



UNIARA

Universidade de Araraquara

SISTEMA DE PROTEÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

ELECTRIC POWER DISTRIBUTION NETWORK PROTECTION SYSTEM

SISTEMA DE PROTECCIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Deivid Wesley Silva¹, Fabiana Florian²

<https://doi.org/10.47820/recima21.v3i12.2422>

PUBLICADO: 12/2022

RESUMO

A segurança da rede elétrica preocupa-se tanto com a integridade física dos componentes do sistema elétrico quanto com o bem-estar daqueles que operam nele ou em seu entorno. A distribuição de eletricidade é vulnerável a uma ampla variedade de modos de falha. Eletricidade gerada por descargas atmosféricas como raios, que podem causar danos à infraestrutura elétrica. Para ser eficiente, um sistema de proteção precisa ser adequadamente dimensionado, seguro, confiável, rápido, sensível a surtos e coordenado em sua seletividade. Neste sentido, objetivou-se mostrar dois tipos de ferramentas de proteção conhecidas como protetores de rede que foram projetadas computacionalmente. Para isso, nas redes de distribuição de energia elétrica, foram instalados protetores de rede para identificar a presença de fluxo reverso de potência nos transformadores de distribuição. Essas configurações de rede proporcionam grande estabilidade no fornecimento de energia devido ao uso de pelo menos duas alimentações principais. Um curto-circuito nos alimentadores primários se manifesta como uma inversão de corrente nos transformadores desta topologia. O fluxo reverso da falta se origina das contribuições da rede secundária das outras alimentações principais. Juntamente com a proteção de sobrecorrente dos alimentadores primários, o protetor de rede ajuda a isolar completamente o curto-circuito isolando os transformadores ligados ao alimentador ausente de suas conexões com a rede secundária. Concluiu-se que os protetores de rede modelados cumprem sua função adequadamente, o crescimento da geração dispersa pode levar a ações inadequadas por parte dos protetores de rede.

PALAVRAS-CHAVE: Distribuição. Energia Elétrica. Modelagem Computacional. Protetor de Rede.

ABSTRACT

The safety of the electrical network is concerned with both the physical integrity of the components of the electrical system and the well-being of those who operate in or around it. Electricity distribution is vulnerable to a wide variety of failure modes. Electricity, generated by atmospheric discharges such as lightning, which can cause damage to electrical infrastructure. To be efficient, a protection system needs to be properly sized, safe, reliable, fast, sensitive to surges and coordinated in its selectivity. In this sense, the objective was to show two types of protection tools known as network protectors that were computationally designed. For this, in the electricity distribution networks, network protectors were installed to identify the presence of reverse power flow in distribution transformers. These network configurations provide great stability in the power supply due to the use of at least two main supplies. A short circuit in the primary feeders is manifested as a current reversal in the transformers of this topology. The reverse flow of the fault originates from the secondary network contributions from the other main supplies. Along with overcurrent protection of the primary feeders, the mains protector helps to completely isolate the short circuit by isolating transformers connected to the absent feeder from their connections to the secondary mains. It was concluded that the modeled network protectors fulfill their function properly, the growth of the dispersed generation can lead to inappropriate actions by the network protectors.

KEYWORDS: Distribution. Electricity. Computational modeling. Network Protector.

¹ Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

² Orientador. Docente Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara-UNIARA. Araraquara-SP.

RESUMEN

La seguridad de la red eléctrica se refiere tanto a la integridad física de los componentes del sistema eléctrico como al bienestar de quienes operan en ella o en sus alrededores. La distribución de electricidad es vulnerable a una amplia variedad de modos de falla. Electricidad generada por descargas atmosféricas como los rayos, que pueden causar daños a la infraestructura eléctrica. Para ser eficiente, un sistema de protección debe estar adecuadamente escalado, ser seguro, confiable, rápido, sensible a los brotes y coordinado en su selectividad. En este sentido, el objetivo era mostrar dos tipos de herramientas de protección conocidas como protectores de red que fueron diseñadas computacionalmente. Para ello, en las redes de distribución eléctrica, se instalaron protectores de red para identificar la presencia de flujo de potencia inverso en los transformadores de distribución. Estas configuraciones de red proporcionan una gran estabilidad en el suministro de energía debido al uso de al menos dos cortes de energía principales. Un cortocircuito en los alimentadores primarios se manifiesta como una inversión de corriente en los transformadores de esta topología. El flujo inverso de la falla se origina a partir de las contribuciones de la red secundaria de las otras fuentes principales. Junto con la protección contra sobrecorriente de los alimentadores primarios, el protector de red ayuda a aislar completamente el cortocircuito al aislar los transformadores conectados al alimentador que faltan en sus conexiones a la red secundaria. Se concluyó que los protectores de red modelados cumplen su función adecuadamente, el crecimiento de la generación dispersa puede conducir a acciones inadecuadas por parte de los protectores de red.

PALABRAS CLAVE: *Distribución. Energía eléctrica. Modelado computacional. Protector de red.*

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo apresentar a importância do Sistema de Proteção da Rede de Distribuição de Energia Elétrica, será realizada uma revisão bibliográfica com foco em: Proteção, rede de distribuição, seletividade, coordenação, segurança, curto-circuitos.

O problema da pesquisa é: Qual a importância do Sistema de Proteção de Rede de Distribuição de Energia Elétrica? Quais são os problemas enfrentados e quais as soluções encontradas para sanar as interrupções e falhas?

É difícil para o sistema de distribuição de energia estar completamente livre de interrupções, falhas e outros problemas, pois é um sistema de alta complexidade. Além de interromper o fluxo de energia e eletricidade, essas anomalias podem causar danos a pessoas, propriedades e aos próprios componentes do sistema.

Devido a essas situações atípicas, o sistema de proteção deve ser projetado para receber informações em tempo real sobre grandezas elétricas para que as devidas precauções possam ser tomadas em tempo real (ARAÚJO, 2005).

O sistema de proteção da rede de distribuição de energia elétrica visa garantir o desligamento total ou parcial de qualquer elemento de um sistema elétrico caso sofra uma anomalia que o leve a operar fora dos parâmetros definidos, pois os mecanismos de proteção são projetados para separar componentes com defeito do sistema.

Todos os dispositivos necessários para detectar, localizar e ordenar a remoção de um curto-circuito ou estado anormal de um sistema elétrico são classificados como sistemas. Ao fazer isso, os danos ao equipamento defeituoso são reduzidos, assim como o tempo que ele fica fora de serviço, além de economizar dinheiro em reparos. (ARAÚJO, 2005)

Para ser eficaz, um sistema de segurança deve seguir as seguintes diretrizes: Segurança,

sensibilidade e confiabilidade andam de mãos dadas com a rapidez (MAMEDE, 2020).

Ao longo do estudo, os sistemas de proteção para linhas de distribuição elétrica são apresentados e discutidos em função desses conceitos com a apresentação de um modelo computacional de protetores de rede para a proteção de redes de distribuição de Energia Elétrica apresentado por Kanehira *et al.* (2020).

1.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

As resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) são regidas pelas leis autorizadas pelo Congresso Nacional e pelos decretos do Executivo Federal, que por sua vez são orientados pelos critérios previstos nas leis (BRASIL, 2011).

A ANEEL através das normas elaboradas no PRODIST (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) dá acompanhamento aos serviços prestados pela distribuidora conforme demonstrado pelos de indicadores de qualidade, como: DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC, de acordo com a PRODIST (2012, p. 24), explicados a seguir:

DEC – duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, que indica o intervalo de tempo, em média, em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em cada unidade consumidora do conjunto considerado, no período de apuração, em horas;

FEC – frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, que indica o número de vezes, em média, em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em cada unidade consumidora do conjunto considerado, no período de apuração;

DIC – duração de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão de instalações dos demais acessantes, que indica o intervalo de tempo em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em uma unidade ou instalação, no período de apuração, em horas;

FIC – frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão de instalações dos demais acessantes, que indica o número de vezes em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em uma unidade ou instalação, no período de apuração;

DMIC – duração máxima de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão de instalações dos demais acessantes, que indica o intervalo de tempo máximo em que ocorreu descontinuidade da prestação de serviço em uma unidade ou instalação, no período de apuração, em horas.

