



Universidade Federal da Paraíba - UFPB
Centro de Energias Alternativas e
Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica -
DEE



Lêda Maria Freitas de Lucena

Estudo de Caso dos Critérios de Coordenação e
Seletividade da Proteção de um Sistema Industrial

João Pessoa, 2017

LÊDA MARIA FREITAS DE LUCENA

**Estudo de Caso dos Critérios de Coordenação e
Seletividade da Proteção de um Sistema Industrial**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Curso de Engenharia Elétrica da UFPB
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Engenheira Eletricista

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB

Orientador: Prof. Dr. Alexandre César de Castro
Coorientador: Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida

João Pessoa

2017

LÊDA MARIA FREITAS DE LUCENA

Estudo de Caso dos Critérios de Coordenação e Seletividade da Proteção de um Sistema Industrial

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Engenharia Elétrica da UFPB como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheira Eletricista

Orientador: Prof. Dr. Alexandre César de Castro

Co-Orientador: Rogério Gaspar de Almeida

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre César de Castro
Orientador

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida
Co-Orientador

**Prof. Dr. Darlan Alexandria
Fernandes**

Tatiana Pontual Guedes

João Pessoa
2017

L935e Lucena, Lêda Maria Freitas de

Estudo de Caso dos Critérios de Coordenação e Seletividade da Proteção de um Sistema Industrial./ , Lêda Maria Freitas de Lucena – João Pessoa, 2017.

57f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Alexandre César de Castro

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Curto-Circuito 2. Proteção 3. Seletividade 3. Relé de Sobrecorrente
4. Relé Digital. . Título

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 621.01(043)

*“Eis por que sinto alegria nas fraquezas.
Porque quando me sinto fraco, então é que sou forte.”
(II Coríntios, 12)*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e Nossa Senhora, por se fazerem sempre presente em minha vida, me concedendo toda força e determinação necessária para a conclusão do curso.

Aos meus pais Antônio e Patrícia por todos os ensinamentos diários de luta, dedicação e força. Às minhas queridas irmãs Luci, Leila e Domila pela paciência nos dias difíceis e pelas alegrias compartilhadas.

Aos professores Alexandre e Rogério pela paciência e disposição durante toda orientação do trabalho, e principalmente pelo incentivo, apoio e confiança.

Agradeço aos demais professores do departamento de engenharia elétrica por todos os ensinamentos que contribuíram para minha formação.

Em nome da Usina Monte Alegre, agradeço a Doutora Marlene pela oportunidade da aplicação prática do estudo realizado. Agradeço também ao Engenheiro Valmor, aos encarregados João Benedito e Edilson Silva e toda a equipe da elétrica pelos grandes ensinamentos profissionais e pessoais, que foram imprescindíveis nessa reta final.

Por fim, e de grande importância, agradeço a todos os meus amigos que são essenciais na minha vida por estarem sempre comigo compartilhando todos os momentos e celebrando cada vitória.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da proteção de um sistema elétrico industrial do ramo sucroalcooleiro. Tem como maior motivação a necessidade da empresa de aplicação dos critérios de coordenação e seletividade no sistema de proteção que não tem operado na forma desejada, atuando de maneira indevida em determinados momentos. O sistema em estudo alimenta uma parcela da carga rural da usina e contém os mais comuns equipamentos como: gerador, disjuntores, transformadores de potência, transformadores de corrente, relé de proteção de sobrecorrente, cabos e motores de indução. O trabalho apresenta desde da teoria conceitual de curto-circuito e proteção à implementação do sistema em ferramenta computacional. Para o melhor entendimento do funcionamento da proteção e seletividade da rede, foi implementado um modelo de relé digital, proporcionando assim a visualização da coordenação dos mesmos. Foi possível observar o comportamento operacional da rede em diferentes prerrogativas de simulação, confirmando a importância da seletividade e coordenação no sistema de proteção na indústria.

Palavras-chaves: Curto-Circuito, Proteção, Seletividade, Relé de Sobrecorrente, Relé Digital.

ABSTRACT

This work presents a study of the protection of a sugar-alcohol industry's industrial electric system. It has as its main motivation the company's need to apply the criteria of coordination and selectivity in the protection system which has not operated in the desired way, acting unduly at certain times. The system under study feeds a portion of the plant's rural charge, and contains the most common equipments such as: generator, circuit breakers, power transformers, current transformers, overcurrent protection relay, cables and induction motors. The work presents from the conceptual theory of short circuit and protection to the implementation of the system in computational tool. For a better understanding of the network's protection and selectivity operation, a digital relay model was implemented, thus providing a visualization of its coordination. It was possible to observe the operational behavior of the network in different simulation prerogatives, confirming the importance of the selectivity and coordination in the protection system.

Keywords: Short Circuit, Protection, Selectivity, Overcurrent Relay, Digital Relay

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Falta Trifásica Simétrica	17
Figura 2 – Falta Fase-fase	17
Figura 3 – Falta Fase-fase-terra	18
Figura 4 – Falta Fase-terra	18
Figura 5 – Sequência de fase positiva	19
Figura 6 – Sequência de fase negativa	19
Figura 7 – Sequência de fase zero	19
Figura 8 – Resistência e Reatância dos condutores de cobre[MAMEDE]	24
Figura 9 – Curva Normalmente Inversa	28
Figura 10 – Curva Muito Inversa	28
Figura 11 – Curva Extremamente Inversa	29
Figura 12 – Diagrama Unifilar do sistema estudado.	31
Figura 13 – Característica a vazio do gerador.	32
Figura 14 – Característica de curto-circuito	33
Figura 15 – Ensaio de curto circuito para determinação das Reatâncias	34
Figura 16 – Ensaio de Curto-Circuito Instantâneo	34
Figura 17 – Reatâncias Transitórias e Subtransitórias em função do tempo	35
Figura 18 – Tabela com os dados de entrada do sistema	38
Figura 19 – Identificação dos tipos de falta na script	39
Figura 20 – Diagrama de blocos do relé 50/51	41
Figura 21 – Configuração para relé trifásico	41
Figura 22 – Rede Elétrica implementada no SIMULINK	42
Figura 23 – Parâmetros do Gerador	43
Figura 24 – Parâmetros dos Transformadores	43
Figura 25 – Parâmetros dos Cabos na Baixa Tensão	44
Figura 26 – Parâmetros dos Motores	44
Figura 27 – Rede elétrica com a proteção existente	45
Figura 28 – Rede Elétrica com inserção de Relés sugeridos	48
Figura 29 – Correntes de curto trifásico a 85 % da linha	49
Figura 30 – TAPs 50/51	50
Figura 31 – Correntes de curto trifásico a 50 % da linha	50
Figura 32 – TAPs 50/51	50
Figura 33 – Correntes de curto monofásico a 85 % da linha	51
Figura 34 – TAPs 50/51	51
Figura 35 – Correntes de curto monofásico a 50 % da linha	52

Figura 36 – TAPs 50/51	52
Figura 37 – Corrente de linha	53
Figura 38 – TAPs 50/51	53
Figura 39 – TAPs 50/51 para comando dos Disjuntores 1 e 3	54
Figura 40 – Correntes de curto-circuito	54
Figura 41 – TAPs 50/51	54
Figura 42 – Algoritmo para cálculo das correntes de falta	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do Gerador	31
Tabela 2 – Valores obtidos através dos ensaios	32
Tabela 3 – Impedâncias das redes de sequência do gerador	35
Tabela 4 – Dados de placa dos transformadores	35
Tabela 5 – Impedâncias das redes de sequência dos transformadores	36
Tabela 6 – Impedâncias das redes de sequência dos condutores	36
Tabela 7 – Dados de placa dos motores	36
Tabela 8 – Correntes de Curto-circuito da rede	39

LISTA DE SÍMBOLOS

V_L	Tensão de linha
I	Correntes nos terminais da máquina
I_0	Correntes de rede de sequência zero
I_1	Correntes de rede de sequência positiva
I_2	Correntes de rede de sequência negativa
R_s	Resistência dos enrolamentos
R_s	Reatância Síncrona
V_d, V_q, V_0	Tensões de eixo direto, quadratura e sequência zero.
I_d, I_q, I_0	Correntes de eixo direto, quadratura e sequência zero.
L_d, L_q	Indutância de eixo direto e quadratura.
P	Potência nos terminais da máquina.
P_{ele}	Potência eletromagnética.
T_e	Torque eletromagnético.
w_e	Velocidade elétrica do rotor.
w_m	Velocidade mecânica do rotor.
T_l	Torque de carga.
FP	Fator de Potência
J	Momento de inércia da máquina.
T_{atu}	Tempo de atuação do Relé 51
η	Rendimento
$I_{ajuste50}$	Corrente de ajuste da unidade instantânea
$I_{ajuste51}$	Corrente de ajuste da unidade temporizada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Apresentação	14
1.2	Tema	15
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivo Específico	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Correntes de Curto Circuito	16
2.1.1	Falta Trifásica Simétrica	16
2.1.2	Falta Assimétrica	16
2.1.2.1	Componentes Simétricas	17
2.1.3	Sistema por unidade	20
2.1.4	Impedâncias do Sistema	21
2.1.4.1	Gerador	21
2.1.4.2	Cabos	22
2.1.4.3	Motores de Indução	23
2.2	Sistema Elétrico de Proteção	24
2.2.1	Seletividade e Coordenação	25
2.2.2	Transformador de Corrente e Transformador de Potencial	25
2.2.3	Relé Digital de Sobrecorrente	26
2.2.3.1	Unidade Instantânea	26
2.2.3.2	Unidade Temporizada	27
3	METODOLOGIA	30
4	APRESENTAÇÃO DO SISTEMA	31
4.1	Gerador	31
4.2	Transformadores	34
4.3	Condutores	35
4.4	Motores de Indução	36
5	CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO DE CIRCUITO	37
6	MODELIZAÇÃO DO SISTEMA PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	40

6.1	Modelo do Relé Digital de Sobrecorrente com unidade instantânea e temporizada – 50/51	40
7	IMPLEMENTAÇÃO DA REDE ELÉTRICA	42
8	COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE	45
8.1	Relação de transformação dos TC's	45
8.1.1	Motor 01 e 03	45
8.1.2	Motor 02	46
8.2	Unidade Temporizada(51)	46
8.2.1	Motores 01 e 03	46
8.2.2	Motores 02	46
8.3	Unidade Instântanea (50)	46
8.3.1	Motores 01 e 02	47
8.3.2	Motor 03	47
8.4	Tempos de atuação e múltiplos	47
8.5	Avaliação do desempenho do relé	47
9	RESULTADOS	49
9.1	Desempenho dos Relé Digital 50/51	49
9.1.1	Curto trifásico a 85% da linha	49
9.1.2	Curto trifásico a 50% da linha	49
9.1.3	Curto monofásico a 85% da linha	51
9.1.4	Curto monofásico a 50% da linha	51
9.2	Inserção de relés na proteção	51
9.2.1	Curto a Montante da proteção existente	52
9.2.2	Curto a Jusante da proteção existente	52
9.2.3	Caso de falha da proteção existente	52
10	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56
A	ALGORITMO PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Um dos aspectos que deve ser considerado em qualquer projeto elétrico é a sua continuidade. Ou seja, deve-se desenvolver de forma que a instalação tenha o mínimo de interrupções possíveis. No ramo de atividade industrial, a interrupção indesejada do sistema elétrico acarreta elevados prejuízos devido a paralisação do processo de produção. Dessa forma, fica evidente a necessidade de um projeto elétrico eficiente, que responda tanto os requisitos básicos de seletividade, como também assegure a proteção à integridade física dos equipamentos e operadores relacionados. [1]

Em oposição ao intento de garantir a continuidade dos setores de produção, os sistemas industriais defrontam-se com as falhas elétricas inevitáveis nas instalações. Dessa forma, para o dimensionamento correto da proteção e realização da coordenação seletiva dos seus elementos, necessita-se conhecer as condições de defeito, através das correntes de curto-circuito.

Como a determinação das correntes de curto-circuito e os cálculos de ajustes das coordenações de proteção demandam esforços excessivos dos projetistas, muitas vezes são utilizadas ferramentas computacionais disponibilizadas no mercado para minimizar o tempo gasto para finalização do projeto. Como por exemplo os softwares: DigSILENT Power Factory; ASPEN One-Liner; EASYPOWER; ECODIAL Advance Calculation.

Visando utilizar uma ferramenta de fácil acesso tanto pelos profissionais formados como pelos alunos, como também realizar uma aplicação prática da teoria vista ao longo da graduação, o estudo de caso desse sistema industrial foi realizado através do Software Matlab, baseando-se nas técnicas aprendidas durante as disciplinas cursadas na graduação, como: Sistemas Elétricos, Análise de Sistemas Elétricos e Proteção de Sistemas Elétricos.

É de grande importância, na graduação, que o aluno consiga associar a aplicação prática do que foi aprendido na sala de aula, uma vez que são conhecidas as grandes dificuldades quando se trata da realidade. Pois, na maioria das vezes, são estudados casos ideais, onde os dados são fornecidos facilmente, e não são consideradas todas as influências externas. Por isso, a importância da aplicação dos conteúdos vistos em salas de aula e avaliações em um caso real.

1.2 Tema

A base para o desenvolvimento do presente trabalho é um sistema elétrico industrial de fabricação de açúcar e etanol, além da geração e exportação de energia elétrica, através da cana-de-açúcar como matéria prima. O tema abordado é o estudo de técnicas de análises e soluções de problemas na proteção e seletividade da fábrica. O estudo de caso é direcionado na melhoria e eficiência operacional do sistema elétrico, visando ganhos de produtividade com a redução de paradas em casos de falhas elétricas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Visa-se avaliar o desempenho da proteção de um sistema elétrico real a partir da implementação da rede elétrica em ambiente computacional MATLAB/SIMULINK.

1.3.2 Objetivo Específico

- Implementar dados reais do sistema em algoritmo desenvolvido na graduação para realização do cálculo das correntes de curto-circuito: trifásica, bifásica e monofásica;
- Implementar a rede elétrica em MATLAB/SIMULINK;
- Definir estratégias de coordenação e seletividade para os relés de sobrecorrente;
- Implementar modelo do relé de sobrecorrente em MATLAB/SIMULINK
- Simular diferentes cenários da rede elétrica para avaliação do desempenho do modelo implementado;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Correntes de Curto Circuito

Os sistemas de potência são constantemente violados por perturbações severas em decorrência da ruptura do isolamento entre as fases ou entre fase e terra. Esse é fenômeno mais severo e comum responsável pela ocorrência de curtos-circuito, também conhecidos por faltas, causam perturbações no seu estado normal, alterando as grandezas elétricas como tensão e corrente. Nessas situações, coloca-se em risco a integridade dos equipamentos e das instalações de forma que, se não sanados ou limitados, chegam a provocar consequências de grandes proporções. [2]

O curto-circuito é uma anomalia intrínsecas no sistema elétrico, por isso se torna imprescindível um sistema de proteção eficiente que venha a impedir que esse fenômeno propague por um longo período de tempo. Para assegurar uma proteção adequada, o comportamento das tensões e correntes durante o curto-circuito deve ser estudado e conhecido.

