

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS DE SOUZA LESSA

**PARAMETRIZAÇÃO DAS FUNÇÕES DIRECIONAL DE SOBRECORRENTE (67) E
DE DISTÂNCIA (21) DOS RELÊS DE PROTEÇÃO DE UM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO EM ANEL**

MEDIANEIRA

2021

LUCAS DE SOUZA LESSA

PARAMETRIZAÇÃO DAS FUNÇÕES DIRECIONAL DE SOBRECORRENTE (67) E DE DISTÂNCIA (21) DOS RELÊS DE PROTEÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ANEL

Parameterization of the overcurrent directional (67) and distance (21) functions of the protection relays of a ring distribution system

Trabalho de conclusão de curso do curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Orientador: Prof. Me. Edson Andreoli.
Coorientador: Prof. Dr. Evandro Andre Konopatzki.

**MEDIANEIRA
2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS DE SOUZA LESSA

PARAMETRIZAÇÃO DAS FUNÇÕES DIRECIONAL DE SOBRECORRENTE (67) E DE DISTÂNCIA (21) DOS RELÊS DE PROTEÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ANEL

Trabalho de conclusão de curso do curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 02/dezembro/2021

Edson Andreoli
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Evandro André Konopatzki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Yuri Ferruzzi
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Naufal Santelo
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2021

Dedico este trabalho a minha família e amigos,
que nos momentos de dificuldade ou fraqueza
estavam ali para me levantar e me fortalecer.

AGRADECIMENTOS

Com certeza eu não teria chegado até este momento sozinho, então seria impossível não reservar um espaço para expressar minha gratidão a todos que fizeram parte dessa caminhada comigo.

Primeiramente agradeço a minha mãe, por toda luta e sacrifício que dela pra que esse sonho se tornasse realidade. Não caberia em uma só página o quanto eu a admiro e tenho orgulho de ser seu filho.

A minha namora que desde o momento que entrou na minha vida, sempre me ajudou e me incentivou nos momentos de incertezas.

Aos amigos que a universidade me trouxe, que nunca mediram esforços ao me ajudar.

Quero também, agradecer à minha família, pois sempre acreditaram em mim e me motivaram a ser a pessoa que eu sou hoje.

Meu Orientador, o Prof. Edson Andreoli e meu Coorientador Evandro André Konopatzki, que não pouparam esforços em me ajudar e foram fundamentais para a conclusão dessa pesquisa.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste sonho.

RESUMO

Devido ao aumento da demanda no consumo de energia elétrica, as redes de distribuição ficaram mais extensas e cada vez mais complexas, exigindo sistemas de proteção mais robustos e ajustados, que garantam um alto nível de confiabilidade na intenção de reduzir o tempo de desligamento nas linhas e conseqüentemente, evitando danos físicos a equipamentos e materiais aos clientes que a utilizam. Em vista disso esse estudo apresenta uma parametrização dos relês de proteção de sobrecorrente direcional e de distância por impedância elétrica em um microssistema elétrico de potência composto por 6 barras e 2 gerações. A metodologia consistiu na parametrização dos relês 50/51, 67 e 21 e simulação de faltas em diferentes pontos da rede. Os resultados apresentaram os valores da corrente de curto-circuito e o desempenho do sistema elétrico mediante uma resposta esperada da proteção para cada uma das faltas simuladas. Foi possível concluir que as proteções devem ser combinadas para proporcionar uma maior assertividade dos parâmetros ideais para atender determinada rede, buscando aumentar a sua disponibilidade no SEP.

Palavras-chave: Parametrização de relês. Relê direcional. Relê de distância. SEP. Python.

ABSTRACT

Due to the increase in demand for electricity consumption, transmission networks have become more extensive and increasingly complex, requiring more robust and adjusted protection systems that guarantee a high level of reliability to reduce the disconnection time on the lines and consequently, avoiding physical damage to equipment and materials to customers who use it. In view of this, the study presents a parameterization of directional overcurrent and distance by electrical impedance protection relays in an electrical power microsystem composed of 6 buses and 2 generations. The methodology consisted of parameterization of relays 50/51, 67 and 21 and simulation of faults at different points in the network. The results presented the value of the short circuit current and the performance of the electrical system through an expected response of the protection for each of the simulated faults. It was possible to conclude that the protections must be combined to provide greater assertiveness of the ideal parameters to serve a given network, improving its reliability, and seeking to increase its availability in the electrical power system.

Keywords: Relay parameters. Directional relay. Distance relay. Power system. Python.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas do sistema elétrico de potência.....	17
Figura 2 - Sistema Interligado Nacional	19
Figura 3 - Sistema de subtransmissão com topologia em anel	20
Figura 4 - Etapas do processo de proteção de sistemas elétricos	21
Figura 5 - Elementos do sistema de proteção	23
Figura 6 - Correntes primárias e relações nominais	27
Figura 7 - Ajuste de tempo pré-definido	30
Figura 8 e 9 - Curvas de tempo inverso nas normatizações IEC e IEEE.....	31
Figura 10 - Comportamento do fluxo de potência nos 4 quadrantes	32
Figura 11 - Atuação da função 21 de impedância	34
Figura 12 - Linha radial de transmissão com três zonas de atuação da função 21....	35
Figura 13 Linha de subtransmissão em anel no PowerWorld.....	36
Figura 14 - Simulação das condições normais de operação do sistema.....	38
Figura 15 - Simulação do sistema operando com abertura da linha AB.....	39
Figura 16 - Simulação do sistema operando com abertura da linha EF.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas do sistema.....	37
Tabela 2 - Características elétricas do sistema.....	37
Tabela 3 - Corrente nas linhas com o sistema operando sem faltas	38
Tabela 4 - Correntes de cc trifásico nas barras.....	39
Tabela 5 - Corrente nas linhas com o sistema sem a linha AB	40
Tabela 6 - Correntes de cc trifásico com o sistema operando sem a linha AB	40
Tabela 7 - Corrente nas linhas com o sistema sem a linha EF	41
Tabela 8 - Correntes de cc trifásico com o sistema operando sem a linha EF.....	42
Tabela 9 - Corrente de ajuste da função 67 temporizada	45
Tabela 10 - Corrente de ajuste da função 67 de tempo instantâneo.....	46
Tabela 11 e 12 - Correntes de cc dentro da zona de atuação dos relês	46
Tabela 13 - Módulo da impedância de ajuste do relê de distância.....	47
Tabela 14 - Módulo da impedância de falta processada pelo relê de distância	47
Tabela 15 - Módulo da impedância de falta processada pelo relê de distância	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	American National Standards Institute
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
Cc	Curto-circuito
CC	Corrente Contínua
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligent Electronic Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ONS	Operador Nacional do Sistema elétrico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivo geral.....	14
1.3	Objetivos específicos.....	15
1.4	Metodologia	15
2	O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	17
2.1	Transporte da energia elétrica	18
3	SISTEMAS DE PROTEÇÃO	22
3.1	Características do sistema de proteção	23
3.2	Componentes do sistema de proteção.....	24
3.2.1	Relês	25
<u>3.2.1.1</u>	<u>Relês eletromecânicos de indução.....</u>	<u>26</u>
<u>3.2.1.2</u>	<u>Relês eletrônicos ou de estado sólido</u>	<u>26</u>
<u>3.2.1.3</u>	<u>Relês digitais</u>	<u>27</u>
3.2.2	Tc e tp	27
<u>3.2.2.1</u>	<u>Transformadores de corrente</u>	<u>28</u>
<u>3.2.2.2</u>	<u>Transformadores de potencial</u>	<u>29</u>
3.2.3	Disjuntores	30
3.3	Funções da proteção	31
3.3.1	Relê de Sobrecorrente (50/51)	31
<u>3.3.1.1</u>	<u>Relê de sobrecorrente instantâneo (50)</u>	<u>32</u>
<u>3.3.1.2</u>	<u>Relê de sobrecorrente temporizado (51)</u>	<u>32</u>
3.3.2	Relê direcional (67)	34
3.3.3	Relê de Distância (21).....	35
<u>3.3.3.1</u>	<u>Relê de impedância.....</u>	<u>36</u>
4	SISTEMA DE POTÊNCIA EM ANEL COM DUAS FONTE DE GERAÇÃO	38
4.1	Características do sistema	39
4.2	Estudo de casos	39
4.2.1	Estado normal de operação do sistema	40
4.2.2	Sistema operando sem a fonte g1.....	41

4.2.3	Sistema operando sem a fonte g2.....	43
4.3	Cálculo das correntes de disparo e módulo da impedância do relê	44
4.3.1	Corrente de <i>Trip</i> da Função Direcional Temporizada (67/51)F	44
4.3.2	Corrente de <i>trip</i> da função direcional instantânea (67/50)f.....	45
4.3.3	Módulo da impedância vista pelo relê de distância	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	Correntes de disparo do relê.....	47
5.2	Módulo da impedância protegida pelo relê de distância	49
5.2.1	Simulação de validação do relê de distância.....	50
6	CONCLUSÃO	51
6.1	Considerações finais	51
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica caminha para ser a principal matriz energética no mundo com o surgimento de políticas sustentáveis que têm como objetivo reduzir o uso de combustíveis fósseis e substituí-los por soluções renováveis. Até mesmo na indústria automobilística as montadoras têm apresentado projetos para a substituição dos motores a combustão de seus veículos por motores elétricos, que além de uma fonte limpa de energia, ainda apresentam um maior rendimento.