Os franqueados visam manter essas métricas dentro das metas estabelecidas pela ANEEL para evitar multas e ressarcimento aos consumidores.

1.1.1 Sistema aplicado na zona urbana

O neutro de um transformador é frequentemente aterrado à rede de aterramento da subestação na zona metropolitana. Existem dois cenários na rede de distribuição urbana: o primeiro é caracterizado por uma alta densidade de carga, que necessita de um número significativo de alimentadores de curta extensão. No caso dois, há muito poucos alimentadores de comprimento adequado devido à baixa densidade de carga do sistema. Deve haver proteção para cada segmento da rede antes que possa ser colocado em serviço, independentemente da carga

ou comprimento (CPFL, 2003).

1.1.2 Sistema aplicado na zona rural

Na zona rural, na qual a rede de distribuição chega a dezenas de quilômetros, e pode atender pequenas cidades ao longo do seu traçado. Por sua própria condição, está exposta às ações da natureza, mais que a rede urbana. E independentemente da extensão todos os trechos deverão ter algum tipo de proteção (CPFL, 2003).

Quando a distância entre os nós da rede de distribuição é de dezenas de quilômetros, é possível alcançar pequenas cidades localizadas ao longo de seu trajeto. As forças da natureza têm mais probabilidade de ter um impacto sobre ela do que a infraestrutura urbana devido à sua localização. E todos os segmentos, por mais curtos que sejam, precisam de salvaguardas.

1.1.3 Transformadores na rede de distribuição

A CPFL utiliza transformadores trifásicos em redes de distribuição de energia que são conectados em delta no lado de alta tensão e em estrela no lado de baixa tensão, com o neutro aterrado (CPFL, 2003).

1.1.4 As tensões básicas existentes

As tensões básicas presentes na rede de distribuição são: 11,9 ou 13,8 kV para a rede primária e 220/127 V e 380/220V para a rede secundária (CPFL, 2003).

1.2 TIPOS DE FALTAS

Faltas é o termo que se aplica a todo fenômeno acidental que impede o funcionamento de um sistema ou equipamento elétrico. Há dois tipos de faltas, as faltas transitórias e faltas permanentes. Qualquer incidente não intencional que torne os sistemas ou dispositivos elétricos inoperantes é chamado de "falha". Falhas temporárias são diferentes de falhas permanentes, que existem desde sempre (CPFL, 2003).

1.2.1 Faltas transitórias

Oitenta por cento dos problemas da rede de distribuição têm uma causa temporária. As falhas transitórias são aquelas que duram apenas um curto período de tempo e são remediadas pela reinicialização do circuito uma vez que o dispositivo de proteção tenha sido ativado (CPFL, 2003).

Os motivos mais constatados nas falhas transitórias são:

- Contato momentâneo entre os cabos condutores;
- Descargas atmosféricas ;
- Abertura de arco elétrico ;
- Isolação precária dos materiais ;

1.2.2 Faltas permanentes

Faltas permanentes são aquelas que necessitam da intervenção do homem para a correção da falha, antes do religamento do circuito (CPFL, 2003).

Eventualmente uma falha transitória pode virar uma falta permanente.

Algumas causas das falhas permanentes são:

- Queda de uma árvore em cima da linha de distribuição
- Acidentes de trânsito envolvendo postes de energia elétrica
- Atos de vandalismo

2. CURTO-CIRCUITOS

Um curto-circuito é uma condição anormal que ocorre em um sistema elétrico que pode causar sérios danos aos componentes que compõem o sistema. Os níveis de curto-circuito são basicamente: curto-circuito monofásico, curto-circuito bifásico e curto-circuito trifásico (ARAÚJO, 2005).

2.1 Curto-circuito monofásico (fase-terra)

Curto-circuito monofásico é o curto que ocorre entre uma das fases e o terra. Como mostra o esquema a seguir (ARAÚJO, 2005).

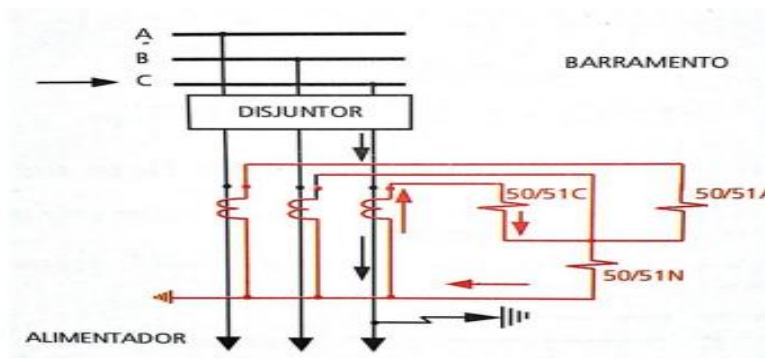


Figura 1- Curto-circuito fase-terra

Fonte: ARAÚJO, 2005

2.1.1 Curto-circuito bifásico (fase-fase)

Curto-circuito bifásico é o curto que ocorre entre duas das fases. Como mostra o esquema abaixo. (ARAÚJO, 2005).

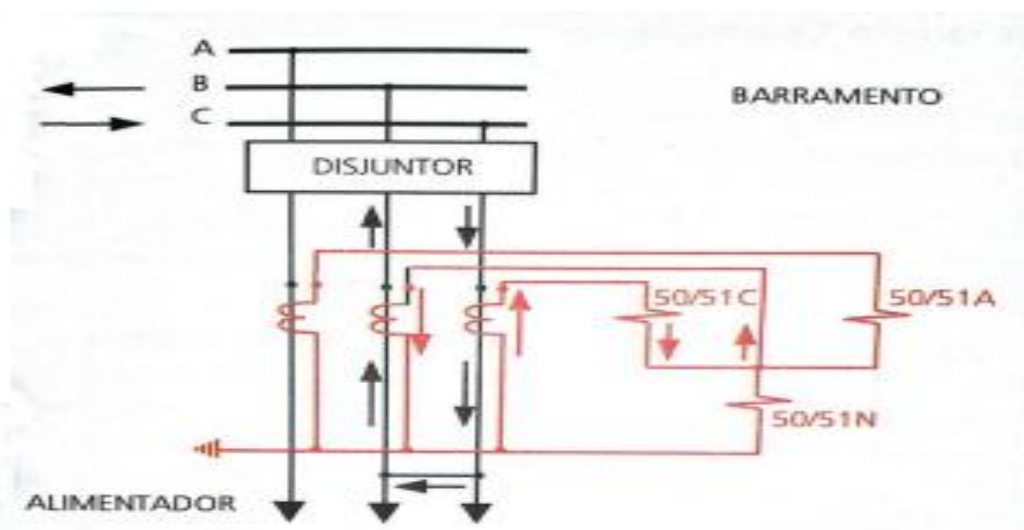


Figura 2- Curto-circuito fase-fase

Fonte: ARAÚJO, 2005

2.1.2 Curto-circuito trifásico (fase-fase-fase)

Curto-circuito trifásico é o curto que ocorre entre as três fases (ARAÚJO, 2005). Como mostra o esquema abaixo.

