

ESTUDO DE MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE SUBESTAÇÕES PARA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

MODERNIZATION STUDY OF THE SUBSTATION PROTECTION SYSTEM FOR ELECTRIC ENERGY DISTRIBUTION

Wallace Luna de Oliveira
wallacelunna@hotmail.com

Marcos Vinícius Campbell Ferreira
marcosvcampbell@outlook.com

Centro Universitário Newton Paiva – Belo Horizonte, MG, Brasil

Submetido em: 08 dez.2021. Aceito em: 21 jun. 2022.

RESUMO

O objetivo deste artigo é abordar de uma forma clara e concisa, um estudo comparativo entre os relés de proteções elétricas eletromecânicos e os digitais aplicados a sistemas de energia elétrica, demonstrando as vantagens e desvantagens desses dispositivos, os benefícios, a eficiência e a segurança que a tecnologia dos relés digitais pode proporcionar ao sistema de proteção. Desta forma, assegura e preserva a operação com qualidade dos equipamentos que compõe o sistema elétrico de potência, como também a qualidade do fornecimento da energia elétrica. A pesquisa fez uma análise comparativa das características técnicas entre relés digitais de modelos e fabricantes diferentes, utilizados em uma subestação de energia, onde foi demonstrado que independente do modelo e/ou fabricante, os relés digitais são projetados com uma grande variedade de funcionalidades em relação aos relés eletromecânicos.

Palavras-chave: Relé eletromecânico. Relé digital. Comparação. Modernização. Recursos.

ABSTRACT

This article there is the objective to approach clearly and concise, a comparative study between the eletctromechanical protection relays and the digitals applied to electrical system, demonstrating the advantages and disadvantages these devices, the benefits, the efficiency and the safety that the technology of the digitals relays can provide on system protection. This way, it ensures and preserves the quality operation of the equipment that compose the electrical power system, as well as the quality of the electrical energy supply. The research compared technical characteristics between digital relays of different types and/or manufacturers, the digital relays are designed with wide variety of functionalities regarding to electromechanical relay.

Keyword: Electromechanical Relay. Digital Relay. Comparison. Modernization. Resources.

1. INTRODUÇÃO

Durante a operabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica, podem haver falhas e interrupções constantes do fornecimento de energia, sendo a causa mais comum para tal interrupção o curto-circuito. O sistema de distribuição é afetado mais frequentemente por perturbações do que nos sistemas de transmissão. Essas perturbações são causadas pela proximidade do sistema com a atividade humana, contato de árvores nas linhas de distribuição e sobrecarga no sistema, o que pode ocasionar mau funcionamento, redução da vida útil ou dano imediato de equipamentos (SCHWEITZER; SCHEER; FELTIS, 1992). Tais sistemas necessitam de fiscalização constante, sendo os relés de proteção os mais indicados para tal supervisão (TEIXEIRA; ROSA, 2020).

Os relés de proteção são os dispositivos mais importantes de um sistema de proteção, pois são eles que estabelecem a operabilidade dos disjuntores para desligar ou ligar determinado circuito. Dentre eles pode-se citar os relés eletromecânicos, que são utilizados nos esquemas de proteção de consumidores industriais e residenciais de grande porte, além dos sistemas de proteção das companhias de eletricidade. Há, porém, algumas desvantagens no seu uso, como o tempo gasto para sua calibração e manutenção por parte das empresas de eletricidade. Essa necessidade se dá pela quantidade de peças móveis e frequentes reajustes no equipamento (RUFATO JR, 2006).

Com o avanço e modernização da tecnologia industrial, da microeletrônica e da ampliação de *softwares*, os relés digitais veem ganhando vantagens em instalações, remodelações antigas, em sistemas elétricos de proteção e em empresas de eletricidade quando comparado aos relés eletromecânicos (RUFATO JR, 2006).

A utilização dos relés digitais vem sendo cada vez mais frequente devido a sua melhor resposta sobre as perturbações do sistema. Algumas vantagens levam a utilização dos relés digitais como a capacidade de proteção de autodiagnosticar tomando atitudes para reduzir ações incorretas, muitas opções de atualizar e alterar o *firmware*, melhor performance que os relés eletromecânicos e eletrônicos devido a multifunções de um mesmo *hardware* (VELOSO, 2006). Neste artigo, será discutida a viabilidade técnica e econômica da modernização do sistema de proteção de subestações distribuidoras de energia elétrica.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Relé de proteção Eletromecânico

Os relés de proteção eletromecânicos são os tipos de relés tradicionais, a primeira classe de proteção criada. São compostos de dispositivos físicos como bobina, disco de indução, molas, contatos fixos e móveis que lhe caracteriza ser robusto, assim, utilizam propriedades eletromagnéticas para movimentar mecanismos que acionam o relé, desligando o sistema em falta (KINDERMANN, 2018). No geral, esses relés apresentam apenas uma única função de proteção, tendo há a necessidade de se aplicar vários relés para outras funções de proteção, criando assim um sistema de proteção mais confiável.

“Apesar de não serem mais fabricados, ainda são encontrados como tecnologia *legacy* nos esquemas de proteção para consumidores industriais e residenciais das companhias de eletricidade no Brasil (RUFATO JUNIOR, 2006). Os relés eletromecânicos são baratos e robustos, o que lhes garante uma vida útil prolongada, sendo assim, só são substituídos quando houver o *retrofit* da proteção de uma subestação, ou seja, quando houver a modernização da proteção dessas subestações, ou ainda em virtude de um defeito no relé.” (HORNUNG; KUSSEK, 2017).

2.1.1. Vantagens dos relés eletromecânicos

Aspectos vantajosos dos relés eletromecânicos são:

- **Durabilidade e robustez** – com manutenções periódicas, pode-se conseguir elevada vida útil do equipamento.
- **Ambiente de instalação** – o relé não apresenta instabilidade em seu funcionamento em ambientes de altas temperaturas e umidade;

- **Baixa sensibilidade a surtos eletromagnéticos** – É necessário que a energia associada a esse tipo de fenômeno seja relativamente alta para algum dano.
- **Confiabilidade** – em relação a sua atuação para as condições especificadas.

2.1.2. Desvantagens dos relés eletromecânicos

As desvantagens dos relés eletromecânicos estão em alguns aspectos, tais como:

- **Velocidade** – sua operação é lenta;
- **Ruídos e arcos** – produzem ao serem acionados, principalmente na comutação de cargas indutivas;
- **Estrutura** - são pesados, caros e volumosos, assim necessitam de uma alta potência para seu funcionamento;
- **Instalação** – necessitam de maior espaço físico e com isso um custo maior;
- **Manutenção** – necessitam de profissionais experientes, e nos atuais dias é difícil de encontrar peças para reposição;
- **Limitações de funcionalidades** – apresentam apenas uma função de proteção, ajuste de *pick-up* limitado, não possuem histórico de eventos de ocorrência no sistema e não possuem oscilografia.

