

APLICAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO RELÉ DE DISTÂNCIA ANSI 21 EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

SILVA, Eduardo Marinho da¹
Centro Universitário Academia – UniAcademia
MAGRI, Luiz Paulo²
Centro Universitário Academia – UniAcademia

Linha de pesquisa: Sistema de Energia Elétrica

RESUMO

Este trabalho abordará o assunto sobre a filosofia de proteção, um breve contexto sobre a coordenação das funções de proteção elétrica utilizada na Linha de Transmissão, sendo a aplicabilidade do relé de distância, número de função ANSI 21, em conformidade com a ABNT NBR 5175 - Números das funções dos dispositivos de manobra, controle e proteção de sistemas de potência - Codificação. Esse equipamento apresenta grande riqueza de informações em suas iterações eletromagnéticas e possui significativa importância para o suprimento e energia ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), daí a necessidade de um sistema de proteção adequado, confiável e corretamente ajustado. Nesta pesquisa, de forma mais detalhada, essa filosofia de proteção e faixa de ajustes, mencionando as causas que levam à sua utilização, sem se ater a nenhum modelo de função ou sistema de proteção particular. Por fim, são apontadas na conclusão, as principais questões que merecem maior enriquecimento por parte daqueles que pretendem desenvolver ainda mais nos estudos desta importante área de engenharia.

Palavras-chave: Proteção. Linha de transmissão. Relé Função 21.

¹ Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia - UniAcademia.

² Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - UniAcademia.

1 INTRODUÇÃO

Os relés são dispositivos compactos ligados aos sistemas elétricos, com a finalidade de detectar condições inadequadas para o circuito de monitoramento. Portanto eles devem possuir características tais que venham garantir, aos sistemas elétricos protegidos, alto grau de confiabilidade reduzindo danos materiais e minimizando danos pessoais (ANDERSON, 1999).

Para isso é fundamental que sejam mantidos em condições perfeitas para que possam atuar sempre que for necessário, de acordo com (FRAZÃO, 2019). Para uma empresa de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, a diretriz principal é, sem dúvida alguma, a manutenção da continuidade do fornecimento de energia, vindo depois a preocupação com a qualidade do produto oferecido. Desta maneira estarão satisfeitos tanto o consumidor quanto o fornecedor. (HOROWITZ & PHADKE, 2014).

Um dos requisitos mais importantes para se atingir tais objetivos é um bom sistema de proteção para os equipamentos que compõem o sistema elétrico.

Em outras palavras, com um bom sistema de proteção que custa em torno de 1% do valor do investimento total do sistema elétrico, se consegue ótimos resultados no que se refere a manutenção da continuidade dos serviços isto é: um mínimo de interrupções na mesma área servida, combinado a reduzidas avarias dos equipamentos elétricos, segundo (CAMINHA, 1977).

Com uma evolução progressiva desde o início do século passado, onde tínhamos proteções baseadas em relés eletromecânicos. É de conhecimento que o dispositivo tinha a sua origem em relés de sobrecorrente baseados no princípio de indução. Data o seu desenvolvimento em 1908, com o objetivo de uma proteção diferencial de corrente, neste cenário segue uma sequência cronológica, constituindo no ano de 1930, o desenvolvimento da proteção baseada no princípio de distância.

Segundo Mamede Filho (2017),

Na década de 1930, surgiram os primeiros relés de proteção com tecnologia à base de componentes eletrônicos, utilizando semicondutores. Os relés eletrônicos ou estáticos não alcançaram aceitação imediata no mercado, devido à forte presença dos relés eletromecânicos, que já nessa época eram fabricados com tecnologia de alta qualidade, robustez, praticidade e competitividade. Eram e ainda hoje são verdadeiras peças de relojoaria de precisão. Os relés eletromecânicos e eletrônicos são considerados

dispositivos burros, enquanto os relés digitais incorporam todas as facilidades que a tecnologia dos microprocessadores oferece, além de preços competitivos e confiabilidade. (MAMEDE FILHO,2017).

Desta forma, dando ênfase ao sistema de proteção para o transporte de energia elétrica, haverá o desenvolvimento de estudos e projetos, que tendem a necessidade dos requisitos básicos de um sistema de proteção, de acordo com Kindermann (1992), sendo:

- a) Velocidade – tempo necessário para o disparo da proteção de acordo com o que foi pré-definido;
- b) Seletividade e Coordenação – capacidade da proteção em isolar o defeito com as menores fronteiras possíveis, impedindo que a falta interfira em outros trechos da rede elétrica;
- c) Segurança – redução dos danos oriundos da falta, comumente curtos-circuitos, pela atuação da proteção, reduzindo o risco oferecido a qualquer pessoa em contato ou próxima ao SEP³;
- d) Sensibilidade – garantia de operação da proteção em qualquer situação anormal para o qual foi projetado;
- e) Confiabilidade – convicção da operação precisa e correta da proteção unicamente nas condições para o qual foi projetado.

2 LINHA DE TRANSMISSÃO

A conexão ao sistema de transmissão pode incluir uma linha de transmissão curta da subestação coletora à subestação no ponto de interconexão com o sistema de transmissão existente onde podemos visualizar a representação de uma linha de transmissão trifásica, de acordo com a figura 01 e o equivalente monofásico na figura 2. Normalmente, esta linha terá vários quilômetros de extensão, e cabos de fibra óptica podem ser incluídos para comunicações seguras e confiáveis entre estações (HOROWITZ,PHADKE,2014). Conseqüentemente, as linhas de transmissão são extremamente vulneráveis às descargas atmosféricas, queimadas, vandalismo e podendo ocorrer em determinadas condições, sobretensões elevadas no sistema,

³ Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é o conjunto constituído por centrais elétricas, subestações de transformação e de interligação, linhas e receptores, ligados eletricamente entre si. São grandes sistemas de energia que englobam geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

apresentando como consequências, condições isoladas ou agregados a outros fatores (KINDERMANN,1992).

De acordo com Mamede Filho (2017) as linhas de transmissão tem a responsabilidade de transportar grandes fluxos de potências, pela diversidade de linhas de transmissão, até as subestações abaixadoras, onde estão localizadas às proximidades dos grandes centros de consumo.

Conseqüentemente, houve a necessidade de buscar critérios para determinarmos as linhas de transmissão, onde podemos avaliarmos nas tabelas 1 e 2, quanto aos princípios de classificação e as formas técnicas que as mesmas são submetidas, podemos complementá-las distinguir estas ferramentas, conforme um dos procedimentos que se segue:

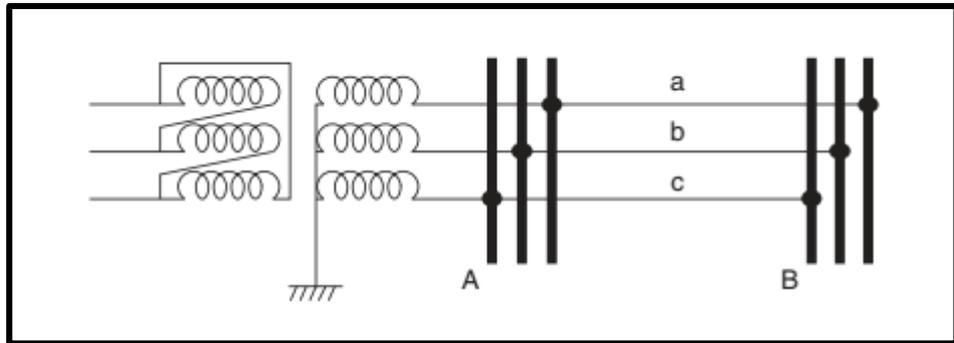
As linhas de transmissão podem ser classificadas em diferentes níveis de tensão. Os procedimentos de Rede, documento preparado pelo Operador Nacional do Sistema - ONS⁴, consideram linhas de transmissão aquelas cujas tensões são 230,345,500 KV e acima que compõem à Rede Básica ⁵do Sistema Interligado Nacional - SIN. As linhas de tensões de 69, 88 e 138 KV são classificadas como de distribuição. Independentes dessas classificações, o estudo aqui desenvolvido abrangerá as linhas de transmissão com tensões iguais e superiores a 69 KV (MAMEDE FILHO,2017).

Além disso, para Kindermann (1992),

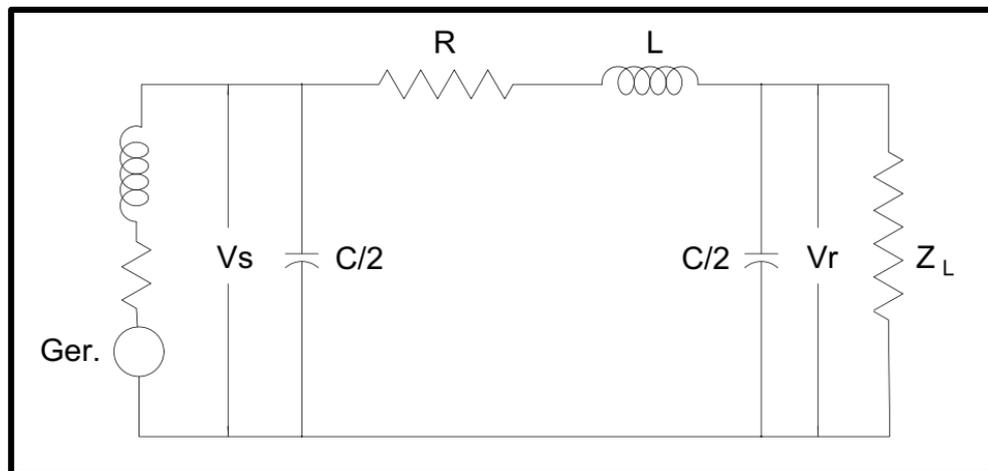
A impedância da linha de transmissão fica, predominante, indutiva com o aumento do nível de tensão. Deste modo, o ângulo de defasagem da corrente de curto circuito tem ângulos de defasagem entre 20° e 85°, dependendo do nível de tensão. As defasagens típicas das correntes de curto-circuito são: 20° a 45° em linhas de transmissão de 7,2 a 23KV; 45° a 75° em linhas de transmissão de 23 a 69 KV; 60° a 80° em linhas de transmissão de 69 a 230KV; 75° a 85° em linhas de transmissão maior que 230 KV (KINDERMANN,1992).