A busca por fontes mais eficientes e menos agressivas ao meio ambiente também é alvo de estudo e pesquisa em diversas instituições pelo mundo. Desse modo, melhorias nas formas de geração alternativas surgem a todo momento, tornando a energia elétrica ainda mais atrativa e democrática, o que contribui para a preferência no uso dela.

Porém, esse aumento na relação entre geração e a demanda de energia exige um aumento também da rede de transmissão do sistema elétrico, tornando-o cada vez mais complexo. Além disso, as dimensões do Brasil tornam a operação de tal sistema ainda mais difícil. Essa dependência de uma boa transmissão que garanta que a energia gerada chegue ao consumidor faz com que a confiabilidade do sistema de proteção deva ser altíssima e para isso, é imperativo que a proteção seja bem ajustada as linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição de energia elétrica.

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) está sujeito constantemente a falhas, sejam elas internas ou externas, e tais falhas prejudicam a qualidade do fornecimento de energia, bem como, pode danificar equipamentos ligados a rede, além de prejuízos pelo tempo de desligamento.

Esses eventos ocorrem muitas vezes por mau dimensionamento do sistema ou carga, erro na operação, descargas atmosféricas ou rompimento físico do circuito. O curto-circuito junto com a sobrecarga são as falhas mais comuns de um sistema elétrico de potência, ambos geram uma sobrecorrente no circuito que podem levar até mesmo a graves consequências se não extinguidas rapidamente.

Dentro do contexto acima descrito enquadra-se este estudo de trabalho de conclusão de curso, que pretende efetuar a parametrização das funções direcional de sobrecorrente (67) e de distância (21) dos relês de proteção de uma rede de distribuição com topologia em anel por meio de um *software* de simulação de fluxo de potência e um algoritmo de análise de dados.

1.1 Justificativa

O sistema de proteção deve ser projetado com base nos dados reais da linha a qual se está protegendo, assim como, a carga que ela abastece. A parametrização correta da proteção do sistema elétrico, elimina ou reduz os danos causados por falhas, além de diminuir o tempo de desligamento não programado, amenizando os efeitos das faltas para os consumidores.

As linhas de transmissão são os elementos do SEP que mais sofrem com a exposição a intempéries. Segundo o Operador Nacional do Sistema (ONS), é nelas que ocorrem cerca de 70% das interrupções de abastecimento. Além disso, por conta dos altos níveis de tensão que as mesmas são submetidas, os danos causados por falhas na rede tendem a serem mais severos ou até mesmo permanentes.

Por isso o estudo de funções elementares de proteção é de suma importância tanto para o sistema elétrico a que se deseja proteger, quanto para o aprendizado técnico desde assunto no decorrer da vida acadêmica. Sendo assim, o tema a ser estudado neste trabalho de conclusão de curso está relacionado as funções de proteção 21 e 67 da tabela ANSI de proteções. Estas funções serão parametrizadas para uma rede de subtransmissão com topologia em anel. Adicionalmente será analisado o efeito da mudança de sentido no fluxo de potência ocasionado pelo fato de haver mais de uma fonte de geração no sistema em anel.

1.2 Objetivo geral

Parametrizar as funções direcional de sobrecorrente (67) e de distância (21) dos relês de proteção de um sistema de subtransmissão em anel com duas fontes de geração com auxílio do *software* Power World para simular as correntes na rede e um algoritmo de análise de dados escrito na linguagem Python.

1.3 Objetivos específicos

- a) Conceituar os elementos a serem apresentados no sistema de proteção.
- b) Apresentar a rede a ser protegida, bem como seus parâmetros de funcionamento.
- c) Simular diferentes casos de faltas ao longo da rede e coletar os dados de correntes na linha e de curto-circuito para o ajuste das funções de proteção 21 e 67.
- d) Validar e discutir os resultados encontrados pelo algoritmo.

1.4 Metodologia

Para a realização desse estudo, serão feitas consultas bibliográficas, para a apresentação do conteúdo e análise de simulações virtuais, além disso, nessa etapa são obtidos os dados do sistema para o desenvolvimento das simulações.

As simulações serão feitas através do *software* Power World, para a obtenção das correntes nas linhas, correntes de curto-circuito, bem como, para observação do sentido do fluxo de potência. Ainda, é por meio da solução do fluxo de carga, nesse mesmo *software* que se obtém as tensões pré falta em todas as barras no momento dos curtos circuitos.

Esses dados obtidos serão analisados por algoritmo escrito na linguagem Python, onde serão comparados os valores obtidos nas simulações e feitos os devidos cálculos. Após essa análise o *script* do programa entregará como resultados, os valores de ajuste a serem usados como parâmetros de funcionamento dos relês de proteção do sistema.

A validação será feita através da comparação dos resultados entregues pelo algoritmo com situações em que a proteção deve atuar simulados por meio Power World. Feitas as devidas comparações, serão ratificados os resultados coerentes e debatidas as divergências encontradas.

1.5 Organização do texto

O presente trabalho de conclusão de curso está dividido em capítulos que estão dispostos da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução

Abrangerá a delimitação do tema, problemática, objetivos gerais e específicos justificativa e contextualização.

Capítulo 2: O sistema elétrico de potência

Serão explorados os conceitos que envolvem o SEP e a rede de estudo.

Capítulo 3: Sistemas de proteção

Nesse capítulo serão conceituados elementos e funções de proteção, dispositivos auxiliares a proteção, funcionamento e características de um sistema de proteção de alta tensão.

Capítulo 4: Sistema de potência em anel com duas fontes de geração

Neste ponto do estudo serão apresentados os dados e características do sistema a ser analisado, serão feitas as simulações, obtenção dos dados e apresentação dos modelos de análise que serão usados no algoritmo.

Capítulo 5: Resultados e discussões

Capítulo no qual serão expostos e debatidos os resultados entregues pelo algoritmo de análise.

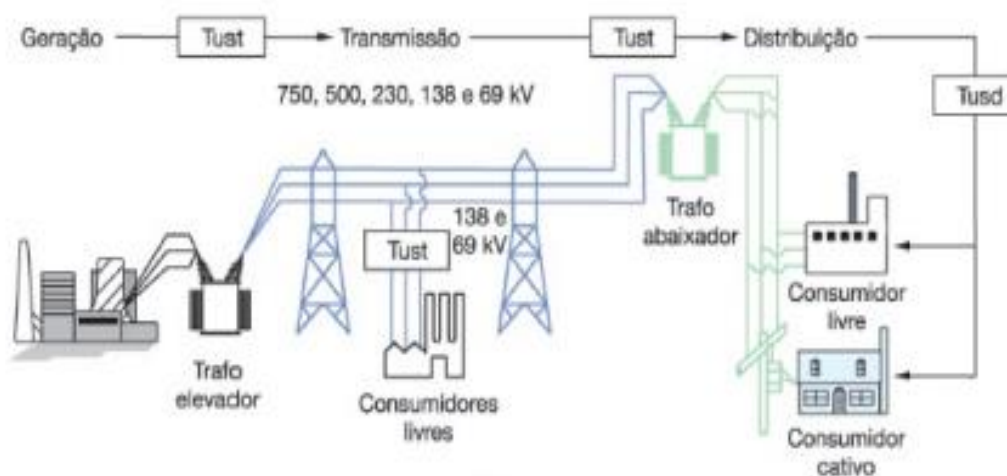
Capítulo 6: Conclusão

Serão feitas as considerações finais acerca do estudo e dos resultados encontrados, bem como, sugestões de trabalhos futuros correlatos com o estudo apresentado.

2 O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

“Os SEP podem ser caracterizados como redes elétricas que têm como objetivo fornecer energia com qualidade e no instante que é solicitada, tanto a grandes como pequenos consumidores” (VASCONCELOS, 2017). O sistema de potência é dividido em três etapas: geração, transmissão e distribuição.

Figura 1 – Etapas do sistema elétrico de potência



Fonte: PINTO, (p. 6)

Na primeira etapa, a energia é produzida, normalmente, em uma faixa de 6 a 25 kV. Por isso, é necessário que ela passe por uma subestação elevadora que adequa esse nível de tensão da saída da usina, a faixa da linha de transmissão que, por sua vez, a transporta até as zonas de consumo, onde é novamente transformada, dessa vez reduzida para o nível de tensão de distribuição, primária ou secundária.

A geração de energia no Brasil é em sua grande maioria realizada através da conversão de energia cinética em elétrica, sendo que a principal matriz usada é a hídrica. Segundo a ONS 63,9% da capacidade de produção de energia em território nacional é proveniente de hidroelétricas, as quais, correspondem uma potência instalada igual a 108.650 MW.

Do total gerado em território nacional, aproximadamente 99,8% são destinados a carga para consumo instantâneo, o que demanda um sistema de transmissão e distribuição gigantesco. O fato do elevado percentual de produção hidroelétrica dificulta ainda mais essa situação. De modo geral, as usinas ficam

afastadas dos grandes centros consumidores por conta de aspectos físicos. Além das dimensões continentais do país.