2.2. Relé de proteção Digital

Os relés de proteção digital são um avanço da eletrônica e da computação. Eles possuem os mesmos princípios das funções de proteção dos demais relés. É um equipamento gerenciado por microprocessadores onde os sinais de entrada das grandezas elétricas e uma programação por interface são controlados por um *software* que processa toda a lógica de proteção por um algoritmo (KINDERMANN, 2018).

O relé digital é um microcomputador que incorpora várias funções de proteção em um só equipamento e pode desempenhar funções de medição e controle, como por exemplo, verificar os valores eficazes de tensão e corrente do sistema diretamente no dispositivo de proteção e enviar comandos de abertura e fechamento para chaves de disjuntores. Os relés digitais podem executar várias outras multitarefas, tais como:

- | | |
|---|---|
| • Proteção do sistema; | • Medição de grandezas elétricas; |
| • Supervisão de rede; | • Obtenção de dados para relatórios de eventos; |
| • Conexão com computadores; | • Religamento de disjuntores; |
| • Auto supervisão; | • Autoteste. |
| • Identificação do tipo de defeito e sua localização; | |
| • Oscilografia; | |

2.2.1. Vantagens dos relés digitais

As vantagens dos relés digitais podem se comparar com a de um microcomputador, pois este equipamento não necessita de ajuste de forma física em seus parâmetros ~~iguais~~ são como acontece nos relés convencionais, os acionamentos são efetuados pelo *software* que converte em uma série de operações em linguagem que por meio de portas lógicas executa a atuação do *hardware* do circuito (KINDERMANN, 2018).

- **Custo** – inicialmente o custo dos relés digitais eram relativamente altos comparados com os relés convencionais, mas com o passar dos anos o custo desse equipamento foi reduzido consideravelmente (GONDIM, 2010);

- **Confiabilidade global e autodiagnóstico** – os relés digitais possuem a capacidade de se autodiagnosticarem, ou seja, são capazes de monitorar seus sistemas de *hardware* e *software*, com isso qualquer defeito interno a ele é detectado e pode se colocar fora de operação e indicar um sinal a central de monitoramento operacional. É uma importante característica que torna favorável a sua escolha e torna a favor de sua escolha (RUFATO JR, 2006);
- **Flexibilidade** – os relés digitais podem ser programados para executar diversas funções de proteção, assim como a forma da função de atuação em relação ao tempo, possibilitando uma melhor coordenação no sistema de proteção. Estes relés possuem vários níveis de ajustes que de modo automático se adaptam a dinâmica de mudança do sistema de subestações (KINDERMANN, 2018);
- **Instalação** – são compactos, logo necessitam de menor espaço e fiação em painéis;
- **Comunicação** – o relé pode transmitir/receber qualquer informação em tempo real do sistema de proteção (RUFATO JR, 2006);
- **Ajustes** – pode se efetuar ajustes diferentes para tipos de defeitos (trifásico, bifásico ou monofásico-terra);
- **Registro de Eventos** – consiste no registro operacional do relé, como por exemplo, funções atuadas, disparos, alarmes, mudanças de ajuste, resultados do autoteste. Para cada evento é registrado a data e o horário de sua ocorrência (PEREIRA, 2005).
- **Oscilografia** - corresponde aos gráficos das formas de onda das correntes e tensões, que auxiliam o pessoal de operação e manutenção a saber o instante de operação dos relés, o momento de disparo dos disjuntores etc. A apresentação dos oscilogramas pode ser feita por meio de computadores local ou de forma remota (PEREIRA, 2005);
- **Facilidade de manutenção** – se instalado em local adequado, sua performance é pouco influenciada (RUFATO JR, 2006);
- **Facilidade de integração com novas tecnologias** – possuem o recurso de conexão com cabos de fibra óptica para a transmissão de dados e integração com supervisórios (GONDIM, 2010).

2.1.2. Desvantagens dos relés digitais

Para Kindermann (2018), apesar de apresentarem muitos benefícios e recursos para um sistema de proteção, os relés digitais possuem algumas desvantagens, que são:

- **Fonte de alimentação** – são alimentados por uma fonte CC ou CA externa independente, o que significa que se houver qualquer problema nesta fonte de alimentação, o relé desliga, perdendo a sua funcionalidade e em alguns casos podendo até executar operação indevida;
- **Ambiente de instalação** – são necessários de serem instalados em ambiente com sistema de climatização, para manter a estabilidade de seus componentes;
- **Durabilidade** – comparado com os relés eletromecânicos, a vida útil dos relés digitais é relativamente baixa (estimada em 10 a 15 anos), e podem se tornar obsoletos devido ao rápido avanço da tecnologia;
- **Defeito** – quando acontece um defeito interno do relé, praticamente todo o módulo é substituído ou é efetuado a troca do relé. Manutenção corretiva são executadas em muitos casos apenas pelos fabricantes;

- **Aterramento** – requerem um sistema de aterramento muito baixo, e estão sujeitos a interferências eletromagnética.

3. COMPARANDO PROTEÇÕES ELETROMECÂNICA E DIGITAIS

Os relés eletromecânicos ao longo dos anos vêm sendo substituídos pela tecnologia digital, trazendo mudanças e confiabilidade para o sistema de proteção. Muitos relés convencionais ainda são encontrados em serviço de forma segura, mas com a avançada tecnologia e redução dos custos dos relés e equipamentos microprocessados leva continuamente a uma maior utilização desses equipamentos por terem várias funcionalidades em apenas um dispositivo, como por exemplo, a implementação de diversas funções de proteção (sobrecorrente, religamento, falta a terra etc.). A seguir são apresentados requisitos quanto a comparação dos relés de proteção digital com os convencionais (GOES, 2013).

- Dinâmica do sistema de Distribuição

Sistemas de proteção são constantemente modificados e aperfeiçoados devido a dinâmica do sistema de distribuição. Em determinados horários o sistema apresenta mudanças, como por exemplo, transferência de cargas, manobras programadas para manutenções ou construção de novas linhas, manobras de emergência para reparos e horários de ponta para demanda de carga (SCHWEITZER; SCHEER; FELTIS, 1992).

Essas reconfigurações do sistema podem durar horas e até meses, assim, problemas podem acontecer, como desequilíbrio de cargas e problemas de coordenação com outros equipamentos de proteção.