⁴ Operador Nacional do Sistema (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Instituído como uma pessoa jurídica de direito privado, sob a forma de associação civil sem fins lucrativos, o ONS foi criado em 26 de agosto de 1998, pela Lei nº 9.648, com as alterações introduzidas pela Lei nº 10.848/2004 E regulamentado pelo Decreto nº 5.081/2004.

⁵ Instalações de transmissão integrantes do SIN, classificadas segundo regras e condições estabelecidas pela ANEEL.

Figura 1 – Representação Linha de Transmissão.


Fonte: Adaptada Horowitz, Phadke (2014).

Figura 2 – Equivalente monofásico


Fonte: Adaptada Stevenson (1986).

Tabela 1 – Linha de Transmissão Curta

LINHA DE TRANSMISSÃO CURTA	
Tensão de Linha (VL)	Comprimento Máximo (L)
$VL < 150\text{kV}$	80km
$150\text{kV} \leq VL < 400\text{kV}$	40km
$VL \geq 400\text{kV}$	20km

Fonte: Adaptada Kindermann (1997).

Tabela 2 - Linha de Transmissão Média

LINHA DE TRANSMISSÃO MÉDIA	
Tensão de Linha (VL)	Comprimento Máximo (L)
$VL < 150\text{kV}$	$80\text{km} \leq L \leq 200\text{km}$
$150\text{kV} \leq VL < 400\text{kV}$	$40\text{km} \leq L \leq 200\text{km}$
$VL \geq 400\text{kV}$	$20\text{km} \leq L \leq 100\text{km}$

Fonte: Adaptada Kindermann (1997).

3 TRANSFORMADORES DE CORRENTE E DE POTENCIAL

Os relés do sistema de proteção são alimentados por transformadores de corrente e de potencial.

Esses transformadores promovem o isolamento dos circuitos de alta tensão e também alimentam os relés com grandeza (corrente e tensão) proporcionais aos vetores primários (KINDERMANN,2005). A relação de transformação das correntes e tensões dos equipamentos de potência, são convertidos por esses dispositivos, que tem a capacidade de reduzir a níveis necessários, por dois motivos: a baixa intensidade de excitação vem a garantir um menor custo e as dimensões menores na confecção destes instrumentos, desta forma é necessário que um transformador de corrente consiga replicar em seu secundário uma corrente que terá uma capacidade duplicada a corrente de origem com a maior fidelidade possível (STEVENSON,1986).

3.1 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

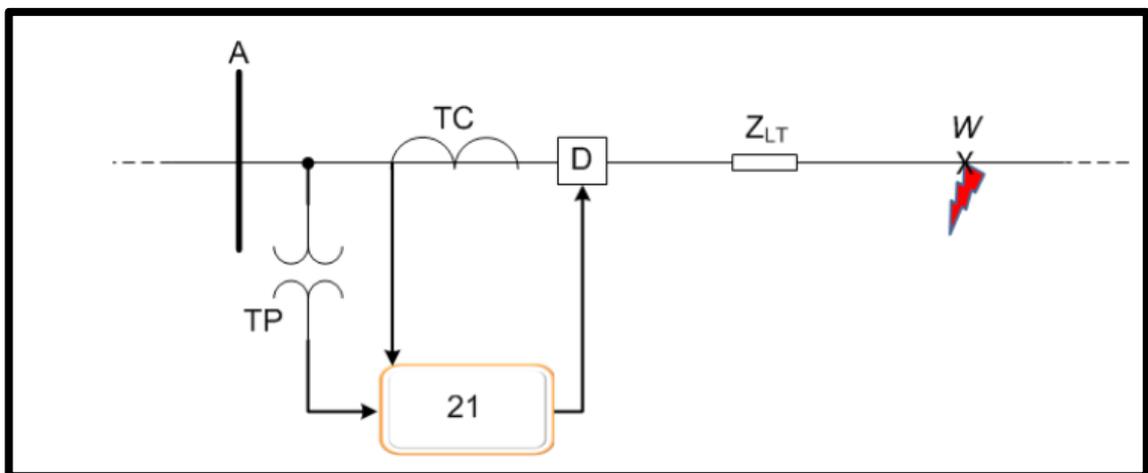
Dispositivo com a finalidade de abaixar o nível de tensão a um equipamento com a característica de medição, proteção e controle em contrapartida a um Transformador de Potencial (TP), deverá reproduzir em seu secundário uma tensão com a relação de suas espiras com o menor erro possível, onde caracteriza o objetivo com a função de transferirmos uma pequena amostragem da tensão do sistema que está sendo aferido do sistema elétrico (KINDERMANN,2005). Os TP, são dispositivos que transferem a capacidade de medição e proteção, com a finalidade de um trabalho dentro dos aspectos os quais foram construídos para o funcionamento, com o menor erro admissível, onde estabelecemos nessa relação de transformação, (KINDERMANN,2005). Esses instrumentos, conforme podemos perceber nas figuras 5 e 6, com uma empregabilidade nos sistemas de medição e proteção da energia elétrica, lembramos que o circuito secundário de TP deve ser galvanicamente isolado e separado do primário, com o extremo objetivo de proporcionar aos operadores destes dispositivos conectados ao TP, de acordo com (MAMEDE FILHO,2017).

3.2 TRANSFORMADOR DE CORRENTE

De acordo com Caminha (1977), os Transformadores de Corrente (TC), destinam-se a evitar a conexão direta de medidores e relés, nos circuitos de corrente

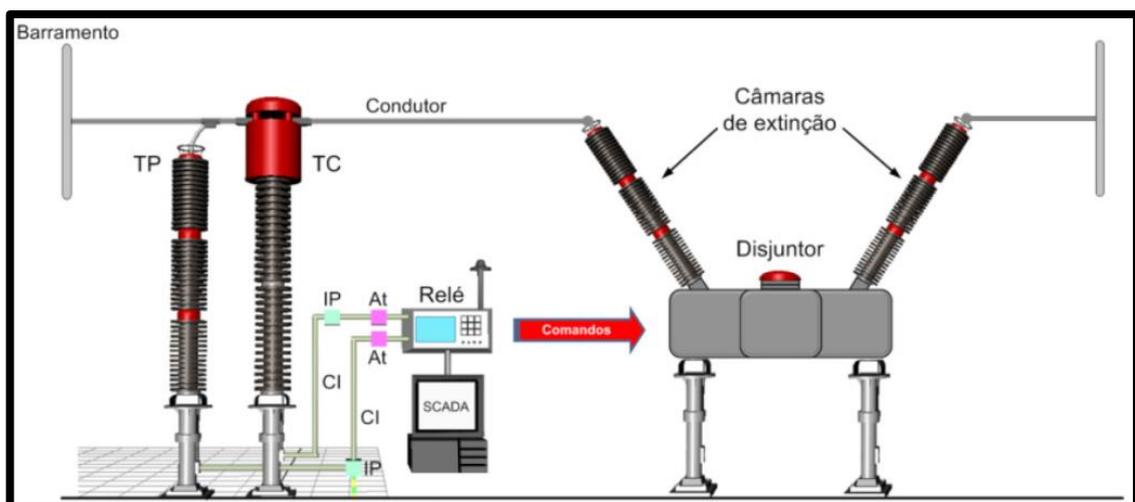
alternada de alta tensão, bem como adaptar a grandeza a ser medida às faixas usuais de aparelhagem. É um transformador destinado a reproduzir proporcionalmente em seu circuito secundário a corrente de seu circuito primário, conforme podem ser observadas nas figuras 3 e 4, com sua posição fasorial mantida, conhecida e adequada para o uso em instrumentos de medição, controle e proteção, de acordo com (KINDERMANN,2005)

Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema radial.



Fonte: Adaptada Frazão (2019).

Figura 4 - Esquemático das conexões entre dispositivos de proteção



Fonte: Adaptada Frazão (2019).

4 RELÉ DE PROTEÇÃO

De acordo com as diretrizes da ABNT⁶, o relé de proteção é um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento ou do circuito em que ele está ligado, ou em outro equipamento ou circuito associado. São dispositivos quase cerebrais que monitorando as grandezas com os quais são alimentados, onde estão em constante vigilância sobre a atuação do sistema, detectando as falhas que nele se ocasionem. Outras normas definem o relé de proteção como um dispositivo cuja função é detectar falhas nas linhas ou equipamentos, perceber perigosas ou indesejáveis condições do sistema e iniciar convenientes manobras de chaveamento ou dar aviso adequado.

Tendo como uma de suas principais características, a realização em consequência da diferenciação de uma falta ou perturbação dentro das limitações de sua capacidade de supervisionar, definido e estabelecido em sua zona de proteção e todas as demais, direcionando desta forma a sua concepção para o acionamento de disjuntores associado ao processo de interrupção imediata, das possíveis falhas em seus limites de proteção, garantindo de maneira eficaz e seletiva, a segurança contra atuações que porventura possam aparecer fora das zonas que estão sendo monitoradas (STEVENSON,1986).