2.1 Transporte da energia elétrica

As linhas de transmissão, podem ser definidas como: “os elementos do sistema elétrico que transportam a energia produzida pelas fontes de geração até as subestações abaixadoras instaladas próximas aos grandes centros de carga”. (MAMEDE, 2011)

Em sua grande maioria são compostas por torres, condutores, sistemas de proteção contra falhas e descargas atmosféricas. Ainda, os seus circuitos podem ser simples, duplos ou múltiplos. (PINTO, 2014)

O sistema de transporte de energia elétrica pode ser classificado quanto ao seu comprimento e nível de tensão. Quanto aos níveis de tensão padronizados, no Brasil, têm-se:

- a) Transmissão: 750, 500, 230, 138, 69 kV;
- b) Subtransmissão: 138, 68, 34,5 kV;

Quanto ao comprimento das linhas é classificado como:

- a) Linha longa: > 249 km;
- b) Linha média: entre 80 e 249 km;
- c) Linha curta: < 80 km

O nível de tensão das linhas está diretamente relacionado ao seu comprimento, uma vez que, a impedância das linhas é sempre fornecida em Ohms por unidade de comprimento.

$$V = Z \cdot I$$

Equação 2.1

Segundo a lei de Ohm, a tensão é inversamente proporcional a corrente, visto que um mesmo nível de potência transportada, a medida que aumenta-se a tensão de operação, diminui-se a corrente que flui pela linha e vice-versa, ou seja, se diminui-se a tensão e o fluxo de corrente através da linha deve aumentar. Geralmente em SEP, opta-se por utilizar sistemas de transmissão em alta tensão, tendo em vista que,

os condutores elétricos utilizados nesse caso possuem uma bitola reduzida em comparação a sistemas de baixa tensão para transportar o mesmo montante de potência elétrica. Além disso, a operação em alta tensão, implica em baixas perdas por efeito joule nos condutores.

$$Perdas = Z \cdot I^2 \cos \varphi \quad \text{Equação 2.2}$$

Como pode-se observar na Equação 2.2, as perdas são proporcionais ao quadrado da corrente que passa no condutor. Logo o transporte em correntes menores melhora o uso dos condutores durante a transmissão de energia.

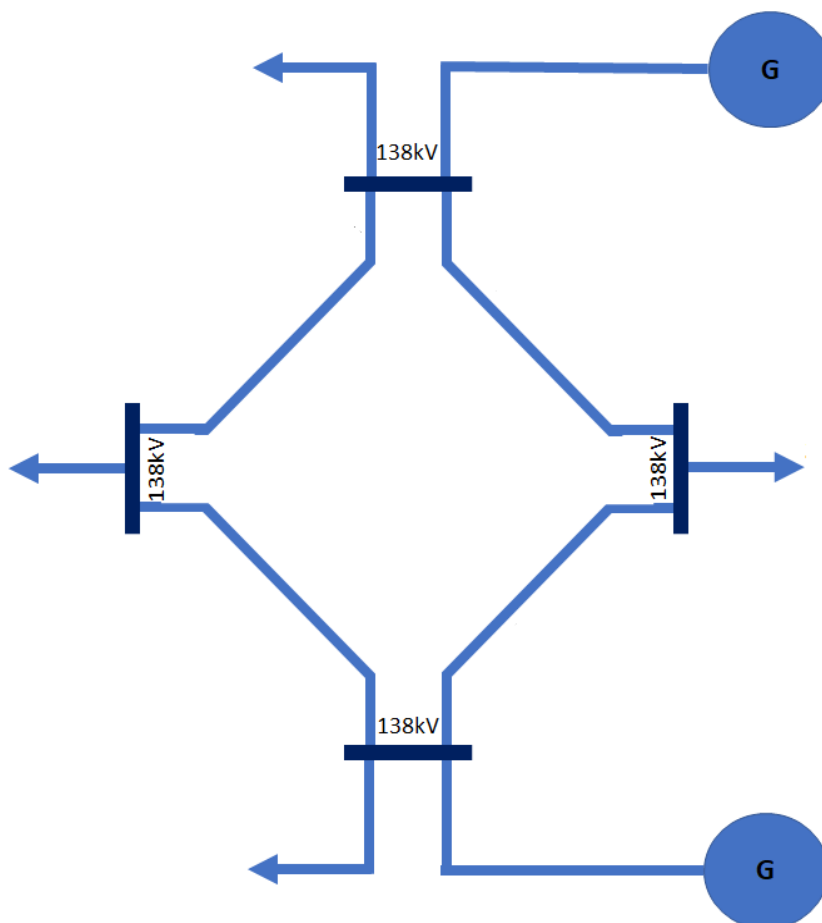
O Brasil possui um sistema de transmissão de energia muito eficiente, o Sistema Interligado Nacional (SIN) que é formado por quatro grandes subsistemas interligados por malhas de transmissão, de modo que em caso de alguma falta danifique o abastecimento de um centro consumidor, o mesmo possa continuar sendo abastecido por outra malha de transmissão, funcionando como um grande sistema em malha.

Figura 2 – Sistema Interligado Nacional (SIN)

Fonte: site ONS

Os sistemas em anel, como o nome propõe, funcionam como um *loop*, onde uma barra é alimentada por mais de uma linha, tornando o sistema redundante e aumentando a confiabilidade do mesmo.

Figura 3 – Sistema de Subtransmissão com topologia em Anel



Fonte: autoria própria

A figura 3 mostra um sistema de subtransmissão em anel, como podemos notar as cargas possuem mais de uma linha que as conectam a geração.

3 SISTEMAS DE PROTEÇÃO

A principal função do sistema de proteção é assegurar a desconexão de todo o sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos ou de parte dele; além de fornecer as informações necessárias aos responsáveis por sua operação, de modo a facilitar a identificação dos defeitos e a sua consequente recuperação. (MAMEDE FILHO, 2011)

Como mencionado no parágrafo anterior, identificar e conter falhas que danifiquem o sistema, estão no topo das obrigações do sistema de proteção, diminuindo assim o tempo de desligamento do sistema elétrico com o intuito de evitar prejuízos maiores, tanto para as concessionárias que operam a rede, quanto ao consumidor final.

A proteção de sistemas elétricos é feita mediante o uso de relês e proteções contra descargas atmosféricas. As medidas das grandezas elétricas são obtidas a partir de unidades de entrada que, tipicamente, são Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP). Estes equipamentos são ligados na rede elétrica a ser protegida e as correntes e/ou tensões dos seus secundários são enviadas ao relê. Este último, por sua vez, faz a análise dos sinais de corrente e/ou tensão e envia um sinal de saída para a unidade de acionamento do circuito que, geralmente, são os disjuntores e as chaves seccionadoras, os quais atuam de acordo com esse sinal. A figura 4 ilustra as etapas do processo de proteção.

Figura 4 – Etapas do processo de proteção de sistema elétricos



Fonte: Introdução à proteção dos sistemas elétricos (unidade 1, seção 1)

3.1 Características do sistema de proteção

Além da necessidade de considerar as características da linha, o sistema de proteção deve atender uma série de requisitos fundamentais para garantir uma boa funcionalidade, os quais, estão descritos a seguir.

Seletividade: Capacidade do sistema de identificar e retirar somente a zona em falha do sistema, mantendo as demais áreas não atingidas em pleno funcionamento, ou seja, mantendo o máximo de continuidade no sistema no caso de malhas de transmissão. É responsável pela coordenação do sistema.

Zonas de atuação: São as regiões “vistas” pelos relês de proteção, área entre dois disjuntores. Quando uma falha ocorre na zona protegida, a seletividade é responsável por determinar quais relês irão atuar e acionar a abertura do disjuntor, retirando a sessão em *trip*.

Velocidade: É a velocidade de atuação do sistema visando o menor tempo possível na operação dos elementos de proteção, diminuindo assim o período de exposição dos equipamentos a falhas e possibilitando o religamento da linha mais rápido.

Sensibilidade: É a precisão do sistema em reconhecer as falhas, ou seja, capacidade de distinguir valores na operação que estejam fora dos parâmetros pré-estabelecidos.

O nível de sensibilidade é medido através da Equação 3.1:

$$Ns = \frac{I_{cc}}{I_{pickup}} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde,

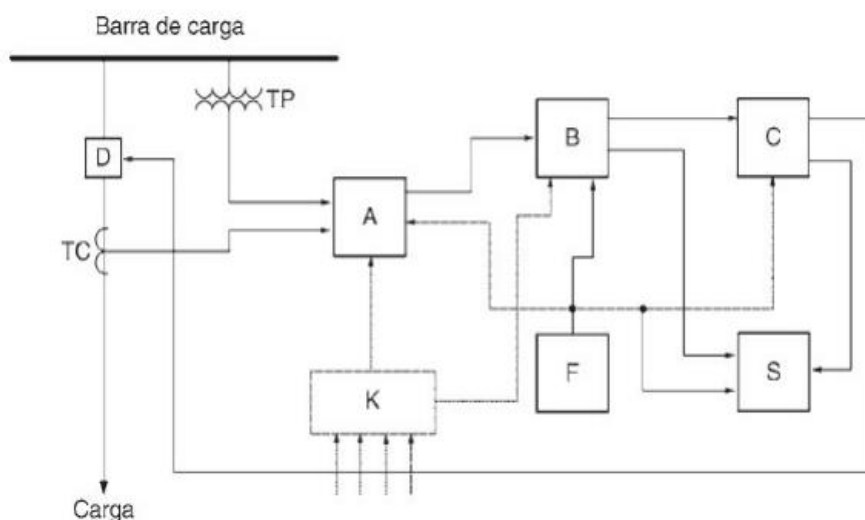
- Ns , é o nível de sensibilidade, com valor ideal de $Ns < 2$.
- I_{cc} , é a corrente de curto-circuito do extremo da falha
- I_{pickup} , é o valor mínimo especificado no relê, valor mínimo para a proteção atuar.

Confiabilidade: É a capacidade de sistema de proteção atuar de maneira correta e conforme foi configurado, com segurança e exatidão.

3.2 Componentes do sistema de proteção

O sistema de proteção é composto por um conjunto de equipamentos e subsistemas que operando em conjunto permitem a detecção e retirada do elemento em estado de *trip*.

