

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO PAULO DA SILVA

**PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL APLICADA A LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019

JOÃO PAULO DA SILVA

**PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL APLICADA A LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Aparecido de Souza

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio Departamento
Acadêmico de Elétrica Curso de
Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Paulo da Silva

Proteção de sobrecorrente direcional aplicada a linhas de transmissão

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:30hs do dia 27/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Edson Aparecido Rozas Theodoro - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me direcionar, encorajar em minhas decisões pessoais e profissionais, me dar força e apoiar nos momentos mais difíceis durante o período de graduação.

As pessoas que passaram na minha vida antes mesmo da graduação e que sempre depositaram confiança e acreditaram que seria capaz de realizar esse curso. Aos meus amigos e colegas de faculdade e da cidade de Cornélio Procópio que foram essenciais para minha vida e que vou levar sempre comigo, em especial: Guilherme Gonçalves da Silva, Heloisa Pepis, Jhonatan Henrique Meneses Puluca, João Paulo Alves Moura, Leonardo Gasparoto, Lucas Fernandes, Lucas de Souza, Sérgio Augusto, Vitor Basso e a todos que contribuíram de alguma forma para o meu crescimento. Minha gratidão eterna à Empresa Júnior de Engenharia Elétrica e Eletrônica SELECT por garantir a experiência de um ambiente de trabalho, colocando em prática meus conhecimentos técnico e me desenvolvendo como um líder.

Meus pais que apesar da distância, estavam sempre por perto, me orientando e desejando sorte em todos os obstáculos que enfrentei. E por último, não menos importante, meu orientador Silvio Aparecido de Souza e todos meus professores que puderam compartilhar seus conhecimentos, conselhos e direcionaram a minha trajetória profissional.

RESUMO

SILVA, J.P. **Proteção de Sobrecorrente Direcional Aplicada a Linhas de Transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

O presente trabalho apresenta o estudo, elaboração de um algoritmo e a implementação de um relé de sobrecorrente direcional em uma linha de transmissão. O sistema elétrico utilizado foi modelado e simulado no *software* ATPDraw e seus dados de tensão e corrente, foram utilizados no *Software* Matlab para validação do estudo. Utilizou-se a Transformada Discreta de Fourier para a extração da componente fundamental dos fasores de tensão e corrente, calculando-se as tensões e correntes de sequência positiva e negativa para detecção de faltas aplicadas no sistema de estudo. Mediante as faltas simuladas no SEP utilizado, foi implementada uma metodologia onde a mesma monitora sobrecorrente em uma determinada direção previamente estabelecida. Objetivando efetuar uma proteção de retaguarda com as faltas detectadas, foram ajustados os elementos de sobrecorrente das unidades instantânea e temporizada, de fase e neutro, garantindo assim, atuação coordenada destas proteções, e incorporando, seletividade, velocidade de atuação e confiabilidade no sistema elétrico onde foi implementado. O algoritmo elaborado obteve um comportamento dentro do esperado das faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas simuladas com um percentual de 92% de acertos, validando assim o estudo e método proposto.

Palavra-chave: Relé. Sobrecorrente. Direcional. Proteção. Retaguarda;

ABSTRACT

SILVA, J.P. **Directional Overcurrent Protection Applied to Transmission Lines.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

The present work presents the study, elaboration of an algorithm and the implementation of a directional overcurrent relay in a transmission line. The electrical system used was modeled and simulated in the ATPDraw software and its voltage and current data were used in the Matlab Software for validation of the study. The Fourier Discrete Transform was used to extract the fundamental component of the voltage and current phasors, calculating the positive and negative sequence and voltage currents to detect faults applied in the study system. By means of the simulated faults in the electric power system used, a methodology was implemented where it monitors overcurrent in a previously established direction. In order to carry out a rear protection with the detected faults, the overcurrent elements of the instant and timed, phase and neutral units were adjusted, thus ensuring, coordinated performance of these protections, and incorporating, selectivity, speed of operation and reliability in the electrical system where was implemented. The elaborated algorithm obtained a behavior within the expected three - phase, biphasic and simulated monophasic faults with a percentage of 92% of correct answers, thus validating the study and proposed method.

Keywords: Relay. Overcurrent. Directional. Protection. Rearguard.

LISTA DE FIGURAS

Proteção de retaguarda.....	15
Relé eletromagnético com disco de indução.....	17
Relés estáticos.....	18
Relés digitais.....	19
Sistema elétrico malhado.....	20
Curva de atuação de uma unidade instantânea.....	22
Curva de atuação de uma unidade temporizada.....	24
Conexões para diferentes conjugados do relé direcional.....	25
Diagrama Unifilar do Relé Direcional 67.....	27
Diagrama fasorial do limiar de operação do Relé Direcional.....	29
Representação do SEP simulado em ATP.....	33
Área de interesse do trabalho.....	34
Fluxograma do algoritmo proposto na metodologia.....	36
Faltas aplicadas no sistema elétrico.....	37
Elemento instantâneo de Fase.....	41
Elemento temporizado de Fase.....	42
Gráfico com faltas trifásicas aplicadas.....	50
Gráfico com faltas tmonofásicas aplicadas.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Percentagem de causas de falhas ocorridas no SEP.....	11
Tabela 2	Percentagem de falhas ocorridas no SEP.....	11
Tabela 3	Coeficientes normalizados segundo IEC e IEEE/ANSI.....	24
Tabela 4	Polarização do relé direcional – conexão 90°.....	26
Tabela 5	Características da linha de transmissão.....	34
Tabela 6	Tabela de acertos da direcionalidade do algoritmo para faltas trifásicas.....	44
Tabela 7	Tabela de acertos da direcionalidade do algoritmo para faltas bifásicas.....	45
Tabela 8	Tabela de acertos da direcionalidade do algoritmo para faltas bifásicas com terra.....	46
Tabela 9	Tabela de acertos da direcionalidade do algoritmo para faltas monofásicas.....	47
Tabela 10	Correntes medidas pelo relé para faltas trifásicas.....	48
Tabela 11	Ajuste da unidade instantânea direcional de fase.....	48
Tabela 12	Ajuste da unidade temporizada direcional de fase.....	49
Tabela 13	Tempos de atuação para cada falta aplicada.....	51
Tabela 14	Correntes monofásicas das faltas utilizadas para realização do ajuste.....	51
Tabela 15	Ajustes da unidade instantânea direcional de neutro.....	52
Tabela 16	Ajustes da unidade temporizada direcional de neutro.....	52
Tabela 17	Tempos de atuação para cada falta aplicada.....	54

LISTA DE SIGLAS

ANSI	American Nacional Standars Intitute
DIT	Demais instalações de Transmissão
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LT	Linha de Transmissão
NOS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR	Plano de ampliações e Reforços da Rede Básica
SEP	Sistema elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TP	Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivos gerais	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1. Proteção das linhas de transmissão	16
2.1.1. Proteção de retaguarda.....	17
2.2 Relés de proteção	18
2.2.1. Classificação dos relés de proteção.....	18
2.2.1.1 Relés eletromecânicos	19
2.2.1.2 Relés estáticos ou eletrônicos	20
2.2.1.3 Relés digitais.....	21
2.2.2 Proteções direcionais.....	22
2.2.2.1. Atuação instantânea	23
2.2.2.2. Atuação temporizada.....	25
2.3 Conexões dos Relés Direcionais	27
2.3.1 Princípio de funcionamento do Relé de Sobrecorrente Direcional Eletromecânico.....	28
3 SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO	32
3.1 Importâncias das simulações no Sistema Elétrico de Potência	32
3.2 Deck de curto-circuito da ONS	32
3.2.1 Software ATP	34
4 METODOLOGIA E FILOSOFIAS DE AJUSTES	38
4.1 Faltas aplicada no sistema elétrico	39
4.2 Leituras dos dados	40
4.3. Extração dos fasores fundamentais	40
4.4 Cálculo dos valores de sequências positiva, negativa e zero	40
4.5. Direcionalidade das faltas aplicadas	42
4.6. Ajustes das unidades direcionais de fase e neutro	44
4.6.1 Unidade instantânea direcional de fase.....	44
4.6.2 Unidade temporizada direcional de fase.....	44
4.6.3. Unidade instantânea direcional de Neutro	45
4.6.4. Unidade temporizada direcional de Neutro	45
5 TESTES E RESULTADOS.....	47

5.1 Resultados da metodologia	47
5.1.1 Testes para a direcionalidade do relé	47
5.1.2 Ajustes dos elementos direcionais de sobrecorrente de fase	50
5.1.3 Ajustes dos elementos direcionais de sobrecorrente de neutro	54
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
6.1 Estudos futuros	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é um conjunto de equipamentos e circuitos que operam de forma coordenada e interligada com objetivo de obter a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica de maneira segura e contínua aos consumidores. Contudo, neste sistema, as linhas de transmissão (LTs), são os elementos mais afetados devido suas exposições ao ambiente e, com isso, podem sofrer várias contingências prejudiciais ao sistema de transmissão de energia, originadas das mais variadas formas, como, por exemplo: descargas atmosféricas, desastres naturais, vandalismo, problemas físicos ou mecânicos, queimadas, que podem danificar equipamentos a ela conectados e (ou) interromper o fornecimento de energia aos consumidores. Segundo Costa (2007), tais contingências podem prejudicar a todos os sistemas que estejam interligados, sendo necessário o isolamento da parte afetada, com o objetivo de minimizar seus efeitos danosos e manter a maior parte possível dos sistemas em funcionamento.

Afim de entender estas contingências, as simulações realizadas em um SEP são de extrema importância, visto que através destas, levando em consideração características e parâmetros dos elementos deste sistema, como geradores, linhas de transmissão, motores e outros equipamentos que compõem o sistema, podemos entender o efeito de uma contingência nos elementos deste sistema. Devido à complexidade de operação do SEP, equipamentos envolvidos de alto custo e preocupação com a prevenção de falhas ocasionadas por fatores já mencionados, as simulações em SEP garantem a validação de estudos sistêmicos a serem aplicados em campo.

Com a finalidade de detectar faltas (situações indesejáveis no SEP) e isolar a área defeituosa, surgiram os dispositivos de proteção. O princípio de operação desses dispositivos de proteção é garantir uma avaliação correta do problema, detectando uma falta e iniciando procedimentos para retirar de operação o trecho com defeito o mais rápido possível. Esta área retirada de operação e isolada recebe o nome de zona de proteção, sendo está configurada nos relés de proteção, de acordo com a função de proteção parametrizada.

Na Tabela 1, tem-se a porcentagem de falhas originadas no SEP, bem como suas causas.

Tabela 1: Percentagem de causas de falhas ocorridas no SEP

Causas	Percentagem %
Fenômenos naturais	48
Falhas em materiais e equipamentos	12
Falhas humanas	9
Falhas diversas	9
Falhas operacionais	8
Falhas na proteção e medição	4
Objetos estranhos na rede	4
Condições ambientais	6

Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, MAMED (2011, p. 4).

Na tabela 2, encontra-se a porcentagem de falhas nos equipamentos que compõem o sistema elétrico.

Tabela 2: Percentagem de falhas ocorridas no SEP

Causas	Percentagem %
Linhas de transmissão	68
Rede de distribuição	10
Barramento de subestação	7
Transformador de potência	6
Geradores	1
Próprio sistema	4
Consumidor	4

Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, MAMED (2011, p. 4).