As correntes de falta em circuitos trifásico variam com o tipo de curto-circuito, que podem ser simétricos, quando trifásico, ou assimétricos quando ocorrem entre duas fases ou entre fase terra. Em relação a magnitude dessas correntes, apesar de o curto-circuito trifásico ser considerado o mais severo, é possível que em algumas situações a corrente de curto-circuito monofásico seja maior.[2]

2.1.1 Falta Trifásica Simétrica

A falta trifásica é apresentada na Figura 1. É considerada equilibrada por apresentar simetria entre as fases antes e após a falta. Apesar de ser pouco registrada, a falta simétrica é sempre analisada devido ao seu alto grau de severidade.

2.1.2 Falta Assimétrica

As faltas assimétricas ocorrem entre duas fases, entre duas fases e terra ou entre fase e terra. São apresentados nas Figuras 2, 3 e 4.

Devido a assimetria ou desequilíbrio nas fases, para análise desses dessas faltas serão utilizados os métodos de componentes simétricas.

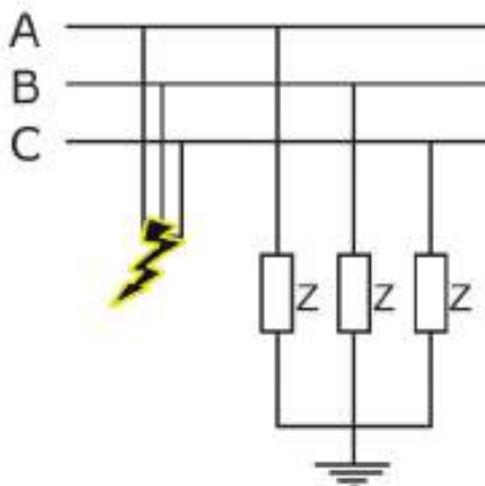


Figura 1 – Falta Trifásica Simétrica

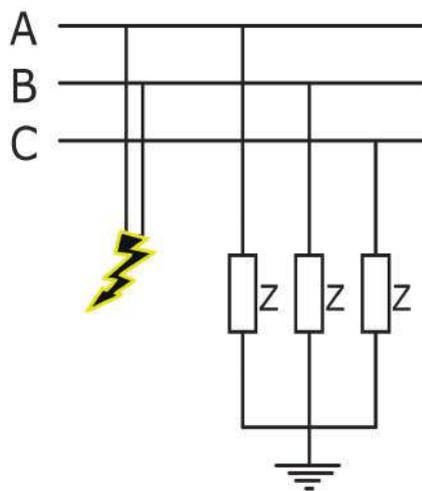


Figura 2 – Falta Fase-fase

2.1.2.1 Componentes Simétricas

O método de componentes simétricas desenvolvido em 1918 por C. O. Fortescue, é um valioso artifício matemático utilizado para modelar as faltas assimétricas na rede usando o modelo de sequências zero, positiva e negativa.

Pelo Teorema de Fortescue, três fasores desequilibrados de um sistema trifásico podem ser decompostos em três sistemas equilibrados denominados de componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero. As componentes simétricas de sequência positiva e negativa, mostradas nas Figuras 5 e 6, são formadas por três vetores iguais em

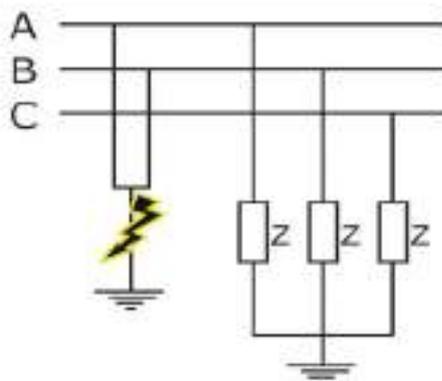


Figura 3 – Falta Fase-fase-terra

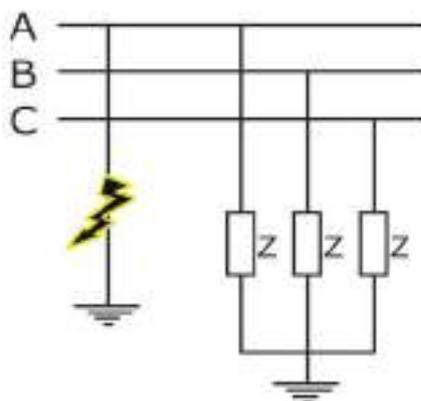


Figura 4 – Falta Fase-terra

modulo e defasados 120° entre si, tendo a sequencia de fase original e oposta, respectivamente. A componente de sequencia zero, mostrada na Figura 7, também é formada por três vetores iguais em modulo, porém não apresentam defasagem entre si.

Dessa forma, o vetor original desequilibrado é decomposto em termos de seus componentes. As tensões e correntes desequilibradas são representadas pela soma das suas respectivas componentes. [3] As equações básicas de componentes simétricas para tensão e corrente são mostradas a seguir.

[h]

O operador a é utilizado para simplificar os cálculos e representa a defasagem de 120° .

Para a construção das redes de sequência para o sistema completo, são obtidos os valores de impedâncias para cada rede de sequência.[4] Um método simplificado que permite encontrar valores de correntes e tensões no vários pontos do sistema é através da

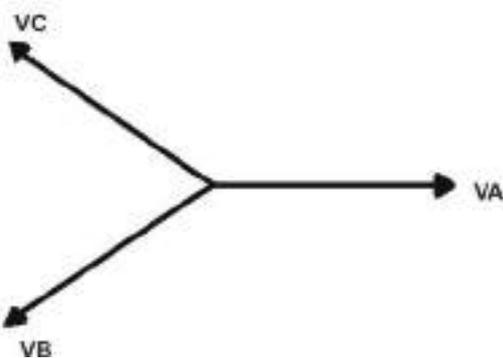


Figura 5 – Sequência de fase positiva

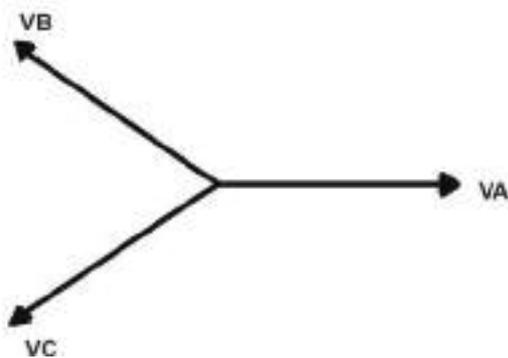


Figura 6 – Sequência de fase negativa

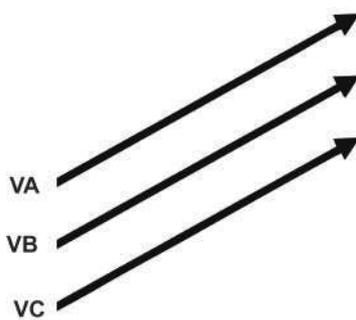


Figura 7 – Sequência de fase zero

$$\begin{bmatrix} IA \\ IB \\ IC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IA_0 \\ IB_1 \\ IC_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} VA \\ VB \\ VC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} VA_0 \\ VB_1 \\ VC_2 \end{bmatrix}$$

construção das matrizes de impedâncias que caracterizam o sistema.

2.1.3 Sistema por unidade

Para facilitação de cálculos, as grandezas dos sistemas elétricos são referenciadas em valores de base calculados pela Equação 2.1.

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{base}} \quad (2.1)$$

Os valores de base de potência e tensão são fixados e pode-se encontrar a corrente de base, pela Equação 2.2, e impedância de base, pela Equação 2.3:

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3}V_b} (A) \quad (2.2)$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{P_b} (\Omega) \quad (2.3)$$

Onde, V_b é a tensão base escolhida, e P_b a potência de base.

Quando as impedâncias dos equipamentos são dadas em bases diferentes das adotadas nos cálculos, é necessário colocá-las na mesma base através da Equação 2.4.

$$Z_b = Z_{dado} \frac{P_b}{P_{dado}} \frac{V_{dado}^2}{V_b^2} \quad (2.4)$$

Onde, V_{dado} e P_{dado} são as tensões e potências bases da impedância fornecida pelo equipamento.

2.1.4 Impedâncias do Sistema

2.1.4.1 Gerador

Para as máquinas de polo saliente, Blondeu (1913) realizou os primeiros estudos de grande repercussão na análise das máquinas síncronas de polos salientes, ao publicar sobre a decomposição das forças magneto-motrizes em componentes nos eixos direto e de quadratura. Estudos derivados surgiram, sendo levantado-se aspectos até então deixados de lado como por exemplo a influência das harmônicas no funcionamento da máquina. Park e Robertson (1928), sintetizando o material até então existente, classificaram de maneira inovadora as reatâncias em três tipos: Reatâncias das sequências de fase, de regime temporal, e relacionadas à orientação rotórica. [5]

Para implementar o modelo do gerador no cálculo das correntes de curto-circuito, são necessárias as reatâncias relacionadas às sequências de fase. A impedância de sequência positiva é a impedância normal da máquina, e a depender da aplicação, toma-se os valores subtransitórios, transitórios ou síncronos.

Para determinação das reatâncias, Chapman utiliza um circuito equivalente simplificado, que apesar de não fornecer informações sobre o comportamento da máquina no enrolamento de campo nem no eixo de quadratura, é suficiente para obtenção de valores aproximados que satisfazem. Por isso, em estudos tradicionais de graduação, considera-se esse modelo simplificado, mostrado na Figura.

Partindo desse modelo, utiliza-se os ensaios no domínio do tempo, que apresentam metodologia de cálculo muito bem definidas e de fácil execução, além de baixa complexidade matemática, na obtenção dos parâmetros das máquinas. São realizados assim, os ensaios de saturação em aberto e de curto-circuito. Consistem basicamente na medição das tensões, correntes de armadura e correntes de campo. Para isso, o gerador é colocado para rodar na sua velocidade nominal.

Com os terminais em aberto, traça-se a curva característica à vazio (CAV) zerando a corrente de campo e incrementando-a gradualmente enquanto são feitas as medições. Através desse ensaio, obtém-se as tensões internas geradas do gerador para qualquer corrente de campo dada. Para realização do ensaio de curto-circuito, os terminais do gerador são curto-circuitados através de um conjunto de amperímetros. Então, a corrente de armadura é medida com o incremento da corrente de campo. Tal curva é denominada característica de curto-circuito (CCC). Diferente da CAV, a característica de curto-circuito é basicamente uma reta, pois para valores baixos na corrente de excitação, o campo magnético líquido é tão pequeno que a máquina não está saturada. Essa diferença representa um problema dessa abordagem, de modo que a reatância encontrada seja apenas um valor aproximado. A não ser que sejam usadas correntes de campo da região linear.

O valor da reatância síncrona varia com o grau de saturação da máquina e obtida

pela equação 2.5.

$$X_s = \frac{E_a}{I_a} \quad (2.5)$$

Onde, E_a é tensão interna da máquina obtida pela curva CAV para determinada corrente de campo; e I_a é a corrente de armadura obtida pela curva CCC para a mesma corrente de campo.

Essa reatância síncrona determinará a corrente de regime permanente durante a falta através da seguinte equação:

$$I_{ss} = \frac{E_A}{X_s} \quad (2.6)$$

Porém, como foi visto anteriormente, quando o conjugado no eixo aplicado a um gerador ou a carga de saída muda repentinamente, há sempre transitórios que perduram por um período finito de tempo antes que o gerador retorne ao regime permanente, sendo a condição mais grave a situação em que os três enrolamentos do gerador são colocados em curto. Nessas condições, para o cálculo de curto circuito, são utilizadas as impedâncias dos períodos subtransitórios ou transitórios. Essas impedâncias por sua vez, são obtidas através de ensaios de curto.

As máquinas síncronas apresentam impedâncias diferentes pra cada rede de sequência. Pois, nas máquinas de polos salientes leva-se em consideração os diferentes caminhos de fluxo no eixo direto e no eixo quadratura, de modo que para uma melhor aproximação do comportamento real, utiliza-se a impedância de sequência negativa como média das reatâncias subtransitórias X_d'' e X_q'' :

$$Z_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (2.7)$$

A impedância de sequência zero leva em conta a impedância do gerador de sequência zero e a impedância de aterramento, e também pode ser obtida por ensaios.

2.1.4.2 Cabos

Os condutores, presentes em qualquer circuito elétrico, interligam os componentes do circuito, transportando a corrente elétrica entre os diferentes potenciais. Os metais que atendem perfeitamente essas funções são o cobre e alumínio, devido as suas características físicas e químicas. A maioria absoluta das instalações industriais emprega o cobre como elemento condutor. Pois, o alumínio apesar de apresentar preço significativamente inferior, necessita de maiores cuidados na manipulação e instalações, devido as suas características mecânicas. Inclusive, até a norma brasileira NBR 2410:2004 restringe a aplicação, permitindo seu uso para seções iguais ou superior a 16 mm.

Os fios e cabos têm como isolantes mais empregados o PVC, EPR ou XLPE, que a depender das suas características físicas, químicas e mecânicas são empregados em condições específicas para cada instalação.

Os condutores são representados por uma resistência em série com uma reatância, por isso, principalmente nas médias tensões, apresentam uma certa influência no valor final da corrente de curto-circuito. O comprimento do circuito é limitado em função da atuação dos dispositivos de proteção para uma dada corrente de curto-circuito, devido ao valor de impedância que apresenta.

Os condutores utilizados nas linhas aéreas que interligam o sistema a subestação são de alumínio, pois, apesar de poder ser utilizado o cobre, opta-se pelo alumínio pois condutores de resistências iguais são mais leves e mais baratos. A escolha do alumínio ainda proporciona uma vantagem adicional: para resistências iguais, o condutor de alumínio tem maior diâmetro. Consequentemente, as linhas de fluxo elétrico que partem da superfície do condutor são mais espaçadas, o que implica menor habilidade de ionizar o ar ao redor do condutor e finalmente, menor efeito corona nas linhas. [6] [1]

Os valores de resistência e reatância são calculados pelas equações 2.8 e 2.9:

$$R_{cabo} = \frac{R_c L_c}{1000 N} \quad (2.8)$$

$$X_{cabo} = \frac{X_c L_c}{1000 N} \quad (2.9)$$

Onde:

R_c é a resistência do condutor retirada do catálogo do fabricante dados em $m\Omega/m$;

X_c é reatância do condutor retirada do catálogo do fabricante;

L_c é comprimento do cabo;

N é o número de condutores por fase.