Figura 5 – Elementos do sistema de proteção



Fonte: MAMEDE, (p. 22)

Na Figura 5, têm-se os seguintes elementos:

TC – Transformadores de corrente;

TP – Transformadores de potencial;

D – Disjuntor de desconexão do sistema;

F – Fonte auxiliar do sistema, permitindo a operação mesmo após a desconexão.

A – Elemento de medição, recebe o sinal do TC ou TP e avalia a situação da rede.

B – Elemento lógico, compara os valores em A com os parâmetros de funcionamento da linha.

C – Atuador, envia o sinal de disparo para o disjuntor em caso de não conformidade em B.

S – Sinalização das operações na estrutura de proteção.

3.2.1 Relês

Os relês, segundo CAMINHA, (1977): “são dispositivos cuja função é detectar nas linhas ou aparelhos faltosos, perigosas ou indesejáveis condições do sistema e iniciar manobras de chaveamento ou dar aviso adequado.”

São a parte pensante do sistema de proteção, em que recebem os dados da linha, processam e enviam o comando de atuação para retirada da zona protegida em caso de falha. Na Figura 5, os elementos A, B e C estão compreendidos dentro do relê.

Os primeiros relês eram eletromecânicos, compostos por bobinas e atuavam através do fenômeno da indução magnética. Com o passar do tempo e o avanço da eletrônica, surgiram os relês de estado sólido. Estes já possuíam a eletrônica como base de sua atuação através de semicondutores.

Com o avanço dos estudos em microprocessamento, vieram os primeiros relês digitais, que além de um conseguem uma sensibilidade melhor, compreendem diversas funções de proteção em um único equipamento visto que seu funcionamento é baseado em *software*.

3.2.1.1 Relês eletromecânicos de indução

“Os primeiros relês atuavam através das forças atuantes produzidas na interação eletromecânica entre as correntes e fluxos.” (HOROWITZ, 2008). Possuem contatos fixos e móveis que atuam de acordo com a saturação da corrente induzida em sua bobina, possui fácil instalação e manutenção, além de sua parametrização ser manual, apenas fazendo o ajuste dos *taps* da bobina.

Entre as desvantagens de seu uso, estão as perdas mecânicas por possuírem contatos móveis, menor sensibilidade e possuírem apenas uma função por aparelho. Por outro lado, hoje os relês digitais fazem inúmeras funções, com mais exatidão em um único equipamento de proteção, tornando os relês eletromecânicos obsoletos. Apesar disso, ainda é encontrado esses modelos em sistemas mais antigos, além de seu uso didático ser bem explorado, visto que são mais acessíveis e com custo menor.

3.2.1.2 Relês eletrônicos ou de estado sólido

Tem o funcionamento similar ao eletromecânico, usando contatos normalmente aberto e fechado. Porém não possui partes móveis, usa componentes

da eletrônica de potência, como tiristores e diodos para representar o estado aberto e o estado fechado. Apesar de mais rápidos, os relês de estado sólido são pouco mais evoluídos que o seu antecessor. Sua aplicação aos sistemas de proteção não obteve muito sucesso, tendo em vista que seu antecessor realizava basicamente a mesma função. Por isso, encontrou uma enorme barreira de entrada no mercado de proteção, não tendo a aceitação esperada pelos seus fabricantes.

3.2.1.3 Relês digitais

Possuem além de componentes eletrônicos na sua construção elementos embarcados, ou seja, microprocessadores que controlam toda a lógica de funcionamento dos IEDs, são considerados relês inteligentes e muitas vezes são também conhecidos por relês numéricos. Seus parâmetros são todos definidos por programação no próprio aparelho, além disso, desempenham diversas funções simultâneas de proteção, controle, comunicação e monitoramento.

Destaca-se que neste estudo, será utilizado o relê digital nas simulações que serão feitas.

3.2.2 Tc e tp

Os relês são a base de um sistema de proteção, segundo ARAGÃO, (2014): “atuam diretamente sobre o mecanismo de abertura e fechamento do disjuntor, monitorando a corrente primária do circuito sob supervisão”. Porém, em altos níveis de corrente e tensão, se faz necessário o uso de transformadores de corrente e potencial, que reduzem as grandezas primárias das redes de energia elétrica a níveis adequados aos relês.

3.2.2.1 Transformadores de corrente

Como dito antes, evita a conexão direta de relês a sistemas com altas correntes, reduzindo-as a classe de medição dos relês. São ligados em série com o sistema, possuem poucas espiras no enrolamento primário e muitas espiras no secundário, sendo que estas últimas, devem estar de acordo com a necessidade de transformação da linha. A relação de transformação dos TCs é dada pela Equação 3.2.

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde,

- N_s = número de espiras no secundário
- N_p = número de espiras no primário
- I_p = corrente no primário
- I_s = corrente no secundário

O dimensionamento do TC para fins de proteção, é baseado na corrente que circula do enrolamento secundário do TC, que tem como referência o valor de 5 A. Logo, a partir da corrente que circula no enrolamento primário, utilizam-se dados tabelados para escolher uma relação de transformação que atenda aos requisitos básicos para a medição dos relês. As correntes primárias e as relações de transformação para um TC típico, podem ser observadas na Figura 6.

Figura 6 – Correntes primárias e relações nominais

Corrente nominal	Relação nominal	Corrente nominal	Relação nominal	Corrente nominal	Relação nominal	Corrente nominal	Relação nominal
5	1:1	60	12:1	400	80:1	2500	500:1
10	2:1	75	15:1	500	100:1	3000	600:1
15	3:1	100	20:1	600	120:1	4000	800:1
20	4:1	125	25:1	800	160:1	5000	1000:1
25	5:1	150	30:1	1000	200:1	6000	1200:1
30	6:1	200	40:1	1200	240:1	8000	1600:1
40	8:1	250	50:1	1500	300:1	-	-
50	10:1	300	60:1	2000	400:1	-	-

Fonte: MAMEDE, (p. 54)

3.2.2.2 Transformadores de potencial

Tem basicamente a mesma função dos TCs, porém reproduzem uma tensão para os relês. No entanto, estes equipamentos são ligados em paralelo com a rede e tem relação de transformação proporcional a razão entre as tensões de secundário e primário, como pode ser observado na Equação 3.3.

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_s}{V_p} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde,

- N_s = número de espiras no secundário
- N_p = número de esperas no primário
- V_s = tensão no secundário
- V_p = tensão no primário

Analogamente ao TC, os TPs relacionam a tensão que circula nos seus enrolamentos primários com a tensão de referência para proteção que, tipicamente, é 115 V no seu secundário. Assim a razão de transformação do TP, pode ser obtida por meio da Equação 3.4.

$$RTP = \frac{Vp}{115} \quad \text{Equação 3.4}$$

3.2.3 Disjuntores

São dispositivos de manobra, com a função de isolar a falha separando o sistema em duas partes. Esses equipamentos recebem o comando dos relês interrompendo a corrente na zona de proteção, evitando maiores danos a rede e aos equipamentos ligados a ela.

Além de retirar a área sob mau funcionamento, o disjuntor é responsável também por extinguir o arco elétrico formado durante o processo de abertura dos contatos de alta tensão. Sua forma de atuação irá variar de acordo com o meio que é utilizado para extinção do arco elétrico. Os tipos mais comuns são: óleo, ar comprimido, vácuo e SF6.

Funcionando como atuadores no sistema, eles devem ser capazes de suportar até mesmo correntes de curto-circuito, ou seja, sua abertura dos contatos está diretamente ligada ao relê, que por sua vez pode ser parametrizado e suportar picos de corrente comuns na rede.

3.3 Funções da proteção

Com a chegada dos relês digitais, não se fez mais necessário um relê de cada natureza, desempenhando uma única função. Dessa forma, foi criado um sistema de identificação para as funções de proteção, comando e comunicação dos IEDs. Este sistema é conhecido como funções ANSI de proteção e o mesmo é identificado pela tabela ANSI. A IEC 61850, por sua vez, é a norma que rege os códigos da tabela, que variam entre números e prefixos.

O estudo deste trabalho de conclusão de curso irá tratar exclusivamente das funções direcional de sobrecorrente (67), instantânea e temporizada e da função de distância (21), onde serão apresentadas as finalidades de cada uma, bem como, seu modo de atuação. Porém, não será abordado o estudo de coordenação, assim como, o ajuste de curvas do relê temporizado, visto que o escopo deste estudo é a função direcional e os parâmetros a serem ajustados serão as correntes de disparo do relê.

3.3.1 Relê de Sobrecorrente (50/51)

Segundo MAMEDE (2011), as sobre correntes são “os eventos mais comuns no sistema elétrico, também os que mais desgastam e comprometem a vida útil dos equipamentos”. Ainda, de acordo com ARAGÃO (2014), elas “são intensidades de corrente elétrica superiores a aceita como normal ou nominal e podem ser classificadas como sobrecorrente de sobrecarga ou de curto-circuito”.

As correntes de sobrecarga, são níveis um pouco acima do valor nominal de corrente do circuito, são toleráveis por segundos ou até minutos, ou seja, quanto maior a intensidade, mais rápida deverá ser a atuação do sistema de proteção.

O curto-circuito, por sua vez, são níveis de corrente muito elevados, podendo variar de 3 até 10 vezes a nominal, estas devem ser eliminadas o quanto antes, pois podem causar a perda de isolamento completa dos condutores.