Os relés de proteção eletromecânicos não se adaptam com facilidade a dinâmica dos sistemas de distribuição. Caso sejam necessários realizar novos ajustes, esses devem ser feitos de forma manual. Com isso, o tempo para se efetuar e realizar testes da nova configuração alonga a demanda emergencial. Há situações em que os ajustes em relés não são remodelados para manobras de emergência, pela demora ou por dificuldades, assim, a proteção do sistema fica comprometida.

Já os relés de proteção digital se adaptam a essa dinâmica, ~~esses~~ pois possuem múltiplos grupos de ajustes que são habilitados por comando de portas de comunicação, que por sua vez podem ser implementados para cobrir as reconfigurações do sistema de distribuição, aumentando a confiabilidade do sistema de proteção. Assim não é necessário efetuar ou testar novas configurações já que é realizado de forma antecipada.

- Requisitos quanto ao espaço e ao hardware

Em uma instalação tradicional de distribuição, um único relé digital pode substituir um esquema de proteção que contém quatro relés de sobrecorrente (três de fase e um de terra), relé de sub e sobretensão, um relé de religamento, e amperímetro. Isto porque os relés digitais possuem várias funções de proteção em um único equipamento, enquanto nos relés convencionais para cada função de proteção e para cada fase ~~necessita de~~ é necessário um relé de proteção. O esquema de proteção eletromecânico requer quase todo o espaço de um painel enquanto a economia de espaço com a utilização do relé digital é consideravelmente significativa.

- Padronização de curvas de atuação e adaptação a sistemas existentes

Com o avanço das tecnologias e com o aumento do ramo das proteções de sistemas elétricos de potência, houveram várias mudanças e adaptações que ~~deram a uma~~ resultaram na criação de um padrão único para as funções de proteção.

Na atualidade qualquer equipamento tem seu sistema de funcionamento padronizado pela ANSI/IEEE e IEC, que contêm exclusivamente as funções de proteção e as configurações em que os equipamentos se comunicam. Isso faz com que os equipamentos de proteção da subestação não necessariamente sejam de um único fabricante (MARTINS, 2012).

Segundo Rufato JR (2006), alguns relés chegaram à sofisticação de permitir a programação da curva de atuação ponto a ponto e mais atualmente é possível a inclusão de curvas personalizadas no nível de usuário, isto é, o engenheiro de proteção tem a liberdade de desenhar a curva de tempo x corrente que melhor coordene com os dispositivos de proteção instalados a montante e a jusante do relé de proteção.

- Novos critérios de ajuste

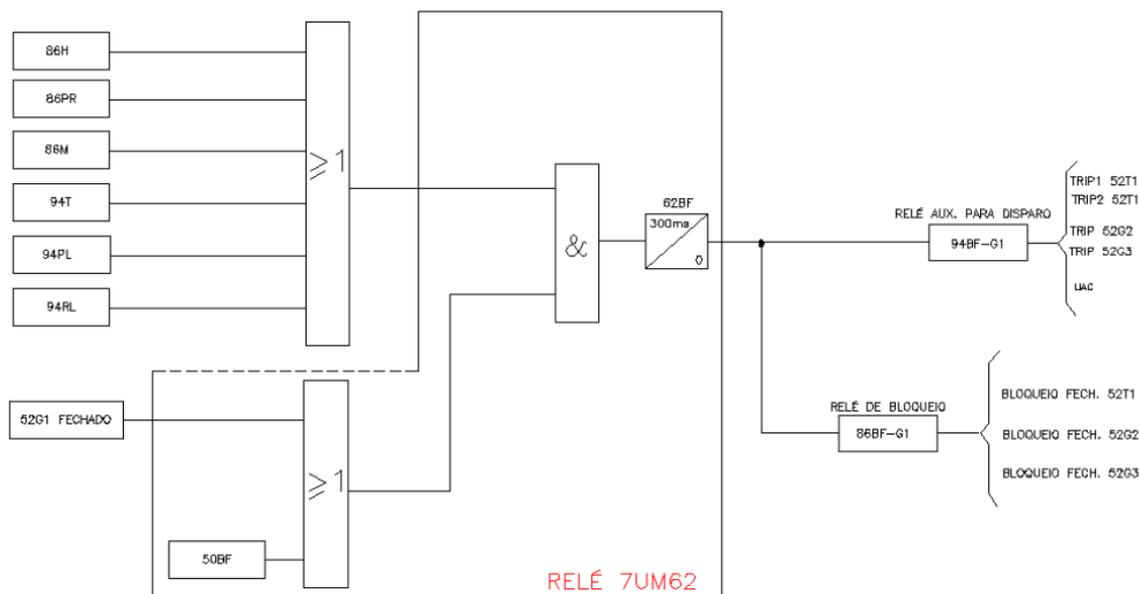
Com o aperfeiçoamento dos sinais recebidos pelos relés digitais e a incrementação de sinais lógicos, foi possível filtrar correntes de *Inrush* de transformadores que são conectados no sistema de distribuição, distorções harmônicas que podem provocar falhas de monitoramento do relé e distinção de partida de motores. Assim os relés digitais não necessitam de temporizadores e aumento de ajustes para impedir atuações indevidas como eram utilizados em relés eletromecânicos e com isso prorrogava a execução em situações verídica de faltas (MARTINS, 2012).

- Intertravamento lógico

Pode se dizer que o Intertravamento é a ligação entre os contatos auxiliares de vários dispositivos, suas operações são dependentes uma das outras. Com o Intertravamento evita - se a ligação de dispositivos antes que outros permitam essa ligação.

Para a formação de um esquema de proteção especial, podem ser usadas entradas e saídas de um relé digital. Com esses sinais é possível garantir a maior confiabilidade do sistema de proteção. Através dessa confiabilidade é permitido montar um esquema exclusivo para a lógica entre os relés de sobrecorrente, e com isso conseguir indiretamente a proteção diferencial de barramentos. Além dessa possibilidade, é possível combinar as funções internas do relé por meio de programação própria para complementar a proteção de equipamentos de uma subestação, como por exemplo, impedir que uma chave seccionadora de um disjuntor abra enquanto o disjuntor estiver fechado evitando eventuais arcos elétricos (MARTINS, 2012). A figura 1 mostra um exemplo de esquema lógico para proteção de falha em disjuntores.

Figura 1. Diagrama lógico de proteção



Fonte: Autoria própria (2021).

