

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Evellyn Fernanda de Almeida Lima

**DIGITALIZAÇÃO DE PROTEÇÕES DE SUBESTAÇÕES DE ALTA
TENSÃO: estudo de caso SE BH ADELAIDE – 138kV**

Betim
2024

EVELLYN FERNANDA DE ALMEIDA LIMA

**DIGITALIZAÇÃO DE PROTEÇÕES DE SUBESTAÇÕES DE ALTA
TENSÃO: estudo de caso SE BH ADELAIDE – 138kV**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Vagner Ferreira

Betim
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

L732d Lima, Evellyn Fernanda de Almeida
Digitalização de proteções de subestações de alta tensão: estudo de caso SE BH ADELAIDE – 138kV / Evellyn Fernanda de Almeida Lima. – 2024.

60 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Vagner Ferreira

1. Subestações de energia. 2. Sistemas de proteção. 3. Energia elétrica. 4. Engenharia de Controle e Automação. I. Lima, Evellyn Fernanda de Almeida. II. Título.

CDU: 621.3

Evellyn Fernanda de Almeida Lima

**DIGITALIZAÇÃO DE PROTEÇÕES DE SUBESTAÇÕES DE ALTA
TENSÃO: estudo de caso SE BH ADELAIDE – 138kV**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 25 / 09 / 2024 pela banca examinadora:

Reginaldo Vagner Ferreira

Prof. Dr. Reginaldo Vagner Ferreira (Orientador) - IFMG

Victor Alves Silva e Melo

Prof. M.Sc Victor Alves Silva e Melo - IFMG

Cristovão Rosa Dias

Eng. Cristovão Rosa Dias - Brastel

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, sem Ele eu não teria a capacidade para desenvolvê-lo, e a todos que me apoiaram ao longo desta jornada acadêmica. À minha família, pelo amor, paciência e incentivo constante; aos meus amigos, por estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis e por celebrarem comigo as pequenas e grandes conquistas; e aos meus professores, por compartilharem seu conhecimento e me inspirarem a ir além.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças ao apoio e incentivo de muitas pessoas, às quais expresso minha sincera gratidão.

Agradeço ao meu orientador, Professor Reginaldo Vagner, por ter aceitado orientar-me neste projeto. Seu comprometimento foi fundamental para manter minha motivação, especialmente quando surgiram desafios ao longo do caminho.

À minha família, expresso minha mais sincera gratidão, especialmente aos meus pais, Juliana de Almeida e Wagner Lima. Agradeço por acreditarem em mim, pelo amor incondicional e por me incentivarem a seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Sem o apoio de vocês, esta conquista não seria possível.

Agradeço profundamente ao meu parceiro, Matheus Henrique, por seu amor, apoio e por estar ao meu lado em todos os momentos dessa jornada. Sua presença e incentivo foram essenciais para que eu pudesse enfrentar os desafios com mais força e determinação.

Aos meus colegas e amigos de trabalho, que sempre me motivaram e prontamente me auxiliaram, compartilhando seus conhecimentos e ajudando a esclarecer todas as dúvidas que surgiram. Em especial, agradeço a Cristóvão Rosa, Juliana Pires e Izabella Alcantara.

Por fim, agradeço a todos os colegas de curso, que compartilharam essa caminhada comigo, trocando experiências, conhecimentos e motivação, especialmente às minhas queridas amigas Aline Morais e Luiza Campos. A jornada foi desafiadora, mas a companhia de vocês tornou tudo mais leve e inspiradora.

A todos, meu muito obrigada.

“Se você não pode mudar seu destino, mude sua atitude.”

— Roronoa Zoro, One Piece

RESUMO

O sistema elétrico de potência é um arranjo complexo, que abrange a geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. As subestações são estruturas fundamentais neste arranjo, atuando como um ponto de interconexão entre diferentes níveis de tensão. Elas recebem a energia elétrica e a transformam para posteriormente distribuí-la. São constituídas por transformadores, disjuntores, barramentos e equipamentos de controle e proteção. Os sistemas de proteção das subestações são essenciais para garantir a segurança e a integridade do sistema, podendo ser classificados como eletromecânicos ou digitais, dependendo da tecnologia utilizada para detectar e responder a falhas. Este trabalho de conclusão de curso compreende um estudo de caso da modernização do sistema de proteção do vão 3K na subestação BH Adelaide. São realizadas análises comparativas das tecnologias pré e pós modernização, incluindo suas funções, vantagens espaciais e viabilidade econômica. Ao final, são apresentadas as conclusões do estudo, além de propostas para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Subestação; Proteção; Digitalização; Modernização; Relé.