3.3.1.1 Relê de sobrecorrente instantâneo (50)

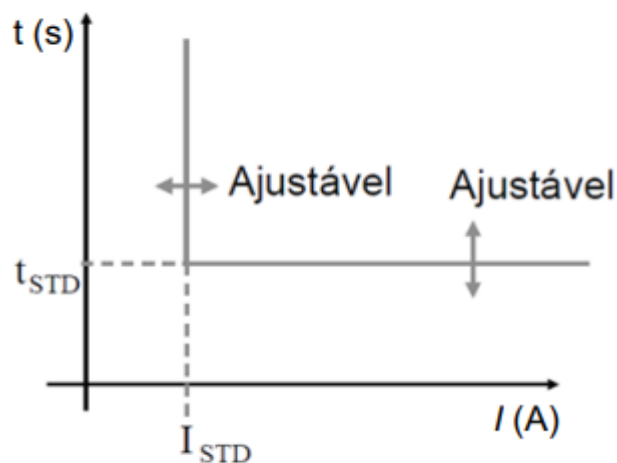
Atua instantaneamente para qualquer valor maior que a corrente ajustada, ou seja, não dependem da intensidade da corrente que excede a nominal, mas sim de um ajuste pré-determinado de acordo com os limites toleráveis de isolamento dos condutores.

3.3.1.2 Relê de sobrecorrente temporizado (51)

O tempo de atuação desse relê já não ocorre de forma instantânea, podem ter seu tempo de disparo pré-definido ou atuar de acordo com uma curva de tempo.

Pré definido: neste caso tem o tempo de atuação ajustável, assim como o limite da corrente, ou seja, o valor de disparo será o mesmo independentemente do nível de corrente.

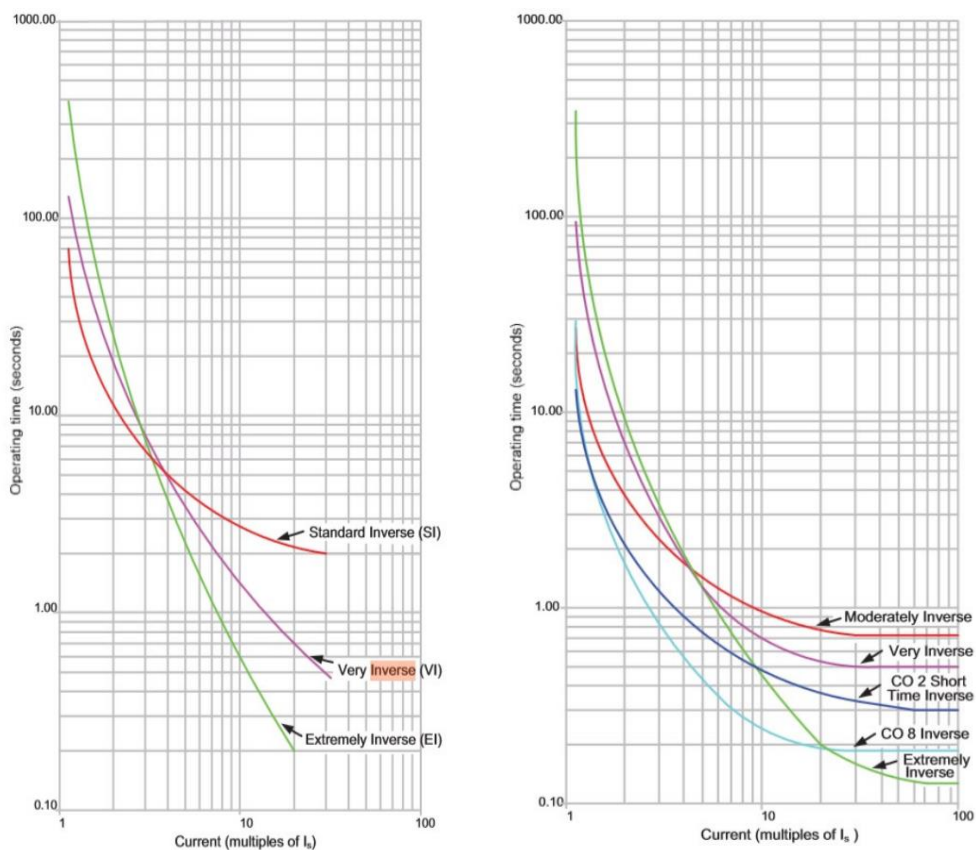
Figura 7 – Ajuste de tempo pré-definido



Fonte:

Tempo inverso: Os relês de tempo inverso, atuam conforme uma curva de atuação. Nesse caso, o tempo de disparo não é escolhido, mas sim a curva em que o relê irá obedecer. O tempo de atuação é menor a medida que o nível de corrente aumenta de curto circuito aumenta. Há vários tipos de curvas e as mesmas variam de acordo com os fabricantes dos equipamentos de proteção. A normatização das curvas é feita pelo IEC e pelo IEEE.

Figura 8 e 9 - Curvas de tempo inverso segundo as normatizações da IEC e IEEE respectivamente



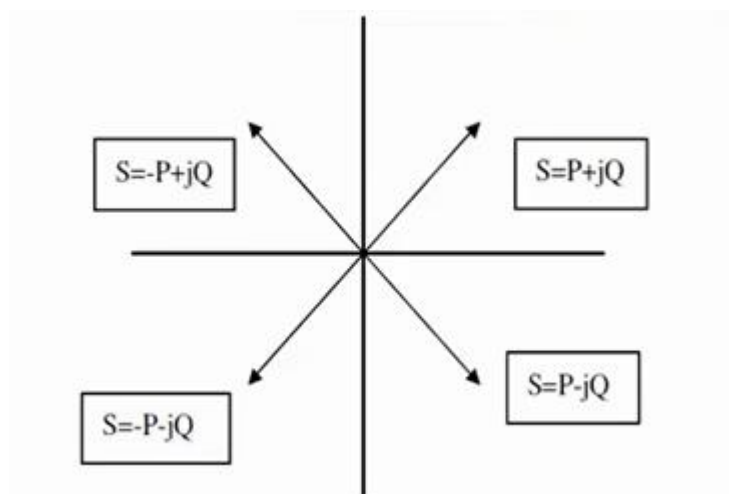
Fonte: IEC 60255 IDMT Relay Characteristics, ANSI IDMT Relay Characteristics

As curvas têm comportamento similar, tanto na norma da IEC quanto na da IEEE, ambas indicam a variação do tempo de disparo com relação ao nível de corrente. A normalmente inversa tem uma inclinação mais suave, ou seja, o tempo de atuação do relê com essa configuração varia de forma menos abrupta, já na curva extremamente inversa a diferença do tempo de atuação é bem maior entre baixos e altos níveis de sobrecorrente.

3.3.2 Relê direcional (67)

Os relês do tipo direcional de sobrecorrente são acionados segundo o sentido do fluxo de corrente ou potência na linha. Para tanto, utiliza TCs e TPs nas três fases do circuito a ser protegido. Em sistemas com a topologia do tipo anel, o fluxo potência e/ou corrente tem mais de uma opção de caminho e direção. Normalmente, o fluxo de corrente, flui no sentido da geração para a carga. Porém, em casos de ocorrência de curto circuito, este sentido pode ser alterado de forma que a fonte de geração do sistema passe a alimentar o curto-circuito por caminhos diferentes daquele que percorria, naturalmente, na ausência do curto-circuito.

Figura 10 – Comportamento do fluxo de potência nos quatro quadrantes



Fonte: Captura de tela, Prof. Luiz Cezar Emanuelli

Dessa forma, a função direcional de sobrecorrente atua quando o sentido do fluxo é contrário ao fluxo normal de potência e/ou corrente do sistema. Essa proteção atua, geralmente, em conjunto com as funções de sobrecorrente temporizada e instantânea. Em casos de sistemas com mais de uma fonte geradora, a inversão de sentido ocorre de forma natural, devido a aspectos próprios da linha. Nestes casos, a função direcional funciona como uma condição de operação das funções 50/51, de acordo com os parâmetros pré-estabelecidos.

3.3.3 Relê de Distância (21)

A base do sistema de proteção são os relês de sobrecarga, porém eles possuem algumas deficiências, como o fato de o relê atuar somente pela leitura de corrente. Além disso, a distância cada vez maior das linhas de transmissão e a complexidade do SEP são atenuantes. Diante disso, algumas desvantagens do relê 50/51 são:

- I. A variação de cargas ou novas gerações ligadas a linha, exigem um novo estudo dos parâmetros e uma readequação das configurações da proteção.
- II. Tempo atuação varia de acordo com a distância entre o equipamento de medição e a falta.
- III. Não diferenciam a sobrecorrente causada por um curto-circuito ou sobrecarga