As resistências e reatâncias de alguns condutores de cobre são mostrados na Tabela 8.

Impedância de sequencia zero difere da sequência positiva e negativa, sendo maiores entre 2 a 3,5 vezes, pois as correntes de sequência zero estão em fase nos três condutores.

2.1.4.3 Motores de Indução

Os motores elétricos são máquinas que transformam a energia elétrica em energia mecânica pela ação de um campo magnético. Os motores podem ser de corrente contínua ou alternada, sendo os de corrente alternada do tipo indução os mais utilizados em aplicações industriais, pois além da simplicidade de construção e vida útil longa, apresenta custo

Seção	Impedância de Sequência Positiva(mΩ/m)		Impedância de Sequência Zero (mΩ/m)	
	Resistência	Reatância	Resistência	Reatância
1,5	14,8173	0,1378	16,6137	2,9262
2,5	8,8882	0,1345	10,6882	2,8755
4	5,5518	0,1279	7,3552	2,8349
6	3,7035	0,1225	5,5035	2,8000
10	2,2221	0,1207	4,0222	2,7639
16	1,3899	0,1173	3,1890	2,7173
25	0,8891	0,1164	2,6891	2,6692
35	0,6353	0,1128	2,4355	2,6382
50	0,4450	0,1127	2,2450	2,5991
70	0,3184	0,1096	2,1184	2,5681
95	0,2352	0,1090	2,0352	2,5325
120	0,1868	0,1076	1,9868	2,5104
150	0,1502	0,1074	1,9502	2,4843
185	0,1226	0,1073	1,9226	2,4594
240	0,0958	0,1070	1,8958	2,4312
300	0,0781	0,1068	1,8781	2,4067
400	0,0608	0,1058	1,8608	2,3757
500	0,0507	0,1051	1,8550	2,3491
630	0,0292	0,1042	1,8376	2,3001

Figura 8 – Resistência e Reatância dos condutores de cobre[MAMEDE]

reduzido de compra e manutenção. São constituídos de duas partes básicas: Estator e Rotor. Na maioria das instalações industriais os motores presentes são do tipo trifásico de indução com rotor em gaiola.

O funcionamento de um motor indução baseia-se no campo magnético rotativo formado pela passagem de corrente alternada nas bobinas do estator. O fluxo magnético ao se deslocar em volta do rotor induz correntes no rotor curto circuitado, formando um novo campo magnético. A interação do campo magnético formado com o campo magnético induzido, No instante da falta, devido a sua própria inércia e da carga os motores continuam em operação por alguns instantes e passam a funcionar como gerador, podendo contribuir significamente com a intensidade da corrente de curto-circuito. Porém, como a rotação mantida está associada ao magnetismo remanescente do núcleo de ferro, essa contribuição apresenta duração de até ciclos. Assim, na simulação dos curtos-circuitos trifásicos transitórios simétricos o motores de indução devem estar fora de operação.

2.2 SISTEMA ELÉTRICO DE PROTEÇÃO

Segundo Mamede [1], o sistema de proteção deve responder aos requisitos básicos de seletividade, exatidão, segurança e sensibilidade. A elaboração da proteção requer desde uma estratégia de proteção na seleção dos equipamentos até a determinação dos valores adequados para calibração. Nesta seção será discutida a filosofia da proteção baseada em critérios de coordenação e seletividade.

2.2.1 Seletividade e Coordenação

A seletividade é definida como a capacidade que possui o sistema de proteção de selecionar a parte danificada da rede e retirar-la de serviço sem afetar os circuitos sãos. Ou seja, nada mais é que uma seleção criteriosa da ordem em que os equipamentos serão desenergizados em caso de falha.

Uma das formas de proteção do sistema contra correntes de curto de curto-circuito é feita através de sensores que, estrategicamente colocados no sistema, atuam acionando equipamentos de interrupção que isolam o defeito. Os relés são os sensores que vigiam as condições de operação do sistema elétrico, por isso são os elementos mais importantes do sistema. Em caso de anomalia, sinais são enviados para a abertura do disjuntor. Para o uso desses equipamentos, são utilizados transformadores que adequam os altos níveis de corrente e tensão presente no sistema elétrico.

Obedecendo os critérios de seletividade, os relés devem operar de forma mais rápida possível para deixar o menor número de equipamentos sem energia. E segundo Kindermann [7], esta filosofia deve ser a arte e a meta de todo projetista da área de proteção. Ele ainda define a coordenação como a estratégia de proteção, que para qualquer corrente de curto-circuito, seja seguida uma escada de tempo na atuação do relé de vanguarda para os relés de retaguarda, garantindo a seletividade do sistema.

Além disso, torna-se necessária porque o sistema de proteção não está imune à falhas, por isso, em caso de defeito da proteção, é imprescindível a atuação do equipamento de retaguarda.

Nos circuitos radiais a proteção retaguarda deve atuar com um certo atraso de tempo e se encontra a montante da proteção local. Para isso, deve-se haver uma estratégia de coordenação de modo que o relé mais próximo atue primeiro.

2.2.2 Transformador de Corrente e Transformador de Potencial

Transformadores de corrente e potencial são equipamentos que possibilitam a medição e proteção a funcionarem adequadamente em correntes e tensões menores que as nominais de carga do circuito.[8]

Apesar de apresentarem funções semelhantes, são destinados em diferentes aplicações a depender da grandeza elétrica a ser fornecida: corrente ou tensão.

Os transformadores de corrente, através da conversão eletromagnética, transformam proporcionalmente as correntes elevadas que circulam no seu primário em valores menores, segundo uma relação de transformação. As correntes nominais primárias devem ser compatíveis com a corrente de carga do circuito primário. As correntes nominais secundárias são geralmente iguais a 5 A.

Para o dimensionamento do TC, quanto a sua relação de transformação, Kindermann (2012) propõe a verificação de dois critérios: o Critério da carga nominal do alimentador e o Critério do curto circuito. O primeiro como o próprio nome sugere, baseia-se no dimensionamento a partir da corrente mínima de operação do sistema em condições normais, ou seja, a corrente de carga, determinada pela Equação 2.10. .

$$I_{Pnominal} = \frac{S}{\sqrt{3} V_L \cos\theta \eta} \quad (2.10)$$

O segundo, estabelece que a máxima corrente de curto-circuito no local da instalação deve estar dentro da limitação da classe de exatidão do TC, de acordo com o fator de sobrecorrente (FS), como mostrado na equação 2.11

$$In = \frac{I_{CCmax}}{I_{FS}} \quad (2.11)$$

O Fator de sobrecorrente produz uma limitação no TC de forma a garantir os limites de erro da sua classe de exatidão. Os valores padronizados pela ANSI e ABNT é 20. Assim, a relação de transformação é escolhida com base no maior valor de corrente encontrado, satisfazendo os dois critérios. A correntes primárias são padronizada segundo normas, e podem ser de (pela ABNT): 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000 e 8000A. Sendo os valores sublinhados usados segundo a norma ANSI.

2.2.3 Relé Digital de Sobrecorrente

Os relés digitais com alto grau de armazenamento de informações, estão ganhando espaço no cenário atual. São considerados robustos e compactos e são capazes de interagir com outros dispositivos eletrônicos. Entre as diversas funções presentes em um único equipamento, têm-se: sobrecorrentes de fase e de terra, subtensão, sobretensão, frequência, verificação de sincronismo, entre outras.

O relé de sobrecorrente detecta níveis acima dos limites estabelecidos de correntes através dos TCs e aciona providências para desconectar o componente protegido. As funções e instantâneas e temporizadas são separadas em duas unidades.

2.2.3.1 Unidade Instantânea

Nesta unidade, como o próprio nome já sugere, a atuação será instantânea no momento em que a corrente que passa por ele for maior que corrente de ajuste. A filosofia de proteção adotada por Kinderman considera a atuação da unidade instantânea um curto a 85% da linha protegida, pois 15% é a folga que garante a seletividade do relé. Dessa

forma, a corrente de ajuste para esta unidade é definida pela Equação 2.12:

$$I_{ajuste50} = \frac{I_{cc3} \text{ a } 85\% \text{ dalinha}}{RTC} \quad (2.12)$$

2.2.3.2 Unidade Temporizada

A unidade temporizada opera de acordo com a corrente obedecendo as curvas de atuação representadas pela Equação 2.13.

$$t_{atu} = \frac{K \cdot DT}{M^\alpha - 1} \quad (2.13)$$

Onde:

t_{atu} - tempo de atuação teórica

K - constante que caracteriza o relé

$D.T$ - dial de tempo

M - múltiplo da corrente de atuação

α - constante que caracteriza a curva

As curvas mais utilizadas para os relés são: Normalmente Inversa, Muito Inversa ou Extremamente Inversa. Nos religadores de saída das subestações em 13800 V da Energisa, são usuais a curva muito inversa, para obter tempos mais altos e facilitar coordenação. Nas unidades consumidoras a curva recomendada é a extremamente inversa, para coordenação viável com a concessionária.

As curvas mostradas nas Figuras , são referentes ao relé Pextron URPE7104T e são dadas em função do múltiplo do relé.

O múltiplo do relé indica quantas vezes a corrente de defeito é maior que o TAP. O cálculo é dado pela expressão:

$$M = \frac{I_s}{I_{ajustedorelé}} = \frac{I_s}{TAP} = \frac{I_p}{RTC \cdot TAP} \quad (2.14)$$

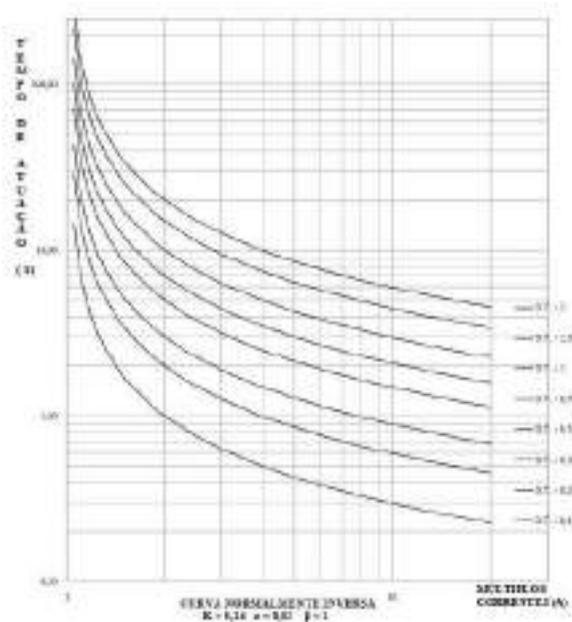


Figura 9 – Curva Normalmente Inversa

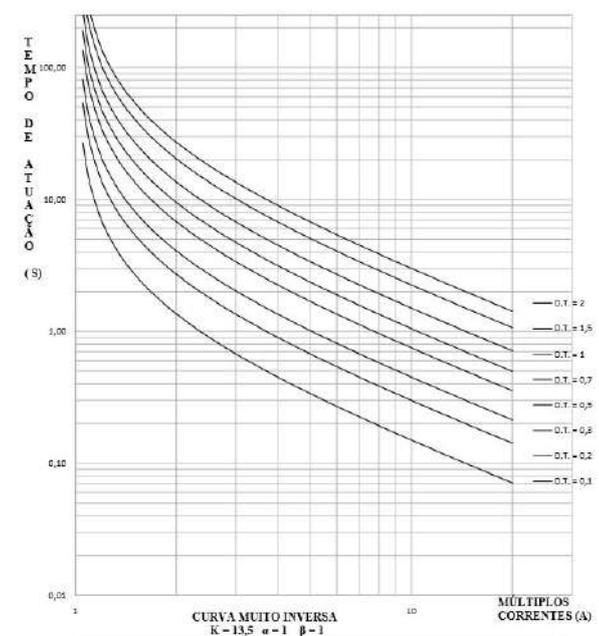


Figura 10 – Curva Muito Inversa

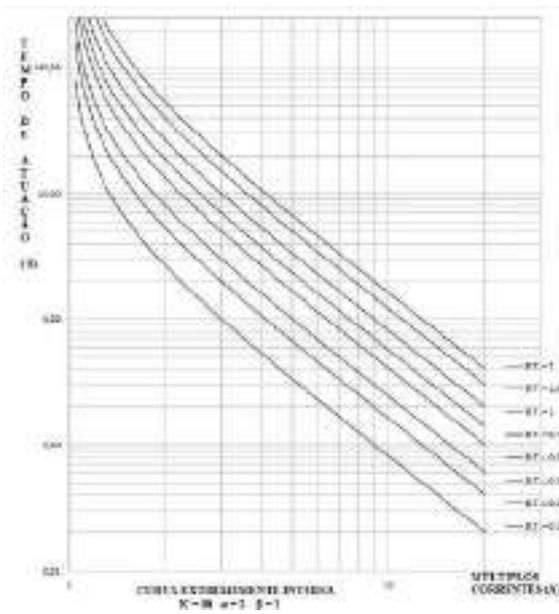


Figura 11 – Curva Extremamente Inversa

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desse trabalho se deu devido a necessidade de melhoria na seletividade da proteção de um sistema industrial de uma usina em constante expansão. Para acompanhar seu crescimento, é de grande importância um estudo na proteção e seletividade para operação satisfatória da usina como um todo.

Dessa forma, afim de aplicar as técnicas de proteção, foi estudado um circuito que corresponde a uma parte da carga alimentada pelo gerador ao qual pretende-se exportar energia elétrica. Atualmente, a usina conta com o funcionamento de três geradores destinados as diferentes cargas: industriais, irrigação e exportação, com potências de 10 MW, 10 MW e 5 MW, respectivamente. Porém, projetos futuros visam a operação de apenas dois desses geradores, passando a demanda de exportação para o gerador da irrigação.

Visando contribuir para o melhor entendimento do funcionamento dos equipamentos de proteção, bem como proporcionar a visualização da coordenação dos mesmos, a proteção e seletividade será estudada através da plataforma Simulink disponível pelo MatLab, ferramenta universalmente utilizada para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Para o estudo de coordenação dos relés, as diferentes correntes de falta foram calculadas via métodos computacionais através de um algoritmo desenvolvido durante a graduação na disciplina de Análise de Sistemas Elétricos.

4 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

O diagrama unifilar do circuito analisado é mostrado na Figura 12.