ABSTRACT

The electric power system is a complex arrangement that encompasses the generation, transmission, and distribution of electrical energy. Substations are fundamental structures within this arrangement, serving as interconnection points between different voltage levels, receiving electrical energy and transforming it for subsequent distribution. Substations are composed of transformers, circuit breakers, busbars, and control and protection equipment. Substation protection systems are essential to ensure the safety and integrity of the overall system. These systems can be classified as electromechanical or digital, depending on the technology used to detect faults. This work presents a case study on the modernization of the protection system for bay 3K at the BH Adelaide substation. Comparative analyses are carried out between pre- and post-modernization technologies, including their functions, spatial advantages, and economic evolution. Finally, the study's conclusions are presented, along with proposals for future work.

Keywords: Substation; Protection; Digitalization; Modernization; Relay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do sistema elétrico de potência (SEP).	14
Figura 2 – Relés eletromecânicos x relés inteligentes.	15
Figura 3 – Zoneamento de proteção.	19
Figura 4 – Exemplo de uma situação de sobrecarga.	20
Figura 5 – Exemplo de uma situação de curto-circuito.	21
Figura 6 – Forma de onda <i>SWELL</i>	22
Figura 7 – Forma de onda <i>SAG</i>	22
Figura 8 – Relé eletromecânico de indução.	25
Figura 9 – Relé de alavanca.	26
Figura 10 – Relé de disco de indução.	26
Figura 11 – Subsistemas que compõem a arquitetura do relé digital.	28
Figura 12 – Estudo de traçado - construção SE BH SERRANO.	29
Figura 13 – Projeto com proteção eletromecânica.	30
Figura 14 – Projeto com proteção digital.	31
Figura 15 – Partes Internas de um Disjuntor GVO.	33
Figura 16 – <i>Bay 3K</i>	33
Figura 17 – Equipamentos antes da modernização.	34
Figura 18 – Disjuntor sendo retirado.	34
Figura 19 – Transformadores de corrente após modernização.	36
Figura 20 – Transformadores de potencial após substituição.	36
Figura 21 – Seccionadora com lâmina de terra.	37
Figura 22 – Seccionadora sem lâmina de terra.	38
Figura 23 – Disjuntor.	39
Figura 24 – Barramento principal.	40
Figura 25 – Transformador regulador.	40
Figura 26 – Diagrama painel de proteção digital.	42
Figura 27 – Dimensões do Relé eletromecânico de sobrecorrente.	43
Figura 28 – Dimensões do Relé eletromecânico de subtensão.	43
Figura 29 – Dimensões do Amperímetro.	44
Figura 30 – Dimensões do Varímetro.	44
Figura 31 – Dimensões do Wattímetro.	44
Figura 32 – Diagrama de ocupação do painel de proteção eletromecânico.	45
Figura 33 – Diagrama CA de alimentação dos relés eletromecânicos.	47
Figura 34 – Diagrama CA de alimentação dos relés microprocessados.	49
Figura 35 – Diagrama CA da saída do transformador de potência do <i>bay</i>	50
Figura 36 – Diagrama CA da saída do transformador de potência da barra.	50
Figura 37 – Relação de depreciação ao longo dos anos - Transformador de potencial 138kV.	52
Figura 38 – Relação de depreciação ao longo dos anos - Transformador de corrente 138kV.	53

Figura 39 – Relação de depreciação ao longo dos anos - Disjuntor 138kV.	54
Figura 40 – Relação de depreciação ao longo dos anos - PSCP.	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação de equipamentos secundários antes da modernização.	51
Quadro 2 – Relação de equipamentos secundários após a modernização.	51
Quadro 3 – Códigos TUC - de mão de obra.	55
Quadro 4 – Códigos TUC - equipamentos.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SEP	Sistema elétrico de potência
IFMG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
IED	Dispositivos Eletrônicos Inteligentes
SE	Subestação
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ADC	Conversor analógico-digital

LISTA DE SÍMBOLOS

M	Mega
k	Quilo
c	Centi
m	Metro
V	Volt
A	Ampère
W	Watt
Var	Volt-ampere reativo
Hz	Hertz
%	Percentual