4.1 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

De acordo com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5175:2014, a designação numérica de uma função pode definir o papel realmente desempenhado pelo dispositivo em um equipamento ou em um conjunto, ou pode se referir a uma grandeza elétrica ou não elétrica à qual o dispositivo é sensível, de acordo com a tabela 3.

O objetivo da função é ajustar o desempenho ou as configurações do relé às mudanças nas condições do sistema. Pode ser definido da seguinte forma: “Filosofia

⁶ A ABNT é o Foro Nacional de Normalização por reconhecimento da sociedade brasileira desde a sua fundação, em 28 de setembro de 1940, e confirmado pelo governo federal por meio de diversos instrumentos legais. Entidade privada e sem fins lucrativos, a ABNT é membro fundador da International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização - ISO), da Comissão Panamericana de Normas Técnicas (Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas - Copant) e da Asociación Mercosur de Normalización (Associação Mercosul de Normalização - AMN). Desde a sua fundação, é também membro da International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional - IEC).

de proteção que permite e procura fazer ajustes automáticos em várias funções de proteção para torná-las mais sintonizadas com as condições prevalentes do sistema, segundo (DAS,2018).

De acordo com a ABNT NBR 5175/2014,

Em alguns casos, pode haver necessidade de mais uma opção para se determinar o número de função a ser atribuído a um determinado dispositivo. Nesses casos, é recomendado escolher sempre a alternativa que seja de interpretação a mais restrita possível, de modo a identificar mais precisamente o dispositivo.(ABNT NBR 5175:2014)

Tabela 3 – Parte de Números das funções

FUNÇÕES	NÚMERO ANSI
Proteção de Distância	21/21N
Check de Sincronismo	25
Energização sob Falta (Switch Onto Fault)	50LP
Relé de sobrecorrente temporizado	51
Disjuntor CA	52
Sobretensão	59
Sobrecorrente Direcional de Neutro	67/67N
Teleproteção	77/85
Perda de Sincronismo	78
Religamento Automático	79
Relé de sub/sobrefrequência	81
Relé auxiliar de bloqueio	86
Relé de proteção diferencial	87

Fonte: Adaptada ABNT NBR 5175:2014.

4.2 RELÉ DE DISTÂNCIA

O relé de distância tem como principal característica de funcionamento, comparar a tensão e a corrente, onde busca através destas formas uma concepção técnica para a obtenção da relação dessas grandezas elétricas, sendo que este método dependerá da metodologia de construção de cada fabricante, segundo (P.M. ANDERSON,1999).

De acordo com Kindermann (2005), os ajustes e a coordenação dos relés de sobrecorrente que atuam na proteção de um sistema elétrico, modifica se houver mudança na configuração da rede. Isso implica num problema em relação à operação

do sistema que está sempre fazendo manobras para garantir a continuidade e qualidade do fornecimento da energia elétrica.

Para Kindermann (2005),

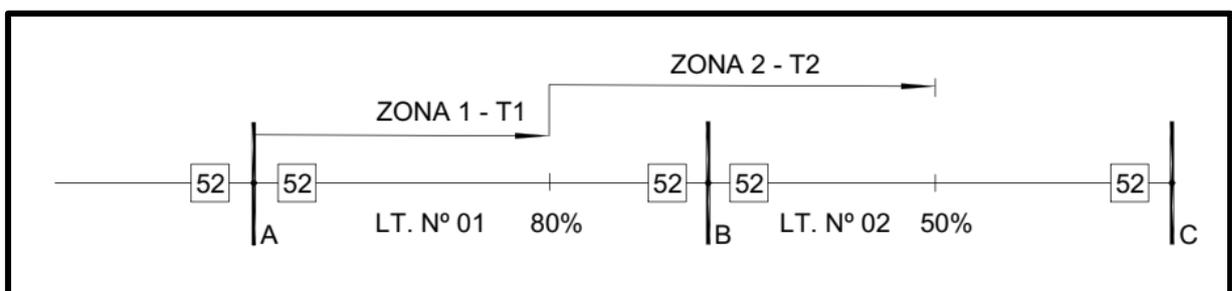
“O relé de distância supre deficiências dos relés anteriores, e produzem uma proteção fácil de ajustar e coordenar. O relé de distância opera medindo o parâmetro de linha de transmissão até o ponto do curto-circuito ou da carga” O relé de distância recebeu este nome genérico, devido a sua filosofia de funcionamento se basear na impedância, admitância ou reatância vista pelo relé. Como esses parâmetros são proporcionais à distância, daí o nome do relé. Na verdade, o relé vê o parâmetro da linha ou sistema e não a distância propriamente dita (KINDERMANN,2005).

E segundo Hewitson, Brown e Ramesh (2005),

Um relé de distância, como o próprio nome indica, tem a capacidade de detectar uma falha dentro de uma distância pré-definida ao longo de uma linha de transmissão ou cabo de alimentação de sua localização. Cada linha de energia tem uma resistência e um reativo por quilômetro relacionado ao seu projeto de construção, de modo que sua impedância total será função de seu comprimento ou distância. Um relé de distância, portanto, analisa a corrente e a tensão e compara essas grandezas com base na lei de Ohm (HEWITSON; BROWN; RAMESH,2005).

De acordo com a figura 5, para assimilarmos o entendimento e compreensão do conceito de aplicação do relé de distância, vamos partir do pressuposto que o relé esteja localizado na Barra A, alcança em 1ª zona 80% da impedância da LT nº 1 ou 80% da distância entre a Barra A e B, e alcança em 2ª zona 50% da LT nº 2, de acordo com (HOROWITZ,2014).

Figura 5 – Faixas de Atuação Relé de Distância



Fonte: Fonte Adaptada Kindermann (2005).

De acordo com a configuração estabelecida de proteção atribuída, haverá a necessidade que o dispositivo atue dentro dos limites parametrizados de sua

instalação e com a possibilidade de proteção sobre qualquer uma das linhas relacionado aos ajustes efetuados no dispositivo que esteja protegendo. Entende-se, que o relé atue para ocorrências de uma certa distância de sua localização e supervisione em condições de trabalho, conseqüentemente é esperado que estas equações, possam ser desenvolvidas, de acordo com (MAMEDE FILHO,2017), com as seguintes conjuntos de fórmulas:

$$Z_c = R_c + jX_c$$

$$R_c = \frac{3 \times P \times V^2}{P^2 + Q^2}$$

$$X_c = \frac{3 \times Q \times V^2}{P^2 + Q^2}$$

Z_c _ impedância da carga da linha de transmissão, em Ω .

R_c _ resistência da carga da linha de transmissão, em Ω .

X_c _ reatância da carga da linha de transmissão, em Ω .

P _ potência ativa que flui pela linha de transmissão.

Q _ potência reativa que flui pela linha de transmissão.

4.2.1 Representação das características das Unidades – Plano Rx

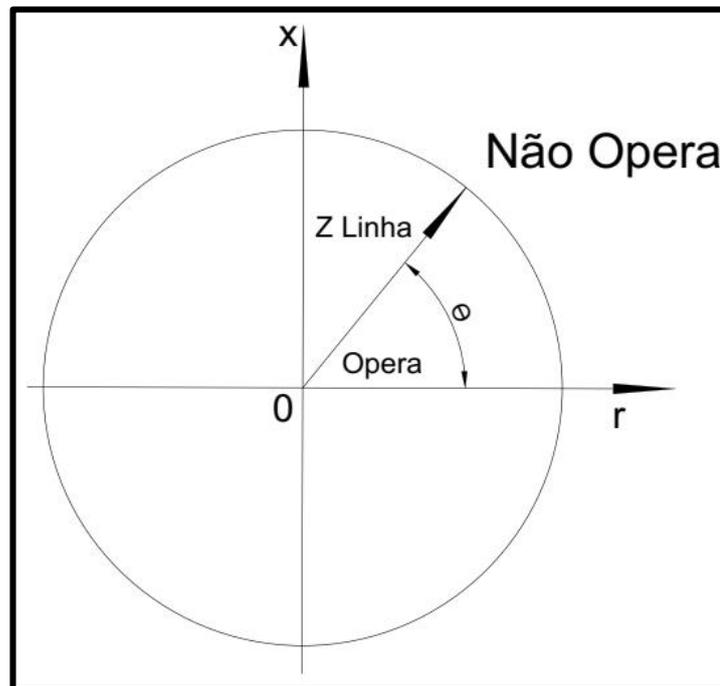
Qualquer uma das três unidades, impedância, reatância, ou admitância, são alimentadas por corrente e tensão do circuito em que estão ligadas e medem a impedância do circuito, cujo módulo é dado por V/I , ou seja, pela tensão do circuito dividido pela corrente e cujo argumento é dado pelo ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente do circuito, ou

$$Z_{\text{Linha}} = V/I$$

O vetor Z , pode então ser representado, conforme mostra a figura 6, num sistema de coordenadas retangulares de abscissa r e ordenada jx tal que:

$$r = V/I \cos \theta \text{ e } jx = V/I \sin \theta.$$

Figura 6 – Característica do relé de distância



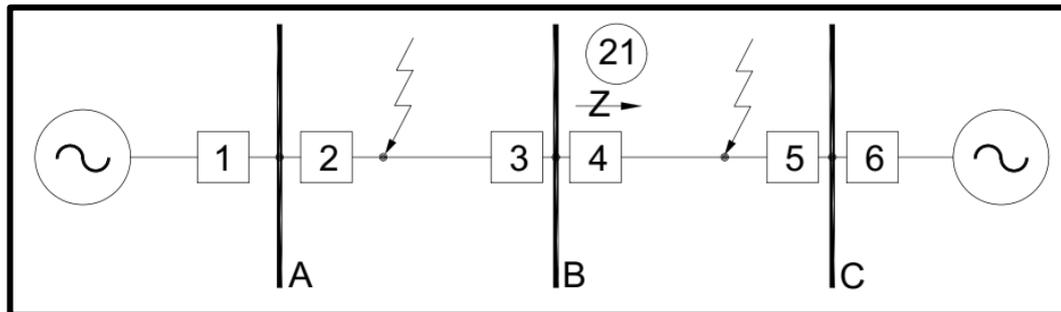
Fonte: Adaptada Mamede Filho (2017).