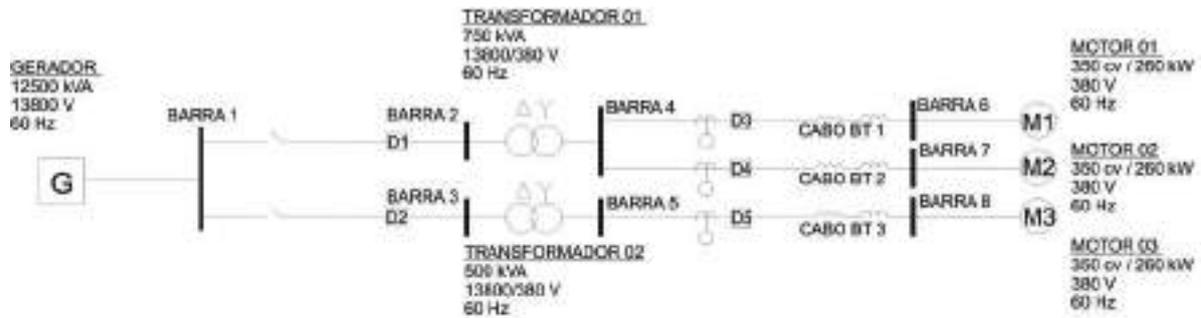


Figura 12 – Diagrama Unifilar do sistema estudado.

No sistema em estudo os componentes protegidos são os cabos, motores e transformadores. São utilizados componentes de proteção como fusíveis, disjuntores, seccionadoras e relés de sobrecarga.

Para previsão do comportamento dos diferentes equipamentos do sistema de potência busca-se modelizações fiéis, permitindo que as simulações se aproximem cada vez mais do comportamento real. Para isso, é de grande importância que os dados sejam levantados fielmente às instalações através dos próprios catálogos, manuais ou ensaios dos equipamentos em estudo.

4.1 Gerador

O gerador em estudo apresenta os seguintes dados de placa, mostrados na Tabela 1.

A curva característica gerador, obtida por ensaio a vazio, é mostrada na Figura 13.

Na curva, pode-se observar a saturação para correntes de campo elevadas. Para valores mais baixos, a curva é quase perfeitamente uma reta, pois o ferro não saturado da

Tabela 1 – Dados do Gerador

MÁQUINA SÍNCRONA WEG	
MODELO	ST40800
TENSÃO (V)	13800.00
FREQUÊNCIA (Hz)	60
POTÊNCIA (kVA)	12500

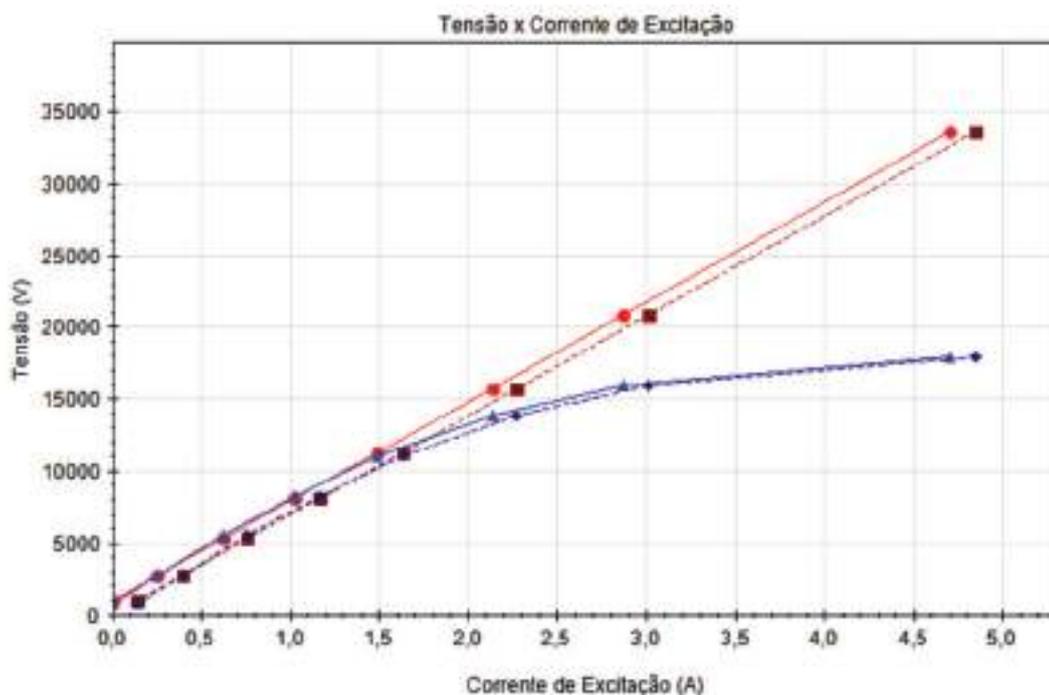


Figura 13 – Característica a vazio do gerador.

máquina apresenta uma relutância muito menor que a relutância do entreferro. Dessa forma, quase toda força magnetomotriz está no entreferro, de modo que o incremento no fluxo resultante é linear. Já na saturação do ferro, como sua relutância aumenta dramaticamente, o fluxo cresce vagarosamente com a força magnetomotriz.

A curva obtida pelo ensaio de curto-circuito está mostrada na Figura 14.

Pelo gráfico, os seguintes dados, mostrados na Tabela 2 são obtidos:

Tabela 2 – Valores obtidos através dos ensaios

Tensão de linha no estator	13800 V
Corrente de Excitação Para Tensão Nominal na Linha do Entre Ferro	1.99 A
Corrente para a Corrente de Excitação	284.19 A

Substituindo os valores da Tabela 2 na equação 2.5, tem-se:

$$X_s = \frac{13800}{\sqrt{3} \cdot I_a} = \frac{13800}{\sqrt{3} \cdot 284,19} = 28,03\Omega \quad (4.1)$$

Utilizando o sistema em PU, tem-se:

$$X_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} \quad (4.2)$$

De posse dos dados do gerador mostrados em:

$$X_{base} = \frac{13800}{\sqrt{3} \cdot 523} = 15,26\Omega \quad (4.3)$$

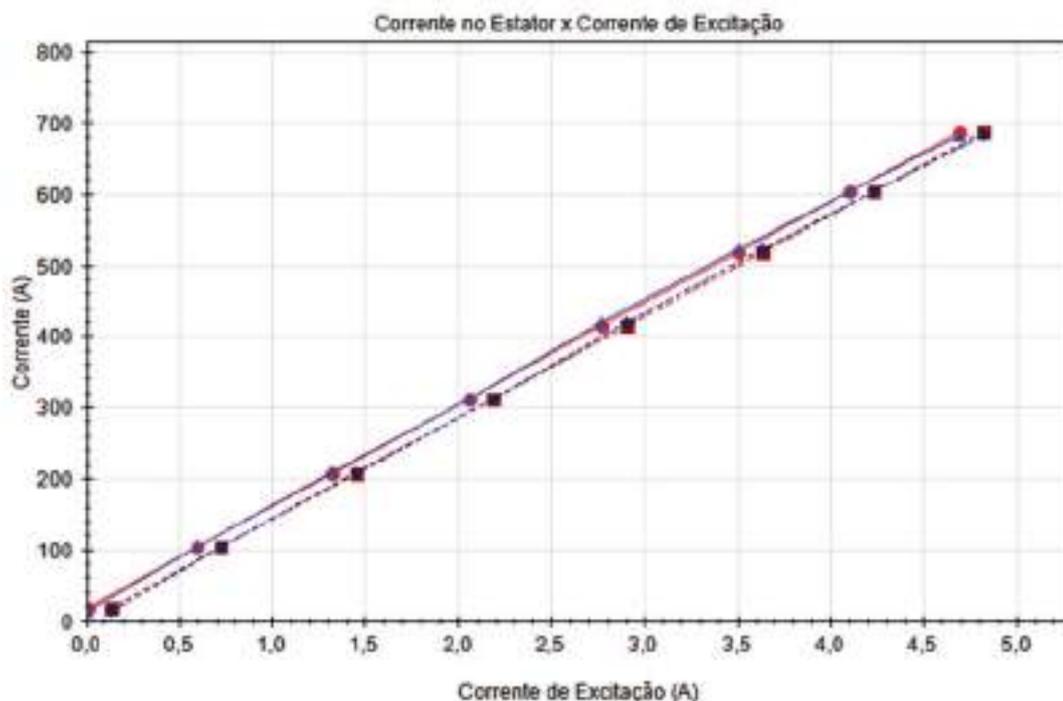


Figura 14 – Característica de curto-circuito

Assim:

$$X_s\% = \frac{X_s}{X_{base}} = \frac{28,03}{15,26} = 1,84pu \quad (4.4)$$

No relatório de ensaios disponibilizados pelo fabricante do gerador, são obtidas as reatâncias ilustradas na Figura 15.

Devido a dificuldade de representação do circuito de eixo de quadratura, será considerado somente o eixo direto, de forma que serão utilizados nas redes de sequência positiva e negativa, as impedâncias subtransitórias disponibilizadas pelos ensaios em regime transitório. O ensaio consiste na aplicação de um curto circuito abrupto nos terminais de armadura, com a máquina operando em rotação nominal sem carga e com os terminais de campo ligados a uma fonte. Tal método permite obter reatâncias transitórias e subtransitórias de eixo direto, bem como suas respectivas constantes de tempo. A desvantagem dessa técnica é a ausência de informações referentes ao eixo de quadratura.

Os resultados obtidos estão mostrados abaixo nas Figuras 16 e 17.

A impedância de sequência zero leva em conta a impedância do gerador de sequência zero e a impedância de aterramento, e seu valor obtido experimentalmente está mostrado na Figura 15.

As impedâncias do gerador utilizadas para o cálculo das correntes de curto-circuito estão mostradas na Tabela 3.

Determinação de Reatâncias						
Curto-Circuito Permanente Entre Linha e Neutro (X0)						
Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Frequência (Hz)	X0 (ohms)	%	
344.0	263.43	3400	60.05	1.3049	8.57	
264.5	216.70	2300	59.96	1.3138	8.60	
216.0	163.40	1300	60.01	1.3217	8.66	
140.0	105.20	500	59.98	1.3312	8.74	
76.4	57.93	100	60.00	1.3360	8.78	
XBase (ohms): 15.2340 Corrente Extrapolada (A): 1509 X0 Extrapolado (ohms): 1.0975 X0 (% Xbase): 7.20						
Curto-Circuito Permanente Entre Duas Fases (X2)						
Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Frequência (Hz)	X2 (ohms)	%	
1173.0	261.70	308000	59.97	2.5978	17.05	
950.0	215.40	209300	59.98	2.6063	17.10	
724.0	154.30	107930	60.00	2.6149	17.15	
506.0	105.20	50600	60.20	2.6268	17.24	
279.0	56.40	14500	60.02	2.6309	17.27	
XBase (ohms): 15.2340 Corrente Extrapolada (A): 906 X2 Extrapolado (ohms): 2.4905 X2 (% Xbase): 16.35						

Figura 15 – Ensaios de curto circuito para determinação das Reatâncias

Curto-Circuito Instantâneo					
Tempo (ms)	Corrente			$\Delta I\%$	$\Delta I\%$
	(A)	I=I _{ip}	$\Delta I\%$		
164.0	414.84	331.84	331.84		
153.0	432.33	349.33	349.30		
145.0	445.37	362.37	362.36		
137.0	456.73	375.73	375.72		
128.0	473.99	390.99	391.10		
120.0	488.14	405.14	405.10		
111.0	504.20	421.20	421.20		
103.0	518.83	435.83	435.83		
96.0	531.87	448.87	448.89		
87.0	549.04	466.04	466.01		
79.0	564.46	481.46	481.54		
70.0	582.43	499.43	499.38		
62.0	598.66	515.66	515.56		
53.0	617.09	534.09	534.11		
44.0	636.02	553.02	553.05		
36.0	653.19	570.19	570.20		
29.0	681.51	608.51	585.46	23.05	
21.0	739.84	656.84	603.17	53.67	
12.0	802.81	719.81	623.46	96.35	
4.0	865.57	783.57	641.82	141.75	
0.0	901.15	818.15	651.11	167.04	

Corrente Permanente (A): 83.00
 Tensão Antes do Curto-Circuito (V): 3951.0
 XBase (ohms): 15.23
 Xd' (ohms): 3.12
 Xd' (% Xbase): 20.45
 Xd'' (ohms): 2.54
 Xd'' (% Xbase): 16.66
 t'd (A): 239.53
 t'd (ms): 224.08
 t''d (A): 61.45
 t''d (ms): 13.64

Figura 16 – Ensaio de Curto-Circuito Instantâneo

4.2 Transformadores

Os dados de placa dos transformadores são mostrados na Tabela 4.

Ainda que as impedâncias de sequência zero das unidades trifásicas possam diferir ligeiramente dos valores de sequência positiva e negativa, costuma-se considerar que são iguais, independentemente do tipo de transformador. [3]

As impedâncias utilizadas são mostradas na Tabela 5.