Como visto na tabela 2, as linhas de transmissão de energia são as mais susceptíveis a falhas no sistema elétrico, sendo que o principal dispositivo de proteção nessas linhas são os relés. Estes são responsáveis por detectar faltas, analisando os sinais de tensão e corrente recebidos dos transformadores de corrente (TCs) e transformadores de tensão (TPs). Segundo Coury (2007), os relés devem propiciar

determinadas características funcionais, essenciais a um sistema de proteção, que podem ser sumarizadas como:

- **Sensibilidade:** diz respeito à capacidade do sistema de proteção em responder às anormalidades nas condições de operação, e aos curtos-circuitos para os quais foi projetado.
- **Seletividade:** propriedade do sistema de proteção em reconhecer e selecionar entre aquelas condições para as quais uma imediata operação é requerida, e aquelas para as quais nenhuma operação ou retardo de atuação é exigido. Esta propriedade define um índice de segurança dos relés, o qual garante que estes não irão operar para faltas para os quais não foram projetados.
- **Velocidade de atuação:** está é, com certeza, uma característica desejável e esperada para se remover o mais rápido possível uma situação de falta. Todavia, o relé deve tomar a sua decisão baseado nas formas de ondas de tensões e correntes, as quais são fortemente distorcidas devido os fenômenos transitórios que seguem da ocorrência de uma falta.
- **Confiabilidade:** define-se confiabilidade como a propriedade de um componente, de um equipamento ou de um sistema em satisfazer a função prevista, sob dadas circunstâncias. Do ponto de vista da engenharia, a confiabilidade dos relés tem dois atributos: pode ser confiável e seguro. O relé será confiável se operar somente em condições para as quais foi projetado e, seguro, se o mesmo não operar para qualquer outra situação que por ventura venha a ocorrer sobre o sistema.

De acordo com ONS Submódulo 20.1 (2016 ,p.15) confiabilidade é:

Probabilidade de um sistema ou componente realizar suas funções previstas de forma contínua, adequada e segura, por um período de tempo preestabelecido, sob condições operativas predefinidas.

Neste presente trabalho utilizaremos a proteção direcional de sobrecorrente em LTs. As funções direcionais de sobrecorrente, de fase e de neutro, são utilizadas para proteção de linhas de transmissão e subtransmissão, geralmente como proteção de retaguarda.

Os relés direcionais, representados pelo código ANSI 67, distinguem o sentido da corrente através da análise de ângulo entre fasores. Para isso, usa-se o ângulo de fase entre a corrente de falta e alguma referência, como uma tensão. O relé então consegue identificar qual a defasagem entre a tensão e a corrente, estabelecendo qual é o sentido positivo da corrente de acordo com a tensão tomada como referência (ANDERSON, 1999; PHADKE, THORP, 1990).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Implementar com a utilização dos softwares ATPDraw e Matlab, um algoritmo responsável por simular o desempenho de uma proteção de retaguarda utilizando proteção direcional de sobrecorrente.

1.1.2 Objetivos específicos

- Compreender o conceito e o funcionamento de uma proteção direcional de sobrecorrente;
- Implementar um algoritmo de proteção para a detectar a direcionalidade de faltas no sistema elétrico de potência;
- Simular faltas no sistema elétrico modelado para observar a efetividade do algoritmo;
- Ajustes das unidades direcionais de fase e neutro, instantâneas e temporizadas;
- Plotagem gráfica das faltas na curva normal inversa através dos ajustes realizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão desdobrados conceitos e diretrizes para o entendimento do trabalho.

2.1. Proteção das linhas de transmissão

A filosofia de proteção de uma linha de transmissão é baseada em suas características construtivas como tipo de estrutura, isolamento, utilização de cabo guarda, bitola e comprimento de cabos condutores, local de instalação com estudos de vento, solo, vegetação, descargas atmosféricas, meios operativos e relés de proteção nas subestações lado fonte e lado carga. (ARTICO, Marcelo; BIANCO, Bráulio Augusto; FERRARO, Alessandro Guliano, 2013).

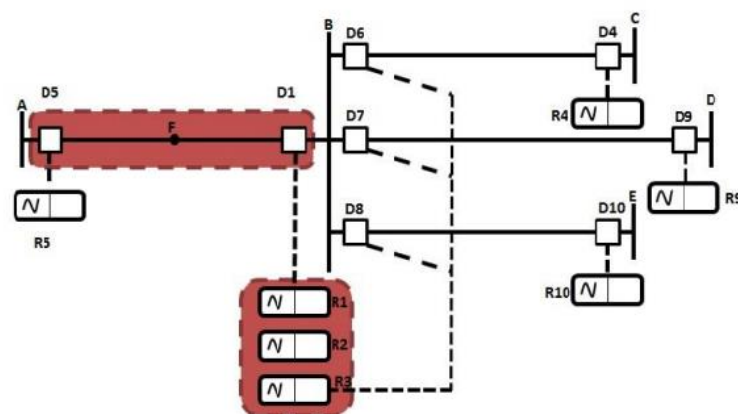
As linhas de transmissão são os elementos mais afetados no sistema elétrico, pois além de serem o componente mais extenso do SEP, estão expostas ao meio ambiente, e com isso, ela está sujeita a uma probabilidade maior de descarga atmosférica, vendavais, queimadas, ato de vandalismo, entre outros. Neste contexto, há a necessidade de elementos associados as linhas de transmissão que tem como função resguardar a integridade física e manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Cabo-guarda, para-raios, disjuntores e proteções de relés primárias (principal) e secundárias (retaguarda), são alguns dispositivos utilizados para manter a seletividade, confiabilidade e segurança para o sistema.

Efetuando uma proteção direcional de sobrecorrente de fase e neutro, a partir dos relés de proteção esse trabalho de conclusão de curso atuará como retaguarda no sistema estudado. Com isso, além dos relés de proteção, outros equipamentos e filosofias de proteção devem ser levados em consideração afim de efetuar uma proteção adequada e confiável as linhas de transmissão de um sistema elétrico de potência.

2.1.1. Proteção de retaguarda

Para exemplificar a atuação de uma proteção de retaguarda, a Figura 1 apresenta uma situação de falta aplicada entre as barras A e B. As proteções primárias correspondentes estão associadas aos relés R1 e R5, devendo ser os primeiros a atuar para uma falta no ponto F. Porém, se o relé R1 não atuar, os relés R2 e R3 irão atuar como relés de proteção de retaguarda local, tendo como ação inicial o acionamento do disjuntor D1. Caso esses relés (R2 e R3) também não atuem, R9, R10 e R4, constituirão uma proteção de retaguarda remota para a proteção primária R1 (Costa, 2015).

Figura 1: Proteção de retaguarda



Fonte: COSTA(2015)

Segundo Costa (2015), para as linhas de transmissão, é usual empregar-se um esquema de proteção que compreende a proteção primária e a proteção de retaguarda. A proteção primária é a principal, tendo uma atuação instantânea. É esperado que, em uma situação de falta, a proteção primária atue o mais rápido possível. Se porventura esta não atuar, a proteção de retaguarda, que é projetada com um atraso de tempo de atuação em relação à proteção primária, deverá atuar, fazendo assim a proteção do elemento sob falta. Este atraso permite uma coordenação entre as mesmas, dando prioridade para a atuação da proteção primária, a qual está mais próxima ao defeito.

Através do entendimento de proteção primária e secundária, onde são instalados e sua importância para o SEP, a seguir, será apresentado e detalhado o princípio de funcionamento de alguns tipos de relés de proteção bem como suas tecnologias e aplicações.

2.2 Relés de proteção

2.2.1. Classificação dos relés de proteção

Segundo Mamede 2011, a maioria dos relés utilizados no SEP podem ser classificados como:

- **Relés de magnitude:** São relés que atuam de acordo com a magnitude da grandeza a ser medida. A sua atuação é feita quando o valor da grandeza medida está fora de uma faixa acima ou abaixo de um valor pré-determinado.
- **Relés diferenciais:** A proteção diferencial é fundamentada na comparação entre as correntes elétricas que circulam entre os dois terminais de um equipamento ou sistema que se quer proteger. Caso haja diferença de módulo entre essas correntes, o relé envia um sinal de atuação para o disjuntor, desligando o sistema.
- **Relés direcionais:** Esse tipo de proteção atua em apenas um sentido do fluxo de corrente e tem por finalidade reconhecer em que sentido esse fluxo está trafegando. Caso ocorra uma falta que esteja à frente do relé, o fluxo de corrente será positivo, sendo assim, o relé envia um sinal de disparo para o disjuntor isolando uma área determinada denominada de zona de proteção.
- **Relés de distância:** É um relé capaz de medir a distância do ponto de falta da LT até o local de sua instalação. Quando ocorre a falta, o relé realiza a medição da tensão e divide pela sua corrente no momento da falta para a obtenção da impedância vista pelo relé, desde a posição na qual ele está instalado até o ponto da falta. Com isso, é possível obter a distância do ponto de falta.

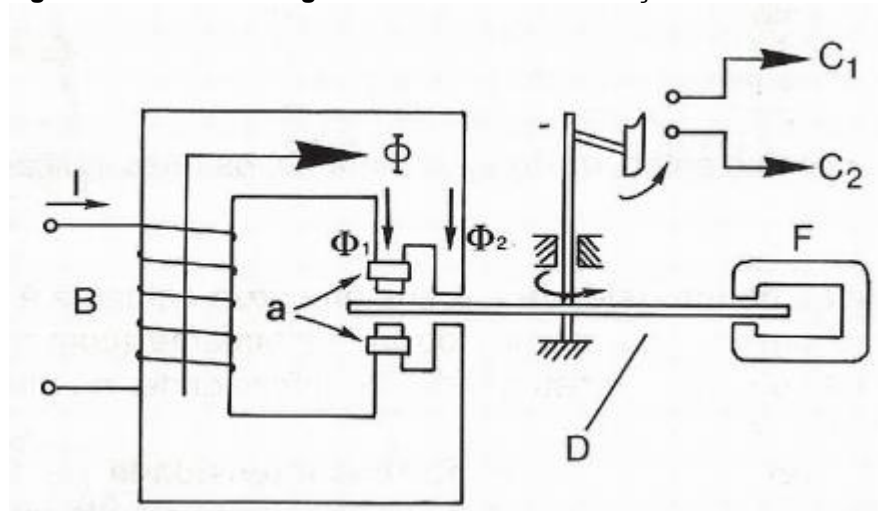
Segundo (MAMEDE, 2011, pag. 97) esses quatro tipos de relés podem ser construídos com três tecnologias diferentes, são elas: relés eletromecânicos, relés estáticos ou eletrônicos e relés digitais.

2.2.1.1 Relés eletromecânicos

Os relés eletromecânicos são os relés tradicionais, os pioneiros da proteção. Elaborados, projetados e construídos com predominância nos movimentos mecânicos provenientes dos acoplamentos elétricos e magnéticos (KINDERMANN, 2005).

A Figura 2, apresenta um relé eletromagnético com disco de indução.

Figura 2: Relé eletromagnético com disco de indução



Fonte: Página pessoal José Matias

Atualmente os relés de indução caíram em desuso devido ao avanço dos relés estáticos e digitais.

2.2.1.2 Relés estáticos ou eletrônicos

Estes relés, diferente dos de indução, não possuem movimento mecânico, sendo, todo seu comando de proteção e operações feito eletronicamente.

A Figura 3, ilustra um exemplo de relé estático, onde são utilizados transistores e diodos, juntos com resistores, capacitores e indutores, etc.

Figura 3 – Relés estáticos



**Fonte: Proteção e Automação de Redes: Conceito e Aplicação.
RUSH, (2011, P. 100).**

Inicialmente os relés estáticos causaram muitos problemas em relação à atuação indevida, por serem muito sensíveis a qualquer variação seja de tensão ou corrente, sendo que muitas vezes o relé interpretava essa variação como uma falta e logo em seguida atuava.