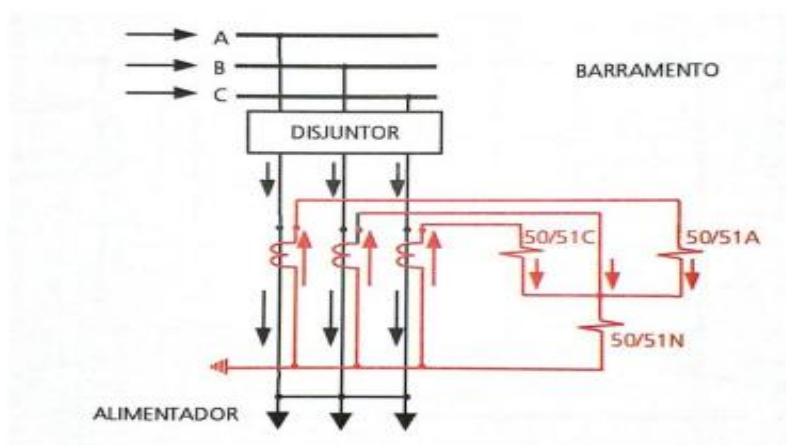


Figura 3- Curto-circuito fase-fase-fase

Fonte: ARAÚJO, 2005

2. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

O SEP é composto por vários dispositivos de proteção diferentes que estão localizados ao longo das redes de distribuição. No entanto, devido ao fato dessas redes serem predominantemente geradas por redes locais, elas são mais vulneráveis a falhas, que podem ter sido causadas por qualquer um dos seguintes:

- a) Abalroamento de veículos em postes;
- b) Descargas atmosféricas;
- c) Galhos de árvores tocando em condutores;

- d) Incidência de pipas;
- e) Instabilidade sistêmicas;
- f) Outros.

Segundo Ramos (2014), o principal objetivo desses dispositivos é fazer a proteção dos equipamentos instalados no sistema elétrico que possuem alta agregação. Além disso, a confiabilidade necessária e as consequências em caso de quando há um problema ou uma interrupção no fornecimento de energia, mostra a importância certifique-se de que o sistema funcione o maior tempo possível.

O objetivo de toda medida de segurança é manter até mesmo o menor concebível para o sistema, que está sempre sendo levado ao limite por eventos imprevistos. Da mesma forma, deve fornecer detalhes pertinentes ao operador do sistema, de modo a facilitar a detecção de falhas.

A base da segurança do sistema é uma abordagem metódica para escolher, implementar, integrar e ajustar os muitos componentes do sistema rede elétrica, de modo que quando algo der errado no circuito, isso separem-se do grupo sem afetá-los. A ênfase primária é quando ocorre uma falha, apenas o mínimo do sistema é desconectado que em um curto espaço de tempo, podemos diminuir o impacto sobre os motoristas, a população e o meio ambiente (BRAGA, 2011).

3.1 Terminologia de proteção

As terminologias utilizadas, segundo Mamede Filho; Mamede (2011), são assim definidas:

- a) Bloqueio – condição que o dispositivo de proteção permanece, uma vez efetuado uma ou mais operações de abertura / fechamento de seus contatos (ciclo de operação), não os fechando novamente.
- b) Capacidade Nominal: valor máximo da corrente que um componente ou equipamento do circuito podem conduzir sem que o acréscimo de temperatura provoque danos aos equipamentos ou a outros elementos vizinhos.
- c) Capacidade de interrupção ou abertura: é a maior corrente que o equipamento pode interromper sem sofrer qualquer dano.
- d) Característica de Operação: trata-se da curva tempo x corrente em que o religador, relé ou outro dispositivo de proteção irá atuar.
- e) Curto-Circuito: ligação acidental, ou intencional entre dois ou mais pontos de um circuito, por meio de pequena impedância.
- f) Coordenação: ato de dispor dois ou mais equipamentos de proteção em série seguindo determinada ordem de operação, estabelecida de acordo com uma filosofia e característica dos sistemas a ser protegido.
- g) Corrente de Curto-Circuito: elevação abrupta das correntes do circuito, que provoca arco-elétrico, podendo destruir componentes do sistema.
- h) Corrente de Pick-up: é a menor corrente exigida para fechar os contatos de um equipamento de proteção, não existe garantia que para esta dada corrente o equipamento irá.
- i) Equipamento Protetor: são equipamentos instalados à jusante da fonte.
- j) Equipamento Protegido: são equipamentos de proteção instalados do lado da fonte.
- K) Falhas: caracterizada por todo fenômeno acidental que impede o funcionamento de um sistema ou equipamento do SEP.
- l) Sequência de Operação: caracteriza-se pela sequência de desligamentos e religamentos de um equipamento com a intenção de eliminar as faltas de natureza transitória, a fim de assegurar a continuidade dos serviços. Caso a falta persistir, a interrupção do fornecimento deverá ser feita pelo equipamento mais próximo do trecho defeituoso.
- m) Seletividade: a capacidade do equipamento de proteção e coordenação mais próximo do defeito, de atuar de forma a desconectar e isolar a parte defeituosa do sistema elétrico.

n) Proteção Coordenada: é a proteção que foi projetada e ajustada que permite o restabelecimento automático em caso de faltas momentâneas e seletivas para as faltas sustentadas.

o) Proteção Seletiva: é a proteção projetada e ajustada para que, na ocorrência de quaisquer tipos de faltas, o equipamento protetor atue antes do dispositivo protegido, isolando assim o trecho defeituoso.

p) Zona de Proteção: É delimitada pelo trecho da rede protegida por um dispositivo de proteção, sendo a partir do curto-circuito fase-terra que será calculada

Todos têm atributos apropriado para uso, operação e alterações. Conseqüentemente, um ajuste adequado torna-se vital para manter a segurança do sistema e equipamentos submetidos para criar um curto-circuito. Segundo Ramos (2014), quanto mais rápido o desempenho, maior o valor de proteção, menos danos seriam causados ao equipamento colocado na estrutura.

Os relés, fusíveis embutidos em disjuntores e religadores, estão contidos em seus respectivos dispositivos. A maioria dos componentes é responsável por isolar o circuito danificado da fonte de alimentação dos circuitos de proteção da fonte que está sendo alimentada.

a) Disjuntores e relés

Os disjuntores atualmente empregados são a vácuo ou SF₆. são modernos e microprocessadores. Conseqüentemente, possui grande capacidade de ajuste, o que facilita a coordenação da proteção (CEMIG, 2017).

b) Religadores

Recentemente, as concessionárias de energia elétrica aumentaram a instalação de religadores e outros equipamentos de automação de alto valor, mas que fornecem níveis sofisticados de segurança, monitoramento e comando. Segundo Ramos (2014), a instalação deste equipamento minimiza as interrupções transitórias de energia, pois pode ser parametrizado com um intervalo de tempo entre os três ciclos.

Após uma falha transitória, o circuito religa automaticamente. Seu conceito está intimamente relacionado às correntes de falta, e seu comportamento de atuação é representado por curvas "tempo versus corrente". Tipicamente, mais corrente de falha reduz o tempo de funcionamento de um dispositivo.

Os religadores possuem sistema, conforme sugerido por Ramos (2014), controlado por um temporizador, para que a máquina possa ser ajustada aos requisitos do circuito:

Operação lenta: Configuração de tempo de extinção mais longo permanentemente, cortando todos os laços entre o ponto de falha e o religador.

Operações Rápidas: um ajuste que impede que os fusíveis explodam mais longe na linha de alimentação do equipamento enquanto ainda protege o sistema protegido.

c) Seccionadores

Seu uso está vinculado ao de um dispositivo de backup e oferece proteção automatizada. Normalmente, um equipamento a montante com religamento automatizado terá um religador instalado em sua zona de proteção (ND-4.15, 2017)

Embora possa interromper correntes até sua capacidade nominal, este dispositivo não pode lidar com situações de curto-circuito.