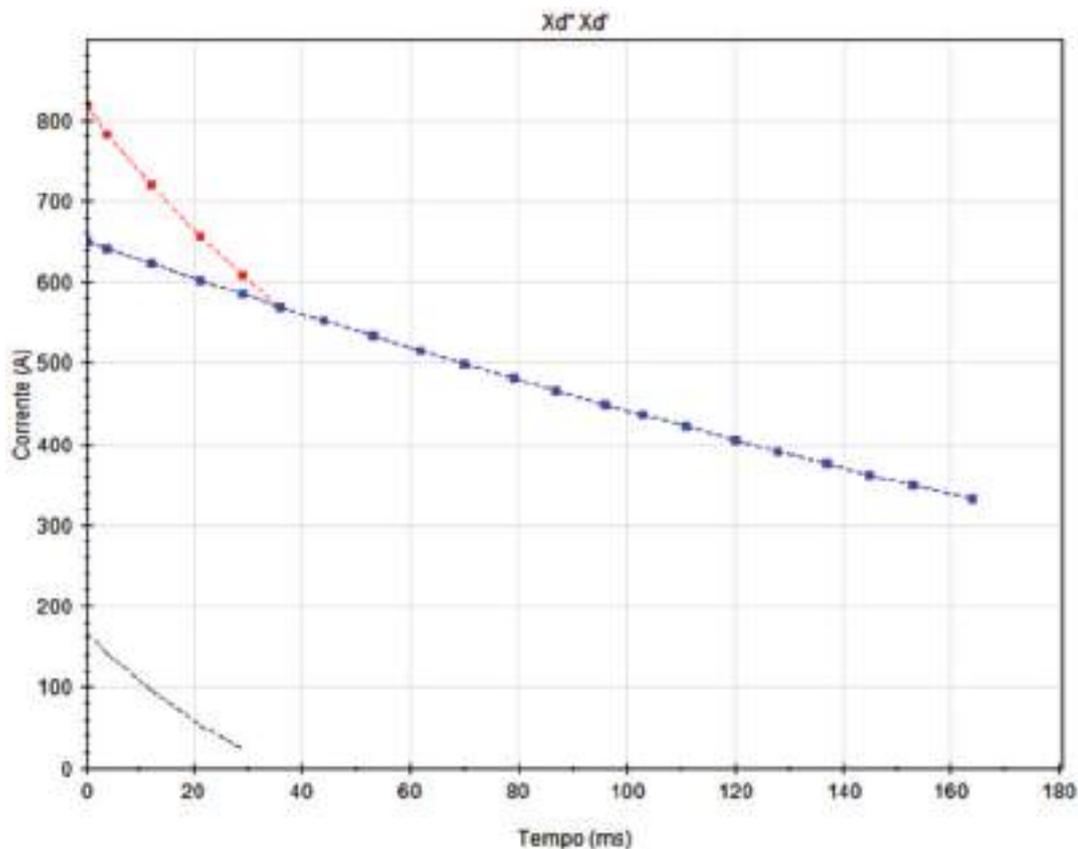


Figura 17 – Reatâncias Transitórias e Subtransitórias em função do tempo

Tabela 3 – Impedâncias das redes de sequência do gerador

IMPEDÂNCIAS DO GERADOR (pu)	
SEQUÊNCIA ZERO	0.0072
SEQUÊNCIA POSITIVA	0.1666
SEQUÊNCIA NEGATIVA	0.1666

Tabela 4 – Dados de placa dos transformadores

TRANSFORMADORES		
DADOS	01	02
POTÊNCIA (kVA)	750	500
TENSÃO PRIMÁRIO (V)	13800	13800
TENSÃO SECUNDÁRIO (V)	380	380
FREQUÊNCIA (Hz)	60	60
IMPEDÂNCIA (%)	5,03	3,14

4.3 Condutores

Devido ao nível de tensão, as perdas nas linhas de alumínio não serão modeladas no cálculo do curto circuito.

Para os condutores em baixa tensão, necessita-se conhecer o valor de resistência e

Tabela 5 – Impedâncias das redes de sequência dos transformadores

IMPEDÂNCIAS DOS TRANSFORMADORES (pu)		
REDES	TRANSFORMADOR 01	TRANSFORMADOR 02
SEQUÊNCIA ZERO	0.785	0.833
SEQUÊNCIA POSITIVA	0.785	0.833
SEQUÊNCIA NEGATIVA	0.785	0.833

Tabela 6 – Impedâncias das redes de sequência dos condutores

IMPEDÂNCIAS DOS CONDUTORES (pu)		
REDES	RESISTÊNCIA	REATÂNCIA
SEQUÊNCIA ZERO	0,00416	0,003065
SEQUÊNCIA POSITIVA	0,0002653	0,0002322
SEQUÊNCIA NEGATIVA	0,0002653	0,0002322

Tabela 7 – Dados de placa dos motores

MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO WEG			
DADOS	MOTOR 01	MOTOR 02	MOTOR 03
POTÊNCIA (cv/ kW)	350 / 260	350 / 260	350 / 260
FREQUÊNCIA (Hz)	60	60	60
VELOCIDADE (rpm)	1790	1790	1790
TENSÃO (V)	380/660	220/760	220/760
RENDIMENTO (%)	0.95	0.96	0.95
FP	0.88	0.87	0.88

reatância de sequência positiva, negativa e zero dos cabos utilizados nas instalações.

As impedâncias dos cabos utilizadas são mostradas na Tabela 6

4.4 Motores de Indução

Os motores apresentam dados de placa mostrados na Tabela 7. No cálculo das correntes de curto-circuito não foram levados em consideração suas contribuições.

5 CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO DE CIRCUITO

Para proteção e coordenação dos diversos elementos de um sistema industrial, é de fundamental importância a determinação das correntes de curto-circuito. Na graduação, diferentes técnicas são estudadas para aplicação dos cálculos. Aplicando a teoria de componentes simétricas vistas na disciplina Sistemas Elétricos, foi desenvolvido durante a disciplina de Análise de Sistemas Elétricos um algoritmo implementado ao Matlab que possibilita a obtenção das correntes de diferentes tipos de curto circuito, trifásico, bifásico ou monofásico.

Para execução do programa torna-se necessário a leitura de dados que caracterizam o sistema a ser implementado. Dessa forma, um arquivo criado externamente ao script permite ter como arquivo de entrada uma tabela já com formatação e apresentação adequada, com todos dados necessários. Dessa forma, evita-se a utilização de rotinas como input, que devido a montante de dados a serem lidos, tornam-se cansativas e improdutivas. [9]

Porém, é importante observar que para a utilização do programa com dados de entrada dados em pu, é necessário estarem todos na mesma base. Na planilha de entrada são inseridos dados do sistema elétrico, a identificação das barras no diagrama unifilar, assim como informações a respeito do tipo de falta e da sua localização. As planilhas a serem lidas são mostradas na Figura 18.

Como mostrado, os dados que caracterizam o sistema são as impedâncias das redes de sequência positiva, negativa e zero dos equipamentos. O diagrama unifilar é modelado através da enumeração das barras e o tipo de falta é indicado na numeração escolhida pelo usuário conforme informado no script e mostrado na Figura 19.

A inclusão de dados do sistema é muito importante para o cálculo das correntes de curto-circuito, então necessita que os dados incluídos ao algoritmo sejam armazenados de forma segura, para que não ocorra uma distorção no resultado final.

Após a leitura, os dados do gerador, condutores e transformadores são processados nas matrizes de admitância de barramento para criação das matrizes de impedâncias de barra para cada sequência: positiva, negativa e zero. De posse disso, as correntes em qualquer parte do sistema podem ser calculadas para cada tipo falta. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 8 e o algoritmo será detalhado no Apêndice A.

The figure shows four screenshots of an Excel spreadsheet, each representing a different sheet in a workbook. The sheets are: 'Geradores', 'Linhas', 'Transformadores', and 'Faltas'. Each sheet contains a table with technical data for a power system analysis.

Sheet: Geradores

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	BARRA	NC	RO	X0	R1	X1	R2	X2	RAt	XAt
1	1	1	0	0,072	0	0,1666	0	0,01666	0	0

Sheet: Linhas

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	DE	PARA	NC	RO	X0	R1	X1	R2	X2	Imax
1	1	2	1	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	1000
2	1	3	1	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	1000
3	4	6	1	0,00416	0,005322	0,003065	0,0026825	0,003065	0,0026825	1000
4	4	7	1	0,00416	0,005322	0,003065	0,0026825	0,003065	0,0026825	1000
5	5	8	1	0,00416	0,005322	0,003065	0,0026825	0,003065	0,0026825	1000

Sheet: Transformadores

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	DE	PARA	NC	RO	X0	R1	X1	R2	X2	Imax	LigP	LigS	Gr1	Gr2	Sb1	Sb2
1	2	4	1	0	0,785	0	0,785	0	0,785	1000	1	0	1	0	1	0
2	3	5	1	0	0,833	0	0,833	0	0,833	1000	1	0	1	0	1	0

Sheet: Faltas

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	ID DA BARRA DE INTERESSE	TIPO DE FALTA													
1															
2	1	0													
3	1	1													
4	1	2													
5	1	3													

Figura 18 – Tabela com os dados de entrada do sistema

```
%Variáveis Auxiliares dos Tipos de Falta  
Trifasico = 0;  
FaseTerra = 1;  
FaseFase = 2;  
FaseFaseTerra = 3;
```

Figura 19 – Identificação dos tipos de falta na script

Tabela 8 – Correntes de Curto-circuito da rede

CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO		
BARRAS	TRIFÁSICO(A)	FASE-TERRA(A)
1	3139,01	2048,75
2	3138,81	6145,48
3	3138,81	6145,48
4	19958,46	14963,62
5	18999,38	14160,27
6	19901,00	22351,43
7	19901,00	22351,43
8	18948,10	21156,84

6 MODELIZAÇÃO DO SISTEMA PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação de modelos de relés digitais para simulação computacional objetiva contribuir para o melhor entendimento do funcionamento destes equipamentos, bem como proporcionar a visualização da coordenação dos mesmos.

6.1 Modelo do Relé Digital de Sobrecorrente com unidade instantânea e temporizada – 50/51

O modelo adotado para simulação do relé digital de sobrecorrente consiste no modelo apresentado por Gécica (2016). Para os propósitos pretendidos, a autora fez algumas modificações no modelo inicialmente desenvolvido por Kezunovic (2016) e posteriormente apresentado por Salles (2007). A modelização do relé foi realizada na plataforma MATLAB/SIMULINK® e apresenta a união da unidade temporizada com a unidade instantânea.

Neste modelo, mostrado na Figura 20, a corrente é transformada em um fasor, sendo sua magnitude comparada com a corrente de ajuste do relé. A comparação será integrada de modo a refletir o atraso de tempo de atuação do relé. Sendo assim, a saída do integrador será comparada com o tempo limite de modo a definir o sinal de comando (Trip) para acionamento do disjuntor. [10]

Para implementação em sistema trifásico, se faz necessária a modelização apresentada na Figura 21. Como pode ser observado, cada fase têm sua proteção e seus respectivos sinais de saída, sejam da unidade instantânea ou temporizada.

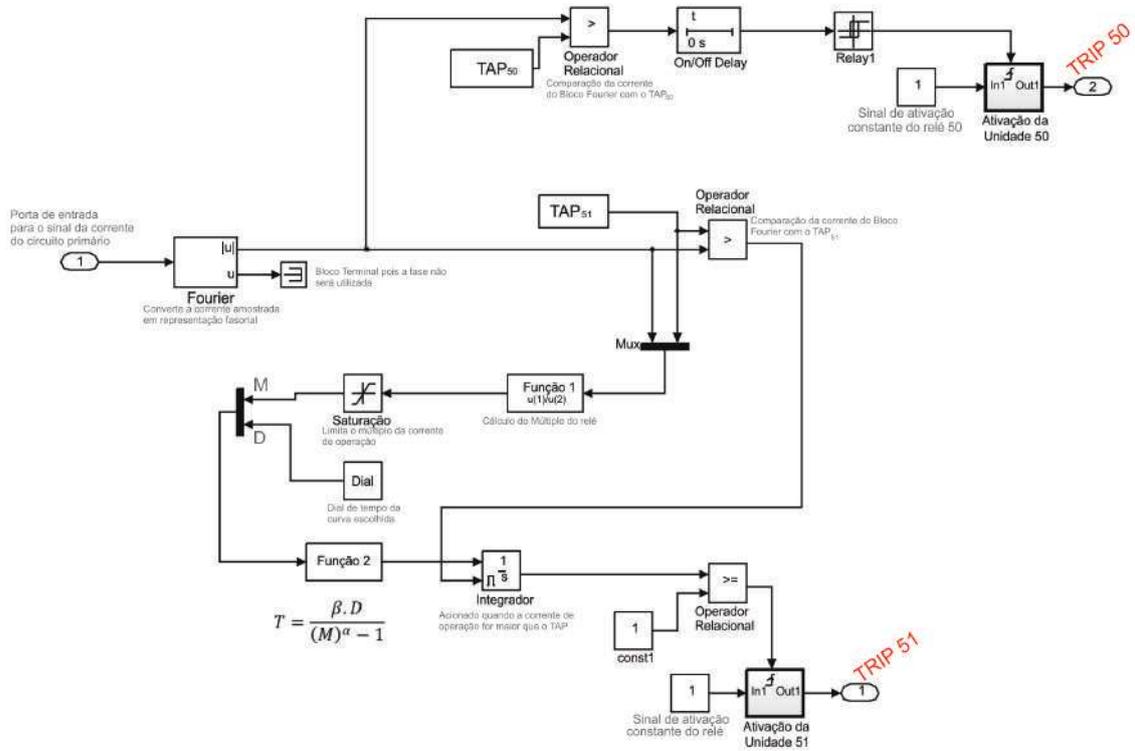


Figura 20 – Diagrama de blocos do relé 50/51

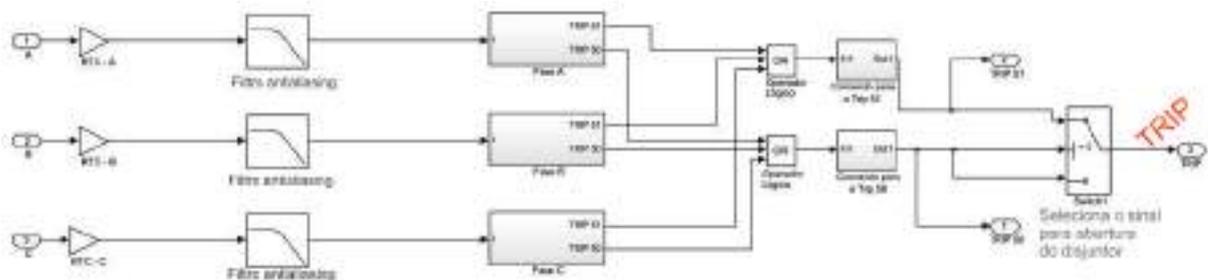


Figura 21 – Configuração para relé trifásico

7 IMPLEMENTAÇÃO DA REDE ELÉTRICA

A Figura 22 apresenta o sistema avaliado e implementado no ambiente SIMULINK.

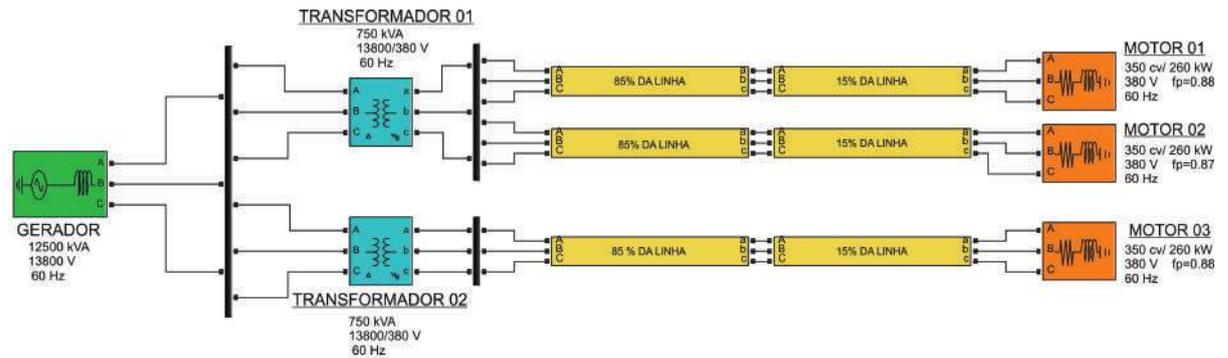


Figura 22 – Rede Elétrica implementada no SIMULINK

Os parâmetros utilizados para a modelização do gerador, transformadores, cabos e motores são mostrados nas Figuras 23 a 26, respectivamente.