2.2.1.3 Relés digitais

Efetua a proteção baseada em técnicas de microprocessadores. Mantêm os mesmos princípios das funções de proteção e guardam os mesmos requisitos básicos aplicados aos relés eletromecânicos ou de indução e aos relés estáticos ou eletrônicos. No entanto, os relés digitais oferecem, além das funções de seus antecessores, novas funções aos seus usuários adicionando maior velocidade, melhor sensibilidade, interfaceamento amigável, acesso remoto, armazenamento de informações e entre outros. (MAMEDE, 2013). Na Figura 4, tem-se um exemplo de um relé digital para proteção de distância.

Figura 4 – Relés digitais



Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories (SEL)

Como visto nessa seção, existem diferentes classificações e tecnologias relacionadas aos relés de proteção. O presente trabalho será focado nos relés de magnitude, mais especificamente nos relés de sobrecorrente, que por sua vez podem ser divididos em direcionais e não-direcionais.

Este estudo enfatizará o funcionamento e aplicação dos relés direcionais de sobrecorrente em linha de transmissão de um sistema elétrico de potência.

2.2.2 Proteções direcionais

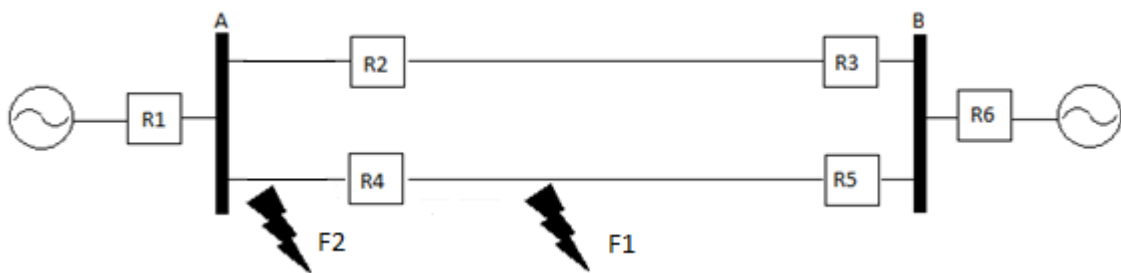
A proteção direcional é realizada para detectar faltas em um determinado sentido previamente estabelecido. Segundo (RUSH, 2011), caso a corrente de falta possa fluir em ambas as direções em relação a posição do relé, pode ser necessário fazer com que a resposta do relé seja direcional.

Portanto, além das funções de sobrecorrente 50 e 51, definidas pela *American National Standards Institute* (ANSI), a proteção direcional 67 precisa ser capaz de detectar o sentido da corrente de falta. Comumente, isto é feito pela comparação entre o ângulo da corrente de falta e alguma referência de corrente ou tensão.

Esse tipo de relé, como o próprio nome sugere, é constituído pela combinação das unidades direcional e de sobrecorrente. Para a proteção de sistemas malhados, o controle direcional é altamente desejável, já que a unidade de sobrecorrente, independente da magnitude de falta, não é capaz de operar, a menos que sua operação seja habilitada pela unidade direcional (MASON, 1956)

A Figura 5 ilustra um sistema elétrico malhado com duas faltas aplicadas no trecho.

Figura 5 – Sistema elétrico malhado



Fonte: Adaptada (NEGRÃO, Danilo, 2015)

Em um SEP, quanto mais próximo do relé de proteção for a ocorrência da falta, maior a magnitude da corrente de curto-circuito. Logo, todos os relés da Figura 5 podem ser sensibilizados quando ocorrer uma falta no sistema, porém com intensidades diferentes.

Com o objetivo de manter o sistema confiável e seletivo os relés, R2, R3, R4 e R5 são habilitados com a unidade direcional. Portanto, ocorrendo uma falta em F1 no trecho exemplificado, apesar de todos os relés sensibilizarem, apenas R4 e R5 enviarão um sinal para a abertura de seus respectivos disjuntores, desenergizando somente o trecho defeituoso. Caso ocorresse uma falta em F2, precisaríamos utilizar outra filosofia de proteção afim de proteger o sistema pois R4 não atuaria para essa falta reversa a ele, por estar ajustado com uma unidade direcional.

Para detecção e direcionalidade da falta, além de o ângulo da corrente de falta, precisamos de um ângulo referência para comparação. Neste trabalho utilizaremos o ângulo de tensão para realizar a detecção do sentido da falta.

A unidade direcional de sobrecorrente possui três unidades de atuação, atuação instantânea, atuação a tempo definido e atuação temporizada, e essas atuações serão descritas a seguir.

2.2.2.1. Atuação instantânea

Com um princípio básico e eficiente de proteção, o relé de sobrecorrente, como o próprio nome define, é um dispositivo que realiza a proteção de um determinado circuito do SEP através da magnitude da corrente que passa através de seu interior. Esse relé é muito utilizado devido a sua economia quando comparado com outros relés, porém, necessita de reajustes quando as configurações do sistema são alteradas.

Tendo em vista um sistema radial, ou seja, um sistema com uma fonte apenas em um sentido, podemos afirmar que, se a corrente mínima de falta do relé é maior que a corrente máxima de carga, pode-se determinar o princípio de funcionamento do relé de sobrecorrente onde:

$$|If| \geq Ip \quad (1)$$

Onde: If : Corrente de falta;

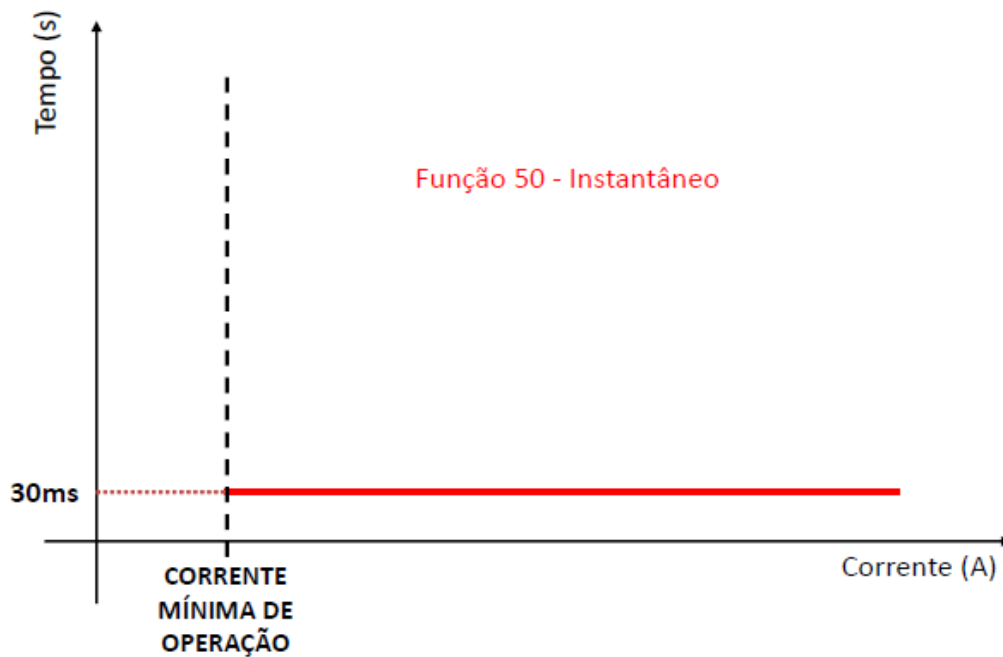
Ip : Corrente de ajuste do relé, também conhecida como corrente de *pick up*.

Quando satisfeita a condição, o relé atuará imediatamente efetuando a abertura do disjuntor e isolando a zona de proteção onde ocorreu a falta. Caso contrário, o relé não atuará pois não existirá corrente de falta.

$$|I_f| < I_p \quad (2)$$

A Figura 6 ilustra a curva de atuação de uma unidade instantânea com um retardo de tempo intencional muito pequeno.

Figura 6: Curva de atuação de uma unidade instantânea



Fonte: SOUZA, 2018.

A Figura 6 também pode ser considerada uma curva de atuação a tempo definido pois através de uma determinada corrente o relé atua com um tempo pré-determinado.

2.2.2.2. Atuação temporizada

Conhecida também como atuação de tempo inverso, o relé pode ser ajustado para operar com diferentes tempos de atuação. Dessa forma, o mesmo funciona como um relé temporizado, onde após a ocorrência da falta, o dispositivo faz uma contagem de tempo estabelecida no ajuste e, em seguida, isola a área defeituosa.

Para esta unidade, o tempo de atuação do relé é inversamente proporcional a corrente, ou seja, quanto maior a corrente, menor o tempo de atuação do relé. Esta característica é desejada pois favorece a seletividade do sistema.

A atuação de tempo inverso pode ser descrita por curvas padronizadas através de equações bem definidas, ou ainda através de curvas não padronizadas que variam por fabricante. (NEGRAO, 2015).

É possível escolher um tipo de curva dentre muitos normalizados pela IEC e IEEE/ANSI aplicando a fórmula para a determinação do tempo de atuação.

$$t = TMS \left(\frac{K}{\frac{I}{I_s}^\alpha - 1} \right) + L \quad (3)$$

Onde:

TMS: Múltiplo de tempo;

K: Coeficiente (vide tabela 3);

I: Corrente de curto circuito;

I_s : Corrente de ajuste (*Ipickup*);

α : Coeficiente (vide tabela 3);

L: Coeficiente (vide tabela 3).

A Tabela 3 ilustra os valores dos coeficientes segundo as normas IEC e IEEE/ANSI.

Tabela 3: Coeficientes normalizados segundo IEC e IEEE/ANSI

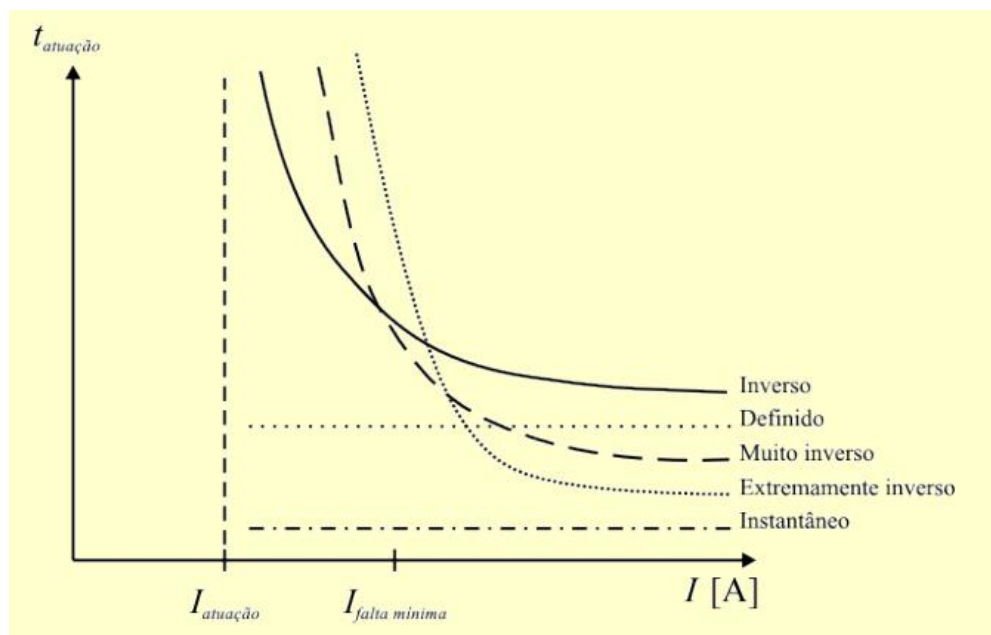
Tipo de curva	Norma	K	A	L
Standard Inverse	IEC	0,14	0,02	0
Very Inverse		13,5	1	0
Extremely Inverse		80	2	0
Moderately Inverse	IEEE/ANSI	0,0515	2	0,18
Very Inverse		19,61	2	0,4910
Extremely Inverse		28,2	2	0,1215

Fonte: SOUZA, 2018.