O seccionador está equipado com um contador de operação do equipamento reserva e um sensor de sobrecorrente. Para que ele funcione, uma corrente de curto-circuito deve passar pelo seccionizador, o que fará com que a parte traseira do dispositivo fique sensível. Com a parte traseira aberta, os contatos serão quebrados e a corrente do dispositivo será interrompida ou reduzida abaixo do nível de disparo. A partir daí, ele começará o processo de contagem do número de vezes que o maquinário a montante foi usado. O religador irá reenergizar o circuito quando uma quantidade de tempo predeterminada tiver passado. Caso o problema persista, o procedimento será repetido e a contagem do seccionador aumentará em um. Quando a contagem regressiva estiver completa, o seccionizador desabilitará o circuito que estava protegendo.

Eles são melhores em coordenar a energia do que os fusíveis. Usando o dispositivo que fecha a porta atrás de você quando você a abre. Supondo que certos requisitos sejam atendidos, ele é instalável.

As ligações de fusíveis não podem ser usadas devido à alta corrente quando houver cooperação de proteção insuficiente entre os fusíveis.

Circuitos extralongos que têm sido difíceis de trabalhar.

Chaves repetidoras

Como um dispositivo de proteção contra sobrecorrente monofásico de três aberturas, as chaves repetidoras são indispensáveis. Capacidades de fusíveis de até 40T ou 40K são possíveis com esses três fusíveis de base tipo C interligados, que foram construídos, integrados mecanicamente e eletricamente. É importante notar que apenas um dos três interruptores do conjunto realmente permitirá que a corrente flua pelo circuito. A outra chave do circuito recebe corrente do circuito quando esta chave é ativada. Sua corrente de curto-circuito é baixa o suficiente para que possa ser usada em redes rurais. Permite a remoção das primeiras falhas intermitentes.

As melhorias na continuidade e no fornecimento resultam da redução do número de interrupções do sistema da instalação e do número de viagens para manutenção e restauração do sistema, em comparação com as chaves fusíveis tradicionais. Como resultado, há uma redução significativa nas despesas operacionais, notadamente para as equipes que prestam esses serviços.

Chaves fusíveis

Conectar um cartucho carregando um fusível entre os terminais do interruptor do fusível é para que serve o gadget. Para proteger os sistemas de distribuição de danos causados por corrente excessiva, um conjunto de chaves e um fusível são frequentemente conectados em série como um dispositivo de proteção montado em fase.

Quando uma perturbação elétrica ocorre mais abaixo no circuito do ponto em que a chave fusível está instalada, a chave é ativada e o elemento fusível é destruído por uma corrente elétrica

maior que seu valor nominal. Na maioria dos casos, a razão fundamental para seus efeitos são ramos de árvores em contato com fios na rede podem causar descargas de ar e curtos-circuitos.

3. DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Essas salvaguardas garantem a segurança do sistema populacional. No entanto, é fundamental notar que a aplicação deve ser seguida e é necessária cooperação para o bom funcionamento desses gadgets (RAMOS, 2014).

4.1 Coordenação entre religador e religador

A coordenação religador-religador depende da análise da corrente mínima de atuação e das curvas tempo x corrente para garantir que o religador traseiro não opere na curva lenta para qualquer valor de curto-circuito na zona de proteção mútua. Em curvas rápidas é permitida a operação simultânea, mas em curvas temporizadas é necessária seletividade (com intervalo mínimo de 0,2 segundos, não ocorrerá nenhuma operação simultânea). Conforme pode ser observado na Figura 4 se a coordenação for alcançada nas curvas rápidas, os dois religadores atuarão em momentos separados, sendo que o religador de proteção atuará primeiro e posteriormente o religador protegido. (CEMIG, 2017).

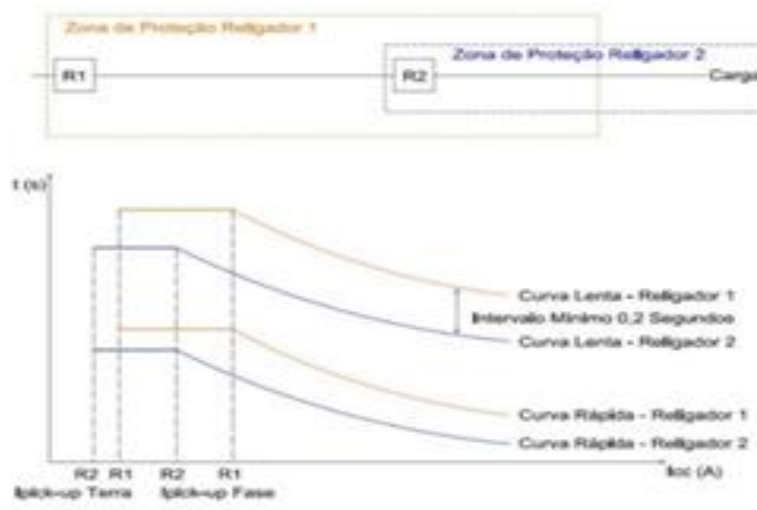


Figura 4- Coordenação Religador – Religador

Fonte: CEMIG, 2017

4.2 Coordenação entre religador e elo fusível

Para uma coordenação adequada, Mamede Filho e Mamede (2011) afirma que não deve haver mais de 0,20 s entre as curvas tempo versus corrente da unidade de sobrecorrente de fase e neutro e o fusível em toda a seção protegida do religador. Por esta razão, o elo fusível deve ser capaz de suportar todas as ações rápidas do religador sem ser danificado para que o sistema coordenado elimine com sucesso as faltas transitórias.

Para defeitos permanentes, a ND-5.15 (CEMIG, 2017) estabelece que o religador deve fornecer tempo suficiente para a fusão do elo fusível. Isso é para evitar a fusão incompleta do link e, potencialmente, problemas de coordenação incorreta. Um fechamento descoordenado ou um

fechamento parcial pode ser evitado se o religador permitir tempo adequado para o elo fusível se fundir.

O projeto da coordenação entre o religador e o fusível é mais bem feito com o religador configurado para duas operações na curva rápida e para duas operações na curva lenta (temporizada).

4.3 Aplicação de elo fusível

Nas concessionárias de energia elétrica, é prática comum a utilização de chaves fusíveis para proteção dos ramais de distribuição devido ao baixo custo de instalação e facilidade de uso do dispositivo (CEMIG, 2010; MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

Os seguintes padrões foram desenvolvidos com antecedência:

- a) Esteja ciente da corrente de carga no alimentador de média tensão.
 - b) Familiarize-se com as correntes de curto-circuito nas configurações trifásica, bifásica e fase-terra ao longo do ramal examinado.
 - c) Verifique se, para uma impedância de contato de pelo menos 40, a corrente nominal do elo fusível é pelo menos 25% maior que a menor corrente de curto-circuito fase-terra concebível na conclusão da seção.
 - d) A corrente nominal da chave deve ser pelo menos 150% maior que a corrente nominal do elo fusível, que será utilizada para proteger o ramal de distribuição.
- A corrente de carga máxima no ponto de alocação da chave deve ser maior ou igual a 150% da corrente nominal do link do fusível.
- f) Em sistemas não radiais, fornecer a conexão fusível para facilitar as transferências de carga.

4.4 Coordenação entre elos fusíveis

Cada fusível tem sua própria curva de corrente versus tempo, e uma certa corrente faz com que um fusível abra em um tempo predeterminado. Os links do tipo K têm atuação rápida, os links do tipo T têm ação lenta e os links do tipo H têm forte sobretensão e são, portanto, a melhor opção para transformadores (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

As conexões do tipo H evitam quedas de energia desnecessárias, acomodando correntes de curta duração como "inrush", "partida do motor" e "surtos atmosféricos". Sua principal função é proteger os transformadores de distribuição (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011). A proteção contra sobrecarga e sobrecorrente é um objetivo primário do projeto.