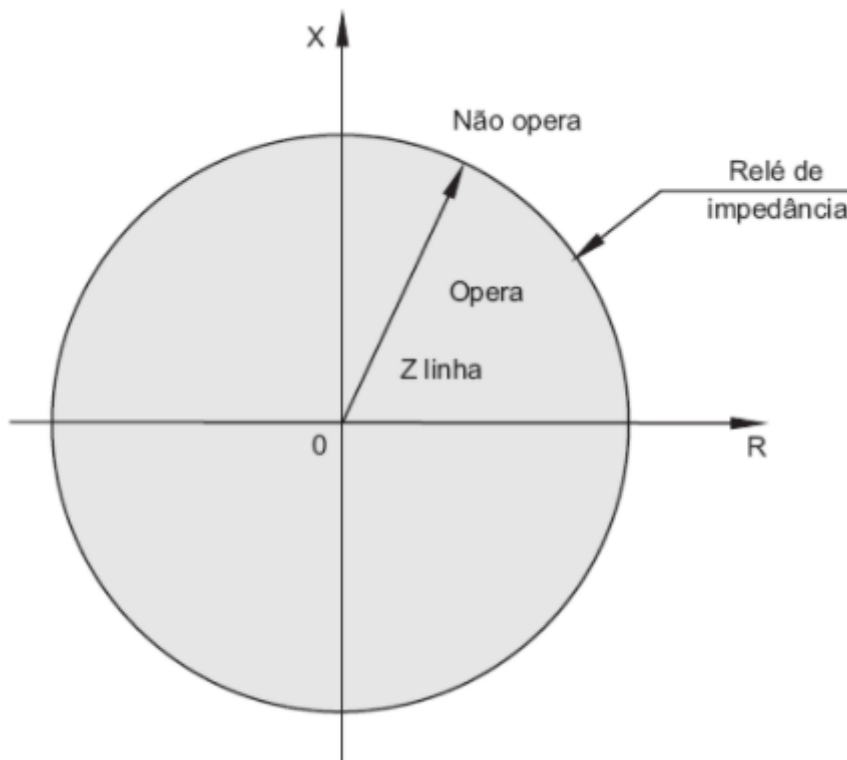
Segundo MAMEDE (2011), “a tensão no ponto de *trip* é praticamente nula, porém, ao se afastar da falta no sentido da fonte ela vai aumentando devido à queda de tensão na linha. O relê de distância processa a tensão aplicada aos TPs e a corrente de falta que circula no mesmo ponto, a partir da lei do OHM, V/I é igual a impedância entre o ponto de medição e o defeito.”

A impedância do condutor é proporcional a distância entre dois pontos, dando origem ao nome do relê. Independentemente dos níveis de tensão ou corrente de falta vistos pelo relê, a impedância será constante. Logo, não sendo afetado por variações de carga ou geração, que é uma das carências das funções 50/51. Outra vantagem, a se evidenciar é a possibilidade de localização do curto circuito dentro de uma zona de proteção.

Os relês de distância são divididos em três tipos principais: de impedância, admitância e reatância. Neste trabalho de conclusão abordar-se-á somente o relê de distância do tipo impedância.

3.3.3.1 Relê de impedância

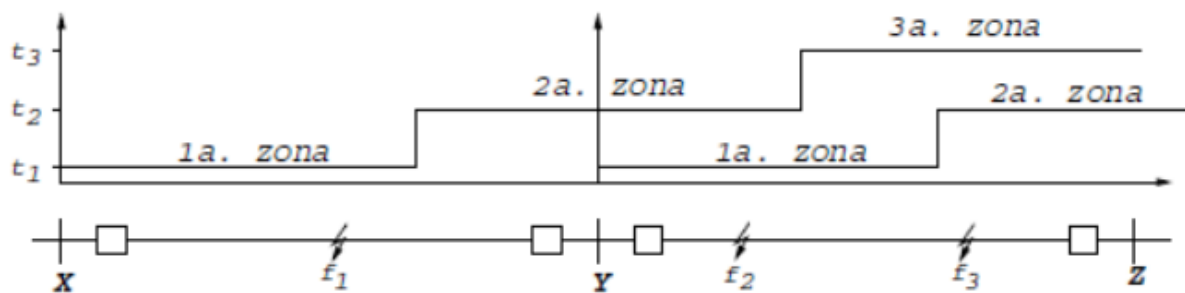
Figura 11 – Atuação da função 21 de impedância



Fonte: MAMEDE, (p. 200)

Atua de acordo com o módulo de impedância vista pelo relê, assim a circunferência formada pelo módulo da impedância forma a área de atuação desse relê, ou seja, o quanto da linha está sob proteção do relê. Normalmente, os relês de distância possuem três zonas de atuação, logo, a primeira zona trabalha dentro de uma faixa da linha, a segunda pegando uma faixa maior, e a terceira maior ainda. Deste modo, viabiliza-se uma melhor coordenação dos dispositivos, além de uma proteção extra, visto que a segunda e terceira zonas, são retaguarda para outros relês conforme pode ser observado pela ilustração da Figura 13.

Figura 12 – Linha radial de transmissão com três zonas de atuação do relê de 21



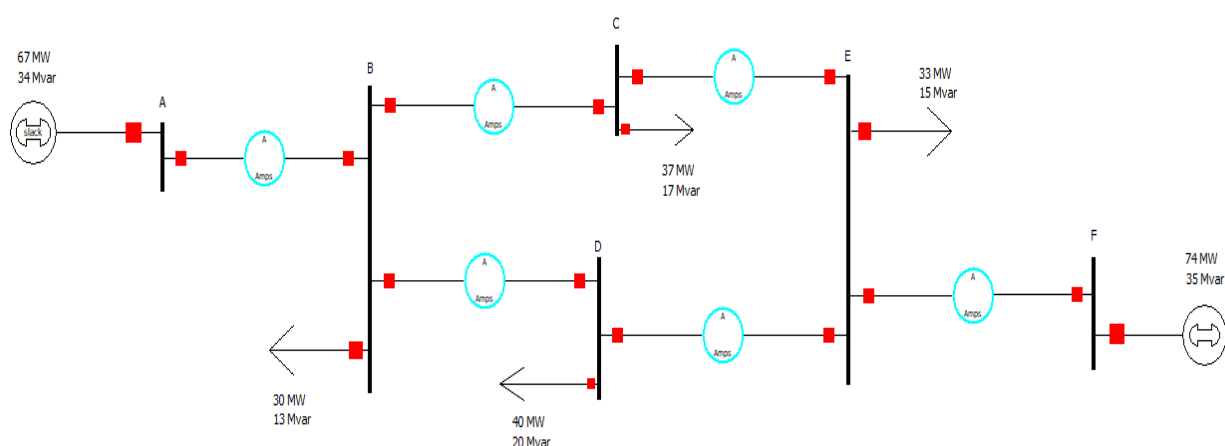
Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos, Capítulo 7, (p. 18)

Quando atuando com a unidade direcional, o relê de distância avalia o ângulo da impedância de falta para identificar se a mesma é a montante ou a jusante do relê e assim ordenar ou não o disparo dos atuadores.

4 SISTEMA DE POTÊNCIA EM ANEL COM DUAS FONTE DE GERAÇÃO

O sistema a ser analisado será composto de seis linhas de transmissão, cada uma sendo protegida por um par de relês e disjuntores, duas fontes de geração situadas em pontos diferentes da rede, seis barras, sendo duas ligadas a geração e quatro barras de carga. A entrada de sinal dos relês será feita por TCs e TPs ligados na linha, o dimensionamento dos TCs e TPs será feito junto com o cálculo das correntes de disparo do sistema, com o auxílio do algoritmo em linguagem python.

Figura 13 – Linha de subtransmissão em anel simulada no Power World



Fonte: Autoria própria

O sistema ilustrado na Figura 14 foi simulado no Power World. Esse *software* necessita de licença, porém seu desenvolvedor disponibiliza uma versão demo, sendo que a partir dessa foi possível analisar o fluxo de potência que circula no SEP, bem como, as correntes nas linhas de transmissão e as correntes de curto-circuito trifásico nas barras e ao longo das linhas.

4.1 Características do sistema

Tabela 1 – Características físicas do sistema

Linhas	Impedância (OHM)	Comprimento (km)
AB	$0.2399 + j1.8720$	6
BC	$5.6250 + j40.625$	125
BD	$4.6340 + j33.4736$	103
CE	$4.3500 + j30.537$	87
DE	$4.7000 + j32.9939$	94
EF	$0.4790 + j3.744$	12

Fonte: Aatoria própria (2021)

Tabela 2 – Características elétricas do sistema.

Barra	Tensão (kV)	Carga (MW/MVAR)	Geração (MW/MVAR)
A	138		$67 + j34$
B	138	$30 + j13$	
C	138	$37 + j17$	
D	138	$40 + j20$	
E	138	$33 + j15$	
F	138		$74 + j35$

Fonte: Aatoria própria (2021)

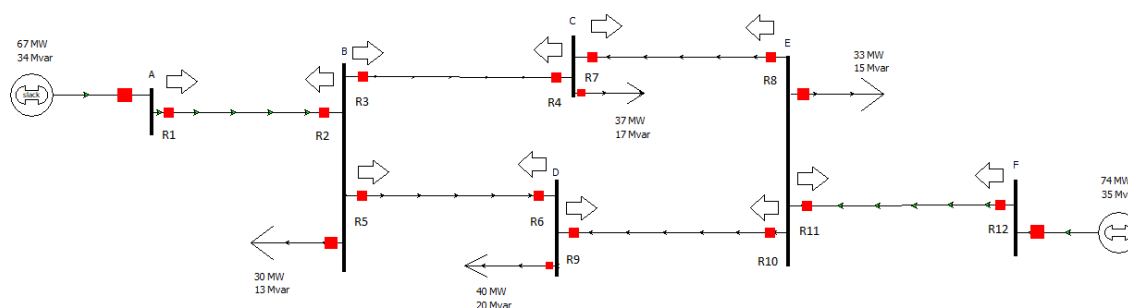
4.2 Estudo de casos

Foram simuladas três situações de funcionamento do sistema já citado, sendo o primeiro caso o estado normal de operação da rede. Já os outros dois simula-se a perda de umas das fontes de geração, acarretadas por falta na linha que conecta o barramento do gerador ao sistema de subtransmissão em anel.

