Esta análise ganha importância considerando que este painel alimenta equipamentos críticos da planta e foi acometido de um dano que comprometeu metade de seu funcionamento e gerou perdas elevadas, tanto por dano aos equipamentos quanto por parada de produção.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] ABB. **Guia de Produtos.** Disponível em: <<http://www.abb.com.br/ProductGuide/>> Acesso em: 20 de novembro de 2011.
- [2] BRITISH STANDARDS. **Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Part 1: Type-tested and partially type-tested assemblies.** Reino Unido, 1999.
- [3] ETAP. **PowerStation 4.0 User Guide.** Estados Unidos: Operation Technology, Inc, 2001. 1664p.
- [4] HOROWITZ, Stanley H.; PHADKE, Arun G. **Power System Relaying.** 3.ed. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 331p.
- [5] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants: Std 141-1993.** New York, 1993.
- [6] KASIKCI, Ismail. **Short Circuit in Power Systems: A Practical Guide of IEC 60909.** Alemanha: Wiley-VCH Verlag-GmbH.
- [7] NFPA. **National Electrical Code.** Estados Unidos: National Fire Protection Association, Inc, 2002. 718p.
- [8] ROSENBAACH, Luiz Marciano; VIANNA, Miguel S. B. **Relatório Técnico Meridium SE-QGDF 31: Avaliação de Ocorrência no Painel.** BRASKEM-SA, 2011. 10p.
- [9] STEVENSSON, William D.; GRAINGER, John J. **Power System Analysis.** 3.ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc. 1994. 814p.
- [10] UNITEC. **Adequação à NR-10 – Braskem PE4,** Porto Alegre, 2008. 73p.

**APÊNDICE A: DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DA
PLANTA**



AL-7 / LINHA-C

AL-10 / LINHA-D

TR-C
40000 KVA
34,5-13,8 KV
5,83%

TR-D
40000 KVA
34,5-13,8 KV
5,83%

400A
10S

400A
10S

PNAT-11

TRB-41
1000 KVA
13,8-0,48 KV
5,83%

TRB-3C
2500 KVA
13,8-0,48 KV
5,48%

TRB-2C
1500 KVA
13,8-0,48 KV
5,81%

TRM-2C
5000 KVA
13,8-4,16 KV
5,37%

TRB-4C
100 KVA
0,68-0,48 KV
6%

TRB-3C
100 KVA
0,68-0,48 KV
6%

TRB-3D
100 KVA
0,68-0,48 KV
6%

TRB-4D
100 KVA
0,68-0,48 KV
6%

TRM-2D
5000 KVA
13,8-4,16 KV
5,35%

TRB-2D
1500 KVA
13,8-0,48 KV
5,81%

TRB-3D
2500 KVA
13,8-0,48 KV
5,83%

PNBT-41
1520KVA

M
CC
L-2300M
75SH

M
CC
L-2290M
1100HP

M
CC
L-2280M
2000HP

M
CC
L-2300M
88HP

W-201D-3M	450 HP
W-201D-2M	450 HP
C-301A-1M	100 HP
C-301A-2M	100 HP
L-303A-1M	170 HP
L-303A-2M	170 HP
E-201C-2M	1250 HP

F-201D-CM	250 HP
C-301A-2M	250 HP
J-304A-1M	700 HP
J-304A-2M	700 HP
W-201D-2M	450 HP
W-246-DM	125 HP
W-247D-3M	125 HP

CCM-2C1
300KVA

CCM-2C1
300KVA

CCM-2C1
300KVA

CCM-2C1
300KVA

CCM-2C1
300KVA

CCM-3C1
300KVA

CCM-3C1
300KVA

CCM-3C1
300KVA

CCM-3C1
300KVA

CCM-3C1
300KVA

350HP
CONJUNTO DE MOTORES CM-1C
PGF-D201C-1M 175 HP
PGF-D202C-1M 175 HP

1500HP
CONJUNTO DE MOTORES CM-2C
F-212ACM 150 HP
F-213ACM 150 HP
F-214ACM 150 HP
F-230ACM 150 HP
F-209ACM 150 HP
F-210ACM 150 HP
F-211ACM 150 HP
C-220A1M 150 HP
C-220A2M 150 HP
C-220A3M 150 HP
F-215ACM 100 HP

700HP
CONJUNTO DE MOTORES CM-1D
J-214D1M 100 HP
J-214D2M 100 HP
J-248D1M 125 HP
J-247D1M 125 HP
J-247D2M 125 HP
J-248D1M 125 HP

PNBT-31

PNBT-21

PNMT-21

PNBT-31

PNBT-21

PNMT-21

PNBT-31

PNBT-21

PNMT-21

**APÊNDICE B: DIAGRAMA UNIFILAR SIMULADO NO
PROGRAMA**