A proteção de ramais de alimentação em redes de distribuição aéreas geralmente faz uso de dispositivos Tipo K devido ao seu rápido tempo de resposta. São divididos em duas categorias, cada uma das quais fornece informações ao usuário sobre a interdependência dos fusíveis exclusivamente dentro da mesma categoria. Os números 6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140 e 200 são os preferidos.

Tipo T: fornece tempo de atuação lento, é mais lento para grandes correntes e permite coordenação em uma faixa de corrente mais ampla; os tipos 8, 12, 20, 30, 50 e 80 não são recomendados.

Há também as categorias preferidas e não preferidas.

Para garantir que o menor número possível de consumidores seja interrompido, é crucial usar requisitos mínimos de coordenação e seletividade. É vital entender a distinção entre um link de proteção e uma conexão protegida para entender o layout dos links de fusíveis. Os links de fusíveis, tanto blindados quanto protetores, são vistos na Figura 5, com o propósito pretendido do último ser proteger o primeiro de quaisquer problemas potenciais na rede de média tensão mais a jusante.



Figura 5- Posição dos Elos Fusível Protegido e Protetor
Fonte: Adaptada de Mamede Filho e Mamede (2011)

5. MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROTETORES DE REDE PARA A PROTEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Após as descrições preliminares apresenta-se duas versões de ferramentas de proteção denominadas "protetores de rede" que foram construídas inteiramente em um computador. Nas redes de distribuição de energia elétrica de topologia reticulada, são instalados protetores de rede para identificar a presença de fluxo reverso de potência nos transformadores de distribuição. Essas configurações de rede proporcionam grande estabilidade no fornecimento de energia devido ao uso de pelo menos duas alimentações principais. Um curto-circuito nos alimentadores primários se manifesta como uma inversão de corrente nos transformadores desta topologia. O fluxo reverso da falta se origina das contribuições da rede secundária das outras alimentações principais. Juntamente com a proteção de sobrecorrente dos alimentadores primários, o protetor de rede ajuda a isolar completamente o curto-circuito isolando os transformadores ligados ao alimentador ausente de suas conexões com a rede secundária. Para examinar como eles reagem à fluxos de energia diretos e inversos, como um curto-circuito ou energia excedente da DG. A ferramenta de simulação *Simulink* no *Matlab* foi utilizada para realizar todas as análises e modelos fornecidos, e o pacote *SimPowerSystems* foi utilizado para simular redes elétricas.

5.1 Modelagem de protetores de rede

Seguindo o formato de IEEE.1547.6 (2011), apresenta-se nesta seção um diagrama de exemplo de um protetor de rede juntamente com uma explicação dos papéis desempenhados por suas várias partes, conforme estudos realizados por Kanehira et al., (2020). Em seguida, demonstra-se dois modelos computacionais de sistemas de segurança de rede. O primeiro

protetor de rede aderiu ao IEEE.1547.6 (2011), enquanto o segundo aderiu aos padrões da Eaton (2019). Devido às suas metodologias distintas, esses dois modelos foram selecionados para uma análise de cenários comparativos de seus respectivos comportamentos.

A Figura 6 mostra os componentes fundamentais de um protetor de rede, incluindo o protetor de rede, a unidade de rede reticulada e a ligação entre os principais alimentadores de distribuição (média tensão) e a rede secundária (baixa tensão). Transformador e protetor de rede são ambos componentes da unidade de rede reticulada. Os terminais secundários do transformador estão ligados ao protetor de rede.

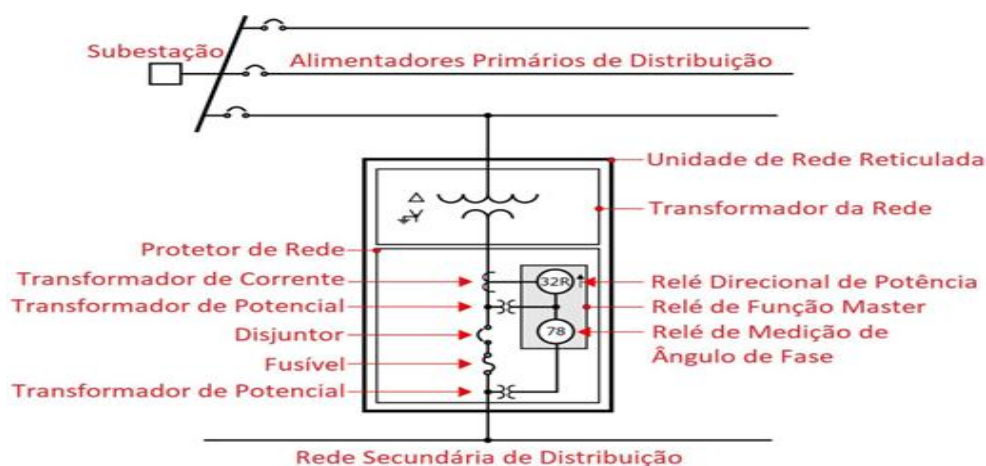


Figura 6- Composição de uma unidade de rede reticulada, que inclui o transformador e o protetor de rede
Fonte: (IEEE.1547.6 2011).

Os transformadores de corrente e potencial, fusível e disjuntor compõem o protetor de rede, juntamente com um relé direcional de potência (ANSI 32R) e um relé de medição de ângulo de fase (ANSI 78). Quando o relé de potência direcional detecta uma corrente negativa, ele envia um sinal ao disjuntor para liberar o circuito. Quando o relé de medição do ângulo de fase detecta que as tensões dos terminais estão dentro de uma faixa aceitável, o disjuntor pode ser redefinido para sua posição desligada assim que a falha for eliminada. Quando o protetor de rede falha, o fusível protege você ainda mais (IEEE.1547.6 2011). Os modelos computacionais desenvolvidos centram-se no relé de potência direcional (ANSI 32R).

5.2 Primeiro modelo de protetor de rede baseado em IEEE.1547.6 (2011)

O IEEE.1547.6 (2011) forneceu a base para o primeiro modelo de firewall de rede. A modelagem de computador resultante é representada na Figura 7.

Os blocos K_n e I são usados para medir tensão e corrente em três fases. É o trabalho dos blocos CEP e RTC reduzir a tensão e a corrente para limites seguros para o relé. Quando a força do sinal é suficiente para o relé, o bloco Filtro Analógico inicia o processo de filtragem do sinal. Para amortecer os sons de alta frequência, este filtro é um passa-baixo Butterworth de ordem 2^o com uma frequência de corte de 360 Hz.

O sinal é então discretizado usando um bloco de Discretização. A maioria dos relés de proteção para sistemas de distribuição (SALLES, 2007) discretiza a uma frequência de 960 Hz, que é alcançada por uma técnica de Amostragem e Retenção que captura 16 amostras a cada ciclo de onda (SALLES, 2007).

O sinal é então enviado através de um filtro digital baseado na Transformada de Fourier, o Filtro Digital (*Fourier*), cujas saídas são o módulo e o ângulo de fase da componente fundamental do sinal (1ª harmônica).