4.2.1 Estado normal de operação do sistema

Todas as linhas, unidades geradoras e cargas em pleno funcionamento

Figura 14 – Simulação das condições normais de operação do sistema



Fonte: Autoria própria

Neste caso, o sentido das correntes é definido pelo fluxo normal de potência dos geradores para as cargas. As setas indicam o sentido de atuação da função direcional.

Tabela 3 – Corrente nas linhas com o sistema operando sem faltas.

lab	314.37
lbc	77.98
lbd	99.37
lce	-96.05
lde	-93.6
lef	-341.23

Fonte: Autoria própria (2021)

Foi definido como sentido de referência para as correntes um fluxo do gerador 1 para o gerador 2, logo para qualquer corrente no sentido oposto foi atribuído um sinal negativo para que o algoritmo reconhecesse o sentido da corrente e fizesse as análises de maneira correta.

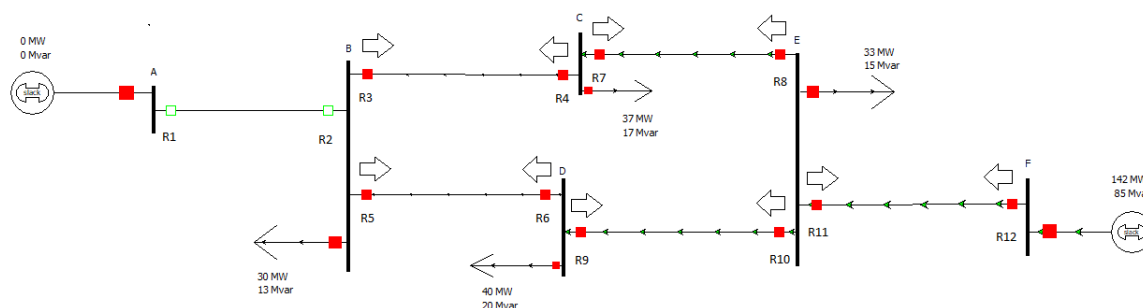
Tabela 4 – Correntes de CC trifásico nas barras

Barra	I _{cc} - trifásico
A	10075.6
B	8742.99
C	3350.65
D	3495.84
E	7813.7
F	10080.8

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.2 Sistema operando sem a fonte g1

Figura 16 – Simulação do Sistema operando com abertura da linha AB



Fonte: Autoria própria

Neste caso, para a simulação, supõe-se que após uma falta na linha AB, a mesma foi desconectada do sistema. Logo toda alimentação do SEP passou a ser realizada somente pelo gerador 2, provocando a mudança de sentido das correntes em algumas linhas conforme é apresentado pelos resultados da Tabela 5.

Tabela 5 – Corrente nas linhas com o sistema sem a linha AB.

lab	0
lbc	-82.15
lbd	-70.59
lce	-265.84
lde	-275.63
lef	-694

Fonte: Autoria própria (2021)

Conforme pode ser notado, a partir da Tabela 5, nessa situação todas as correntes fluem no sentido do gerador 2 para o gerador 1, ou seja, é contrário ao fluxo de referência adotado. Além das mudanças de sentido, a intensidade da corrente que flui através da linha EF aumentou significativamente e isso influenciará diretamente no ajuste das correntes de disparo dos relês que protegem essa linha. Essa situação será debatida mais adiante na seção de resultados e discussões.

Tabela 6 – Corrente de CC trifásico nas barras com o sistema operando sem a linha AB.

Barra	lcc - trifásico
A	8367.4
B	1665
C	2168.73
D	2067.73
E	6271.54
F	8743.15

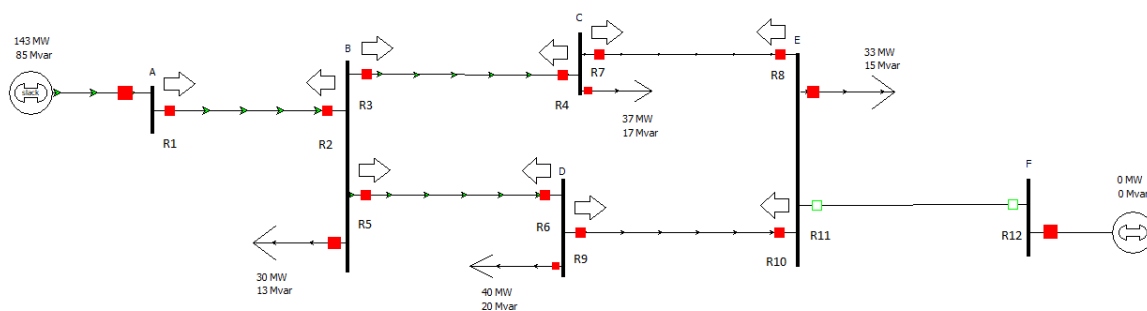
Fonte: Autoria própria (2021)

Na Tabela 6, pode-se notar que mesmo com a linha AB fora de operação há uma corrente de curto-circuito na barra A. Isso se deve ao fato de que essa barra é a barra de referência do sistema (barra *slack*). Vale salientar que barra *slack* é uma barra que serve para o balanço das equações de potência, ou seja, ela é quem equilibra o montante de potência gerada com o montante de potência consumida pelo sistema elétrico, além disso, essa barra é sempre uma subestação que contém

geração nela. No próximo caso, será possível verificar que o mesmo não acontece com a barra F.

4.2.3 Sistema operando sem a fonte g2

Figura 16 – Simulação do Sistema operando com abertura da linha EF



Fonte: Autoria própria

Nessa situação considera-se a abertura do circuito da linha EF, esse caso é análogo ao caso anterior, onde a diferença básica, reside no fato de que ocorre a perda da unidade geradora G2, tornando, dessa forma, G1 a única fonte de alimentação de toda a rede elétrica.

Tabela 7 – Corrente nas linhas com o sistema sem a linha EF.

lab	695.69
lbc	261.98
lbd	296.7
lce	76.21
lde	92.07
lef	0

Fonte: Autoria própria (2021)

Novamente, pode-se observar uma mudança no sentido da corrente das linhas em comparação ao caso normal de operação, onde todas fluem no sentido de G1 para G2 (sentido referência do sistema). Assim como no caso da seção anterior, pode-se

observar também um aumento mais significativo na intensidade da corrente que flui através da linha AB.

Tabela 8 – Corrente de CC trifásico nas barras com o sistema operando sem a linha EF.

Barra	I _{cc} - trifásico
A	8745.41
B	7306.97
C	2005.1
D	2194.97
E	1741.84
F	0

Fonte: Autoria própria (2021)

Neste caso, diferentemente do anterior, não há a presença de corrente de curto circuito no barramento F. Pois, trata-se de um barramento de geração simples, no qual o gerador 2 não mais fornece corrente para a barra. Em consequência disso, não alimenta o curto-circuito simulado na linha EF.

4.3 Cálculo das correntes de disparo e módulo da impedância do relê 21

Os cálculos para os ajustes de parâmetros dos relês estudados são feitos por meio de um algoritmo de análise de dados desenvolvido em linguagem *Python*.

4.3.1 Corrente de *Trip* da Função Direcional Temporizada (67/51)F

A corrente de *trip* da função (67/51) F é dada pela Equação 4.1:

$$\frac{K \times I_n}{RTC} < I_{trip} < \frac{K \cdot I_{cc3\phi 80\%}}{RTC} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde,

- I_{trip} = corrente de disparo do relê
- K = coeficiente de sobrecarga permissível
- I_n = corrente na linha
- RTC = relação de transformação de corrente (valor tabelado como já citado nos capítulos anteriores)

Normalmente os curtos-circuitos são de intensidades muito maiores que a tensão nas linhas e são protegidos pela função instantânea da proteção, por isso o ideal é que a I_{trip} seja o mais próximo possível da corrente admissível da rede.

4.3.2 Corrente de *trip* da função direcional instantânea (67/50)f

A corrente de *trip* da função (67/50) F é dada pela Equação 4.2:

$$\frac{4 \times I_n}{RTC} < I_{trip} > \frac{K \cdot I_{cc3\phi 80\%}}{RTC} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde,

- $4 \times I_n$ = corrente da magnetização do transformador (caso a corrente de *trip* seja menor que esse valor, o relê irá atuar indevidamente)
- RTC = relação de transformação de corrente
- $I_{cc3\phi 80\%}$ = corrente de curto-circuito trifásico a 80% do comprimento total linha
- I_{trip} = corrente de disparo da função (67/50) F

A corrente de curto-circuito a 80% do comprimento total da linha foi usada na intenção de evitar o disparo indevido de dois relês no caso de uma falta a 100% da linha, ou seja, na próxima barra, assim, caso ocorra um curto nesta faixa da linha que não está dentro da proteção instantânea do relê, a proteção temporizada deve atuar.

4.3.3 Módulo da impedância vista pelo relê de distância

O módulo da impedância é dado pela Equação 4.3.

$$Z_{rel\acute{e}} = Z_{linha} \times d \quad \text{Equação 4.3}$$

onde,

- $Z_{rel\acute{e}}$ = módulo da impedância vista pelo relê
- Z_{linha} = módulo da impedância da linha a ser protegida
- d = distância da linha a ser protegida em %

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos mediante o tratamento dos dados coletados através das simulações de funcionamento do sistema em estudo.

5.1 Correntes de disparo do relê

Tabela 9 – Corrente de ajuste da função 67 temporizada.