Definimos assim o “PLANO RX” e considerando o sistema em rede, o relé localizado no ponto “O” origem das coordenadas, verificamos que a impedância medida, em condições normais do sistema, pode estar em qualquer um dos quatro quadrantes, dependendo do fluxo de potência no instante considerado. Esta impedância, medida nestas condições, é chamada impedância de carga ou Z de carga (MAMEDE FILHO,2017).

Segundo Kindermann (2005) este dispositivo possui, geralmente, módulo elevado, fora do alcance do relé, e argumento baixo, isto é: o vetor Z se localiza próximo do eixo r, em qualquer um dos quadrantes.

No caso de um curto-circuito na LT, a impedância medida passa a ser a impedância da linha de transmissão até o ponto do curto circuito. A impedância medida nas condições de curto-circuito, apresenta reatância indutiva, e baixo valor de resistência. Resumidamente: $Z = r + jx$ e $x > r$, de acordo com a figura 7, para o relé localizado em B, atuando nos disjuntores 4 e curto-circuito no trecho em BC, encontra-se no 1º quadrante.

Figura 7 – Curto circuito na LT.



Fonte: Adaptada Kindermann (2005).

Analisando o mesmo relé na figura 7, temos um curto no trecho BA, onde o mesmo seria “visto” com uma impedância $Z = -r - jx$, portanto, no 3º quadrante. Concluímos assim, que os relés de distância devem ser direcionais.

4.2.2 Tipos de relés de distância

De acordo com Mamede Filho (2005) há uma grande variedade de relés de distância com características diferentes adequadas a determinadas aplicações, o qual da origem aos designados relés de distância, sendo:

- Relés de reatância
- Relé de admitância ou MHO
- Relé de impedância

A aplicação de um relé de distância está condicionada à característica do sistema no qual irá operar, ou seja: o relé de impedância é indicado para a proteção de linhas de transmissão consideradas de comprimento médio para o seu nível de tensão; o relé de reatância é indicado para a proteção de linhas de transmissão consideradas de comprimento curto para o seu nível de tensão. Foi desenvolvido para reduzir o efeito do arco no ponto de balanço do relé, durante a ocorrência de um defeito; o relé de admitância é indicado para a proteção de linhas de transmissão consideradas de comprimento longo para o seu nível de tensão. (MAMEDE FILHO, 2017)

4.2.3 Relés de reatância

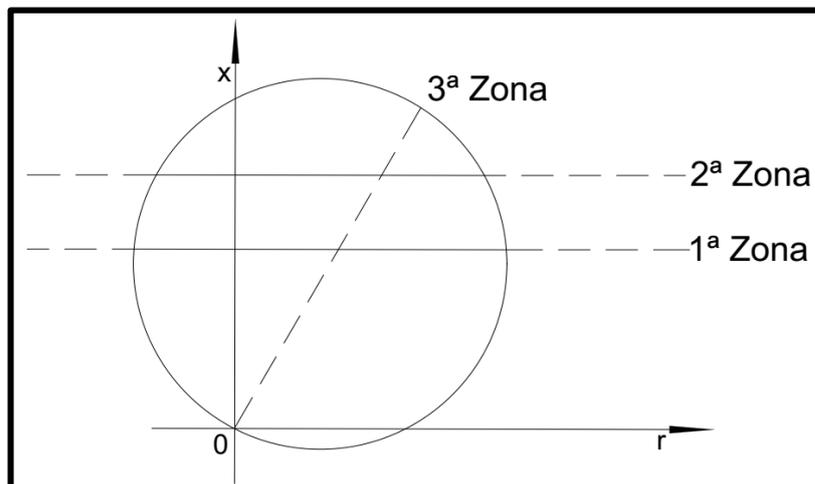
São os tipos de relés mais atribuídos para sistema de proteção em linhas de transmissão de energia, que são definidas como linhas de extensões curtas, onde podemos considerar que a resistência proveniente de um arco pode haver valores

significativos, quando comparado com o valor de uma impedância referenciado a uma linha de transmissão (MAMEDE FILHO,2005).

Este dispositivo, também designado pelo grupo dos relés de distância, com uma funcionalidade tendo uma de suas características a sensibilidade na reatância do sistema, segundo (CHRISTOPOULOS,1997).

Este relé é composto por uma unidade de reatância e por uma unidade MHO, conforme pode ser observado na figura 8. A unidade de reatância tem a função de medir a 1ª e a 2ª zonas. A unidade MHO, além de dar ao conjunto a característica direcional, estabelece a 3ª zona e atua também como unidade de partida.

Figura 8 – Relé de reatância



Fonte: Adaptada Kindermann (2005).

A sequência de operação do relé é bastante semelhante à do relé de impedância (bobina móvel). A diferença é que a extensão de alcance é realizada apenas para a 2ª zona. A 3ª zona é definida pela unidade de partida (unidade MHO).

4.2.4 Relé de admitância ou MHO

De acordo com Kindermann (1997), o relé de distância (21), tem os mesmos princípios de funcionamento comparado ao relé de Impedância, porém apresenta características distintas, onde teremos nestas grandezas as seguintes condições:

- a) Corrente elétrica, que produz torque de operação;
- b) Tensão elétrica, responsável pelo torque de restrição.

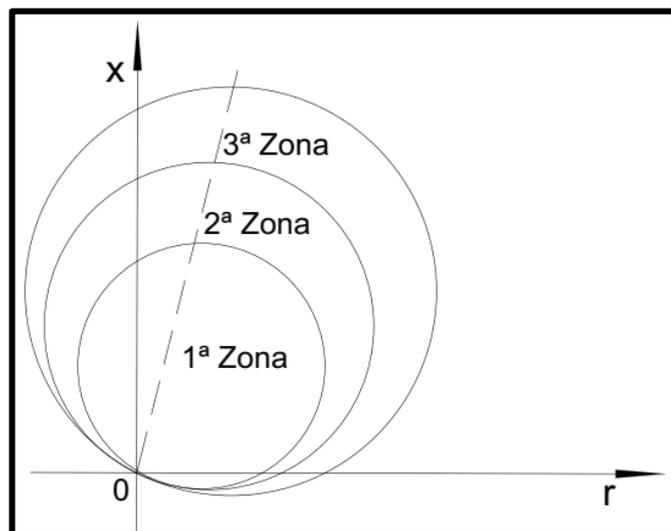
Segundo, Kindermann (1999), nos remete que essas interações dos fluxos magnéticos que assim foram originados no relé de admitância.

Denotamos desta forma, que tais características, direciona o comportamento de funcionamento destes dispositivos, para serem utilizados de maneira eficaz em proteções de LT longas (MAMEDE FILHO,2017).

Conhecido também como relé MHO, isto é, OHM isto é escrito de trás para a frente. Tendo uma natureza direcional importante, pois desta forma haverá uma confiabilidade quanto a seletividade garantida do sistema de supervisão deste relé, sendo primordial a direcionalidade deste instrumento, pois o mesmo só atuará para falhas que estejam no perímetro cuja impedância esteja dentro deste círculo (KINDERMANN,1999).

De acordo com Horowitz (2014), este dispositivo apresenta 3 unidades MHO, com uma certa similaridade ao relé de impedância (eletromecânica), diferindo por dispensar esta unidade direcional. A figura 9 conforme sequência, demonstra a característica do relé MHO.

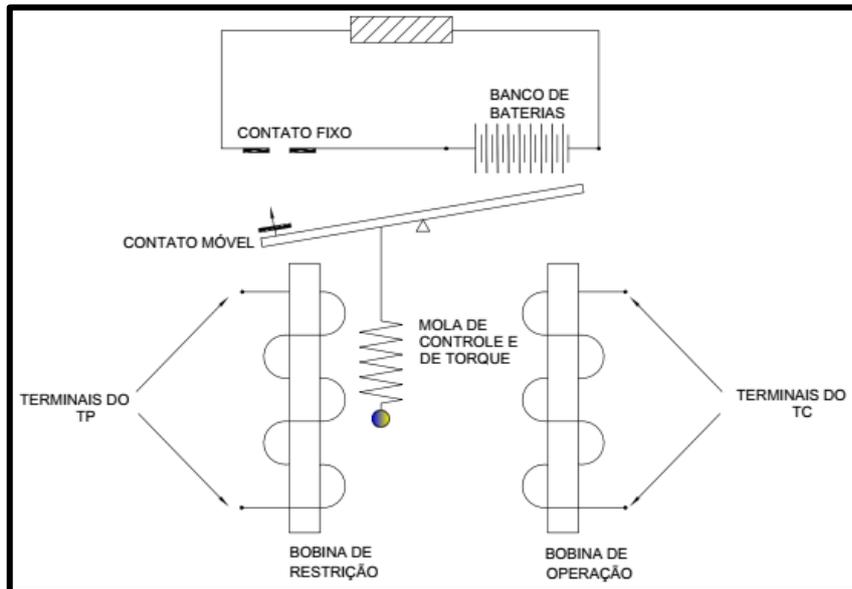
Figura 9 – Representação relé MHO e zonas de atuação



Fonte: Adaptada Horowitz (2014).