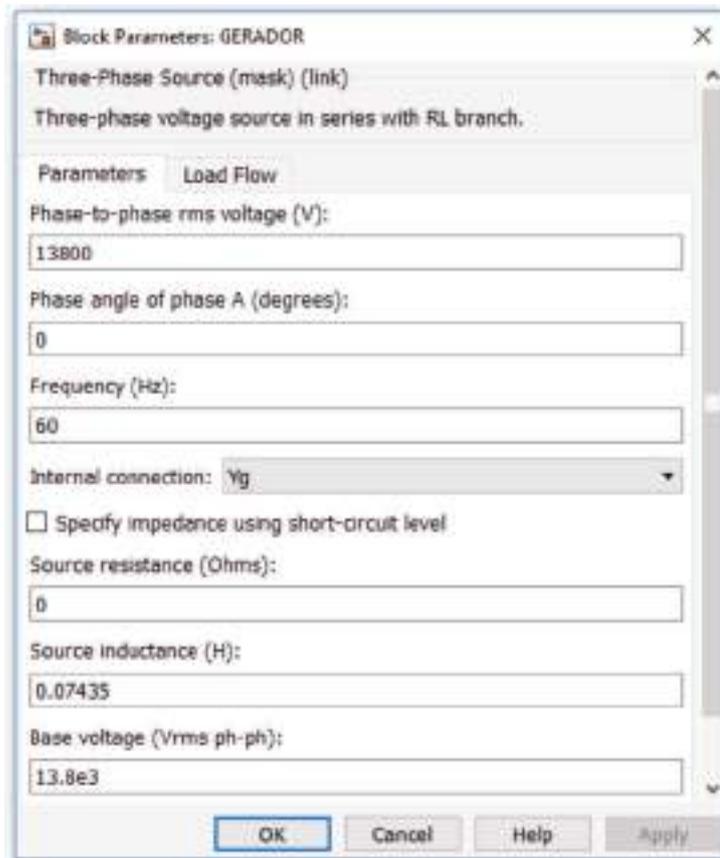


Figura 23 – Parâmetros do Gerador

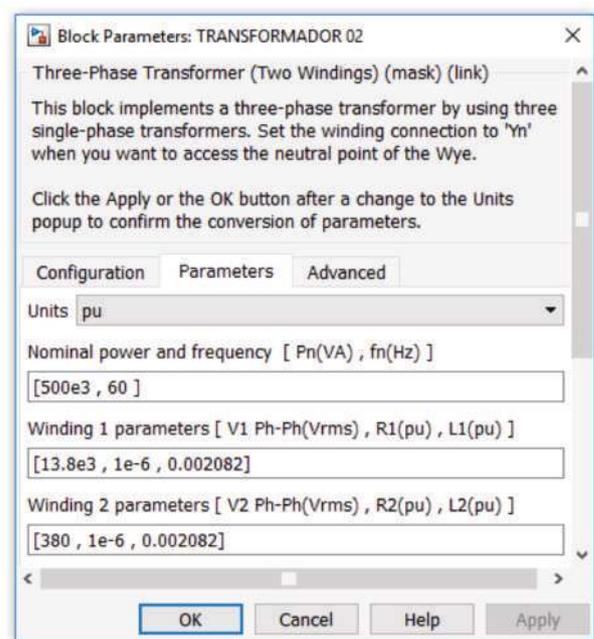
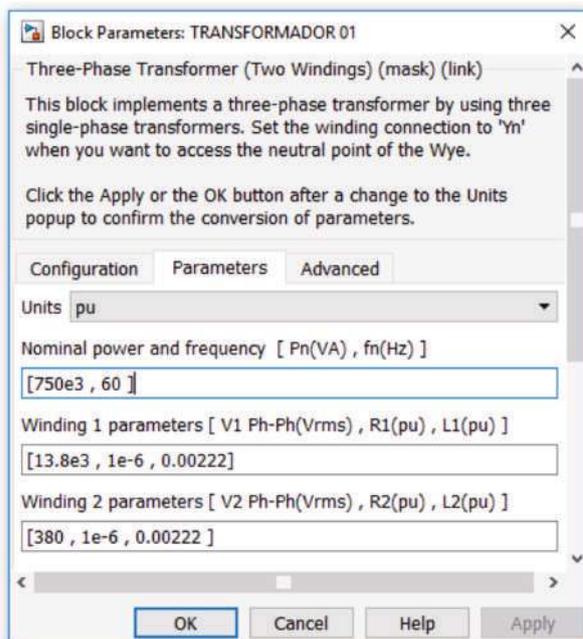


Figura 24 – Parâmetros dos Transformadores

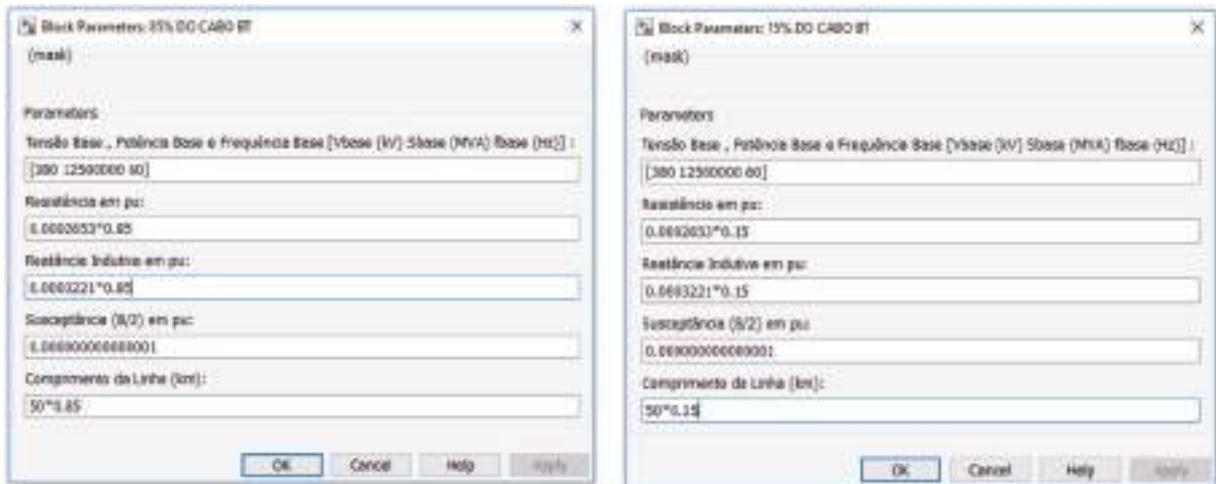


Figura 25 – Parâmetros dos Cabos na Baixa Tensão

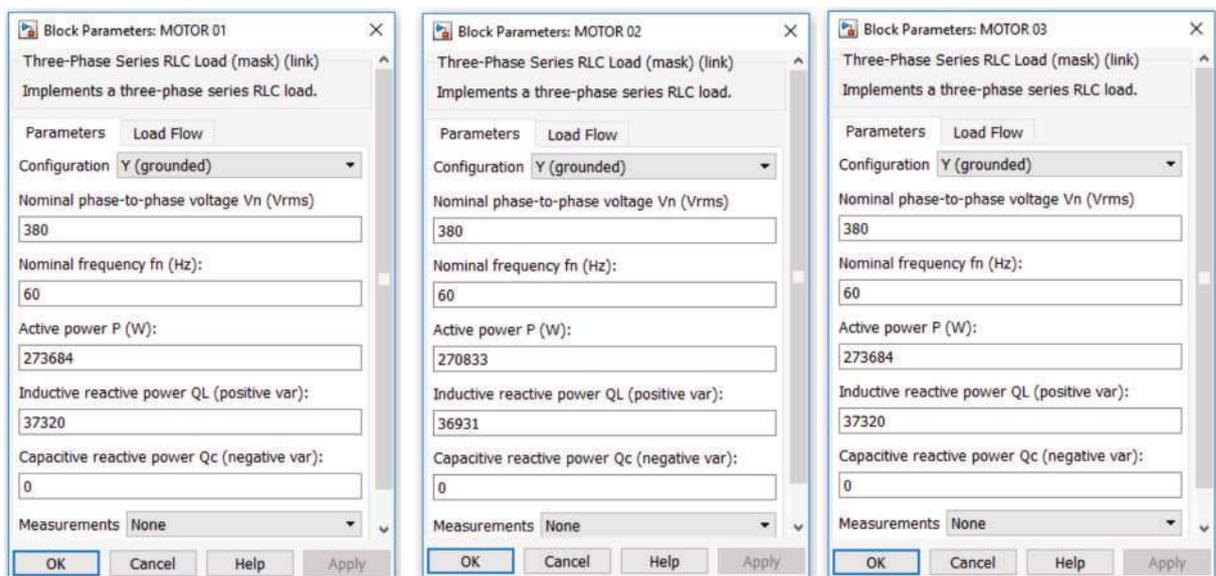


Figura 26 – Parâmetros dos Motores

8 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

Serão avaliados o desempenho da coordenação e seletividade através dos relés de sobrecorrente 50/51 presentes atualmente no sistema como é ilustrado na Figura 27.

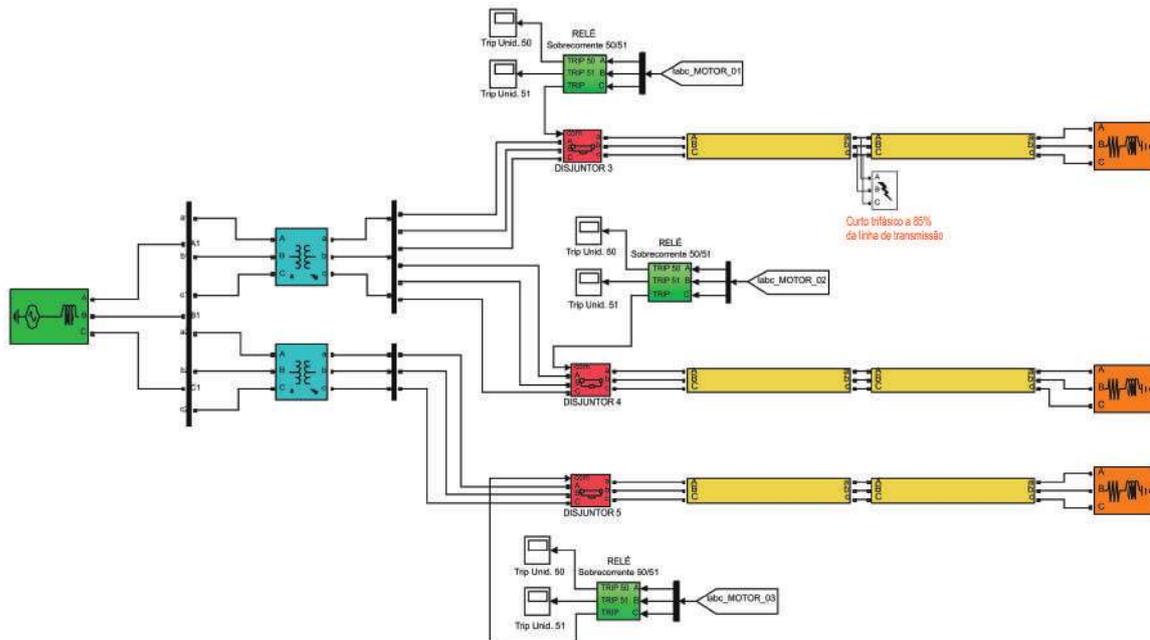


Figura 27 – Rede elétrica com a proteção existente

8.1 Relação de transformação dos TC's

As relações de transformação são determinadas seguindo os critérios de curto e de carga através das Equações 2.10 e 2.11.

8.1.1 Motor 01 e 03

- Critério de Curto

$$I_{Pnominal} = \frac{19958,46}{20} = 997,923A \quad (8.1)$$

- Critério de Carga

$$I_N = \frac{260000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,95} = 472,53A \quad (8.2)$$

Considerando a maior das duas correntes e os valores disponíveis pela ANSI, obtém-se:

$$TC = \frac{1200}{5} \quad (8.3)$$

8.1.2 Motor 02

- Critério de Curto

$$I_{Pnominal} = \frac{18999,38}{20} = 948,969A \quad (8.4)$$

- Critério de Carga

$$I_N = \frac{260000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,96} = 467,60A \quad (8.5)$$

Considerando a maior das duas correntes e os valores disponíveis pela ANSI, obtém-se:

$$TC = \frac{1200}{5} \quad (8.6)$$

8.2 Unidade Temporizada(51)

Para obter a corrente de ajuste do relé, usa-se a expressão 2.12:

8.2.1 Motores 01 e 03

$$I_{ajuste51} = 1,5 \frac{472,53}{\frac{1200}{5}} = 2.95 \quad (8.7)$$

8.2.2 Motores 02

$$I_{ajuste51} = 1,5 \frac{467}{\frac{1200}{5}} = 2.92 \quad (8.8)$$

8.3 Unidade Instântanea (50)

Para unidade instantânea utiliza-se a corrente de curto-circuito a 85% da linha, pela Equação. A corrente de ajuste é calculada pela Equação 2.12;

8.3.1 Motores 01 e 02

$$I_{cc3,85\%} = \frac{19958,46 \quad 19901}{(0,85 \quad 19958,46) + (0,15 \quad 19901)} = 19908A \quad (8.9)$$

$$I_{ajuste50} = \frac{19908}{\frac{1200}{5}} = 82,95A \quad (8.10)$$

8.3.2 Motor 03

$$I_{cc3,85\%} = \frac{18999,38 \quad 18948,10}{(0,85 \quad 18999,38) + (0,15 \quad 18948,10)} = 18955,68A \quad (8.11)$$

$$I_{ajuste50} = \frac{18955,68}{\frac{1200}{5}} = 78,982A \quad (8.12)$$

8.4 Tempos de atuação e múltiplos

Calcula-se o múltiplos utilizando a Equação 2.14:

$$M_{motor1} = \frac{82,95}{2,95} = 28,12 \quad (8.13)$$

$$M_{motor2} = \frac{82,95}{2,95} = 28,12 \quad (8.14)$$

$$M_{motor3} = \frac{78,982}{2,95} = 27,04 \quad (8.15)$$

O tempo de atuação é calculado pela Equação 2.13, através da curva normalmente inversa com Dial de 0,1. Os parâmetros são mostrados na Figura 9.

$$T_{atu} = \frac{0,14 \quad 01}{28,12^{0,02} - 1} = 0,205s \quad (8.16)$$

8.5 Avaliação do desempenho do relé

Os valores encontrados foram inseridos em seus respectivos blocos para a avaliação do desempenho do relé para a coordenação. Foram considerados os seguintes casos:

- Curto trifásico a 85% da linha de transmissão
- Curto trifásico a 50% da linha de transmissão

- Curto monofásico a 85% da linha de transmissão
- Curto monofásico a 50% da linha de transmissão

É importante observar que a proteção através dos relé de sobrecorrente só atuará em casos de faltas a jusante do sensor. Dessa forma, em caso de faltas a montante do relé, será acionado a proteção do gerador, de forma não seletiva, interrompendo os demais sistemas por ele alimentado.