- Requisitos quanto à instalação

Segundo Vasconcelos e Vieira Jr. (2003), com os benefícios e vantagem que as instalações de sistema elétricos de potência tiveram, principalmente pela menor proporção dos equipamentos de proteção e pela chegada dos relés multifuncionais. Abaixo serão apresentadas as principais mudanças na instalação inseridas pela proteção digital em sistemas de potência:

- Cabeamento de comunicações: o controle de sistema elétrico e o alto grau de sofisticação da tecnologia digital de proteção requerem um sistema de comunicação semelhante e de difícil instalação adequado a infraestrutura que é requisitado;
- Menos solicitações de cargas dos TCs e TPs, baixo consumo: o baixo consumo de potência busca atingir o circuito de aquisição de variáveis analógicas dos relés digitais, além de que, esses relés são preparados para estabelecer a proteção aliados com a medição para diminuir ainda mais a demanda de potência;
- Aterramentos: muitas das vezes os relés que estão conectados com equipamentos de páteo distantes por serem de alta sensibilidade exigem uma sugestão de tensão comum com esses equipamentos. Idealmente é utilizado um valor de referência da terra onde o aterramento da subestação não é feito tomando os devidos cuidados solicitados, provavelmente as funções de proteção ajam de forma inadequada;
- Fonte de alimentação estável e constante: fundamental para dar apoio ao sistema de proteção e controle, ela é fornecida através de um sistema de nobreaks de bancos de baterias que só é sustentado em geral por um enrolamento terciário de baixa tensão encontrado nos transformadores da subestação. Diante disso é executado um sistema de comutação de alta velocidade capacitado de impedir entre as fontes antes que a perda da alimentação dos equipamentos de proteção digital possa acontecer;
- Simplificação e compactação das instalações: quanto menor as proporções dos relés digitais multifuncionais a ocupação será menor em um espaço físico do que no sistema de proteção convencionais.

- Requisitos quanto a testes

Ao longo dos anos os testes de relés de proteção de sistemas elétricos sofreram mudanças e o crescimento dos dispositivos de testes efetua novos sistemas para atender as novas qualidades dos modelos de sistemas de proteção. Com a evolução dos dispositivos de testes, a partir de equipamentos passivos, constituídos de fontes analógicas, para os equipamentos baseados em sistemas digitais, eletrônica de potência e aplicando tecnologia microprocessada, para os controles dos testes seria adicionado a engenharia de *software*.

Rotina ou testes de manutenção são executados quando o relé sofre alguma intervenção ou periodicamente, atualizações de *firmware* e como modificação de ajustes. O propósito é analisar os riscos de maus funcionamentos e a correta operação do relé minimizando.

O teste de um relé microprocessado convencional ou eletromecânico, será necessário simular uma serie de estados com o equipamento de teste, efetuando alterações dinâmicas nas extensões analógicas através de suas saídas de tensão e corrente ou formação de reais ou eventos elaborados em software de simulação produzindo um teste transitório. Enquanto o equipamento deve vistoriar as saídas do relé em teste no propósito de identificar as alterações dos estados simulados (partida, disparo etc.) e analisar o comportamento desse IED.

Com a melhoria dos equipamentos de teste, ~~disponibilizou~~ novas possibilidades foram disponibilizadas, que podem ser utilizadas em várias filosofias de testes, procedimentos e diferentes métodos, levados pelas habilidades dos testadores. Desta forma ~~aumentou~~ a precisão de teste aumentou, garantindo a repetibilidade dos processos utilizados (GOES, 2013).

~~De acordo com os~~ benefícios da padronização dos testes:

- Agilidade na troca de pesquisas entre os integrantes do grupo de testes, com a mesma ordem e formatação de teste;
- A qualidade pode ser melhorada e controlada pois os planos de testes apresentam procedimentos iguais;
- Habilidades da empresa podem ser acrescentadas à padronização;
- Os desenvolvimentos de testes serão realizados com mais rapidez.

Como podemos observar os testes destes equipamentos evoluíram. No entanto, do mesmo modo à a dificuldade dos testes aumentou, proporcionando um controle maior do usuário e solicitando ajustes e melhor elaboração da equipe responsável pelos testes. As ferramentas e os procedimentos de teste desenvolvidas contribuem com uma solução ótima buscando à confecção de planos de testes automáticos.

-Medição, comando e comunicação integrados à proteção

Os relés digitais além das funcionalidades já citadas neste trabalho contam com a possibilidade de medição das grandezas elétricas lidas em cada fase pelos TCs e TPs, e ainda são capazes de serem integrados a sistemas supervisórios na própria subestação ou em sistemas distantes (remotos), permitindo realizar atividades tais como mudanças automáticas, ajustes e religamento de forma automática de circuitos (RUFATO JR, 2006).

- Automonitoramento dos componentes e circuitos

Os relés digitais utilizam menos componentes do que os relés convencionais e com isto a possibilidade de ocorrer uma falha é bem pequena, mesmo assim, as falhas ainda podem ocorrer (SCHWEITZER; SCHEER; FELTIS, 1992). Uma falha no relé digital pode acarretar perda de praticamente todas as suas funções, (GOES, 2013). A nova tecnologia dos relés digitais possui a função de automonitoramento de seu *hardware* e do circuito de trip do disjuntor. Com esse tipo de recurso, o relé é capaz de identificar de forma momentânea qualquer falha interna e sinalizar um alarme para a equipe de operação da subestação (RUFATO JR, 2006). Dependendo do tipo de relé e da filosofia de proteção, o relé de forma automática se retira de operação e a proteção retaguarda passa a exercer a função de proteção principal (MARTINS, 2012).

Com este tipo de recurso e a facilidade de substituição destes equipamentos, o resultado é um grande aumento de confiabilidade e disponibilidade do sistema de proteção (SCHWEITZER; SCHEER; FELTIS, 1992). Segundo Rufato JR (2006) o recurso de automonitoramento é uma função vital que foi implementada com a tecnologia digital, que propicia através da automação, saber se o equipamento está ou não funcionando de forma adequada. Schweitzer (1992) cita que com esse recurso, a manutenção de rotina não é tão necessária no dia a dia, já que o automonitoramento, sequência de eventos e medição proporcionam saber o desempenho dos relés digitais. Os relés convencionais não possuem este tipo de recurso e não dispensam a manutenção de rotina para verificação de possíveis problemas.

4. MODERNIZAÇÃO

Nas subestações mais antigas, onde o sistema de proteção era feito por relés eletromecânicos, estes equipamentos estão sendo sucessivamente substituídos por relés digitais através de projetos de *retrofit*, trazendo melhorias e principalmente novas funcionalidades para o sistema de proteção. Nesta etapa vamos abordar a funcionalidade e características dos relés digitais de dois fabricantes para comparar qual é mais viável de ser aplicado em uma subestação de energia fictícia. São eles relé SEL-351A e o relé MiCOM P40 da General Electric.