Mediante a utilização da equação (3) determina-se o tipo de curva mais adequado para um determinado tipo de proteção, levando em consideração a filosofia de proteção adotada pela Empresa.

A Figura 7 ilustra as curvas temporizadas mais utilizadas no sistema de proteção.

Figura 7: Curva de atuação de uma unidade temporizada



Fonte: MANASSERO, 2017.

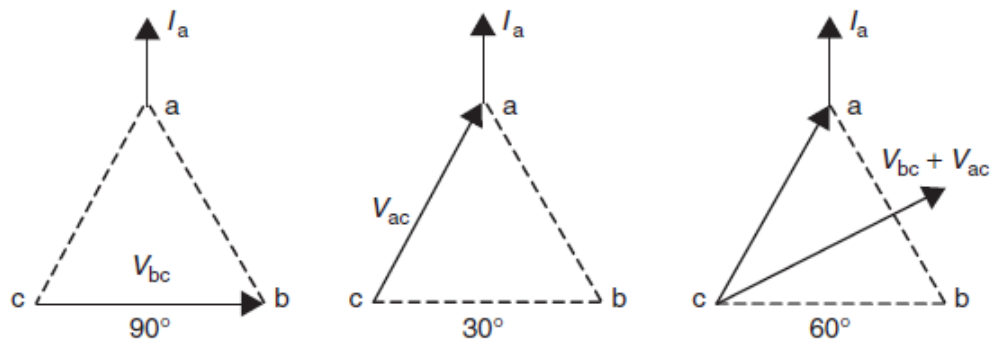
Utilizaremos no presente trabalho a padronização estabelecida pelo IEC. Será estudado, aplicado e mostrado graficamente somente a curva padronizada normal inversa, muito inversa e extremamente inversa

2.3 Conexões dos Relés Direcionais

Para as conexões dos relés direcionais existem várias possibilidades que são combinadas com entrada de tensão e corrente. No caso do relé digital ou numérico, a defasagem é obtida por programação, já no caso dos relés eletromecânicos e estáticos essa defasagem é obtida mediante a conexão adequada dos valores de entrada do relé (RUSH, 2011).

Neste trabalho será adotada a técnica de polarização em quadratura 90° para atuação efetiva e direcionalidade do relé. Porém, outras conexões como 60° e 30° são utilizadas, como também indicadas na Figura 8, a seguir.

Figura 8: Conexões para diferentes conjugados do relé direcional. a) Conexão 90° ; b) Conexão 30° ; c) Conexão 60° .



Fonte: HOROWITZ, PHADKE, 2014.

Segundo (KINDERMAN, 2005) este relé precisa de duas grandezas de atuação. Estas grandezas são:

- Uma grandeza de polarização que pode ser tensão ou corrente, sendo que a tensão é mais usada;
- Uma grandeza de operação, sendo está caracterizada geralmente pela corrente elétrica.

A tabela 4 mostra as tensões que devemos utilizar para cada falta analisada. Isto ocorre pelo fato de que quando utiliza-se da tensão da fase que está ocorrendo a falta, caso a falta ocorrer imediatamente a frente do instrumento de medição (relé), a tensão chegará bem próxima de zero, perdendo assim a referência e conseqüentemente a confiabilidade da proteção.

Tabela 4: Polarização do relé direcional – Conexão 90°

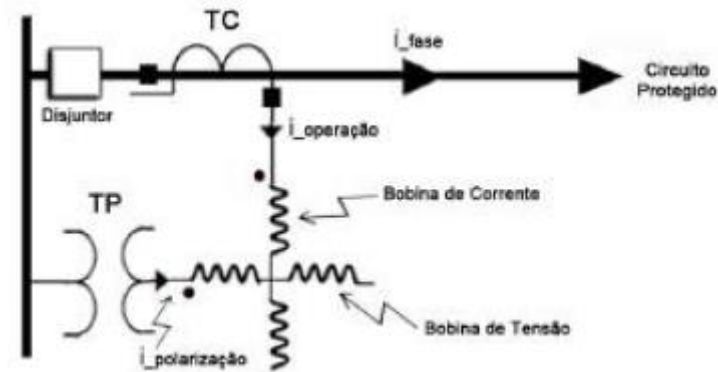
Falta	Corrente de falta	Tensão de polarização
Fase A	IA	V_{BC}
Fase B	IB	V_{CA}
Fase C	IC	V_{AB}

A direcionalidade é dada pela comparação fasorial das posições relativas da corrente de operação e tensão de polarização. Esta defasagem é que produz o sentido da direção do fluxo de energia da corrente de operação ou do curto-circuito (KINDERMAN, 2005).

2.3.1 Princípio de funcionamento do Relé de Sobrecorrente Direcional Eletromecânico

Este relé apresenta dois conjuntos de bobinas em quadratura e que são alimentados pelas grandezas de operação e polarização, corrente e tensão respectivamente. A defasagem entre estas duas bobinas estabelece a direcionalidade da corrente de operação e curto circuito. A figura 9 mostra o diagrama unifilar do relé direcional.

Figura 9: Diagrama Unifilar do Relé Direcional 67



Fonte: ROLIM, 2018.

O princípio de funcionamento dos relés direcionais eletromecânicos está diretamente ligado à defasagem medida entre as duas bobinas (operação e polarização). O acionamento destes é movido pela equação geral mostrada na Equação (4).

$$\tau_{motor\ do\ relé} = K \cdot \varnothing_{Ia} \cdot \varnothing_{polarização} \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (4)$$

Tal que:

K: Constante relacionada à posição da alavanca entre os contatos fixos e móvel do relé;

\varnothing_{Ia} : Fluxo magnético criado pela corrente secundária da fase A (I_A) – Corrente de operação na bobina do relé;

$\varnothing_{polarização}$: Fluxo magnético na bobina de tensão decorrente da corrente de polarização;

α : Ângulo entre os fluxos \varnothing_{Ia} e $\varnothing_{polarização}$.

Ainda de acordo com Kindermann (2005), devido à natureza indutiva das linhas de transmissão e distribuição, quando da ocorrência de um curto-circuito, verifica-se uma grande defasagem entre a corrente I_a e a tensão V_{AN} . O valor desse ângulo é dado por $90^\circ - \Theta$, sendo Θ o ângulo entre a corrente de operação (I_a) e a tensão de polarização (V_{BC}).

Sabe-se que a reta normal é perpendicular a I_a e que o ângulo entre ela e V_{BC} é o de máximo torque do motor do relé (r), este definido por características construtivas do equipamento, logo definido pelo fabricante. Desta forma, tem-se a relação exposta na Equação (5):

$$\alpha = 90^\circ - r + \theta = 90^\circ - (r - \theta) \quad (5)$$

Reescrevendo a Equação 4 e utilizando relações trigonométricas, chegamos a Equação 6, e podemos afirmar que a intensidade do torque do relé depende diretamente da tensão de polarização e da corrente de operação e sua direcionalidade varia de acordo com a defasagem entre estas duas grandezas.

$$\tau_{motor\ do\ relé} = K \cdot I_a \cdot V_{BC} \cdot \cos(r - \theta) \quad (6)$$

O torque efetivo do relé é dado levando em consideração o torque do relé também o de efeito restaurador da mola, como mostrado na Equação (7)

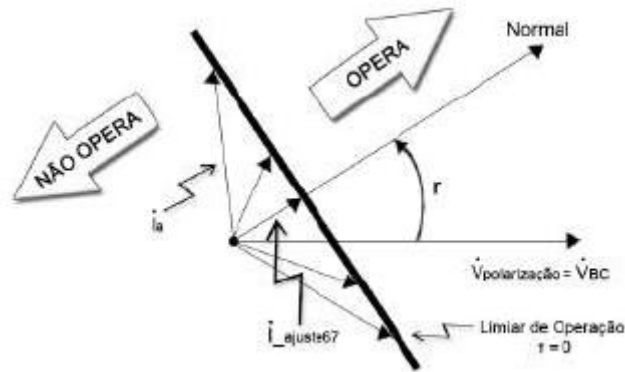
$$\tau_{motor\ do\ relé} = \tau_{motor\ do\ relé} - \tau_{restaurador} \quad (7)$$

Para definir a região de atuação do relé será analisado seu comportamento no limiar da sua operação e sabe-se que neste ponto o torque resultante é nulo.

$$0 = K \cdot I_a \cdot V_{BC} \cdot \cos(r - \theta) - \tau_{restaurador} \quad (8)$$

Por fim é apresentado o diagrama fasorial, figura 10, onde exemplifica a região de operação e limiar de operação do relé direcional eletromecânico.

Figura 10: Diagrama fasorial do limiar de operação do Relé Direcional



Fonte: ROLIM, 2018.

Segundo Sato (2015), os relés de proteção foram os primeiros dispositivos automatizados utilizados no SEP. Os relés eletromecânicos dominaram o mercado até a década de 1970. Com o avanço das tecnologias de microprocessadores, a construção dos relés passou a contar com componentes altamente integrados que propiciaram inclusive a capacidade de detecção de falhas de operação no próximo equipamento, evitando atuações indevidas deste. Atualmente muitos fabricantes deixaram de produzir os relés eletromecânicos e a quantidade dos relés digitais só tende aumentar no SEP.

Neste presente trabalho utilizaremos a tecnologia digital devido as vantagens mencionadas acima. Utilizando um algoritmo desenvolvido no *software* Matlab, e seu princípio de funcionamento e detecção da direcionalidade da falta será detalhado na metodologia nos próximos capítulos.

3 SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

3.1 Importâncias das simulações no Sistema Elétrico de Potência

A utilização de ferramentas computacionais para se modelar um sistema elétrico real tornou-se, ao longo dos anos, uma prática comum e indispensável. As razões para essa postura são inúmeras, dentre as quais pode-se destacar: a possibilidade de se verificar eventuais falhas de um sistema antes que seja implementado, o dimensionamento dos dispositivos de segurança, economia de capital, uma maior compreensão do sistema, maior eficiência de seus equipamentos, dentre outros. Nos sistemas de potência, por se tratar de uma área onde o volume de capital envolvido é bastante significativo, essa prática se difundiu largamente, visto que fazer simulações é uma forma segura e barata de se fazer testes e implementações, auxiliando, inclusive, no dimensionamento dos dispositivos da rede (FONSECA;LEAL,2003).

3.2 Deck de curto-circuito da ONS

Os estudos de curto-circuito são definidos no submódulo 11.3 dos procedimentos de rede. Nesses estudos são apresentados diversos níveis de curto-circuito trifásico e monofásico, bem como suas evoluções e os valores de relação X/R (relação entre parte real e imaginária da impedância) relacionados a barras da rede básica e das Demais Instalações de Transmissão (DIT). Os estudos também contemplam a avaliação da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores da rede básica e das DIT.

O objetivo deste submódulo é atribuir responsabilidades e estabelecer diretrizes e sistemáticas para (ONS, 2009):

- Manutenção da base de dados de curto-circuito e criação dos casos de referência da rede básica e das DIT;
- Identificação dos disjuntores da rede básica e das DIT que apresentem possíveis problemas de superação da capacidade de interrupção simétrica;

- Identificação das barras da rede básica e das DIT nas quais os agentes de operação devem efetuar os estudos detalhados para determinação da suportabilidade dos equipamentos;
- Manutenção dos diagramas de impedâncias da rede básica e das DIT, considerando a configuração anual do sistema e o horizonte do Plano de Ampliações e Reforços da Rede Básica (PAR), para a representação da base de dados e dos casos de referência de curto-circuito pertencentes à rede básica;
- Cálculo dos retores equivalentes para utilização nos estudos de transitórios eletromecânicos e para simulação de curto-circuito monofásico.