Diante dessa problemática, será analisado o desempenho da proteção com a inserção de relés a montante do transformador afim de contribuir para o melhor entendimento da seletividade, proporcionando a visualização da coordenação dos mesmos. A rede sugerida é mostrada na Figura 28.

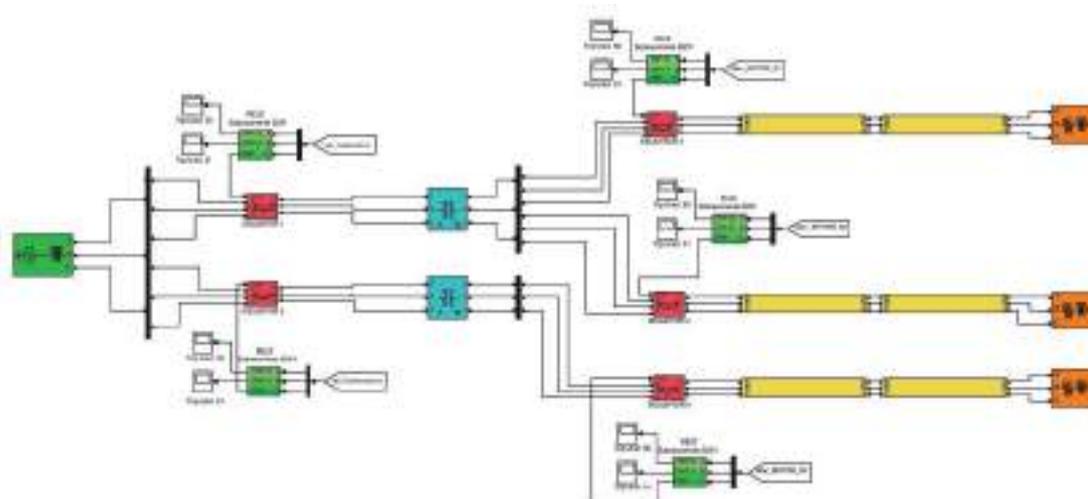


Figura 28 – Rede Elétrica com inserção de Relés sugeridos

Serão analisados os seguintes casos considerando a inserção de novos relés:

- Atuação da proteção local
- Atuação da proteção de retaguarda

9 RESULTADOS

9.1 Desempenho dos Relé Digital 50/51

Inicialmente serão apresentados os resultados da operação dos relés que simulam a situação atual do sistema em estudo, sem a ocorrência de falha. Posteriormente, será avaliada a atuação da proteção com a inserção dos relés no sistema, observando assim, a coordenação e seletividade em caso de falhas do relé mais próximo do curto.

9.1.1 Curto trifásico a 85% da linha

A simulação do curto trifásico a 85% da linha é mostrada na Figura 29.

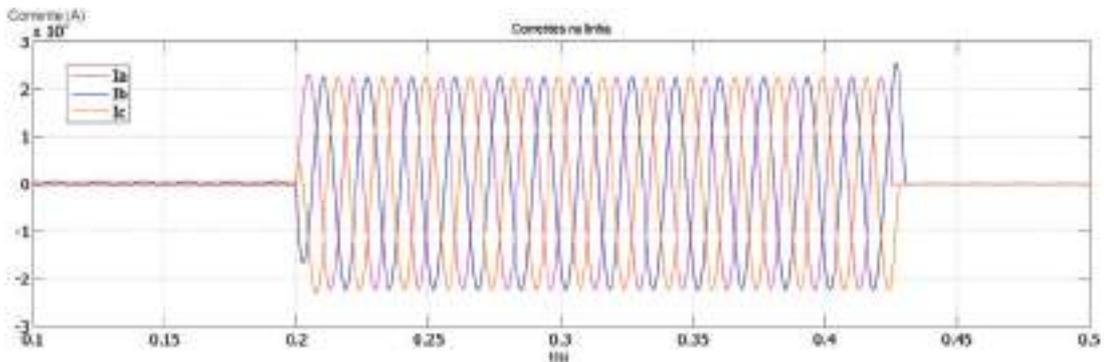


Figura 29 – Correntes de curto trifásico a 85 % da linha

Através da Figura, pode-se observar a ocorrência do curto no tempo de 0,2s e a atuação da proteção em aproximadamente 0,42 s. O intervalo de 0,22s corresponde ao tempo de atuação (T_{atu}) previamente calculado. A diferença de 0,02s é causada pelo bloco Fourier que utiliza um período (1/60s) para estimar o fasor da corrente.

Analisando o relé de sobrecorrente 50/51 através da Figura 30, verifica-se exatamente a atuação da unidade temporizada no tempo esperado. Nota-se também que a unidade instantânea não é sensibilizada, conforme esperado.

9.1.2 Curto trifásico a 50% da linha

A simulação do curto trifásico a 50% da linha é mostrada na Figura 29.

Através da Figura, pode-se observar a ocorrência do curto no tempo de 0,2s e a atuação da proteção instantânea em aproximadamente 0,22 s. A mesma diferença de 0,02s causada pelo bloco Fourier é visualizada.

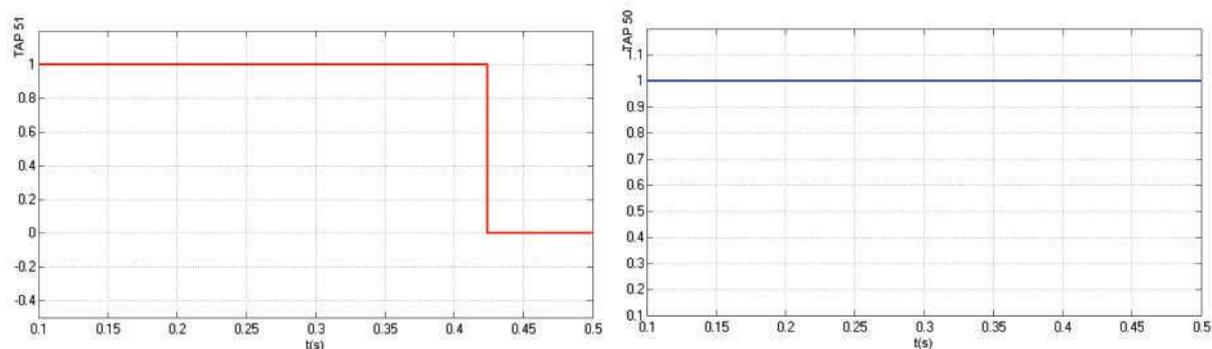


Figura 30 – TAPs 50/51

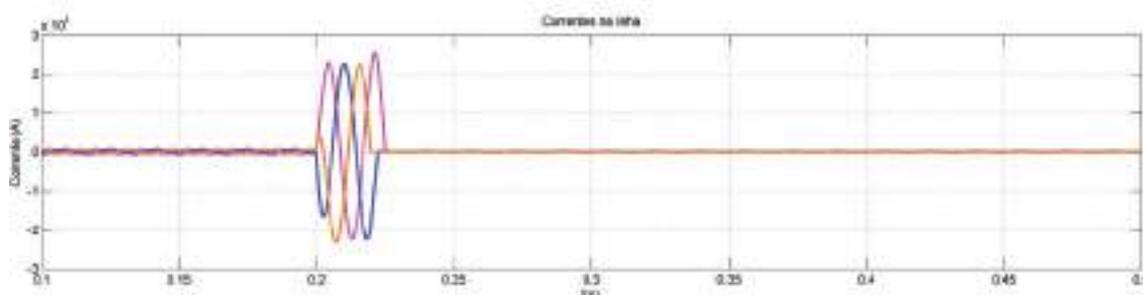


Figura 31 – Correntes de curto trifásico a 50 % da linha

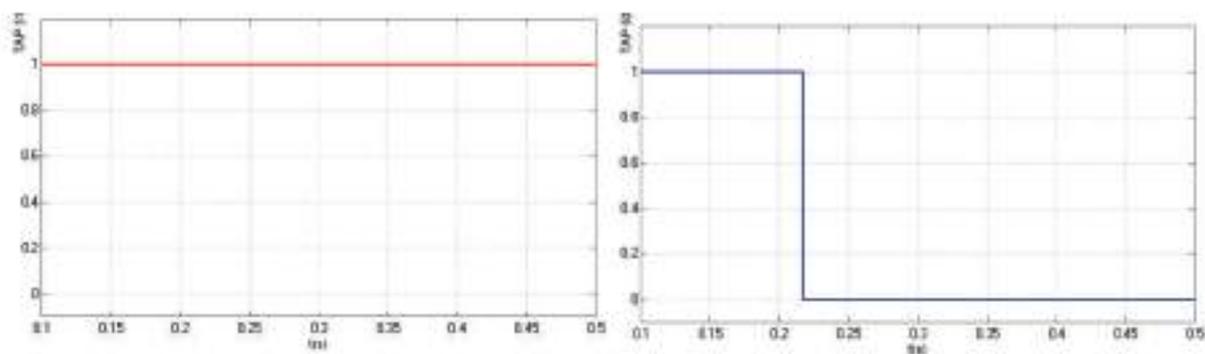


Figura 32 – TAPs 50/51

Analisando o relé de sobrecorrente 50/51 através da Figura 30, verifica-se a atuação da unidade instantânea como esperado. Nota-se também que a unidade temporizada não é sensibilizada.

9.1.3 Curto monofásico a 85% da linha

As mesmas análises são observadas para o curto monofásico. Nas Figuras 33 e 34 são mostradas a corrente do sistema e a atuação do relé de sobrecorrente, respectivamente.

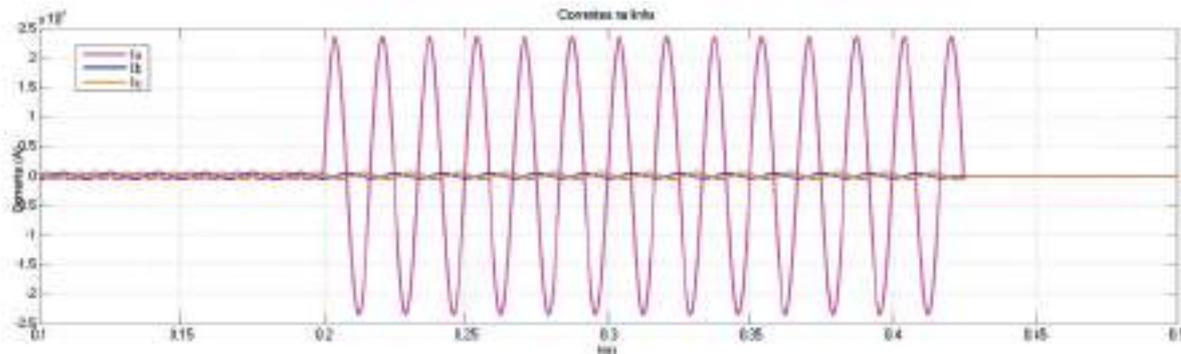


Figura 33 – Correntes de curto monofásico a 85 % da linha

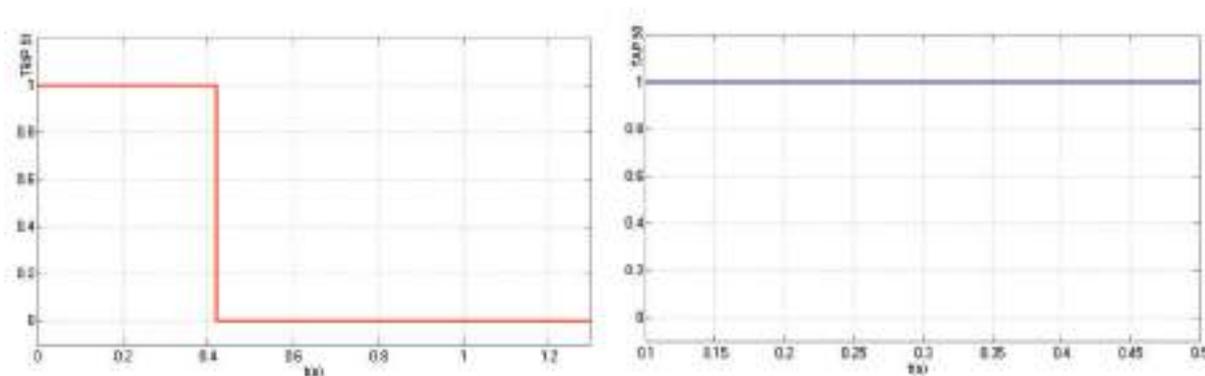


Figura 34 – TAPs 50/51

9.1.4 Curto monofásico a 50% da linha

No curto monofásico a 50% da linha, é observado na Figura 34 a atuação da unidade instantânea devido ao crescimento do nível de curto ao aproximar-se da fonte.

9.2 Inserção de relés na proteção

São sugeridas a implementação de dois relé afim de atender os critérios de coordenação e seletividade do sistema elétrico. Pois, o sistema atual não apresenta relé de proteção a montante do transformador.