4.1. Relé de proteção SEL-351A

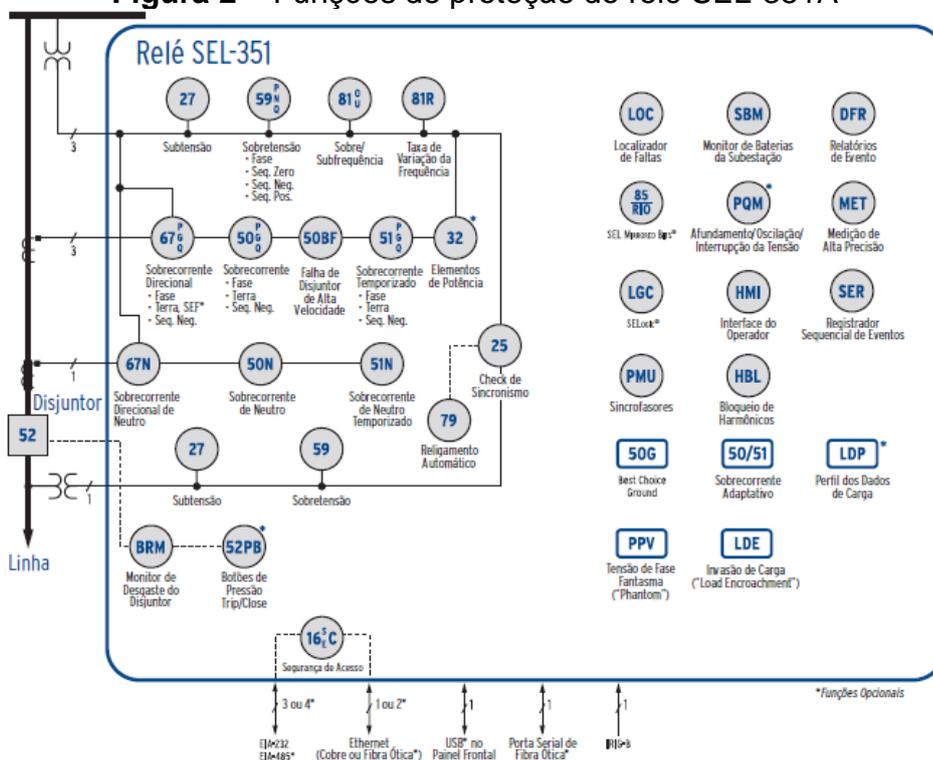
- Funções de proteção

Como já visto anteriormente, os relés digitais possuem diversas funções de proteção e podem ser programados de acordo com a finalidade de proteção. O relé SEL-351A tem as principais funções mostradas na figura 2. Ele fornece um pacote de monitoramento, controle e localização de faltas, assim como uma lista de controles padrão e os recursos opcionais de comunicação.

- 50/51 - Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51G - Sobrecorrente residual instantânea e temporizada;
- 50/51N – Sobrecorrente instantânea e temporizada de neutro;
- 50/51Q (46) - Sobrecorrente instantânea e temporizada de sequência negativa;
- 67/67G/67Q – Sobrecorrente direcional de fase, residual e de sequência negativa;
- 67N - Sobrecorrente direcional de neutro;
- 25 - Verificação de sincronismo;
- 79 – Religamento automático, até quatro tentativas;
- 27/59 - Subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases;

- 59G - Sobretensão residual;
- 59Q (47) - Sobretensão de sequência negativa;
- 50/62BF - Falha de disjuntor;
- 60 - Perda de potencial;
- 81 – Sub/Sobrefrequência e taxa de variação de frequência;
- 51/67HZ – Sobrecorrente direcional de neutro de alta sensibilidade (opcional).

Figura 2 – Funções de proteção do relé SEL-351A

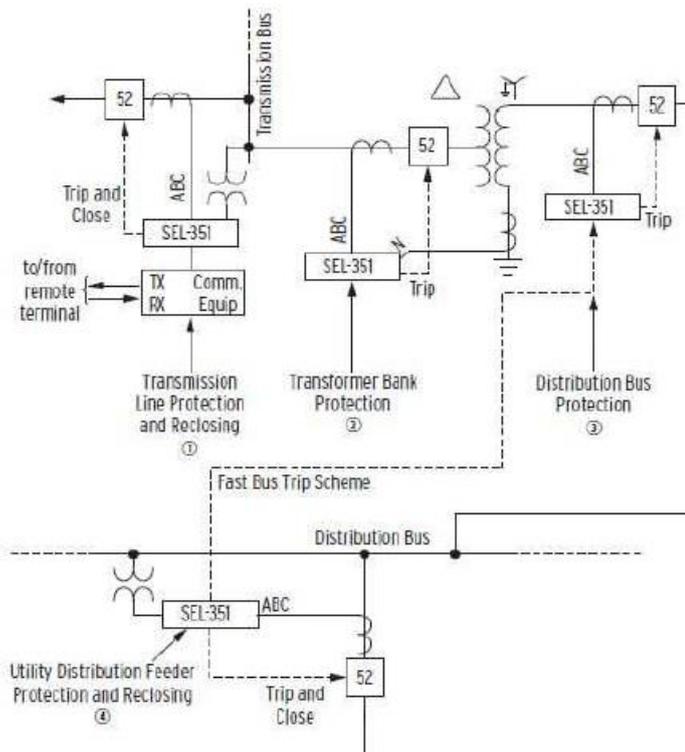


Fonte: Manual do relé SEL-351A (2021).

- Aplicações

O relé de proteção SEL-351A possui várias aplicações de proteção. A Figura 3 mostra algumas, onde o relé pode ser utilizado em quaisquer sistemas como em linhas de transmissão, linhas de distribuição, em alimentadores, transformadores, bancos de capacitores, reatores e geradores entre outros.

Figura 3 – Aplicação do relé SEL-351A.



Fonte: Manual do relé SEL-351A (2021).

- Funções de Medição

O relé SEL possui funções de medição incorporadas em seu *Hardware* com a capacidade de realizar medições de alta precisão das grandezas elétricas do sistema, o que elimina demais dispositivos de medição montados separadamente. Abaixo são mostradas as grandezas que este relé consegue realizar a medição:

- Correntes de fase I_A, I_B, I_C , de neutro I_N e corrente residual, correntes de sequência (I_0, I_1, I_2),
- Tensões de fase (V_A, V_B, V_C) e de sincronismo (V_S);
- Potência ativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Potência reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Fator de potência por fase e trifásico;
- THD (Distorção Harmônica Total) e harmônicos individuais para tensões e correntes até a 16ª ordem;
- Demanda de corrente de fase, de neutro e de sequência negativa;
- Demanda de potência ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Energia ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Frequência;
- Registro de valores máximos e mínimos de grandezas analógicas.