Os níveis de curto-circuito e a relação X/R são necessários em diferentes estudos elétricos, notadamente nos estudos de ajuste e coordenação de proteção, bem como na adequação de disjuntores e análises de perturbações. A partir da atualização da base de dados de operação referente a curto-circuito são efetuados os casos de referência, os relatórios e a elaboração dos diagramas de impedância (ONS, 2009).

O referido relatório indica também os valores das impedâncias de barras de sequência positiva e zero. Os diagramas de impedâncias consistem na representação gráfica da base de dados de curto-circuito que é feita a partir dos diagramas unifilares das instalações e inclui os valores das impedâncias de sequência positiva, sequência zero e das impedâncias de acoplamento mútuo de sequência zero entre linhas de transmissão.

Mantém-se, no Âmbito da ONS e dos agentes de operação, diagramas de impedâncias que representam a configuração atual do sistema e o horizonte do PAR. Os valores constantes nesses diagramas compõem a base de dados de curto-circuito da rede básica e das DIT. Tais diagramas são disponibilizados no site da ONS (ONS, 2009).

Foi, então, simulado no software ATPDraw parte do sistema de transmissão na região de 440 kV, sendo utilizado o equivalente de curto-circuito e de fluxo de carga. O sistema foi gentilmente cedido por um agente de transmissão.

3.2.1 Software ATP

O submódulo 18 da ONS trata dos sistemas e modelos computacionais, apresentando um rol de ferramentas computacionais e suas funcionalidades utilizadas para tornar possível a associação de cada ferramenta a uma denominação de referência pela qual essa ferramenta é citada nos demais módulos dos procedimentos de rede. Ou seja, associando determinada ferramenta a sua respectiva função (ONS, 2017).

Segundo Santos (2013), o programa ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, através de um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados.

O programa permite a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, etc. De modo geral, são considerados parâmetros em componentes de fase e em sequência (zero e positiva), dependendo do modelo.

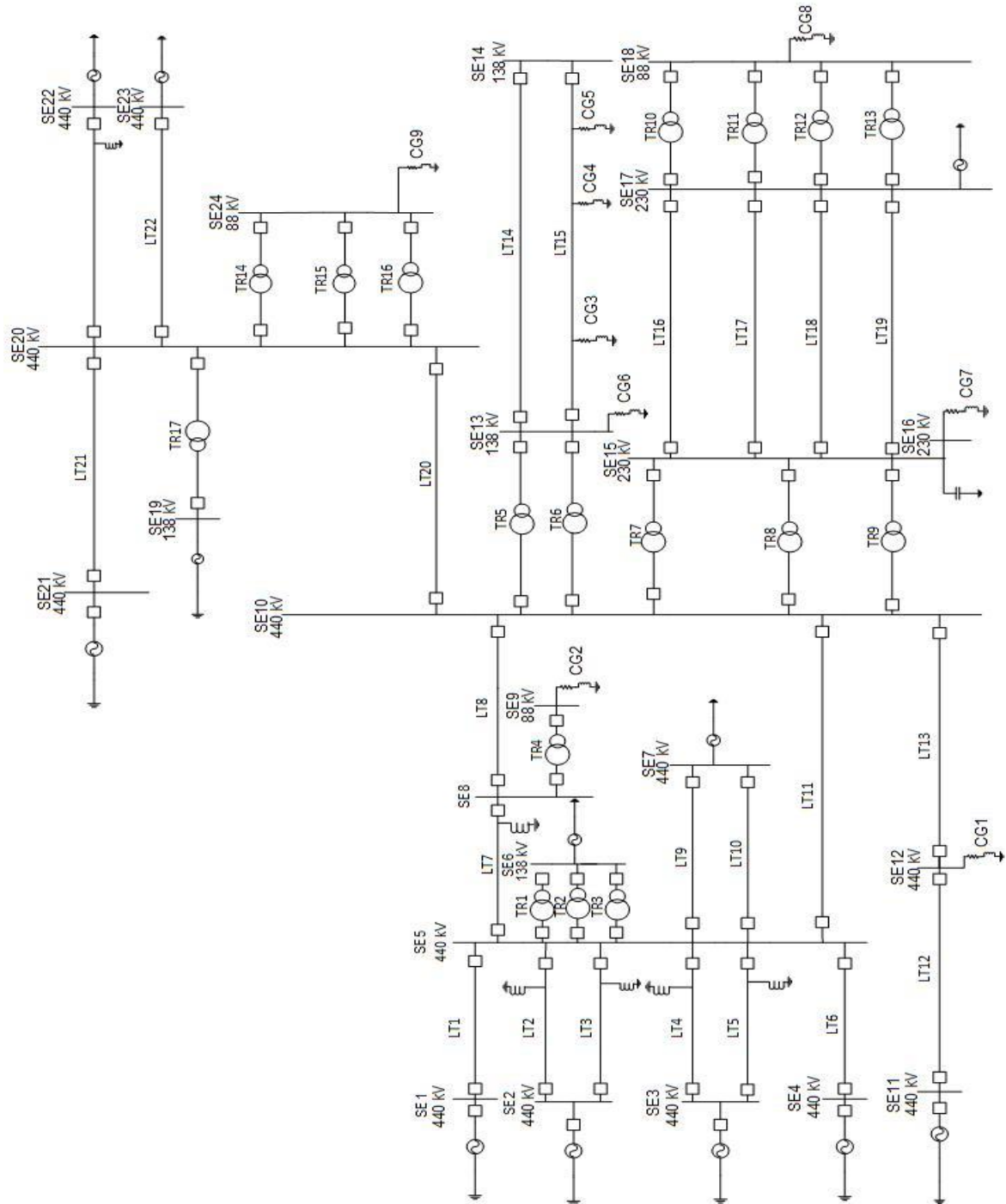
O ATPDraw possibilita a criação dos arquivos de dados com base no circuito simulado, que é construído graficamente com os modelos existentes no programa. Cada componente gráfico permite a inclusão dos parâmetros correspondentes em janelas próprias que ajustam os dados aos formatos de entrada requeridos pelo ATP, facilitando o trabalho do usuário e reduzindo a chance de erro nos dados dos modelos (Santos, 2013).

A resposta da rede elétrica no domínio do tempo é disponível para as tensões de barras e de ramos, e para correntes de ramos, através de uma tabela de valores ou de gráficos produzidos através do programa PlotXY (Santos, 2013).

Esse modelo tem sido usado no planejamento e na operação do sistema elétrico, bem como na fabricação de equipamentos elétricos. Os principais resultados do modelo são as grandezas elétricas no domínio do tempo.

A figura 11 representa o sistema elétrico simulado e estudado.

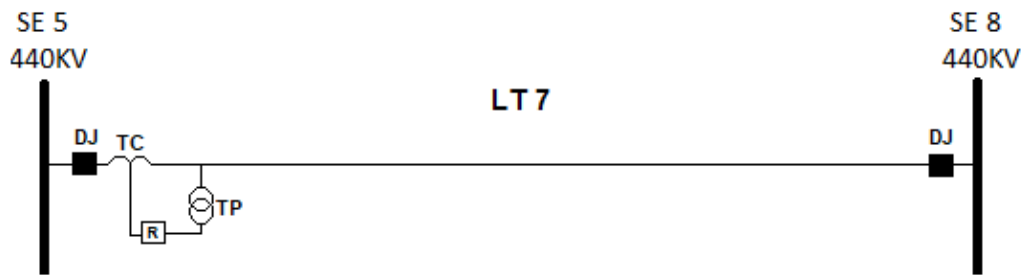
Figura 11: Representação do SEP simulado em ATP



Fonte: SANTOS, 2018

Para o desenvolvimento do trabalho, delimitou-se o uso da LT 7, onde haverá a medição de tensões e correntes para utilização dos dados a aplicação da metodologia. A figura 12 ilustra a área de interesse:

Figura 12: Área de interesse do trabalho



Fonte: Autoria própria.

Tal que:

R: Relé de proteção;

DJ: Disjuntor;

TP: Transformador de potencial;

TC: Transformador de corrente.

As duas barras presentes na LT 7 possui tensão nominal de 440 KV e a linha estudada possui as seguintes características:

Tabela 5: Características da linha de transmissão

	R+(Ω)	R0 (Ω)	L+(mH)	L0 (mH)	C+ (μF)	C0 (μF)
LT7	5,43	73,97	67,73	310,16	1169,62	636,62

Fonte: Autoria própria.

Tal que:

R+: resistência de sequência positiva da linha;

R0: resistência de sequência zero da linha;

L+: indutância de sequência positiva da linha;

L0: indutância de sequência zero da linha;

C+: capacitância de sequência positiva da linha;

C0: capacitância de sequência zero da linha.

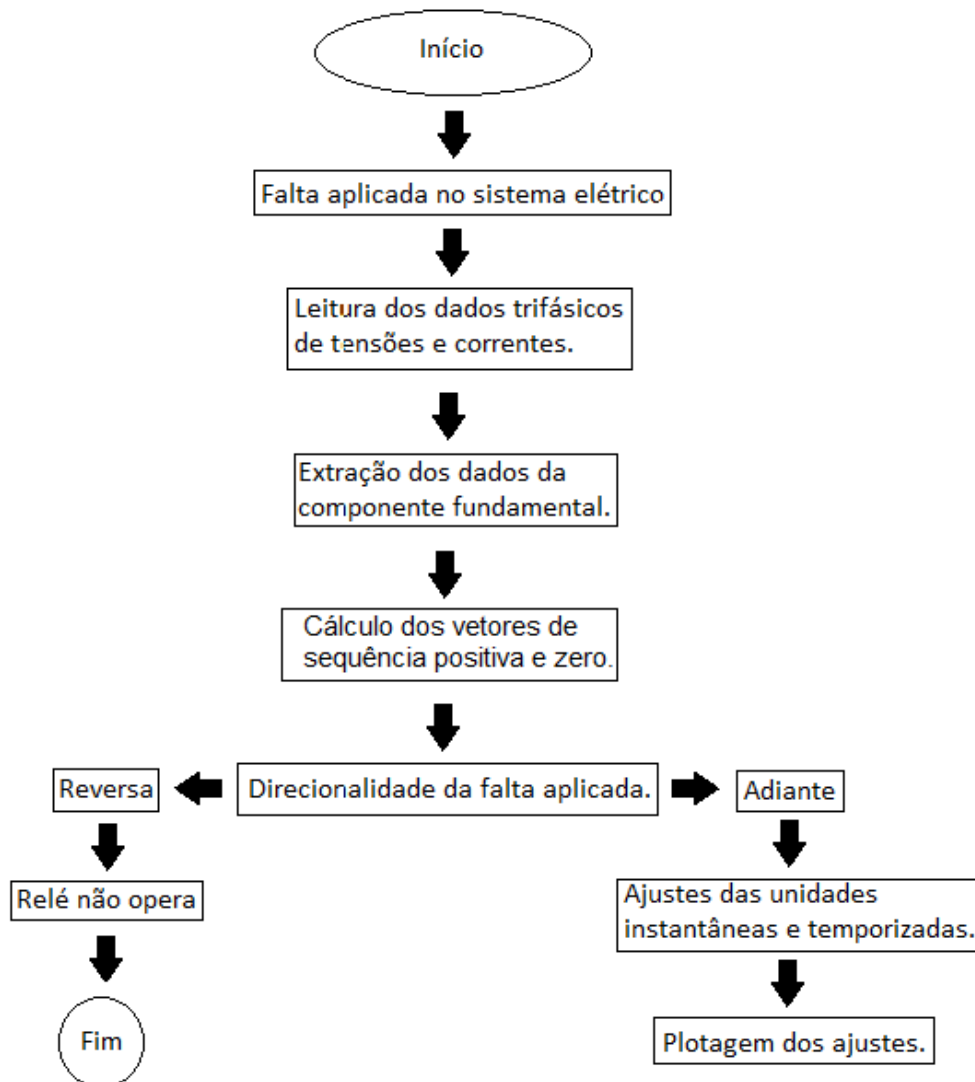
A partir da área de estudo definida serão coletados os dados de tensão e corrente no ponto de instalação do relé, próximo à SE 5, e, cada situação de falta aplicada na LT7, ou nas barras da SE 5 ou SE 8, será utilizada como entrada de dados para que o algoritmo detecte a direcionalidade da falta.