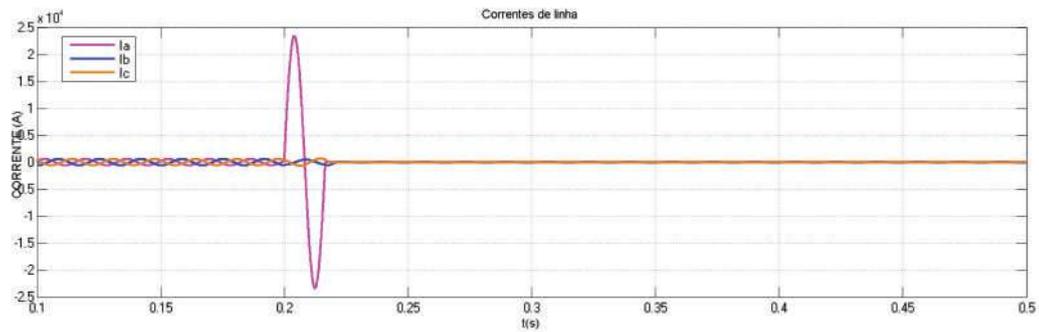


Figura 35 – Correntes de curto monofásico a 50 % da linha

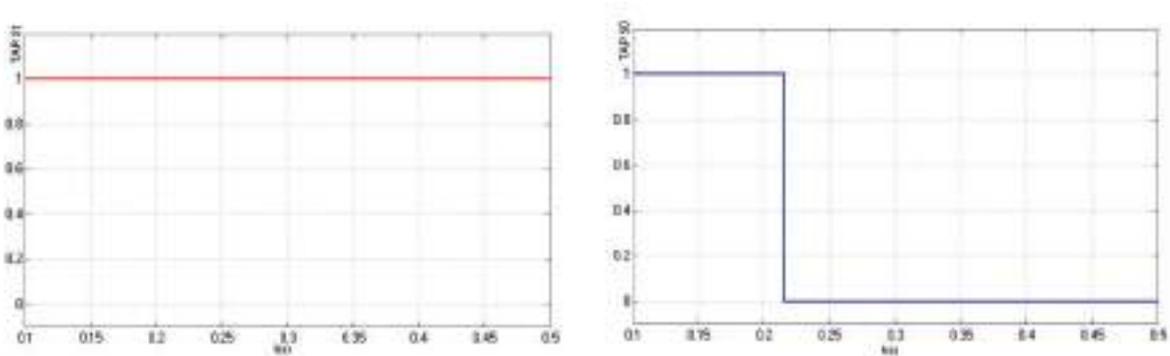


Figura 36 – TAPs 50/51

9.2.1 Curto a Montante da proteção existente

Em caso de curto-circuito anterior ao relé existente no sistema, ao inserir um relé, observa-se na Figura 37 a atuação corretamente do relé na unidade instantânea.

9.2.2 Curto a Jusante da proteção existente

No caso de curto-circuito a jusante da proteção existente, verifica-se a coordenação e seletividade nas Figuras 39.

Nessa situação, o disjuntor de retaguarda não é sensibilizado pelo relé, por nenhuma das unidades, pois, garantindo a coordenação seletividade, apenas o disjuntor é sensibilizado de forma que só o motor saia de operação.

9.2.3 Caso de falha da proteção existente

Simulando um curto-circuito trifásico para o caso de falha na proteção existente, a atuação do relé retaguarda inserido é observada na Figura 40.

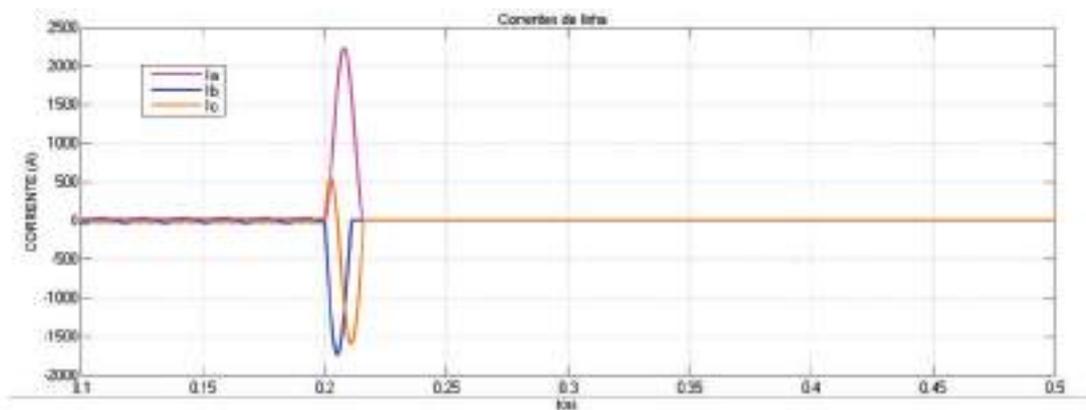


Figura 37 – Corrente de linha

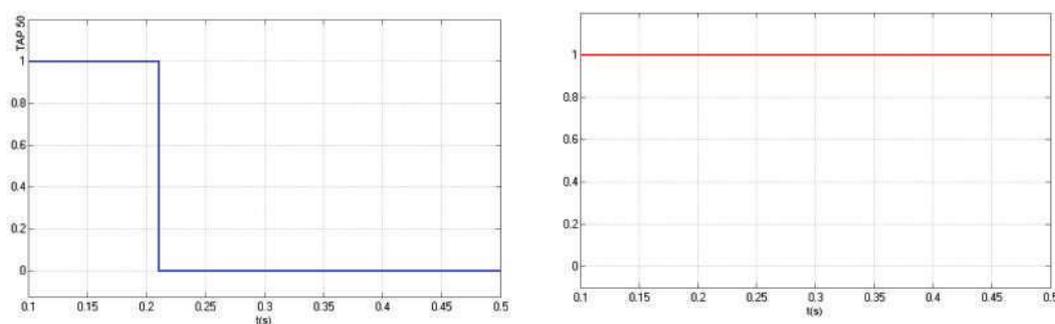


Figura 38 – TAPs 50/51

A atuação do relé de retaguarda de forma seletiva e coordenada é conferida pela Figura 41, onde a atuação da unidade temporizada no intervalo de 0,7s garante que essa proteção só atue em caso de falha da proteção a montante. A atuação desse relé garante que defeito não atinja o gerador e tire-o de operação.

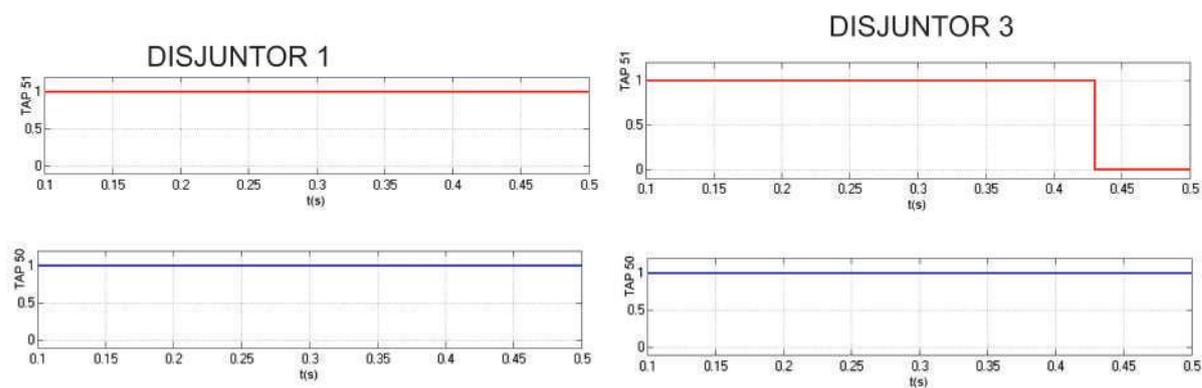


Figura 39 – TAPs 50/51 para comando dos Disjuntores 1 e 3

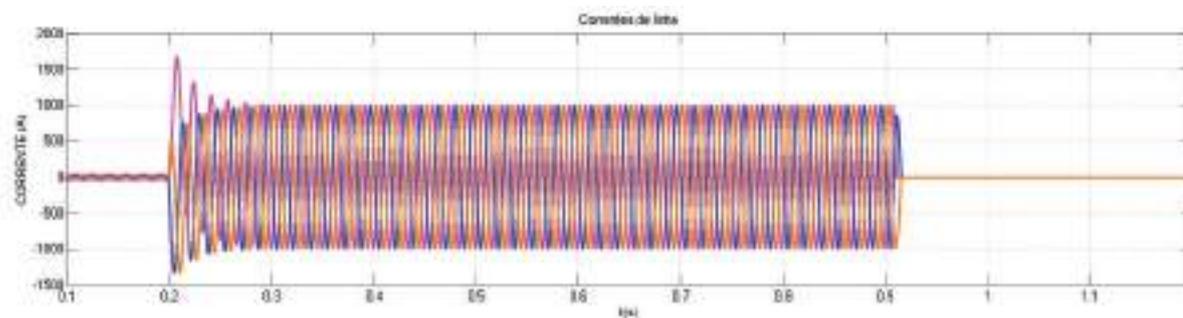


Figura 40 – Correntes de curto-circuito

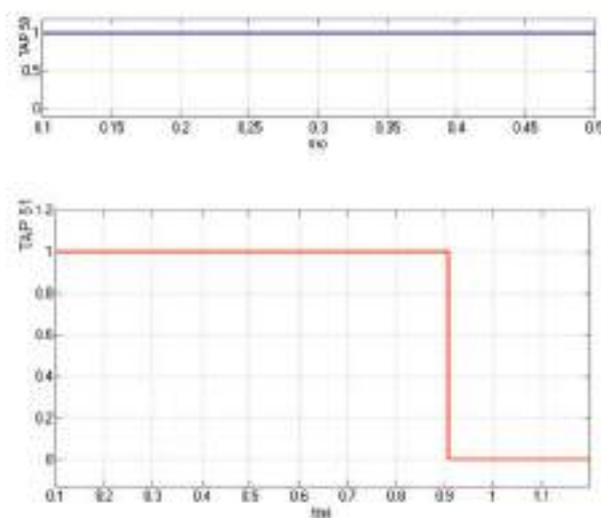


Figura 41 – TAPs 50/51

10 CONCLUSÃO

A partir de um embasamento teórico e ao longo do desenvolvimento do trabalho, foi possível aprofundar os conceitos e aplicações práticas quanto a proteção de um sistema elétrico. Como trabalho de conclusão de curso, foi de grande importância a oportunidade de estudar um caso real, onde era-se acompanhado de perto os transtornos e consequências oriundos de uma proteção comprometida. A seletividade mostrou-se uma técnica imprescindível para garantir a continuidade nos setores de produção, minimizando as interrupções indesejadas.

Além disso, através da metodologia apresentada foi possibilitada uma análise detalhada do comportamento do relé de sobrecorrente digital, segundo modelamento matemático de acordo com suas características operacionais. Foi verificada a eficácia das técnicas de coordenação e seletividade, confirmando sua importância no sistema de proteção em uma indústria.

A utilização de modelos para simulação computacional foi importante para prever o comportamento e os possíveis erros que possam ocorrer quando os equipamentos estiverem de fato em operando.

Apesar de limitado a apenas um tipo de proteção, a percepção da grandeza existente dentro dessa área despertou interesse na continuidade e extensão dos estudos voltados a proteção do sistema elétrico visando uma possível atuação profissional nesse âmbito.

REFERÊNCIAS

- 1 FILHO, J. M. *Instalações Elétricas Industriais*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- 2 SATO, F.; FREITAS, W. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica: Fundamentos e prática. *Rio de Janeiro: Campus*, 2015.
- 3 STEVENSON, W. D. *Elementos de análise de sistemas de potência*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1974.
- 4 CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- 5 SOUSA, M. H. d. *Determinação de parâmetros de máquinas síncronas pelo ensaio de resposta em frequência: proposta de metodologia com inversor de frequência*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- 6 BRAZ, H. D. Resumo sobre linhas de transmissão.
- 7 KINDERMANN, G. Proteção de sistemas elétricos de potência. *Florianópolis: UFSC*, 1999.
- 8 FILHO, J. M. *Manual de Equipamentos Elétricos*. [S.l.]: 2005.
- 9 BRAZ, H. D. Melhorando a entrada de dados dos scripts matlab.
- 10 PRUDENCIO, G. M. R. Análise de coordenação de relés digitais de sobrecorrente utilizando simulação computacional. 2016.

A ALGORITMO PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO

```

%Calculo das correntes de falta

i=Local;
szB = size(Zbus1,1);
E = ones(szB,1);
I1 = zeros(szB,1);
I2 = zeros(szB,1);
I0 = zeros(szB,1);

switch Tipo
case Faltatrif
    I1(i) = E(i)/Zbus1(i,i)
    for j=1:nb
        V1(j) = E(i) - (Zbus1(j,i)*I1(i));
    end

case Faltamono
    I1(i) = E(i)/(Zbus0(i,i) + Zbus1(i,i) + Zbus2(i,i));
    I0(i) = I1(i);
    I2(i) = I1(i);
    I=A*[I0(i);I1(i);I2(i)];
    IA(i) = I(1);
    IB(i) = I(2);
    IC(i) = I(3);

    for j=1:nb
        V0(j) = -(Zbus0(j,i)*I0(i));
        V1(j) = E(i) - (Zbus1(j,i)*I1(i));
        V2(j) = -(Zbus2(j,i)*I2(i));
        Vn = A*[V0(j);V1(j);V2(j)];
        Va(j) = Vn(1);
        Vb(j) = Vn(2);
        Vc(j) = Vn(3);
    end

case Faltabif
    I1(i) = E(i)/(Zbus1(i,i)+Zbus2(i,i));
    I2(i) = -I1(i);
    I0(i)=0;
    I=A*[I0(i);I1(i);I2(i)];
    IA(i) = I(1);
    IB(i) = I(2);
    IC(i) = I(3);

    for j=1:nb
        V1(j) = E(i) - (Zbus1(j,i)*I1(i));
        V2(j) = -(Zbus2(j,i)*I2(i));
        V0(j)=0
        Vn = A*[V0(j);V1(j);V2(j)];
        Va(j) = Vn(1);
        Vb(j) = Vn(2);
        Vc(j) = Vn(3);
    end

case Faltabift
    I1(i) = (E(i)*(Zbus0(i,i)+Zbus2(i,i)))/((Zbus0(i,i)*Zbus2(i,i))+(Zbus1(i,i)*(Zbus0(i,i)+Zbus2(i,i))));
    I2(i) = -(Zbus0(i,i)*I1(i))/(Zbus0(i,i)+Zbus2(i,i));
    I0(i) = -(Zbus2(i,i)*I1(i))/(Zbus0(i,i)+Zbus2(i,i));
    I=A*[I0(i);I1(i);I2(i)];
    IA(i) = I(1);
    IB(i) = I(2);
    IC(i) = I(3);

    for j=1:nb
        V0(j) = -(Zbus0(j,i)*I0(i));
        V1(j) = E(i) - (Zbus1(j,i)*I1(i));
        V2(j) = -(Zbus2(j,i)*I2(i));
        Vn = A*[V0(j);V1(j);V2(j)];
        Va(j) = Vn(1);
        Vb(j) = Vn(2);
        Vc(j) = Vn(3);
    end
end
end

```

Figura 42 – Algoritmo para cálculo das correntes de falta