- Funções de Monitoramento

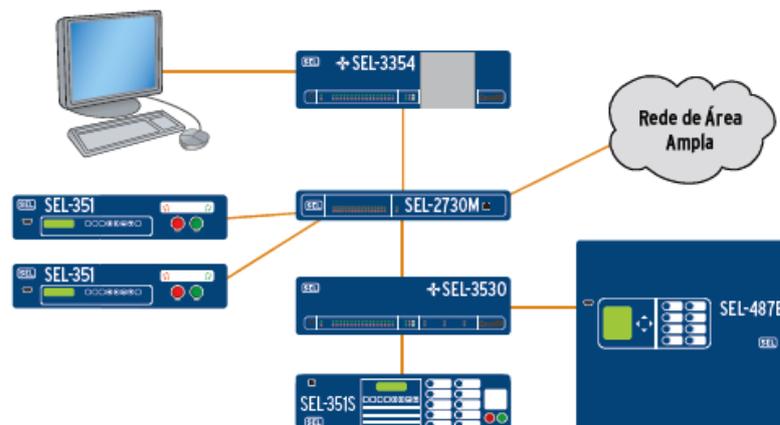
- Oscilografia que armazena até 7,5 segundos de dados;
- Armazenamento de até 512 sequências de eventos;
- Localizador de faltas com indicação em quilômetros (Km) ou (%);
- Monitoramento do sistema com alimentação auxiliar CC, fornecendo alarme para sub e sobretensão;
- Monitoramento de desgaste dos contatos do disjuntor por polo;

- Monitoramento das bobinas do disjuntor através da lógica de programação;
- Registro de perfil de carga a cada 15 minutos;
- Qualidade da energia (interrupção, afundamento e elevação de tensão).

- Sistema de Comunicação

Este relé não necessita de um tipo de comunicação dedicada. Esta comunicação é realizada por meio de ligações entre computadores, modems, conversores de protocolo, switches porto, comunicação com processadores e impressoras. Conexão do relé diretamente a uma rede local através da interface Ethernet que será ligada ao computador. A figura 4 mostra a conexão de vários relés SEL-351A.

Figura 4 – Conjunto de relés SEL-351A ligados a um computador.



Fonte – Manual do relé SEL-351A

- Demais Características

- Possui número padrão de 6 entradas e 8 saídas binárias e opção de placa adicional de 14 entradas ??? e 20 digitais;
- Comando de abertura/fechamento de disjuntor e/ou seccionadora de forma local ou remota;
- Software amigável para parametrização (*AcSELeRator*);
- Programa *AcSELeRator Analytic Assistant* para a visualização das componentes de fases do sistema e sua oscilografia;
- Servidor Web;
- Contatos Standard: capacidade de condução contínua 6A, 50A por 1 segundo capacidade de interrupção 0,3A (125Vcc, L/R = 40ms);
- Tensão auxiliar: 24/48 VCC ou VCA, 48/125 VCC ou VCA, 125/250 VCC ou VCA;

- Temperatura de operação -40° a $+85^{\circ}$ C;
- Peso (máximo) 5,0 kg a 6,8 kg;
- Frequência do sistema de 60/50 Hz e sequência de fase ABC/ACB são configuráveis pelo usuário.

- Custo

O custo para a aquisição de um relé SEL-351A no mercado, varia entre R\$ 3.000,00 a R\$ 7.000,00 (MERCADO LIVRE, 2021).

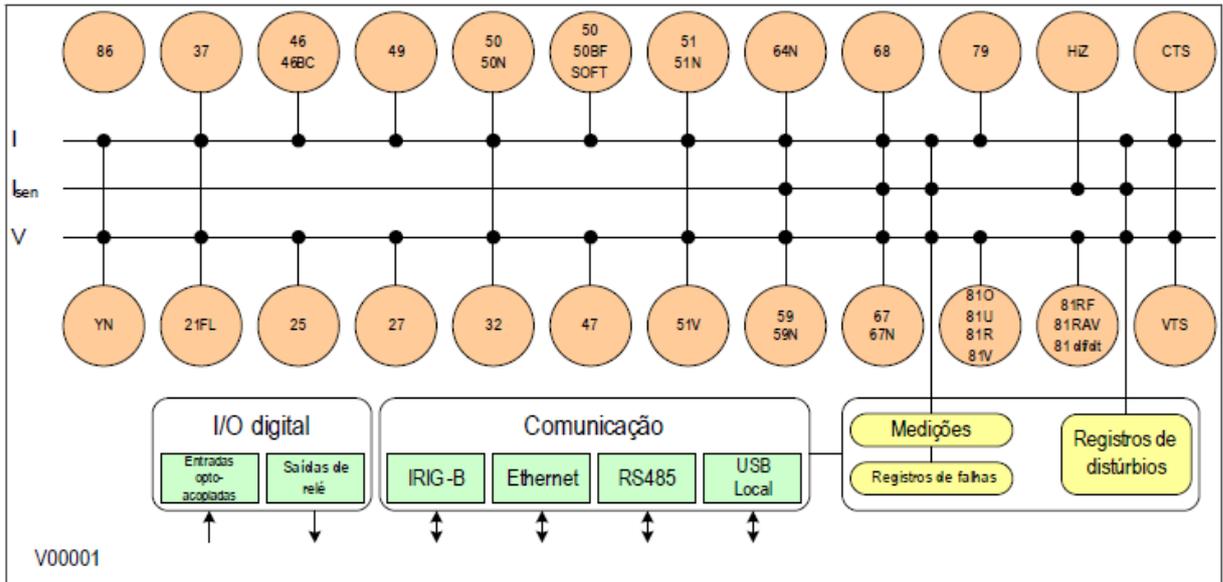
4.2. Relé de proteção P14D da GE Energy Connections

- Funções de proteção

A família de relés P14D oferece uma proteção por completa contra sobrecorrentes direcional e não direcional. O relé inclui medições e facilidades de gravação, que podem ajudar na verificação de falhas no sistema.

- 37 – Detecção de subcorrente (carga baixa);
- 46 – Sobrecorrente de sequência negativa;
- 46 BC – Condutor Rompido;
- 49 – Sobrecarga térmica;
- 50 BF – Falha de disjuntor;
- 50 – Proteção contra sobrecorrente de tempo definido;
- 50 N – Proteção contra sobrecorrente de tempo definido neutro/terra;
- 67 – Sobrecorrente de fase direcional;
- 67 N – Sobrecorrente direcional de neutro;
- 27 – Subtensão;
- 47 – Sobretensão de sequência negativa;
- 25 – Verificação de sincronismo;
- 59 N Sobretensão residual;
- 51 V – Sobrecorrente controlada por tensão;
- Curvas programáveis;
- Esquema de bloqueio;

Figura 5 – Funções de proteção do relé P14D da GE.