4 METODOLOGIA E FILOSOFIAS DE AJUSTES

Neste trabalho, utilizou-se um algoritmo com a finalidade de desenvolvimento de um sistema de proteção direcional de sobrecorrente aplicado a uma determinada área de um SEP.

A figura 13 apresenta o fluxograma da metodologia adotada para melhor entendimento a respeito do trabalho.

Figura 13: Fluxograma do algoritmo proposto na metodologia

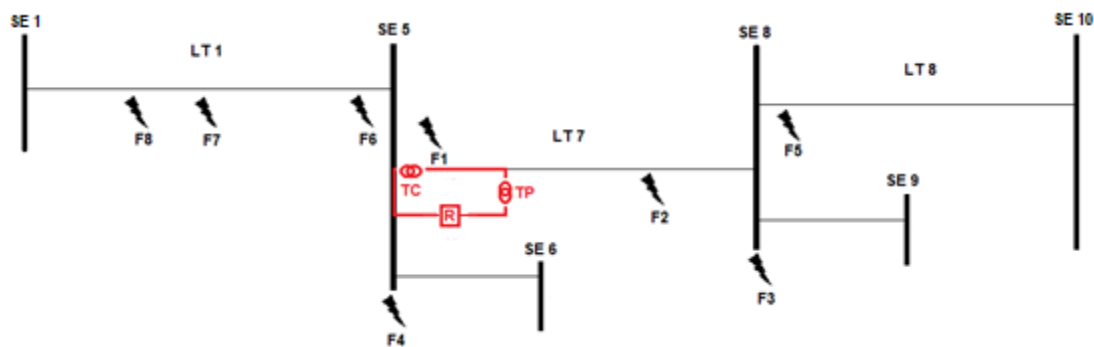


Fonte: Autoria própria

4.1 Falta aplicada no sistema elétrico

Com o SEP proposto e elaborado no *software* ATPDraw (figura 11), a primeira etapa do fluxograma se baseou em aplicar vários tipos de faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas-terra no sistema. Estas faltas, por sua vez, foram aplicadas tanto à frente da área de interesse do trabalho (figura 13), LT 7 e SE 8, quanto no sentido reverso à SE 5, LT 1, conforme mostra a Figura 14 a seguir:

Figura 14: Falta aplicada no sistema elétrico



Fonte: Autoria própria

Tal que:

F1: Falta à 10% da LT 7 (Adiante);

F2: Falta à 70% da LT 7; (Adiante);

F3: Falta na barra SE 8 (Adiante);

F4: Falta na barra SE 5 (Reversa);

F5: Falta à 10% da LT 8; (Adiante);

F6: Falta à 10% da LT 1 (Reversa);

F7: Falta à 50% da LT 1 (Reversa);

F8: Falta à 70% da LT 1 (Reversa).

4.2 Leituras dos dados

A partir das definições dos pontos nos quais serão aplicados os curtos-circuitos, todas as faltas foram geradas. Os sinais de tensão e corrente oriundos das faltas, foram salvos e carregados no *software* MATLAB.

4.3. Extração dos fasores fundamentais

Após os dados coletados, o algoritmo estima os fasores fundamentais das tensões e corrente mediante aplicação da equação (9) da Transformada Discreta de Fourier (TDF) nos sinais de falta, assim, é possível extrair os dados da componente fundamental (60Hz).

$$Fn = \sum_{k=0}^{N-1} fk. e^{-j\frac{2\pi}{N} n.k} \quad (9)$$

Utilizando uma frequência de amostragem $f_s = 960 \text{ Hz}$ e com uma frequência de 60 Hz, o sinal de tempo discreto fk resultante possui período $N=16$ amostras.

Onde:

N = Número de amostras por período;

fk = Amplitude de cada amostra;

Fn = Valores complexos (módulo e fase) das N senoides obtidas com TDF.

4.4 Cálculo dos valores de sequências positiva, negativa e zero

Conforme apresentado por Sato (2015), sendo o sistema elétrico equilibrado, pode-se afirmar que seus fasores de tensão, por exemplo, apresentam mesmo módulo e estão simetricamente defasados entre si com um ângulo de 120° , devido ao desacoplamento entre as fases. O mesmo aplica-se aos fasores de corrente. Desta forma, o conhecimento de uma destas variáveis para uma fase, assegura a determinação de sua correspondente nas outras.

Contudo, quando o sistema é desequilibrado este princípio não é válido. A análise de circuitos elétricos polifásicos desbalanceados é feita com base no Método das Componentes Simétricas desenvolvido por *Charles Le-Geyt Forescue* que diz que: um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados e esta decomposição é única.

Estes sistemas equilibrados são:

- Componente de Sequência Positiva: composto por três fasores de mesmo módulo e defasados de 120° entre si, seguindo a sequência de fases do sistema original;
- Componente de Sequência Negativa: mesma composição da sequência positiva, mas com sequência inversa;
- Componente de Sequência Zero: consiste em três fasores de mesmo módulo e que estão em fase.

Através dos fasores fundamentais estimados pela TDF é possível calcular os vetores de sequência positiva, negativa e zero através da equação (10)

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

Tal que:

V_A , V_B e V_C : fasores trifásicos da tensão desequilibrados;

V_{a0} , V_{a1} e V_{a2} : fasores de sequências zero, positiva e negativa equilibrados;

α : $1 \angle 120^\circ$;

α^2 : $1 \angle 240^\circ$.

O mesmo equacionamento visto em (10) também é aplicado para obter os valores de corrente de sequência positiva, negativa e zero.

4.5. Direcionalidade das faltas aplicadas

Assim, de acordo com o fluxograma da Figura 13, há a necessidade de detectar a direcionalidade da falta aplicada no sistema, sendo esta, descrita conforme (Gonzalez, 2007).

Para faltas que não envolvem o terra, deve-se determinar para cada fase, se a falta está adiante ou atrás do relé.

Para unidade direcional de fase (67) temos:

Adianta = 1

Reversa= 0

Onde adianta e reversa são apresentados com um e zero indicando a direção da falta no código desenvolvido.

Em seguida se faz a comparação de fases das correntes e tensões adequadas. De acordo com GONZALEZ (2007, p.36) para a fase A, deve-se subtrair do ângulo da tensão fase-fase BC ("V_{BC_ang}") o da corrente da fase A ("I_{A_ang}"). Neste momento, é necessário também, somar o ângulo de máximo conjugado do relé. Se a diferença angular for maior que -90° e menor que +90°, a falta está adiante do relé.

```

Diferenca_angular_a = VBC_ang - IA_ang + Ang_1
If (Diferenca_angular_a > -90 && Diferenca_angular_a < 90)
disp( 'FALTA ADIANTE')
else
disp('FALTA REVERSA')

```

Onde:

Ang_1: Ângulo de máximo conjugado (30°).

Para faltas que não envolve o terra, utiliza-se apenas as componentes de sequência positiva.

Para unidade direcional de neutro (67N), de maneira similar, é necessário identificar se a falta está adiante ou atrás do relé

Adianta = 1

Reversa= 0

Em seguida se faz a comparação de fases das correntes e tensões adequadas. No relé direcional de neutro, utilizamos apenas as componentes de sequência zero. Para obter a direcionalidade nesta unidade devemos somar do ângulo da tensão ("V_{0_ang}") o ângulo de 180° e subtrair o ângulo da corrente da fase A ("I_{0_ang}"). Logo em seguida, é necessário somar o ângulo de máximo conjugado do relé ("Ang_1"). Se a diferença angular for maior que -90° e menor que +90°, a falta está adiante do relé.

De acordo com GONZALEZ (2007, p.41)

```
diferenca_angular = (V0_ang + 180) – I0_ang + Ang_1
If (diferenca_angular_a > -90 && diferenca_angular_a < 90)
disp( 'FALTA ADIANTE')
else
disp('FALTA REVERSA')
```

Onde:

Ang_1: Ângulo de máximo conjugado (-90°).

Depois de detectado a direcionalidade da falta aplicada no sistema serão realizados os ajustes da função de sobrecorrente do relé para que ele opere de maneira coordenada, seletiva e confiável.

4.6. Ajustes das unidades direcionais de fase e neutro

4.6.1 Unidade instantânea direcional de fase

O elemento instantâneo deve ser adotado apenas se possível, desde que possua sensibilidade somente para detectar curto circuito trifásico no início da linha e alcançar no máximo 70% da LT, estando acima do carregamento da linha com uma certa margem de segurança. (SOUZA, 2018).

A figura 15, ilustra a atuação de um elemento instantâneo de fase.

Figura 15: Elemento instantâneo de Fase



Fonte: Autoria própria

A corrente de ajuste dessa unidade deverá satisfazer as seguintes condições:

- Ser maior que a corrente de carga máxima;
- Ser maior que a corrente obtida para uma falta trifásica a 70% da LT;
- Ser menor, e com margem, que a menor corrente medida para uma falta trifásica do início da LT (*close in*).

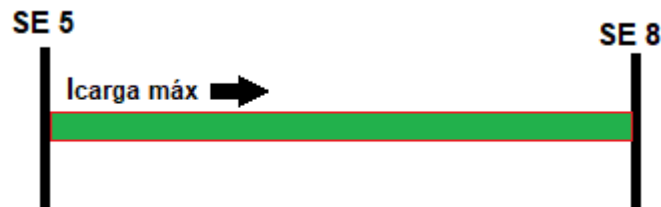
Utilizando-se a característica da curva de atuação da figura 6, busca-se um tempo de atuação da proteção de sobrecorrente instantânea em torno de 0,03 segundos.

4.6.2 Unidade temporizada direcional de fase

O elemento temporizado deve ser ajustado para detectar faltas que ocorrem até o final da LT protegida, tendo em vista o relé instalado no início da linha. Isso ocorre pelo fato de outros relés estarem instalados mais próximos da falta, e, para manter a seletividade do sistema, os relés mais próximos da falta geralmente possui prioridade para atuação.

A figura 15, ilustra a atuação de um elemento temporizado de fase.

Figura 16: Elemento temporizado de Fase



Fonte: Autoria própria

A corrente de ajuste dessa unidade deverá satisfazer as seguintes condições:

- Ser maior que a corrente de carga máxima;
- Ser menor que a menor corrente medida para uma falta trifásica da barra remota.

Utilizando-se uma das características da curva de atuação da figura 8, busca-se um tempo de atuação da proteção de sobrecorrente temporizada em torno de 0,50 segundos, calculado para maior corrente de curto-circuito obtida para faltas na barra remota.

4.6.3. Unidade instantânea direcional de Neutro

O elemento instantâneo de neutro deve ser adotado apenas se possível, desde que possua sensibilidade somente para detectar curto-circuito monofásico no início da linha. (SOUZA, 2018).

A corrente de ajuste nessa unidade deverá satisfazer as seguintes condições:

- Ser maior que a corrente medida para uma falta monofásica a 70% da LT;
- Ser menor e, com margem, que a menor corrente medida para uma falta monofásica do início da LT (*close in*).

4.6.4. Unidade temporizada direcional de Neutro

Para atuar de forma temporizada, este elemento deve ter sensibilidade para detectar um curto-circuito monofásico no final da LT, tendo em vista o relé instalado no início da linha, devendo atuar, quando possível, para faltas com resistência de falta.

Utilizando-se uma das características da curva de atuação da figura 8, buscase um tempo de atuação da proteção de sobrecorrente temporizada em torno de 0,50 segundos, calculado para maior corrente de curto-circuito obtida para faltas monofásicas na barra remota.