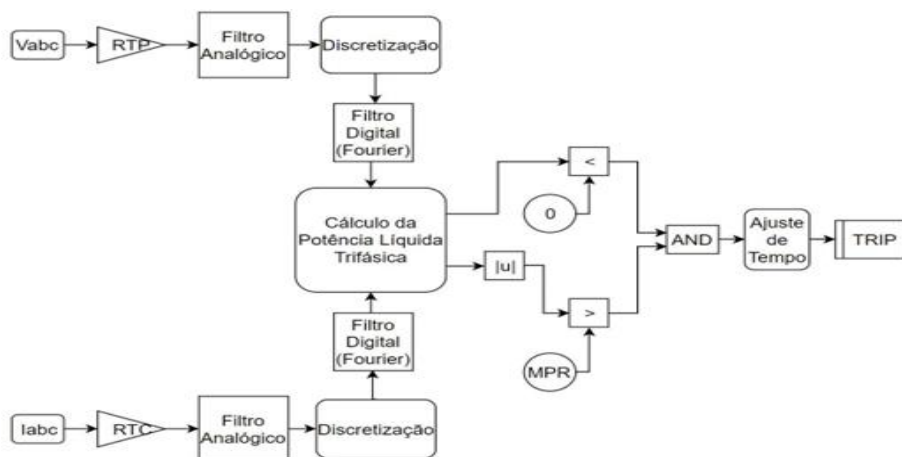


Figura 7- Primeiro modelo de protetor de rede
 Fonte: Baseado em IEEE.1547.6 (2011).

O estágio lógico de decisão do relé segue o estágio de processamento do sinal (pré-processamento), que termina no bloco Filtro Digital (*Fourier*). Para isso, deve-se determinar a potência da rede trifásica que passa pelo protetor de rede. O cálculo é realizado no bloco Cálculo da Potência Líquida Trifásica, com os passos descritos em (1) aplicados a cada uma das três fases do sistema: P = potência ativa relativa a uma fase do sistema, V_{ef} = tensão de fase rms, I_{ef} = corrente da fase rms, θ_v = ângulo de fase da tensão de fase rms e θ_i = ângulo de fase da corrente de fase rms. As três potências calculadas são unidas para obter a potência líquida trifásica quando os cálculos são feitos.

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (1)$$

Uma contagem de ajuste de tempo acontece no bloco de Ajuste de Tempo se a alimentação da rede trifásica for negativa e seu módulo for maior que a Potência Reversa Máxima Permitida (ajuste de tolerância). O TRIP do disjuntor trifásico correspondente ocorre se a alimentação permanecer negativa e o módulo for maior que a tolerância para todo o período de tempo escolhido. Se parar de contar, espera por um novo sinal de início antes de reiniciar o processo. Ao implementar desta forma, a atuação desnecessária é evitada para fenômenos transitórios rápidos.

5.3 Segundo modelo de protetor de rede conforme EATON (2019)

O segundo protetor de rede modelado foi baseado em Eaton (2019). A Figura 8 apresenta o resultado da modelagem computacional construída.

O procedimento de processamento do sinal (pré-processamento) é o mesmo do primeiro modelo. Em outras palavras, os blocos U₁ e I₁ são usados para ler as correntes e tensões trifásicas. A intensidade do sinal é reduzida pelos blocos RTP e RTC, enquanto o ruído de alta frequência é amortecido por um filtro passa-baixa aplicado aos sinais de entrada. Posteriormente, a Transformada de Fourier é usada para aplicar filtragem e discretização digital ao sinal.

Assim, o relé começa a se desligar do projeto original. Os blocos Comp são usados para determinar os componentes simétricos de tensão e corrente. Consistente com o Teorema de Fortescue sobre Componentes Simétricos, portanto, sim. As saídas do bloco são o ângulo de fase da tensão de sequência positiva (THETA V1), a magnitude da corrente de sequência positiva (THETA I1) e o ângulo de fase da corrente de sequência positiva (THETA VI).

Para realizar o cálculo indicado em (2), os valores de saída são enviados para o bloco CALCULATION. I₁ representa a magnitude da corrente de sequência positiva, θ_{v1} o ângulo de fase da tensão de sequência positiva e θ_{i1} o ângulo de fase da corrente de sequência positiva.

$$\text{Cálculo} = I_{a1} \cos(\theta_{V_{a1}} - \theta_{I_{a1}}) \quad (2)$$

Segundo Eaton (2019), o ajuste de tolerância no bloco Percent Adjustment pode variar de 0,05% a 5% do valor da corrente nominal do transformador associado, e o tempo contado no bloco Ajuste de Tempo ocorrerá se o cálculo for negativo e sua módulo é maior que a configuração de tolerância. O TRIP ocorre no disjuntor trifásico correspondente se o cálculo for consistentemente negativo e tiver um módulo maior que o valor de tolerância para a duração do intervalo de tempo. Se a contagem não continuar, aguarda-se o sinal para recomeçar.

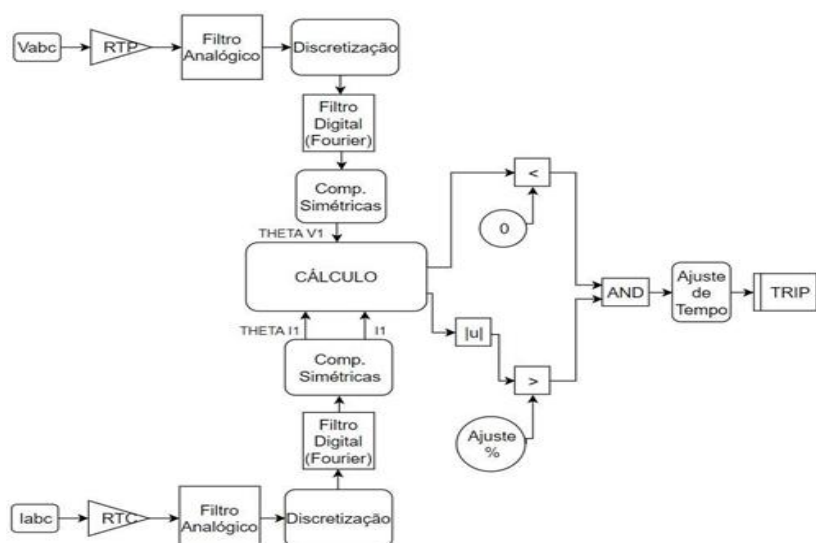


Figura 8. Segundo modelo de protetor de rede
Fonte: Baseado em Eaton (2019).

A técnica utilizada consiste em verificar as configurações de cada protetor de rede modelado para verificar se melhoram (ou não) o desempenho da rede em cenários de fluxo de potência direto e reverso.

Uma rede de teste com topologia malha reticulada foi utilizada para caracterizar as situações de fluxo de potência direta e reversa, com um total de 20 barras e quatro transformadores (cada um com seu próprio protetor de rede). Modelos de subestação, linha, transformador e carga estão todos incluídos na biblioteca *SimPowerSystems*. Na Figura 9 vemos uma representação simplificada de uma linha do secundário de baixa tensão da rede de teste.

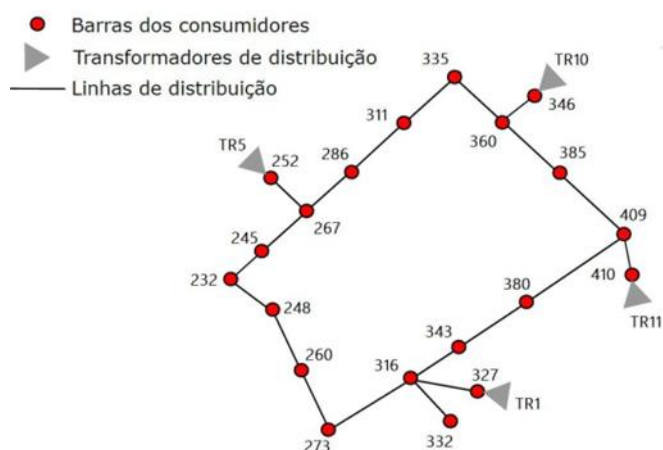


Figura 9 Diagrama unifilar do secundário (baixa tensão) da rede de testes
Fonte: AZEVEDO, 2010

Na Figura 10 observa-se um gráfico de linha simples da tensão principal (média) da rede de teste. Existem 3 alimentadores principais em 13,8 kilovolts no sistema (001-041, 001-053 e 001-126). O transformador TR1 é alimentado pelo alimentador primário 001-041 e é protegido pelo interruptor principal PR1. O transformador TR5 é conectado a um protetor de rede PR5 através do alimentador primário 001-053. Por fim, os transformadores TR10 e TR11 são conectados aos protetores de rede PR10 e PR11, respectivamente, através do alimentador primário 001-126. Conectados à rede secundária de baixa tensão de 220V estão os protetores de rede PRI, PR5, PR10 e PR11 através dos barramentos 327, 252, 346 e 410, respectivamente. São transformadores aterrados em delta-estrela (13,8 kV / 220 V). Este sistema opera em 60 hertz. Para garantir que as faltas nas primárias dos alimentadores sejam totalmente isoladas, foi instalada proteção de sobrecorrente (ANSI 50/51) no início de cada um dos três alimentadores primários (saindo da subestação) e no alimentador principal da subestação, a montante do barramento 001. De acordo com Kanehira, Wagner e Vieira Jr. (2019) e Salles (2007), foram implantadas as salvaguardas ANSI 50/51 (2007).