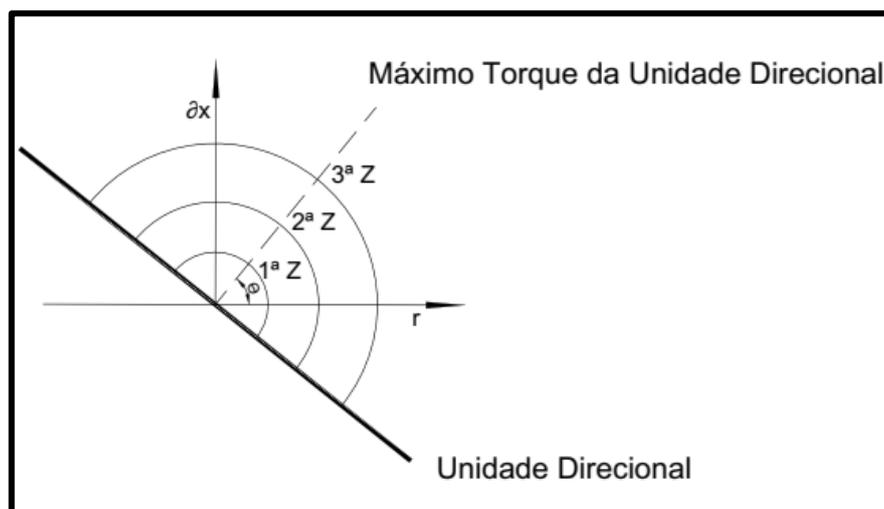
4.2.5 Relé de Impedância

De acordo com as informações técnicas, segundo Kindermann (1999), o princípio de funcionamento de um Relé de Impedância, terá como uma representação simbólica, como pode ser avaliado na figura 10, da seguinte forma:

Figura 10 – Princípio de funcionamento relé de distância


Fonte: Adaptada Mamede Filho (2017).

De acordo com Kindermann (1999), o relé de impedância eletromecânico, é composto por três unidades de impedância, uma unidade direcional e uma unidade auxiliar de temporização com dois ajustes de tempo T_1 e T_2 . As unidades de impedância são ajustadas para três valores diferentes de atuação, 1^a , 2^a e 3^a , conforme a figura 11.

Figura 11 – Características de um relé de impedância


Fonte: Adaptada Kindermann (2005).

Segundo Mamede Filho (2017),

O relé de distância a impedância, ou simplesmente relé de impedância, é composto normalmente por uma unidade direcional e três unidades de impedância, e sua alimentação é realizada pelos transformadores de correntes e pelos transformadores de potencial instalados na barra onde está operando o relé. A resistência do arco no ponto de defeito é vista pelo relé de impedância e assim deve ser considerada nos sistemas de tensão elevada, tais como 69 e 230 KV, a resistência do arco é muito pequena comparada com a impedância do sistema entre a geração, onde está instalado o relé, e o ponto de defeito. Para linhas curtas esta afirmação não pode ser considerada. (MAMEDE FILHO,2017)

As características do relé foram mostradas na figura 11, referente à unidade direcional, e o circuito de “Trip”⁷ está na figura 12.

Suponhamos a LT conforme esquemático elétrico destacado na figura 12, protegidas por relé de distância, tipo impedância. Analisemos o relé localizado em A, atuando no disjuntor 1.

4.2.6 Falta no ponto 1

Para a falta no ponto 1, de acordo com a figura 13, deverão operar as unidades Z1, porque a falta está contida na 1ª zona do relé e as outras duas unidades Z2 e Z3 que contém a 1ª zona. Neste caso, pode verificar no diagrama elétrico referente a figura 12, o disparo do disjuntor se dará instantaneamente (T1) pelo contato de 1ª zona.

4.2.7 Falta no ponto 2

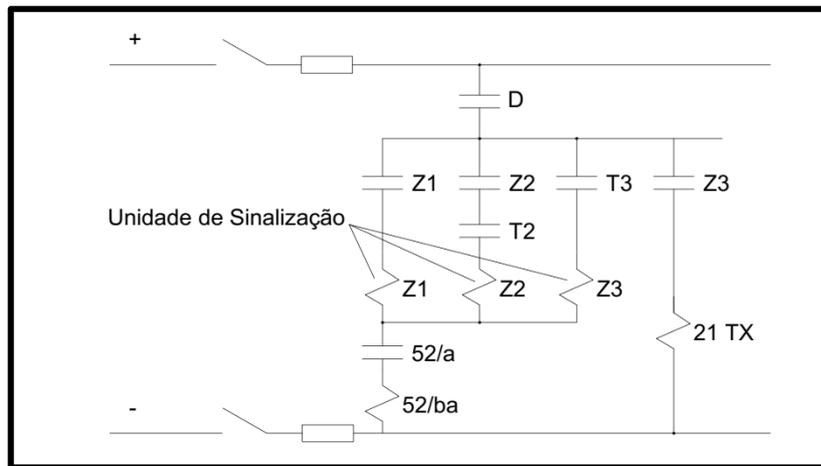
A falta, agora está fora do alcance de medição da 1ª zona e dentro da 2ª zona e 3ª, de acordo com a figura 13. Portanto, Z2 e Z3 operam. O relé Z1 e TX é energizado por Z3. Decorrido o tempo T2, o circuito da 2ª zona se completa, abrindo o disjuntor de acordo com diagrama referente à figura 12.

⁷ Disparo de proteção: Sinal que identifica o momento em que a unidade de proteção comanda o desligamento do equipamento após atuação de uma ou mais de suas funções ou lógicas. Normalmente, nos relés digitais (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED), do inglês *Intelligent Electronic Devices*) este momento é registrado como “trip” geral.

4.2.8 Falta no ponto 3

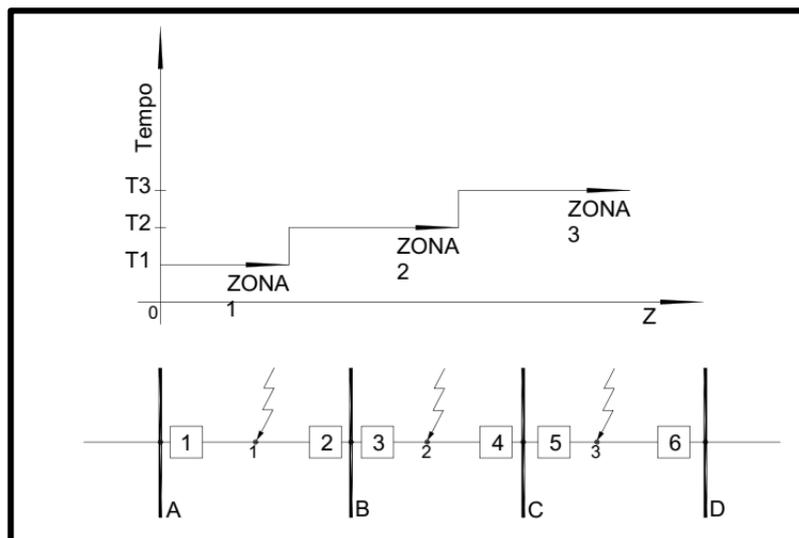
Neste ponto, referenciando à figura 13, a falta está fora do alcance de Z1 e Z2, mas dentro do alcance da 3ª zona. Z3 opera e parte o temporizador. O disjuntor é disparado pelo contato T3, do temporizador conforme o desenho referente à figura 12.

Figura 12 – Circuito de comando



Fonte: Adaptado manual General Electric.

Figura 13 – Atuação do relé de impedância



Fonte: Adaptado manual General Electric.

5 TÓPICO DE AJUSTES

5.1 PRIMEIRA ZONA

- a) Faixa de alcance típico da zona 1 é de entre 80 e 90% da impedância da sequência positiva da linha protegida: $0,8Z' \leq Z1 \leq 0,9 Z'1$ (KINDERMANN,2005);
- b) Isto se aplica as unidades de medida tipo MHO e de reatância com compensação do carregamento pré-falta em linhas sem acoplamento magnético (KINDERMANN,2005);
- c) Uma unidade de reatância convencional deve ser ajustada em 80 a 90% da menor reatância medida para faltas resistivas no fim da LT com carga exportada (HOROWITZ,2014);
- d) Nas unidades de medida tipo MHO o ângulo característico deve ser ajustado tão próximo quanto possível do ângulo de $Z'1$;
- e) A cobertura de resistência de falta fica a cargo de impedância da fonte (Zs);
- f) É sempre útil estimar que cobertura da Resistência de Falta (Rf) está sendo obtida com o alcance ajustado.

5.2 SEGUNDA ZONA

- a) A zona 2 deve ser ajustada de modo a detectar falta em qualquer ponto da linha protegida;
- b) Isto significa que detecta faltas no barramento adjacente, em quaisquer circunstâncias;
- c) O alcance ajustado Z deve ser necessariamente maior do que a impedância de sequência positiva da LT protegida para cobrir os seguintes fatores:
 - Exatidão da unidade medida
 - Exatidão do TP e TC
 - Erros impostos pelo sistema elétricoPortanto, ajustar $Z2$ para algo como 120% - ou mais – de $Z1$ pode ser insuficiente.

5.3 TERCEIRA ZONA

- a) A zona 3 deve ser ajustada de modo a detectar faltas até a extremidade da LT adjacente eletricamente mais longa;
- b) Isto significa detectar faltas com terminal remoto aberto;
- c) As impedâncias medidas devem ser calculadas para defeitos monofásicos sólidos e resistivos;
- d) O tipo de unidade de medida define o alcance necessário para uma razoável cobertura resistiva.

6 SISTEMAS DE TELEPROTEÇÕES

6.1 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

De acordo com Kindermann (2005), na teleproteção é imprescindível que o meio de comunicação tenha alta confiabilidade e alta velocidade. Isto porque a teleproteção é um componente incorporado ao sistema de proteção. Desse modo é importante considerar a segurança do meio de comunicação, principalmente quanto à sua exposição física.