A corrente de ajuste nessa unidade deverá satisfazer as seguintes condições:

- Ser menor e, que a menor corrente de falta monofásica da barra remota;
- Ser menor que a corrente de falta monofásica da barra remota com resistência de falta (RF);
- Estar entre 10% e 30% da corrente nominal do TC.

Com isso, depois de apresentadas a metodologia do presente trabalho, faltas aplicadas no sistema de estudo e filosofias de ajustes das unidades direcionais de fase e neutro, os testes e resultados obtidos serão apresentados no próximo capítulo.

Para as faltas trifásicas aplicadas obteve-se um percentual de 92% de acertos, validando assim, o algoritmo desenvolvido para o presente trabalho.

A tabela 7 apresenta a direcionalidade, adiante ou reversa, de cada falta bifásica aplicada no sistema de estudo. Os quadros em vermelho indicam direcionalidade oposta esperada.

Tabela 7: Tabela de acertos da direcionalidade do algoritmo para faltas bifásicas

Localização da falta	IA		IB	
	0°	90°	0°	90°
LT 7 (frente)	-	-	-	-
10%	Adiante	Adiante	Adiante	Adiante
50%	Adiante	Adiante	Adiante	Adiante
70%	Adiante	Adiante	Adiante	Adiante
BARRA SE 8 440 KV (frente)	Adiante	Adiante	Adiante	Adiante
BARRA SE 9 88 KV (frente)	Adiante	Adiante	Reversa	Reversa
LT 8 (frente)	-	-	-	-
10%	Adiante	Adiante	Adiante	Adiante
50%	Adiante	Adiante	Adiante	Adiante
70%	Adiante	Adiante	Adiante	Adiante
BARRA SE 5 440 KV (Reversa)	Reversa	Reversa	Reversa	Reversa
BARRA SE 6 138 KV (Reversa)	Adiante	Adiante	Reversa	Reversa
LT 1 (Reversa)	-	-	-	-
10%	Reversa	Reversa	Reversa	Reversa
50%	Reversa	Reversa	Reversa	Reversa
70%	Reversa	Reversa	Reversa	Reversa

Para as faltas bifásicas aplicadas obteve-se um percentual de 92% de acertos, validando assim, o algoritmo desenvolvido para o presente trabalho.

A tabela 8 apresenta a direcionalidade, adiante ou reversa, de cada falta bifásica com terra aplicada no sistema de estudo. Os quadros em vermelho indicam direcionalidade oposta esperada.

Tabela 8: Tabela de acertos da direcionalidade do algoritmo para faltas bifásicas com terra

Localização da falta	3*10	
	0°	90°
LT 7 (frente)	-	-
10%	Adiante	Adiante
50%	Adiante	Adiante
70%	Adiante	Adiante
BARRA SE 8 440 KV (frente)	Adiante	Adiante
BARRA SE 9 88 KV (frente)	Reversa	Reversa
LT 8 (frente)	-	-
10%	Adiante	Adiante
50%	Adiante	Adiante
70%	Adiante	Adiante
BARRA SE 5 440 KV (Reversa)	Reversa	Reversa
BARRA SE 6 138 KV (Reversa)	Reversa	Reversa
LT 1 (Reversa)	-	-
10%	Reversa	Reversa
50%	Reversa	Reversa
70%	Reversa	Reversa

Para as faltas bifásicas com terra aplicadas obteve-se um percentual de 92% de acertos, validando assim, o algoritmo desenvolvido para o presente trabalho. Assim, 8% dos erros estão contidos nos valores de ângulo para detectar a direcionalidade da falta.

A tabela 9 apresenta a direcionalidade, adiante ou reversa, de cada falta monofásica aplicada no sistema de estudo. Os quadros em vermelho indicam direcionalidade oposta esperada.

Tabela 9: Tabela de acertos da direcionalidade do algoritmo para faltas monofásicas

Localização da falta	3*10	
	0°	90°
LT 7 (frente)	-	-
10%	Adiante	Adiante
50%	Adiante	Adiante
70%	Adiante	Adiante
BARRA SE 8 440 KV (frente)	Adiante	Adiante
BARRA SE 9 88 KV (frente)	Reversa	Reversa
LT 8 (frente)	-	-
10%	Adiante	Adiante
50%	Adiante	Adiante
70%	Adiante	Adiante
BARRA SE 5 440 KV (Reversa)	Reversa	Reversa
BARRA SE 6 138 KV (Reversa)	Reversa	Reversa
LT 1 (Reversa)	-	-
10%	Reversa	Reversa
50%	Reversa	Reversa
70%	Reversa	Reversa

Para as faltas monofásicas aplicadas obteve-se um percentual de 92% de acertos, validando assim, o algoritmo desenvolvido para o presente trabalho.

5.1.2 Ajustes dos elementos direcionais de sobrecorrente de fase

A Tabela 10 mostra os valores de correntes encontrados para realizar o ajuste do elemento instantâneo e temporizado para as faltas trifásicas, para o relé instalado no início da LT 7, na SE 5, conforme visto na figura 14.

Tabela 10: Correntes medidas pelo relé para faltas trifásicas

Curto – Circuito	IA (A)	IB (A)	IC (A)
10% da LT	19629,665	20629,361	18370,515
70% da LT	5591,426	5936,496	5347,992
Barra na SE	3650,296	3813,742	3493,952
Barra na SE Reverso	2692,778	3060,426	2733,433

A partir dos valores obtidos na tabela 10 e utilizando a metodologia proposta na seção 4.6, para ajustes de elemento instantâneo e temporizado, obtêm-se os valores de ajustes para as faltas trifásicas, conforme desenvolvido abaixo.

As Tabelas 11 e 12 mostram os valores de corrente obtidos no ajuste do elemento instantâneo e temporizado para a falta trifásica.

Tabela 11: Ajuste da unidade instantânea direcional de fase

Correntes de falta	I (A)	Ajuste instantâneo (A)
I carregamento máximo	2000	6200
10% da LT, medida na fase C	18370,515	
70% da LT, medida na fase B	5936,496	

Este ajuste de 6200 A para a unidade instantânea direcional de fase satisfaz os requisitos da metodologia, uma vez que:

- I ajuste > I carregamento máximo (2000A) com margem, ou seja, 310% acima deste carregamento máximo;
- I ajuste < que o menor Icc a 10% da LT (18370,515 A);
- I ajuste > Icc a 70% da LT (5936,496 A).

O mesmo apesar de ser considerado instantâneo possui uma temporização de 0,03 segundos com o objetivo de não atuar indevidamente caso ocorra uma oscilação no sistema.

Tabela 12: Ajuste da unidade temporizada direcional de fase

Correntes de falta	I (A)	Ajuste temporizado (A)
I carregamento máximo	2000	2400
Maior corrente na barra na SE 8, medida na fase B	3813,742	
Menor corrente na barra na SE 8, medida na fase C	3488	

Este ajuste de 2400 A para a unidade temporizada direcional de fase satisfaz os requisitos da metodologia, uma vez que:

- I ajuste > I carregamento máximo (2000A) com margem, ou seja, 120% acima deste carregamento máximo;
- I ajuste < que a menor lcc na barra SE 8 (3488 A).

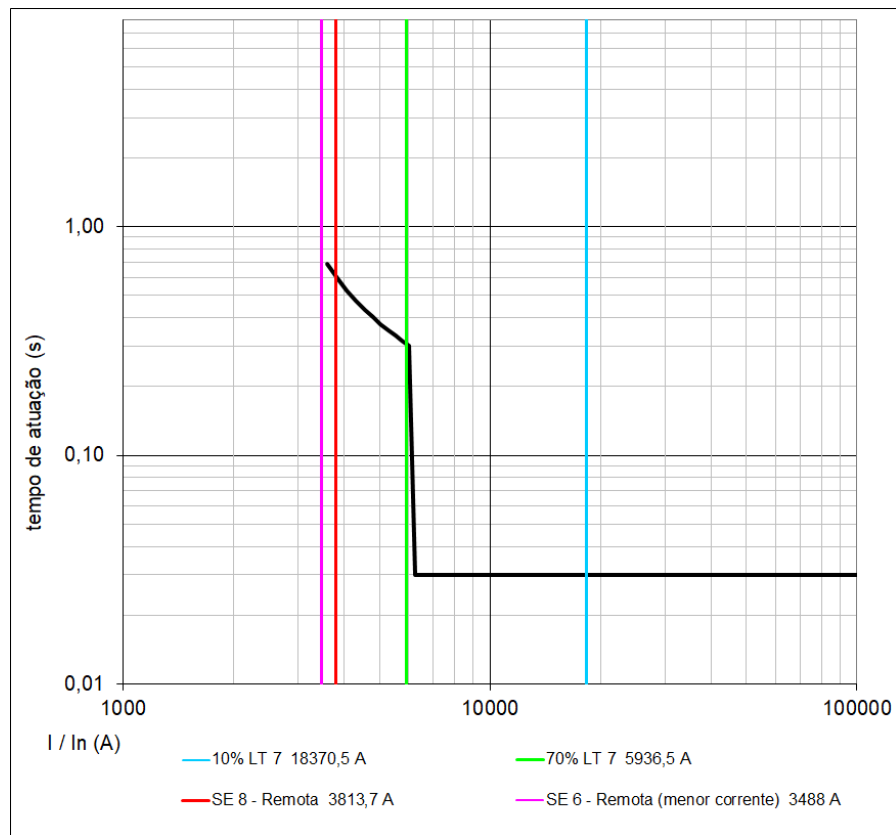
Para essa unidade deve-se eliminar a maior corrente de curto-circuito na barra remota em torno de 0,5 segundos, com isso, adotando a curva normal inversa temos:

$$0,5 = TMS \left(\frac{0,14}{\left(\frac{3813}{2400} \right)^{0,02} - 1} \right) \quad (11)$$

Obtendo assim o valor de 0,033, portanto definimos um TMS=0,04.

Com os ajustes definidos, a figura 17 ilustra os ajustes dos elementos instantâneo e temporizado direcionais de fase, bem como seus respectivos tempos de atuação para 4 situações de faltas.

Figura 17: Gráfico com faltas trifásicas aplicadas



Fonte: Notas de aula. Prof.Dr Silvio

Onde:

Falta 1: Falta à 10% da LT 7;

Falta 2: Falta à 70% da LT 7;

Falta 3: Falta na barra SE 8;

Falta 4: Falta na barra SE 8 (menor corrente).

As faltas aplicadas no gráfico têm como objetivo mostrar a efetividade dos ajustes realizados e ilustrar a posição de cada falta nos elementos instantâneos e temporizados.

Tabela 13: Tempos de atuação para cada falta aplicada

Curto – Circuito	I cc (A)	Tempo (s)
10% da LT	18370,515	Inst (0,03)
70% da LT	5936,496	0,30
Barra na SE 8 – Remota	3813,742	0,60
Barra na SE 8 – Remota (menor corrente)	3488	0,75
Barra na SE 8 – Reverso	3060,426	Sem atuação

Analisando o gráfico plotado e a tabela de tempo de atuação, note-se que a curva adotada (normal inversa) e o critério para realização dos ajustes resultam em uma boa coordenação para a proteção do sistema estudado.

5.1.3 Ajustes dos elementos direcionais de sobrecorrente de neutro

A Tabela 14 mostra os valores de correntes encontrados para realizar o ajuste do elemento instantâneo e temporizado de neutro.

Tabela 14: Correntes monofásicas das faltas utilizadas para realização do ajuste

Curto – Circuito	3I0 (A)
10% da LT	11781,535
70% da LT	3227,231
Barra na SE 8	2653,874
Barra na SE com RF = 100 Ω	913,212
Barra na SE Reverso	1759,960

A partir dos valores obtidos na tabela 14 e utilizando a metodologia proposta na seção 4.6, para ajustes de elemento instantâneo e temporizado de neutro, obtêm-se os valores de ajustes para as faltas monofásicas.