Relê	Iajuste51F
r1	5.22
r2	0
r3	5.24
r4	4.93
r5	5.93
r6	5.65
r7	4.57
r8	5.32
r9	5.52
r10	5.51
r11	0
r12	5.2

Fonte: Autoria própria (2021)

Na tabela 9 encontram-se os valores da corrente de disparo da função temporizada da unidade direcional dos relês. Note que os relês “R2” e “R11” possuem unidade temporizada da função 67, por não haver fluxo de corrente no mesmo sentido que o definido para sua atuação, isso porque a corrente flui sempre da alimentação para a rede, e junto a barra *swing* não há nenhuma carga.

As correntes de ajuste foram calculadas para os piores níveis de sobrecarga admissíveis para linha, como citado anteriormente, nos casos em que ocorre a perda de uma das unidades geradoras do sistema, a corrente da linha do alimentador em funcionamento é elevada e a não consideração desse fato acarretaria na atuação do relê que protege a linha, conseqüentemente a retirando de operação e deixando toda rede sem energia.

Tabela 10 – Corrente de ajuste da função 67 de tempo instantâneo.

Nome	Iajuste50F
r1	45.98
r2	19.68
r3	8.74
r4	11.31
r5	8.97
r6	13.37
r7	8.60
r8	10.34
r9	9.09
r10	9.41
r11	19.85
r12	40.49

Fonte: Autoria própria (2021)

Na tabela 10 estão apresentadas as correntes de disparo dos relês para unidade instantânea da função 67, note que agora todos os relês possuem um parâmetro, isso porque na função 50F o que está sendo alimentado é um curto-circuito.

Tabela 11 – Corrente de curto-circuito dentro da zona de atuação dos relês.

linha	AB (R1)	BC (R3)	BD (R5)	CE (R7)	DE (R9)	EF (11)
Icc75% (s)	46.378875	31.8241667	36.7646667	48.609	52.6695	19.93525
Icc50% (s)	48.45775	42.7858333	48.533	55.945	61.7165	20.36475
Icc25% (s)	50.7303125	64.8408333	71.0518333	64.562	73.0275	20.812875

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 12 – Corrente de curto-circuito dentro da zona de atuação dos relês.

linha	AB (R2)	BC (R4)	BD (R6)	CE (R8)	DE (R10)	EF (12)
Icc75% (s)	20.1445	72.519	94.962	62.0756667	66.29416667	48.47975
Icc50% (s)	19.93275	59.4025	80.196	48.7416667	46.374	44.490188
Icc25% (s)	19.725375	49.3855	68.234	37.6651667	35.57383333	41.104375

Fonte: Autoria própria (2021)

As tabelas 11 e 12 apresentam as correntes de curto-circuito lidas pelo secundário do TC dos respectivos relês, os curtos foram simulados em três pontos diferentes da linha, dentro da zona de atuação do relê.

Comparando os valores das simulações de faltas com a corrente de disparo dos relês entregues pelo algoritmo, é visto que a parametrização é eficiente, pois para cada caso simulado, a corrente de falta foi maior que a de disparo, causando a atuação instantânea do relê para extinção da falha no circuito.

5.2 Módulo da impedância protegida pelo relê de distância

Tabela 13 – Módulo da impedância das linhas a serem protegidas.

Nome	Zr
r1	1.51
r2	1.51
r3	32.80
r4	32.8
r5	27.02
r6	27.02
r7	24.66
r8	24.66
r9	26.47
r10	26.47
r11	3.01
r12	3.01

Fonte: Autoria própria (2021)

Na Tabela 13 observa-se o módulo da impedância sob proteção do relê de distância. A seguir será comparado o módulo das impedâncias de falta com os valores de ajustes dos relês para avaliar a atuação dos mesmos e a situação de *trip*.

5.2.1 Simulação de validação do relê de distância

Tabela 14 – Módulo da impedância de surto processada pelo relê de distância em OHMs

linha	AB (R1)	BC (R3)	BD (R5)	CE (R7)	DE (R9)	EF (11)
Zcc75%	2.45	53.27	43.9	40.06	43.29	4.9
Zcc50%	0.21	35.51	29.26	26.71	28.86	1.81
Zcc25%	0.817	17.75	14.63	14.08	14.43	0.91

Fonte: Aatoria própria (2021)

Tabela 15 – Módulo da impedância de surto processada pelo relê de distância em OHMs

linha	AB (R2)	BC (R4)	BD (R6)	CE (R8)	DE (R10)	EF (12)
Zcc75%	0.817	17.75	14.63	14.08	14.43	0.91
Zcc50%	1.63	35.51	29.96	26.71	28.86	1.81
Zcc25%	2.45	53.27	43.9	40.06	43.29	4.9

Fonte: Aatoria própria (2021)

Comparando os resultados obtidos nas simulações dentro da zona de atuação dos relês, com os módulos de impedância de atuação, pode-se notar que para as faltas que ocorrem nos pontos próximos aos relês, a função 21 atua corretamente segundo os módulos encontrados pelo algoritmo. Porém ao se afastar dos relês, a impedância de *trip* aumenta de modo a sair da zona de atuação virtual, mesmo estando dentro das zonas físicas de atuação da proteção. Logo, há uma defasagem entre os parâmetros obtidos para a atuação da função do relê de distância e a impedância real que o mesmo deveria estar protegendo.

6 CONCLUSÃO

Devido aos dados levantados através das simulações de faltas nas linhas juntamente com as referências bibliográficas utilizadas ao longo do estudo, percebe-se que é possível realizar um ajuste mais preciso dos parâmetros de atuação da função direcional de corrente, instantânea e temporizada. As diferentes situações trazidas neste estudo permitem uma visualização das possíveis falhas na atuação do sistema.

Por se tratar de um trabalho de conclusão de curso, o cunho central do estudo é promover a discussão e levantar questões acerca da temática escolhida, nesse caso, o sistema de proteção em linhas de transmissão, e as funções aqui abordadas.

6.1 Considerações finais

Para a função direcional de corrente temporizada, foi possível observar que a perda de uma das gerações, poderia ocasionar o desligamento de todo o sistema em caso de uma falta nas linhas que as conectam ao SEP. Nessa situação, o gerador restante, é o responsável por alimentar toda a rede, injetando um nível maior de corrente em sua linha de transmissão. Consequentemente, a proteção deve estar preparada para suportar essa corrente, não promovendo o desligamento completo do sistema.

Nos casos de curto-circuito, a função direcional se mostra fundamental para a seletividade do sistema, tendo como função principal a atuação apenas em casos de falha dentro da linha que o relê está protegendo, logo, faltas nas linhas conectadas a mesma barra não promoverão a atuação e o desligamento de linhas não faltosas.

Os resultados dos ajustes do relê de distância entregues pelo algoritmo, por sua vez, não se mostraram eficientes para a proteção das linhas, onde os testes feitos dentro da zona de proteção do relê, não promoveram a atuação dos mesmos, visto que o módulo da impedância de falta calculado foi maior do que o ajustado para a proteção do relê, apesar de fisicamente estar dentro da zona de proteção.

Isso ocorreu devido à complexidade do processamento dos sinais do relê de distância, aliado a outros fatores, como a topologia do sistema analisado, os tipos de

falta simulados e o método de ajuste adotado. Sistemas de comunicação entre os terminais da rede podem ser uma opção desejável para aumentar a confiabilidade operacional do sistema de proteção analisado.

As simulações, bem como os dados aqui usados, estão abertas para trabalhos futuros. Sendo assim, sugere-se como trabalho futuro realizar a mudança no método de ajuste da função 21 ou alguma compensação no sistema que reduza o erro, buscando um resultado mais assertivo. Outra sugestão seria a coordenação das funções de tempo instantânea e temporizada do relê direcional de sobrecorrente, promovendo ajustes nas curvas de tempo inverso e ajustando as correntes de disparo para que os relês atuem como retaguarda dos demais.

REFERÊNCIAS

- ANEEL – **Curso Básico EAD: Fundamentos do Setor Elétrico**. Prod. LABTIME, UFG. http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl12.html
- Autor não identificado, **Proteção de Sistemas Elétricos**, Capítulo 7 – **Proteção de Linhas de Transmissão**. http://www.eletr.ufpr.br/p/ media/professores:mateus:te_131 - capitulo_7.pdf
- Autor não identificado, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, **Introdução a proteção de sistemas elétricos**. http://dedmd.com.br/validacao/2019_1/PROTE%C3%87%C3%83O%20DO%20SISTEMA%20EL%C3%89TRICO%20DE%20POT%C3%8ANCIA/Unidade%201/s1/
- ARAGÃO FILHO, Wilson Correa de, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência** – ed. do Autor, 1.ed, Vitória – ES, 2014.
- CAMINHA, Amadeu C., **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos** - ed. Edgard Blucher LTDA., São Paulo, 1977.
- Emanuelli, Eng. Luis Cesar Emanuelli
<https://www.youtube.com/channel/UCVDt7DzFvmAU6Cd3oejraXg>
- FRONTIN, S. O. **Equipamentos de alta tensão - prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília: Elsevier, 2013
- HOROWITZ, Stanley H. & PHADKE, Arun G., **Power System Relaying** - ed. Research Studies Press Ltd, second edition ,
- MAMEDE, João Filho & MAMEDE, Daniel Ribeiro, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência** – ed. LTC, Rio de Janeiro – RJ, 2011.
- Baldock, 1995.
- ONS – **O SIN em número**. <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>
- PINTO, Milton de Oliveira, **Energia Elétrica: Geração, Transmissão e Sistemas Interligados**, ed. LTC, 1.ed., Rio de Janeiro – RJ, 2014.
- VASCONCELOS, Felipe Matos de, **Geração, transmissão e Distribuição de Energia elétrica**, Editora e Distribuidora Educacional SA, Londrina – PR, 2017.