A necessidade de expansão do sistema elétrico associada ao esgotamento dos potenciais hídricos próximos aos grandes centros de carga, forçou o aparecimento de longas linhas de transmissão, operando em tensões cada vez mais elevadas e transmitindo grandes potências.

Linhas de transmissão com essas características exigem que a operação da proteção (tempo do relé + tempo de abertura dos disjuntores) seja extremamente rápida para não comprometer a estabilidade do sistema e evitar problemas de sobretensão. Sempre que o disjuntor de um terminal da LT abrir o do outro terminal deverá também abrir o mais rápido possível. Isto é conseguido através da teleproteção.

Segundo Mamede Filho (2017), para existir troca de informações entre os elementos de proteção de um sistema elétrico, que compreende a comunicação entre subestações e entre subestações e os centros de operação, é necessário um sistema de comunicação que pode ser constituído de diferentes meios.

Fio Piloto – consiste geralmente em um circuito a dois fios, do tipo linha telefônica, aberta ou por cabo. É um sistema econômico para distâncias da ordem de 10-15 km, sendo bastante comum em sistemas de distribuição de energia e em sistemas industriais, particularmente na proteção de redes subterrâneas. Usa frequência industrial.

Rádio – Podem ser utilizados vários tipos de frequência, ou seja:

* Alta frequência (HF)

Utilizada exclusivamente para comunicação de voz, opera na faixa de 3 a 30 MHz, mesmo assim de forma precária, devido a vários tipos de interferência, tais como radiações solares, dependência da hora do dia e das estações do ano, atividade solar etc.

* Muito alta frequência (VHF)

Utilizada normalmente para a comunicação de voz, opera na faixa de 30 a 300 MHz. Pode ser utilizada para teleproteção, mas atua de modo precário.

Onda portadora – Também conhecida como carrier, tem como fundamento a utilização dos próprios condutores da linha de transmissão a ser protegida que transmite sinais na banda de frequência entre 30 a 300 KHz. O sinal pode ser transmitido apenas numa fase da linha de transmissão, que é a forma mais empregada, por ser também a mais econômica. Para utilização das três fases deve ser empregado um maior número de equipamentos

Microondas - Na transmissão por micro-ondas o meio de propagação do sinal é pelo ar. O sinal é transmitido numa frequência de 900 KHz a 20 MHz. O sinal de frequência da microonda é dirigido por antenas parabólicas de ponta a ponta. Por este motivo as antenas parabólicas devem ser colocadas em torres de comunicação para que sua visada tenha longo alcance. O sistema de comunicação por micro-ondas é muito complexo e caro. As antenas parabólicas devem estar direcionadas umas em relação às outras, de modo que o sinal seja transmitido entre as torres de comunicação até o seu destino final. Em condições favoráveis a máxima distância entre duas torres pode ser de até 60 Km. Este sistema sofre influência das condições atmosféricas sendo um problema para a fidelidade desse sistema de transmissão, principalmente para a teleproteção. A vantagem desse sistema é que a comunicação independe dos efeitos das correntes de curto-circuitos na linha de transmissão e das interferências eletromagnéticas geradas na subestação.

Fibra ótica - Consiste num cabo de fibra ótica com diâmetro na ordem de 100µm pelo qual a informação é transmitida utilizando técnicas de modulação de luz. É um canal de grande capacidade de transmissão de dados, sendo imune aos efeitos transitórios que acometem os condutores elétricos. Por apresentar uma elevada atenuação de sinal, o sistema de fibra ótica pode ser aplicado em linhas de transmissão de pequeno e médio comprimento. Atualmente os cabos de fibra ótica utilizados nos sistemas de potência, em geral, fazem parte do próprio cabo utilizado na proteção contra descargas atmosféricas, ou cabo- guarda. Esses cabos são denominados OPGW (Optical Ground Wire). A utilização do cabo de fibra ótica elimina a presença de filtros, transformadores saturados, indutores etc. (MAMEDE FILHO, 2017).

6.2 ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO

6.2.1 Equipamento de Onda Portadora

Chama-se “corrente de onda portadora” ou “CARRIER CURRENT” uma corrente de alta frequência (30 a 200Khz) que é transmitida pela própria linha de transmissão.

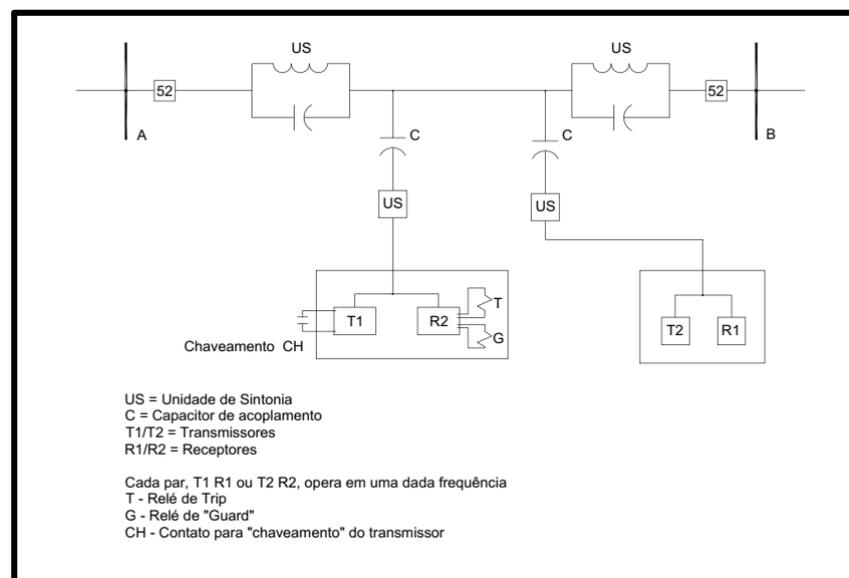
O equipamento que emite e recebe a “corrente carrier” é constituído de um transmissor e um receptor em cada terminal de acordo com a figura 14 e 15 do circuito de transmissão de dados e voz.

Figura 14 – Acopladores Carrier de uma LT de 138KV



Fonte: Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig.

Figura 15 – Circuito de Onda Portadora



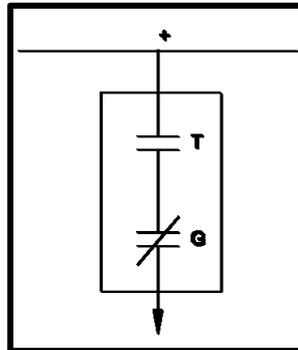
Fonte: Adaptado Manual General Electric.

6.2.2 Funcionamento do sistema

Com os contatos de chaveamento abertos o transmissor de um terminal, emite continuamente, um sinal de uma frequência F1 chamado sinal de “GUARD” do receptor correspondente à frequência F1. O relé de “GUARD” um contato

normalmente fechado que fica em série com um contato normalmente aberto do relé de trip, conforme demonstrado na figura 16.

Figura 16 – Circuito de contatos do receptor



Fonte: General Electric.

O sinal de “GUARD”, enquanto existir, atua como proteção contra sinais espúreos, prevenindo desligamentos acidentais.

Com o contato de chaveamento fechado conforme pode ser observado na figura 15, o transmissor muda a frequência do sinal transmitido de F1 para F2. Com isso desaparece o sinal de “GUARD” de acordo com a figura 16, e desta forma passa a ser transmitido o sinal de trip. O receptor do outro terminal, recebendo agora a frequência F2, faz operar o relé de trip. Não havendo sinal, o relé de “GUARD” desopera, e com isso o circuito de trip é completado.

6.2.3 Esquema de Permissive Transfer-Trip com unidades de sobrealcance

Para que seja caracterizada uma falta dentro do trecho AB, é necessário que ambas as unidades de 2ª zona dos relés 21A e 21B operem simultaneamente.

Uma vez caracterizada a falta dentro do trecho, as 2ªs zonas podem e devem atuar instantaneamente.

Neste esquema, a 2ª zona, chaveia o transmissor e ainda possui um outro contato que é ligado em série com os contatos do receptor ao circuito de trip.

Desta forma para que haja trip instantâneo, é necessário que ambos os relés, operem, pois somente assim teríamos a operação do relé mais recepção de sinal: condição para que a bobina de trip do disjuntor seja energizada de acordo com a figura 17.

6.2.4 Carrier blocking

Neste esquema o equipamento de “CARRIER” difere dos anteriores. São empregados um TRANSCEPTOR, em cada terminal de modo que basta 1 transmissor emitir o sinal para que ambos os receptores o recebam.

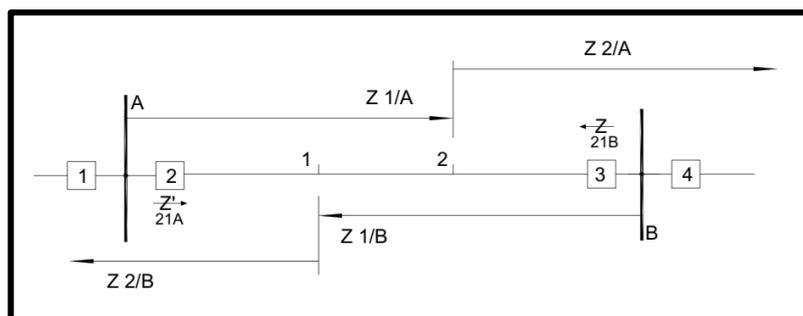
O esquema funciona com um sinal contínuo emitido de ambos os terminais. Este sinal atua bloqueando a atuação instantânea das 2^{as} zonas. Ocorrendo um defeito dentro do trecho entre as estações, ambas as unidades de 2^a zonas, dos dois terminais, operarão simultaneamente.