As Tabelas 15 e 16 mostram os valores de corrente obtidos no ajuste do elemento instantâneo e temporizado de neutro para faltas monofásicas.

Tabela 15: Ajustes da unidade instantânea direcional de neutro

Correntes de falta	I (A)	Ajuste instantâneo (A)
10% da LT	11781,535	3400
70% da LT	3227,231	
Barra na SE 8	2653,874	

Este ajuste de 3400 A para a unidade instantânea direcional de fase satisfaz os requisitos da metodologia, uma vez que:

- I ajuste > Icc a 70% da LT (3227,231 A).
- I ajuste < que o menor Icc a 10% da LT (11781,535 A);
- I ajuste > que a maior na Icc na barra SE (2653,874 A).

O mesmo apesar de ser considerado instantâneo possui uma temporização de 0,03 segundos com o objetivo de não atuar indevidamente caso ocorra uma oscilação no sistema.

Tabela 16: Ajustes da unidade temporizada direcional de neutro

Correntes de falta	I (A)	Ajuste temporizado (A)
Barra na SE 8	2693,556	300
Barra na SE com RF=100Ω	913,212	
10% e 30% da corrente nominal do TC	300	

Considerando o TC com relação de 2000/5, este ajuste de 300 A para a unidade temporizada direcional de neutro satisfaz os requisitos da metodologia, uma vez que:

- I ajuste < que a menor Icc na barra SE 8 (2693,556 A);
- I ajuste < que a menor Icc na barra SE 8 com RF = 100Ω (913,212 A);
- I ajuste < entre 10% e 30% da corrente nominal do TC.

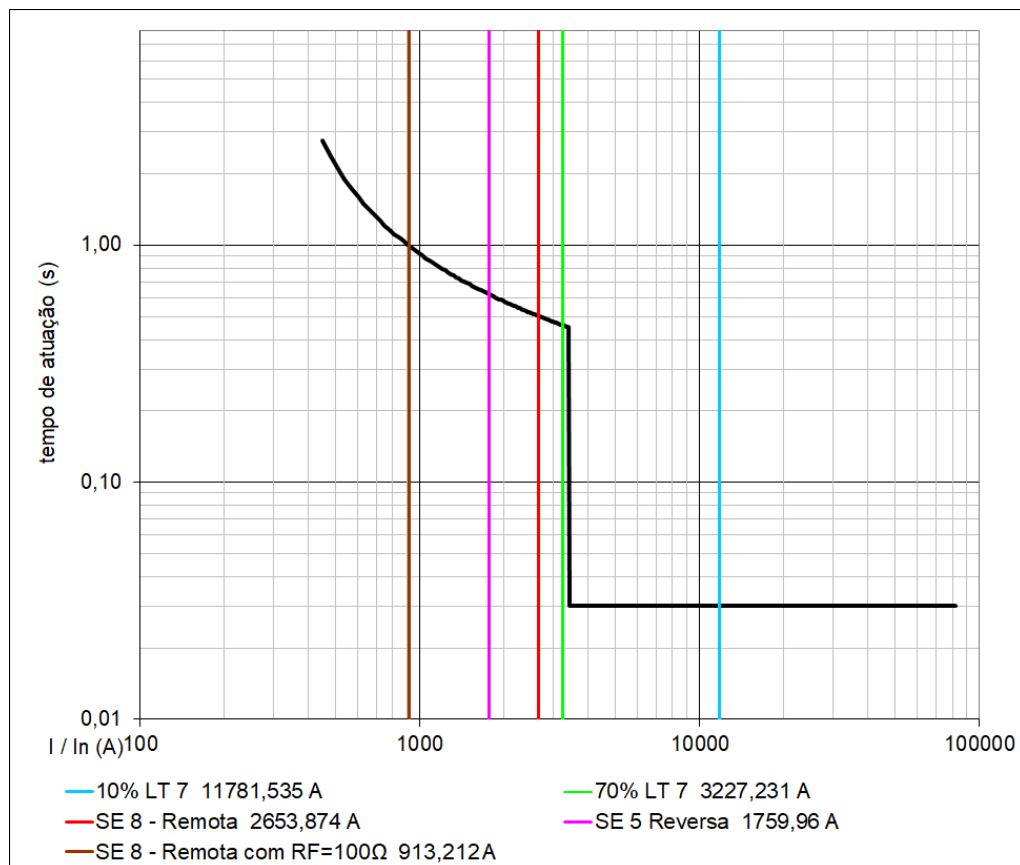
Para essa unidade deve-se eliminar a maior corrente de curto-circuito na barra remota em torno de 0,5 segundos, com isso, adotando a curva normal inversa temos:

$$0,5 = TMS \left(\frac{0,14}{\left(\frac{2693}{300} \right)^{0,02} - 1} \right) \quad (12)$$

Obtendo assim o valor de 0,16, portanto definimos um TMS=0,16.

Com os ajustes definidos, a figura 18 ilustra os ajustes definidos dos elementos instantâneo e temporizado direcionais de neutro, bem como seus respectivos tempos de atuação para as diversas situações de faltas

Figura 18: Gráfico com faltas monofásicas aplicadas



Fonte: Notas de aula. Prof.Dr Silvio

Onde:

Falta 1: Falta à 10% da LT 7;

Falta 2: Falta à 70% da LT 7;

Falta 3: Falta na barra SE 8;

Falta 4: Falta na barra SE 5 (Reversa);

Falta 5: Falta na barra SE 8 com $RF = 100\Omega$.

As faltas aplicadas no gráfico têm como objetivo mostrar a efetividade dos ajustes realizados e ilustrar a posição de cada falta nos elementos instantâneos e temporizados.

Tabela 17: Tempos de atuação para cada falta aplicada

Curto - Circuito	I cc (A)	Tempo (s)
10% da LT	11781,535	Inst (0,03)
70% da LT	3227,231	0,47
Barra na SE	2693,556	0,50
Barra na SE Reverso	1759,960	Sem atuação
Barra na SE com $RF=100\Omega$	913,212	1,00

Analisando o gráfico plotado e a tabela de tempo de atuação, note-se que a curva adotada (normal inversa) e o critério para realização dos ajustes resultam em dados confiáveis para a proteção do sistema estudado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido teve como objetivo apresentar uma metodologia de proteção de sobrecorrente direcional em uma linha de transmissão através de um sistema elétrico de potência modelado no *software* ATPDraw e de um algoritmo elaborado no *software* Matlab.

Neste contexto, o algoritmo desenvolvido carregou as faltas aplicadas no *software* ATPDraw e com uma filosofia de estudo, valores de ângulo de fase da corrente e tensão de sequência positiva e zero diferenciou se a falta estava localizada a frente ou reversa do ponto de referência.

Por meio do estudo apresentado, pôde-se notar a importância da utilização das proteções direcionais de sobrecorrente devido as várias contingências que o sistema pode sofrer devido sua exposição já citada, e a necessidade de manter a seletividade, confiabilidade e segurança para o sistema de proteção.

Foram aplicados diversos tipos de faltas monofásicas, bifásicas, bifásica terra e trifásicas, e no que se refere ao desempenho da metodologia a porcentagem de acertos da direcionalidade da falta atingiu 92%, porcentagem que deve ser elevada em estudos futuros levando em consideração as conexões dos transformadores e seus valores de ângulo.

6.1 Estudos futuros

A continuação do trabalho pode-se dar a partir das seguintes propostas:

- Implementação de outros tipos de definição da direcionalidade;
- Simulação de outros valores de resistência de falta para as faltas aplicadas;
- Otimização do algoritmo elaborado;
- Algoritmo detectar o tipo de falta que foi simulada.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, P. M. **Power system protection**. New York: Ed. McGraw-Hill, 1999.

ARTICO, Marcelo; BIANCO, Bráulio Augusto; FERRARO, Alessandro Guliano, 2013. **Proteção de sistemas elétricos de potência com ênfase em linhas de transmissão**. Universidade São Francisco, Engenharia Elétrica. Itatiba, 2013.

COSTA, N.S.; **Proteção de Sistemas Elétricos considerando Aspectos de Segurança da Rede de Comunicação**. São Carlos, 2007, 189p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

COSTA, A.F.N. **Sistema de Medição Fasorial Sincronizada Aplicada à Proteção de Retaguarda de Grandes Áreas**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência Dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007. ISBN: 978-85-85205-78-2.

FONSECA, Hugo Leonardo Chaves Ayres da; LEAL, MÁrcio Fernandes. **ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS UTILIZANDO O ATPDraw**. 2003. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2003. Disponível em: <<http://www.gsep.ene.unb.br/osem/damasceno/Transmiss%E3o%20de%20energia/Use%20do%20ATP/como-usar-o-ATP-proj-final-hugo-marcio.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

GONZALEZ, Juan Ignacio Patricio Rossi. **Representação de Relés de Proteção em programas de Curto-Circuito**. 2007. Tese (mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

HOROWITZ S H.; PHADKE A G. **Power System Relaying**. 4. Ed. John Wiley and Sons. 2014.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. Ed. Florianópolis, Santa Catarina. UFSC. EELL. LABPLAN, 2005.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 4.e.d. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013.

MANASSERO. G.J. **Proteção e Automação de Sistemas Elétricos de Potência**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/59995674-Protacao-e-automacao-de-sistemas-eletricos-de-potencia-i.html>>. Acesso em: 06 mai. 2019.

MARCOLINO, M. H. **Coordenação de Relés de Sobrecorrente e Distância para Sistemas de Transmissão**. 2014 105 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2014.

MASON, C. R. **The Art and Science of Protective Relaying**. [S.1]: John Wiley & Sons, 1956.

NEGRÃO, Danilo Luiz Alves. **Metodologia Para a Coordenação e Seletividade da Proteção Direcional de Sobrecorrente em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**. 2015. Tese (mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

ONS. **Submódulo 11.3 - Estudos de curto-circuito**. 2009. Disponível em: <http://www.ons.org.br//ProcedimentosDeRede/Módulo_11/Submódulo_11.3/Submódulo_11.3_Rev_1.0.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2019.

ONS. **Submódulo 20.1 – Glossário e termos técnicos**. 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2017/082/documento/anexo_minuta_ren_submodulo_20.1.pdf> Acesso em: 15 mai. 2018.

PÁGINA PESSOAL DE JOSÉ MATIAS. Disponível em: <<https://www.josematias.pt/esquemasElectrotecnia2.htm>> Acesso em: 15 mar. 2018.

PHADKE, A.G; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power System**. Research Studies Press. LTD, 1990.

ROLIM, G, S. **Análise da Utilização de Relé Direcional em Sistemas Elétricos com Geração Distribuída**. 2018. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) – UFPB, João Pessoa, 2018.

RUSH, Peter. **Proteção e automação de redes: Conceito e aplicação**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher: Schneider, 2011.

SANTOS, Marcos Rosa dos. **Metodologias para a execução de manobras de paralelismo em redes aéreas de distribuição na operação de tempo real.** 2013. 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTOS, G.O. **Implementação de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada para Proteção de Retaguarda.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

SATO, F. **Análise dos Impactos e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica.** 1e.d. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

Schweitzer Engineering Laboratories. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/schweitzer-engineering-laboratories/product-23479-1812116.html>>. Acesso em: 19 out. 2017.

SILVA, R.A. (2008). **Comportamento da Função de Proteção de Sobrecorrente Instantânea Frente a Distorções Harmônicas nos Relés de Proteção Numéricos.** Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SOUZA, S.A. **Relé de sobrecorrente e suas aplicações:** Proteção de sistemas, 10 de Mar – 10 de Jul, de 2018. Notas de Aula. Power point.