Fonte – Manual do relé P14D da GE (2021).

- Aplicações

Os relés de proteção da família P14D possuem várias aplicações e podem ser usados em vários sistemas, conforme o modelo designado. No caso dos relés P14D existem seis modelos diferentes para diversas aplicações, sendo eles: P14DA, P14DB, P14DG, P14DL, P14DZ, P14DH. Em aplicações específicas, existe a possibilidade da aquisição de módulos de expansão.

- P14DA é um dispositivo compacto em uma caixa 2OTE;
- P14DB é o dispositivo básico para aplicações gerais;
- P14DG é para aplicações em geradores;
- P14DL é para proteção de linha;
- P14DZ é para aplicações de falha à terra de alta impedância;
- P14DH inclui proteção wattimétrica direcional de falha à terra;

- Funções de Medição

Os relés P14D possuem a capacidade de medir de forma direta e calcular demais grandezas do sistema que são atualizadas a cada segundo. Abaixo são mostradas as grandezas que este relé consegue realizar a medição:

- Correntes de fase I_A, I_B, I_C , de neutro I_N e corrente residual, correntes de sequência (I_0, I_1, I_2);
- Tensões de fase (V_A, V_B, V_C) e tensão entre fase e neutro (V_N);
- Potência ativa por fase e trifásica;
- Potência reativa por fase e trifásica;
- Fator de potência por fase e trifásico;
- Demanda de corrente de fase, de neutro e de sequência negativa;
- Demanda de potência ativa e reativa por fase e trifásica;
- Energia ativa e reativa por fase e trifásica;

- Frequência;
- Fornecimento de medidas de 2ª harmônica, e leitura de temperatura interna do relé.

- Funções de Monitoramento

- Oscilografia que armazena até 9 segundos de dados;
- Possui a capacidade de armazenamento de 3 tipos de eventos, que são: Registro de eventos, defeito e manutenção. Capacidade de 2.048 registros de eventos, 10 registros de defeito e 10 registros de manutenção;
- Localizador de faltas em porcentagem (%);
- Monitoramento do sistema com alimentação auxiliar CC, fornecendo alarme para sub e sobretensão;
- Monitoramento de falha do disjuntor de dois estágios e monitoramento da condição do disjuntor;
- Função polo morto utilizada para indicar que uma ou mais fases da linha estão desenergizadas;

- Sistema de Comunicação

Essa família de relé possui protocolos universais de comunicação, sendo possível estabelecer uma topologia em anel, com a troca de dados através dos protocolos seriais e Ethernet, possibilitando uma redundância e confiabilidade na comunicação. O protocolo serial é bastante utilizado em muitos sistemas de energia elétrica. O protocolo Ethernet por ser mais atual e um meio que oferece mais confiabilidade e estabilidade e entre outras vantagens, os novos sistemas de energia já estão sendo implantados com essa tecnologia.

- Demais Características

- Autodiagnostico para verificação do seu *hardware* e *software*. Caso haja alguma inconformidade o relé elabora um relatório e reinicializa o seu sistema na tentativa de se solucionar o problema;
- Comando de abertura/fechamento de disjuntor e/ou seccionadora de forma local ou remota;
- Software parametrização;
- Tensão auxiliar de alimentação: 24 – 250 VCC +/- 20% ou 110 – 220 VCA +/- 10%;
- Faixa de Temperatura operacional –25°C a + 55° C;
- Faixa de Temperatura de armazenamento e transporte -25°C a + 70°C;
- Peso (máximo) 2 kg a 4 kg;
- Frequência do sistema de 60/50 Hz e sequência de fase ABC.

- Custo

O custo para a aquisição do relé P14D da GE no mercado, varia entre R\$ 7.000,00 a R\$ 12.000,00 (Mercado Livre, 2021).

Para escolha do relé que será utilizado na SE para o *retrofit*, foi criada uma tabela pontuando as características de cada relé de proteção, atribuindo uma escala de avaliação dos requisitos de 1 a 10, sendo: de 1 a 2 (Razoável), 3 a 5 (Bom), 6 a 8 (Muito bom) e 9 a 10 (Excelente). A Subestação distribuidora é fictícia, possuindo tensão nominal de entrada de 34,5 KV, dois transformadores trifásicos de potência

nominal de 5 MVA, tensão nominal 34,5/13,8 KV e 5 saídas para fornecimento de energia.

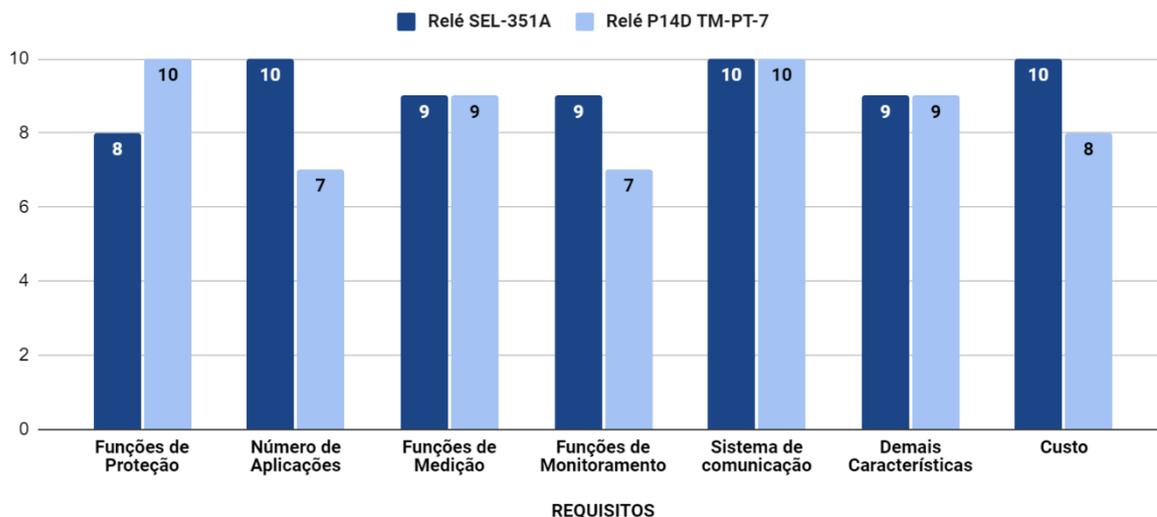
Tabela 1 – Tópicos avaliativos para escolha do relé de proteção.