Com isso, cada relé em seu terminal atuará no transmissor que para de emitir o sinal de bloqueio. Desaparecendo o sinal de bloqueio, haverá operação do disjuntor instantaneamente pelas unidades de 2^a zona.

6.2.5 Esquema de transfer - trip direto com unidades de sub-alcance

Para analisarmos e avaliar a aplicação do esquema TRANSFER-TRIP, vamos considerar a LT, destacada na figura 17, protegida por relés de distância os quais são ajustados para 80% da LT entre A e B, para evitar que possa operar para faltas além do trecho por sobre alcance, durante o regime transitório.

Figura 17 – Esquema de Transfer trip com unidades de zonas



Fonte: Manual General Electric.

Para faltas entre os pontos 1 e 2 os relés de ambos os terminais operarão em 1^a zona, portanto instantaneamente. Para faltas entre a SE A e o ponto 1 somente operará em 1^a zona o relé 21 A, e apenas o disjuntor (2) abriria instantaneamente, pois essa falta seria “vista” pelo relé 21B em 2^a zona. Para faltas entre o ponto 2 e a

SE B, o relé 21B opera uma 1ª zona e o relé 21 A em 2ª zona. Com isso apenas o disjuntor (3) abrirá instantaneamente.

Para evitar esse problema, isto é para que os dois disjuntores abram instantaneamente, é empregado o esquema de transfer-trip direto, desde que as unidades de subalcançe (1ª zonas) sejam direcionais, a operação de qualquer uma delas caracteriza defeito dentro do trecho compreendido entre as SE's A e B.

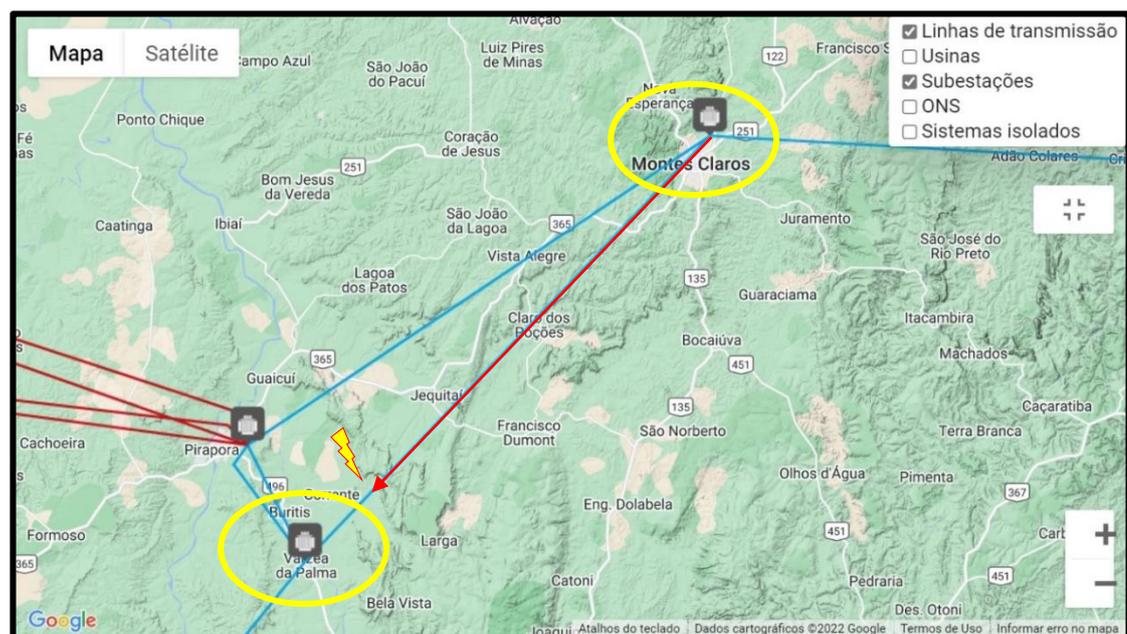
7 ESTUDO DE CASO

A perturbação consistiu no desligamento automático da LT 345 kV MONTES CLAROS 2 – VÁRZEA DA PALMA 1 C 1 MG devido a um curto-circuito monofásico envolvendo a fase branca (fase C – Cemig GT), por causa indeterminada.

A falta foi eliminada em 75 ms pelas atuações das proteções de distância principal e alternada em primeira zona, e associadas aos esquemas de teleproteção de transferência de disparo permissivo por sobrealcançe em ambos os terminais.

Houve atuação do esquema de religamento automático com sucesso, sendo a SE Várzea da Palma 1 o terminal líder. A falta foi localizada a 123 km da LT, a partir do terminal da SE Montes Claros 2, destacado na figura 18.

Figura 18 – Mapa Dinâmico SIN

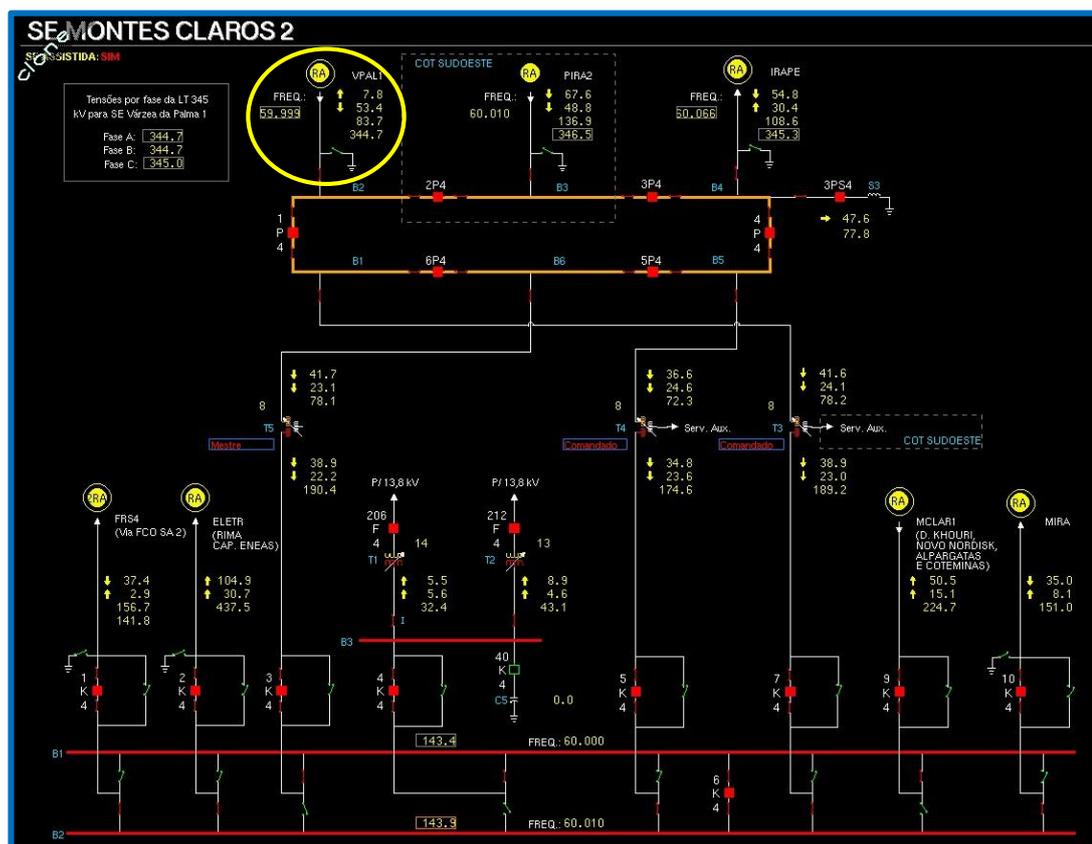


Fonte: Operador Nacional do Sistema – ONS.

SE Montes Claros 2 e SE Várzea da Palma 1, com a distância aproximada 145,3 Km, conforme a informação retirada do Mapa Dinâmico SIN no site do ONS, tensão de 345 KV, onde ressaltamos em destaque com a seta vermelha o sentido em que foi calculada pelo programa da concessionária local da falta como descrito no resumo da informação análise.

Na figura 19, temos a subestação de Montes Claros 2, com a capacidade de 500 MW, sendo o seu agente a Cemig Geração e Transmissão, nesta imagem temos destacado em círculo amarelo referente ao religador da linha de 345 KV aberto também devido a proteção de sobrealcance e atuação em primeira zona, onde o mesmo protege a linha de transmissão de 80 a 90%.