A metodologia incluiu caracterizar 3 situações diferentes na rede de teste e observar o desempenho (ou falta dele) dos protetores de rede para fluxo direto nos quatro transformadores com o sistema sem GD em carga média (50% da potência de carga instalada), (ii) fluxo reverso no transformador PRI, devido a um curto-circuito no meio do alimentador primário 001-041, com o sistema sem DG em carga média (50% da potência de carga instalada), e (iii) reversão de o Cabe

ressaltar que foram realizadas duas simulações para cada um dos três cenários, uma para cada modelo de protetor de rede e posteriormente analisadas separadamente.

No cenário (iii), foram utilizadas as recomendações de Wagner, Kanehira e Vieira Jr.(2019) para modelagem, condições de irradiação, temperatura, carregamento e alocação do gerador. Às 16h (49% da carga máxima, 900 W/m² e 40°C), os 10 geradores da rede colocados aleatoriamente (barras 232, 252, 286, 335, 360, 409, 380, 316, 373 e 248) espera-se que opere em circunstâncias representativas de um perfil doméstico típico. Uma das quatro alimentações da rede experimenta fluxo reverso quando os geradores produzem 78,7% da carga máxima dos barramentos aos quais estão ligados (TRII).

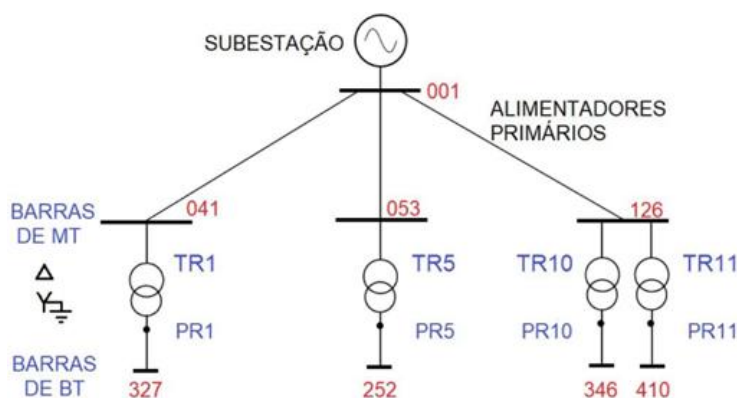


Figura 10- Diagrama unifilar do primário (média tensão) da rede de testes
Fonte: AZEVEDO, 2010

Todas as simulações usaram uma configuração de 100 W para a tolerância de potência reversa MPR do primeiro protetor de rede e um valor de 0,05% para o segundo protetor de rede. Ambos os escudos foram programados para ativar a cada 33,3 milissegundos, ou a cada duas ondas.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção demonstra-se os resultados obtidos no experimento realizado por Kanehira et al., (2020) sobre modelagem computacional de protetores de rede para a proteção de redes de distribuição de energia elétrica.

6.1 Condição de Operação de Fluxo Direto

Na Tabela 1, podemos ver os resultados da execução de uma simulação sob condição I fluxo direto nos quatro transformadores com o sistema sem GD operando em carga média (50% da potência de carga instalada). Como pode ser observado, a potência ativa P (kW) que passa pelos terminais dos protetores de rede (e, por extensão, seus transformadores correspondentes) é positiva, indicando uma corrente contínua. Isso impede que os protetores de rede façam seu trabalho (Status ativado para todos os 4 protetores de rede).

Tabela 1. Comportamento dos dois modelos de PRs em relação a condições de fluxo direto de potência em condições normais, sem GD

		PR1		PR10	PR11
	P (kW)		47,6	23,2	30,3
Modelo 1	Status		On		On
Modelo 2	Status	On	On	On	On

6.2 Resultados obtidos no fluxo reverso devido a um curto-circuito em um dos alimentadores primários

Com referência à Tabela 2, os resultados da condição simulada (ii) fluxo reverso no transformador PRI como resultado de um curto-circuito no centro do alimentador primário 001-041 com o sistema sem DG operando em carga média (50%) de a potência de carga instalada são mostradas. A falta aplicada era do tipo trifásico e a resistência da falta era de 10 D. O fluxo reverso (potência negativa) é confirmado para ocorrer em PR1 como resultado da falta, levando à atuação de PR1 (Status OFF) e resultando em um novo cenário de estado estacionário envolvendo apenas 3 transformadores. Os protetores da rede fizeram bem seu trabalho.

Tabela 2. Comportamento dos modelos de PRs em relação à condição de fluxo reverso de potência ocasionado por falta trifásica de 10 f2 no alimentador primário 001-041

		PRI	PR5	PR10	PR11
Pré-Falta	P (kW)	37,5	47,6	23,2	30,3
	Modelo 1	On	On	On	On
	Modelo 2	On	On	On	On
Durante a Falta	P (kW)	-90,5	120,0	42,0	134,0
	Modelo 1	OFF	On	On	On
	Modelo 2	OFF	On	On	On
Após Isolação da Falta	P (kW)	0	59,9	27,3	47,3
	Modelo 1	OFF	On	On	On
	Modelo 2	OFF	On	On	On

Embora apenas o primeiro modelo PR tenha sido considerado por Kanehira, Wagner e Vieira Jr. (2019), verificou-se que os protetores de rede funcionam adequadamente para condições de falta que resultam em fluxo de potência reverso, incluindo faltas trifásicas 10 f2, faltas bifásicas e bifásicas à terra e diferentes valores de resistência de falta. É importante notar que isso só acontece dentro de uma faixa específica de valores de resistência de falha com base

no nível de carga do sistema e no tipo de falha, como em resistências de falha mais altas, fluxo reverso de energia deixa de ocorrer e o PR não entra em vigor nestas condições.

6.3 Resultados obtidos no fluxo reverso devido ao excedente de GD na rede secundária

Como esperado, o fluxo reverso devido à abundância de geração descentralizada de energia produziu problemas na rede. Assim que o protetor de rede do TR11 pegou na corrente inversa, ele desligou o transformador. Isso não apenas resultou na perda desnecessária de um transformador para a rede, mas também produziu fluxo reverso no TR10, que por sua vez levou à abertura do PR correspondente, que por sua vez levou à rede sem o alimentador primário 001-126. Dois transformadores e dez geradores distribuídos estabilizaram o sistema. Isso demonstra como a falta de salvaguardas suficientes pode causar um efeito dominó, que pode resultar em um desligamento completo da rede (WAGNER; KANEHIRA; VIEIRA JR., 2019). A Tabela 3 exibe os achados coletados para ambos os modelos de PR.

Tabela 3. Comportamento do 1º modelo de PRs em relação à condição de fluxo reverso de potência no TRII ocasionado por excedente de geração distribuída.