REQUISITOS	ITENS	Relé SEL-351A	Relé P14D TM-PT-7
Funções de Proteção	Função 27/59	8	10
	Função 59N		
	Função 46		
	Função 49		
	Função 50/51		
	Função 50/51N		
	Função 50BF		
	Outras funções de proteção		
Número de Aplicações	Sistema de Geração	10	7
	Sistema de Transmissão		
	Sistema de Distribuição		
	Transformadores		
	Alimentadores		
Funções de Medição	Grandezas Elétricas (Corrente, tensão, Potência Ativa e reativa, Fator de Potência)	9	9
	Frequência		
	Demanda de Potência Ativa e Reativa		
	Medição de Energia Ativa e Reativa		
	Harmônico		
	Temperatura interna do relé		
Funções de Monitoramento	Oscilografia	9	7
	Sequência de Eventos		
	Localizador de faltas		
	Automonitoramento		
	Monitoramento do Disjuntor		
	Monitoramento da Qualidade da Energia		
Sistema de comunicação	Comunicação Serial	10	10
	Comunicação Ethernet		
Demais Características	Número de entradas e saídas	9	9
	Software		
	Temperatura de operação		
	Peso		
	Outros		
Custo		10	8
PONTUAÇÃO TOTAL		65	60

Fonte: desenvolvida pelos autores (Excel 2010).

O gráfico 1 abaixo, demonstra os resultados para cada requisito de cada relé de proteção da tabela 1 acima.

Gráfico 1 - Tópicos avaliativos para escolha do relé de proteção.



Fonte: desenvolvida pelos autores (Excel 2010).

5. ANÁLISE DA COMPARAÇÃO DOS RELÉS

Na comparação dos relés, observou-se que independente do modelo e/ou fabricante, os relés digitais são projetados com uma grande variedade de funcionalidades em relação aos relés eletromecânicos.

No item funções de proteção, tanto o relé SEL-341A quanto o relé P14D TM-PT-7 possuem grandes variedades de funções que atendem as necessidades de diversas subestações. No entanto, a família de relés P14D TM-PT-7 possui maior número de funções de proteção, assim, conforme demais necessidades forem surgindo, estas funções podem ser habilitadas. Assim sendo, o relé P14D TM-PT-7 é pontuado com maior nota em relação ao relé SEL-341A.

No item aplicações, observa-se que o relé SEL-341A é um equipamento que pode ser adaptado e aplicado em diferentes tipos de sistemas, como proteção para geradores, linhas e proteção de transformadores sem a necessidade de adquirir demais módulos ou um novo relé, o que não ocorre com a família de relés P14D TM-PT-7, que possui diferentes modelos específicos para cada aplicação.

No item funções de medição, podemos notar que os dois relés possuem praticamente as mesmas funções de medição. O relé SEL-341A, diferente do P14D TM-PT-7, não conta com a função de medição da temperatura interna do relé, mas pode realizar medições harmônicas individuais para tensões e correntes até a 16ª ordem.

No item funções de monitoramento os dois relés também possuem bastante similaridade como por exemplo oscilografia, localizador de faltas, e nota-se que o relé SEL-341A conta com registro de perfil do tipo de carga a cada 15 minutos e monitoramento da qualidade da energia (interrupção, afundamento e elevação de tensão), assim este tipo de recurso tem grande finalidade no sistema de proteção.

No item de comunicação, os dois relés podem estabelecer comunicação via serial ou Ethernet, enviando informações em tempo real para sistemas supervisórios.

As demais características como por exemplo temperatura de operação, peso do equipamento, *software* de programação, tensão de operação, automonitoramento de

seu *hardware* e *software*, são baseadas nos aspectos construtivos dos relés, e sua construção irá variar de fabricante para fabricante, por este motivo os relés foram pontuados de forma igual.

Em se tratando de custo dos relés, podemos ver que o relé SEL-341A requer menor investimento em relação a família de relé P14D TM-PT-7.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral foi abordar um estudo comparativo entre os relés de proteção eletromecânico e digitais, demonstrando as vantagens e desvantagens de cada dispositivo.

Em relação aos relés digitais podemos afirmar que este equipamento proporciona mais confiabilidade, estabilidade, funcionalidades e flexibilidade aos sistemas de proteção se comparado ao relé eletromecânico, além de apresentar menor custo de manutenção e de serem mais compactos.

Com o aumento da demanda de energia elétrica nas últimas décadas, se tornou necessário cada vez mais a otimização dos métodos e processos dos sistemas de proteção para garantir os níveis aceitáveis na qualidade da energia, confiabilidade e eficiência das proteções. Os relés digitais estão suprimindo essa necessidade do setor elétrico, fornecendo múltiplas funcionalidades o que pode reduzir o uso de outros sistemas de medição e controle em subestações. Os relés modernos de proteção não se limitam mais a apenas executar a proteção do sistema, mas também o monitoramento das grandezas elétricas, se tornando parte integral e maior, de um esquema de automação de subestação.

Os relés digitais possuem a características de automonitoramento que executam rotinas internamente em seu *software* que validam o seu correto funcionamento, prolongando seu ciclo de manutenção. Dessa forma a implantação de relés digitais, além dos ganhos já apresentados também pode reduzir os testes de instalação de manutenção.

A principal vantagem de se modernizar uma subestação são as múltiplas funções de ajustes no sistema que o relé digital nos possibilita, sendo possível ainda a elaboração de um projeto de proteção, controle e supervisão de subestações que o utilize como único equipamento.

Com o avanço nos sistemas elétricos de potência e na tecnologia dos relés, conseqüentemente, o custo-benefício destes equipamentos tendem a se tornar mais atrativos e devido a contínua pressão das concessionárias em redução de custos é mais um indício de que a tendência de modernização dos sistemas de proteção permanecerá.

Para a subestação fictícia, a implementação do relé SEL-351A é mais favorável para ser aplicado, pois apesar de este equipamento possuir um menor número de funções de proteção, ele possui maior polivalência em outros requisitos na subestação com um custo-benefício bem menor em relação ao relé P14D.

Para uma análise mais qualitativa de trabalhos futuros, deverão ser colocados para a comparação outros modelos de relés para que se tenha um maior universo de análise.

REFERÊNCIAS

VELOSO, Heitor Martins. **Índice de desempenho dos filtros digitais para proteção de sistemas elétricos de potência**. Belo Horizonte, MG, 2006. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/411M.PDF>. Acesso em: 27 mar. 2021.