Figura 19 – Diagrama Unifilar SE Montes Claros 2

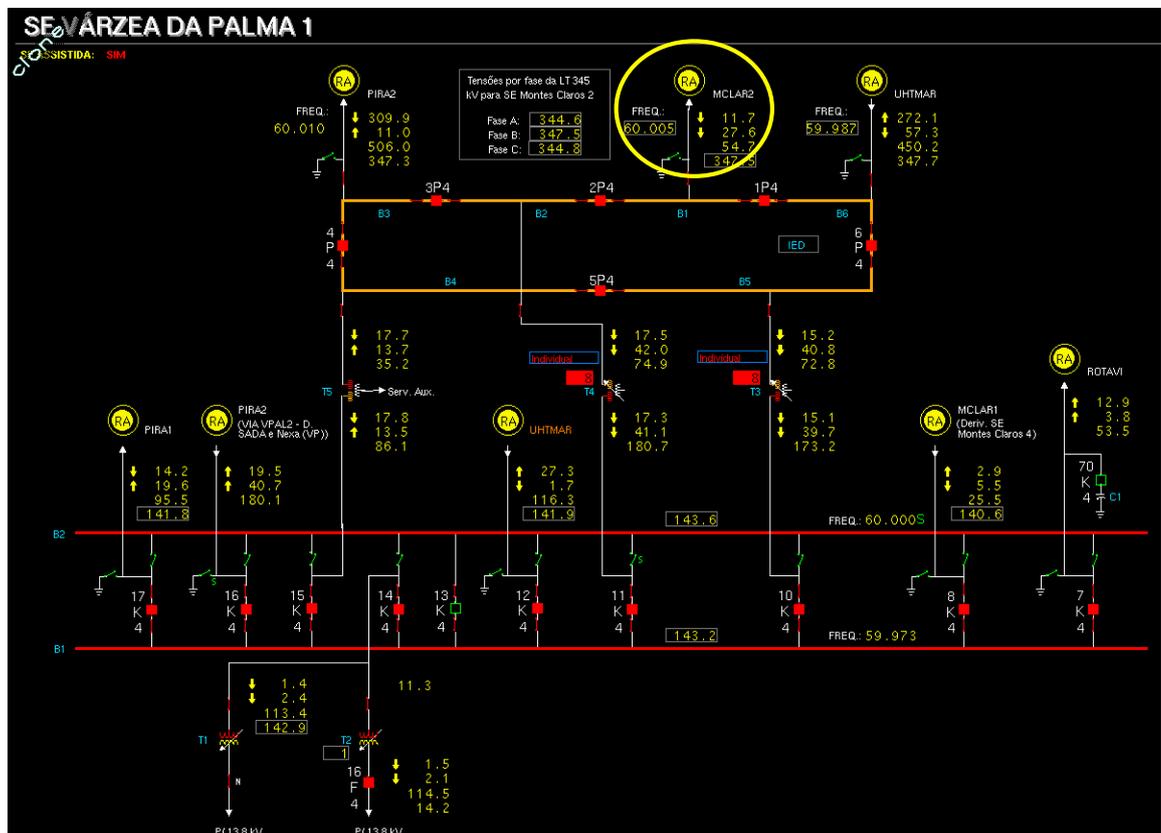


Fonte: Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig.

Na figura 20, temos a subestação de Várzea da Palma 1, com a capacidade de 470 MW, sendo o seu agente a Cemig Geração e Transmissão, nesta imagem temos destacado em círculo amarelo referente ao religador da linha de 345 KV conforme ao

processo de restabelecimento em 75 ms, de acordo com o Submódulo 2.6 do Procedimento de Rede do ONS, para linhas de transmissão com tensão nominal igual e superior a 345 KV é de 100 milissegundos, sendo que o mesmo encontra dentro das parametrização de ajuste de proteção. No entanto a atuação da proteção foi de sobrealcance, tema que foi explorado no item (6.2.3 Esquema de permissive transfer-Trip Com Unidades de sobrealcance). No entanto, outra forma para avaliarmos a aplicação do da função 21, foi quanto a atuação em primeira zona, onde o mesmo protege a linha de transmissão de 80 a 90%.

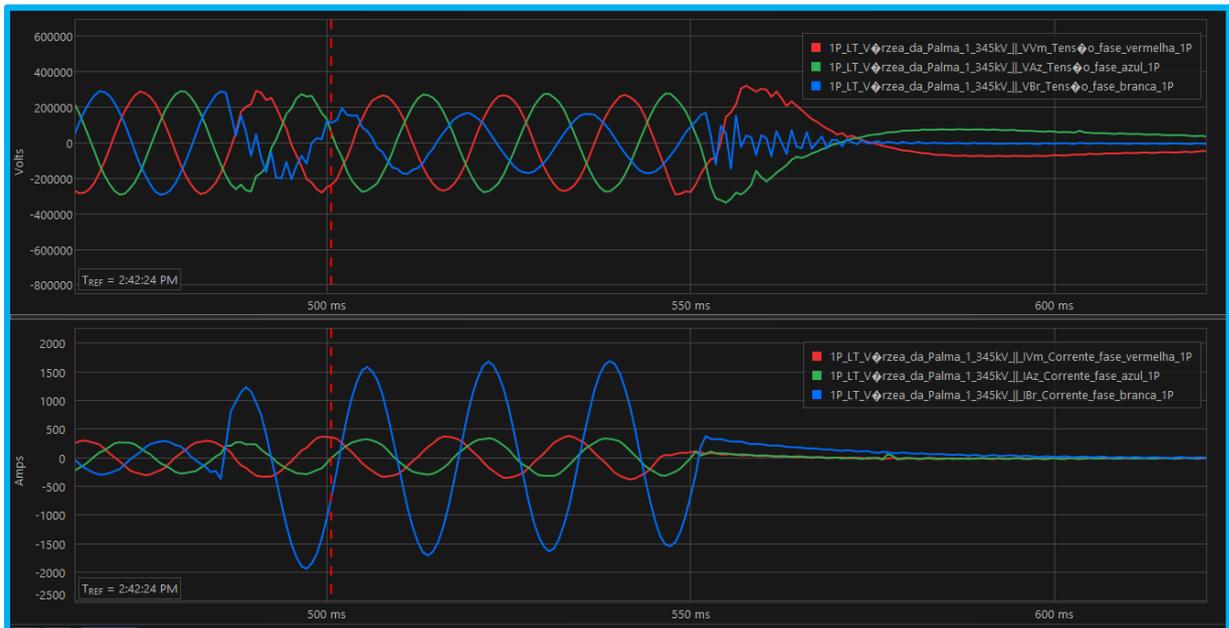
Figura 20 – Diagrama Unifilar SE Várzea da Palma 1



Fonte: Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig.

De acordo com a figura 21, podemos avaliar graficamente o aumento abrupto da corrente na fase branca, representada nesta imagem pela cor azul e o afundamento da tensão na fase branca, que são uma das características dos parâmetros de avaliação do relé de função 21.

Figura 21 – Esquema de Transfer_trip com unidades de sobrealcançe



Fonte: Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig.

8 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho, foi buscar informações que pudessem auxiliar nos estudos de proteção, referentes aos relés de distância, função 21, sobre parâmetros e critérios que são utilizados em linhas de transmissão, de forma mais objetiva, suscinta e direta quanto a sua funcionalidade, sem grandes aplicações de fórmulas complexas, o que fomentou ao desenvolvimento deste material.

Para que os estudantes e interessados no tema proposto, tenha neste trabalho o início para um projeto como um primeiro contato para um entendimento básico do dispositivo relacionado a proteção. Pois a cada dia vemos o quanto a utilização da energia elétrica é um bem mais que essencial para continuidade do desenvolvimento industrial, desta forma enfatizamos a busca de monitorarmos de forma segura as nossas linhas de transmissão.

Vale ressaltar, que a exigência de segurança, continuidade, confiabilidade em sistemas de transmissão de energia, são cada vez mais efetivos, com o compromisso e responsabilidade para minimizar os efeitos pela falta no Sistema Elétrico de Potência, o mesmo podendo ser prejudicial para o nosso desenvolvimento e utilização da energia elétrica.

Com este objetivo acadêmico, vemos o estudo de caso aqui realizado de uma ocorrência real, com o objetivo de aproximar o aluno ao estudo aqui que foi explorado, não de maneira profunda, pois este relé, como já mencionado tem uma variedade de funcionalidade, que não seria o suficiente este único trabalho para enfatizar todo o seu potencial de utilização no SEP.

Consequentemente, teremos a realização de um tema com possibilidades de trabalhos e discussões futuras para contribuição do desenvolvimento e progresso do sistema de transporte de energia.

ABSTRACT

This work will address the subject of protection philosophy, a brief context on the coordination of electrical protection functions used in the Transmission Line, being the applicability of the distance relay, function number ANSI 21, in accordance with ABNT NBR 5175 - Numbers of the functions of the switching, control and protection devices of power systems - Coding. This equipment presents a great wealth of information in its electromagnetic iterations and has significant importance for the supply and energy to the Electric Power System (EPS), hence the need for an adequate, reliable and correctly adjusted protection system. In this research, in more detail, this protection philosophy and adjustment range, mentioning the causes that lead to its use, without sticking to any particular function model or protection system. Finally, in the conclusion, the main issues that deserve further enrichment by those who intend to develop even more in the studies of this important engineering area are pointed out.

Keywords: Protection. Transmission line. Relay Function 21

REFERÊNCIAS

ANDERSON, P. **Power system protection**. New York: McGRAW-HILL, 1999.

Antônio M. Vallêra, M. C. **Meio século de história fotovoltaica**. Gazeta de Física, 2006.

C. C., & A. W. **Electrical power system protection**. Índia: Springer-Science Business Media, B.V., 1999.

C.R, M. **The art and Science of Protective relaying**. John Wiley and Sons Inc., 1956.

CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: EDGERD BÜCHER, 1977.

França, V. C. **Dissertação de Mestrado** : Inserção da Energia Fotovoltaica no Brasil: Uma Avaliação de Incentivos. Brasília: Universidade de Brasília - DF, 2016.

Frazão, R. (2019). **Proteção do sistema elétrico de potência**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A.

HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; RAMESH, B. **Practical power systems protection**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2005.

HOROWITZ, S., & PHADKE, A. **Power system relaying**. Virginia, 2014.

J.L., B. **Protective relaying** - Principles and Applications. Marcel Dekker Inc. 1997.

KINDERMANN, G. **Curto circuito**. Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1997.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Florianópolis: Edição do autor. 2005.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MAMEDE FILHO, J. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

STEVENSON, W. D. **Elementos de análise de sistemas de Potência**. São Paulo: Mcgraw-Hill, 1986.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto circuito** - 2ª edição - Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1997.

DAS, J.C. **Power systems protective relaying**. Snellville, Georgia, USA, 2018.