	PR1		PR5	PR10	PR11
Fluxo Reverso no TR11	P (kW)	1,9	3,4	0,3	-0,6
	Modelo 1	On	On	On	OFF
	Modelo 2	On	On	On	OFF
Fluxo Reverso no TR10	P (kW)	1,3	4,3	-0,8	0,0
	Modelo 1	On	On	OFF	OFF
	Modelo 2	On	On	OFF	OFF
Sistema em Estabilidade	P (kW)	0,5	3,6	0,0	0,0
	Modelo 1	On	On	OFF	OFF
	Modelo 2	On	On	OFF	OFF

Comparado aos carregamentos antes de TR10 e TR11 serem desconectados, o carregamento de TR1 foi reduzido em 73,7%, enquanto o carregamento de TR5 aumentou 5,9%.

Assim, as salvaguardas simuladas para as redes modeladas funcionam como esperado. Além de confirmar que há um problema com DG excessivo na rede secundária, isso também forneceu mais evidências de que os guardiões da rede estavam agindo de forma inadequada (embora corretamente).

Ambos os modelos de protetores de rede apresentam o mesmo comportamento na presença de disparos, conforme pode ser demonstrado nas Tabelas 2 e 3, permitindo validar o correto funcionamento dos dois projetos. Deve-se notar que os períodos de operação dos dois

modelos não eram idênticos, mas as discrepâncias foram consideradas inconsequentes por serem comparáveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para evitar falhas catastróficas, como a explosão de um transformador em uma subestação ou a perda de energia para um número significativo de clientes, a rede de distribuição elétrica é protegida isolando a parte onde ocorreu a falha.

Neste estudo foram delineadas algumas condições fundamentais que devem ser cumpridas para que a proteção da rede elétrica de distribuição seja bem-sucedida. A seletividade da rede de distribuição e a sincronização entre os equipamentos de proteção são duas das considerações mais vitais entre essas necessidades. Porque atender a essas condições ajudará a evitar mais danos à rede, isolando o problema e coordenando o uso de dispositivos de proteção.

A ANEEL é a agência reguladora responsável pelo monitoramento do desempenho das concessionárias de energia elétrica (Agência Nacional de Energia Elétrica). A missão da ANEEL é dupla: primeiro, proteger uma ampla gama de clientes dos efeitos de problemas no sistema de distribuição e, segundo garantir a segurança de todos os envolvidos no fornecimento de energia.

O órgão responsável (ANEEL) define DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC como metas a serem alcançadas pelas concessionárias; caso as metas não sejam atingidas, as concessionárias são obrigadas a ressarcir financeiramente os clientes.

Com isso em mente, fica claro que as concessionárias de distribuição devem realizar pesquisas e projetos regularmente para garantir que o sistema de proteção na rede de distribuição de energia permaneça em condições de operação de ponta.

Em geral, os protetores de rede simulados funcionaram conforme previsto durante os eventos de fluxo reverso trouxeram um curto-circuito ou uma superabundância de GD. Foi estabelecido que as redes reticuladas podem ter sérias dificuldades como resultado do crescimento da DG devido ao desempenho abaixo da média dos PRs. Portanto, é fundamental a realização de pesquisas e estudos sobre o tema para que a característica de confiabilidade desta arquitetura de rede de distribuição seja aprimorada pela contínua injeção de geração dispersa nos centros consumidores. O estudo continua enfatizando a importância de mais pesquisas sobre possíveis melhorias no sistema de proteção como forma de resolver o problema. Futuras pesquisas na área de magnitudes podem usar os estudos de modelagem apresentados como base.

Neste estudo foram delineadas algumas condições fundamentais que devem ser cumpridas para que a proteção da rede elétrica de distribuição seja bem-sucedida. A seletividade da rede de distribuição e a sincronização entre os equipamentos de proteção são duas das considerações mais vitais entre essas necessidades. Porque atender a essas condições ajudará a evitar mais danos à rede, isolando o problema e coordenando o uso de dispositivos de proteção.

Com isso, fica claro que as concessionárias de distribuição devem realizar pesquisas e projetos regularmente para garantir que o sistema de proteção na rede de distribuição de energia permaneça em condições de operação de ponta.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, C. A. S. et al. **Proteção de Sistemas Elétricos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2005.

BRAGA, Mozart Ferreira JR. **Elaboração de Estudos de Proteção de Redes de Distribuição**. Dissertação (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal De Juiz de Fora, Juiz De Fora, 2011.

BRASIL. **Infraestrutura**. Brasília: Serviços e Informações do Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/entenda-coo-a-energia-elétrica-chega-sua-casa>. Acesso em: 14 jun. 2022.

CAIXETA, G. P. Modelos de Componentes de Redes Elétricas. *In: XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica SENDI*, 2008. Pernambuco, 2008

CEMIG DISTRIBUIÇÃO AS. **Norma Técnica de Distribuição, ND 4.15**. Proteção de Sobrecorrentes do Sistema de Distribuição de Média Tensão da Cemig Belo Horizonte, 2017. Disponível em: https://www.cemig.com.br/wpcontent/uploads/2020/07/nd_4_15_000001p.pdf. Acesso em: 25 nov. 2022

CPFL- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **NORMAS TÉCNICAS. Proteção de redes aéreas de distribuição – sobrecorrente – 07**. São Paulo: CPFL, 2003. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/normas-tecnicas>. Acesso em: 14 jun. 2022.

CPFL ENERGIA. **Norma Técnica Distribuição 2912, versão 1.1**. Proteção de Redes Aéreas de Distribuição – Sobrecorrente. Campinas: CPFL Energia, 2003

EATON. **CM52 Advanced Deadfront Network Protector**. [S. l.]: Eaton, 2019. Disponível em: <https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/utility-and-grid-solutions/cm52-advanced-deadfrontnetwork-protector.html>. Acesso em: 30 set. 2022.

IEEE.1547.6. **IEEE recommended practice for interconnecting distributed resources with electric power systems distribution secondary networks**. [S. l.]: IEEE Std 1547.6. 2011, p. 1-38.

KANEHIRA, A. K. B.; WAGNER, F. M.; DE PAULA, S.; VIEIRA JR., J. C. M. Modelagem Computacional de Protetores de Rede para a Proteção de Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Topologia Reticulada. **Sociedade Brasileira de Automática**, v. 1, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2241>. Acesso em: 16 out. 2022

KANEHIRA, A. K. B.; WAGNER, F. M.; VIEIRA JR., J. C. M. Avaliação da Influência das Proteções contra Curtos-Circuitos na Qualidade da Energia Elétrica em Redes de Distribuição Reticuladas. *In: XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE 2019)*, São Caetano do Sul, BR, 2019, p. 1-6.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, R. D. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. São Paulo: LTC, 2011.

MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. São Paulo: GEN / LTC, 2020.

PRODIST. **Distribuição ANEEL- Módulo 8**. [S. l.]: Prodist, 2012. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 14 jun. 2022

PRODIST. **Indicadores Individuais de Continuidade**. [S. l.]: Prodist, 2012. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2> > Acesso em: 15 jun. 2022

RAMOS, Maicon Jaderson da Silveira et al. **Metodologia para análise da coordenação e seletividade de dispositivos de proteção durante reconfigurações de redes de distribuição**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SALLES, N. J. **Modelagem e análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos**. 2007. 203 f. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, Campinas, 2007.

WAGNER, F. M.; KANEHIRA, A. K. B.; VIEIRA JR., J. C. M. Avaliação dos Impactos Causados por Geração Solar Fotovoltaica na Qualidade da Energia Elétrica em Redes de Distribuição Reticuladas. *In: XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE 2019)*, São Caetano do Sul, BR, 2019, p. 1-6.