SUMÁRIO

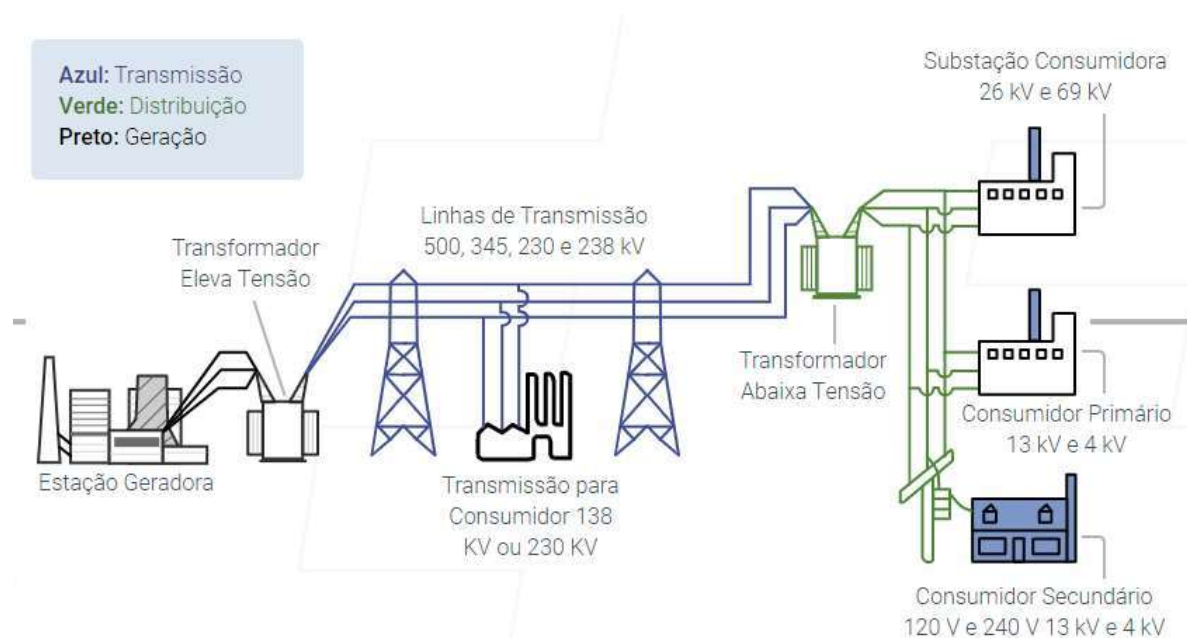
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	15
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
1.2	Justificativa	16
1.3	Colocação do Problema	17
1.4	Organização do Texto	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Estrutura do sistema elétrico de potência	18
2.2	Tipos de faltas	19
2.2.1	<i>Sobrecarga</i>	20
2.2.2	<i>Curto-circuito</i>	20
2.2.3	<i>Sobretensão e Subtensão</i>	21
2.2.4	<i>Sobrecorrente e Subcorrente</i>	23
2.2.5	<i>Sobrefrequência e Subfrequência</i>	23
2.3	Dispositivos de proteção	24
2.3.1	<i>Relés eletromecânicos</i>	24
2.3.2	<i>Relés digitais</i>	27
3	METODOLOGIA	29
4	RESULTADOS	32
4.1	Equipamentos	32
4.2	Vantagens espaciais no painel de proteção	41
4.3	Diagrama CA	46
4.4	Análise Financeira	51
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é uma das principais formas de energia utilizadas pela sociedade moderna. Ela é essencial para a execução de diversas atividades humanas, como iluminação, aquecimento, refrigeração, transporte e produção industrial. Para garantir que a eletricidade chegue de forma eficiente e contínua aos usuários finais, é necessário um sistema elétrico de potência (SEP).

O sistema elétrico de potência (Figura 1) é composto por diversos elementos, como geradores, transformadores, linhas de transmissão e subestações, que trabalham juntos para fornecer eletricidade aos usuários finais. Desde a consolidação do modelo de indústria elétrica no início do século XX por Samuel Insull, o fornecimento de energia elétrica foi se adaptando com a necessidade de consumo e com a qualidade da eletricidade fornecida (KLINGENBERG, 1914).

Figura 1 – Estrutura do sistema elétrico de potência (SEP).

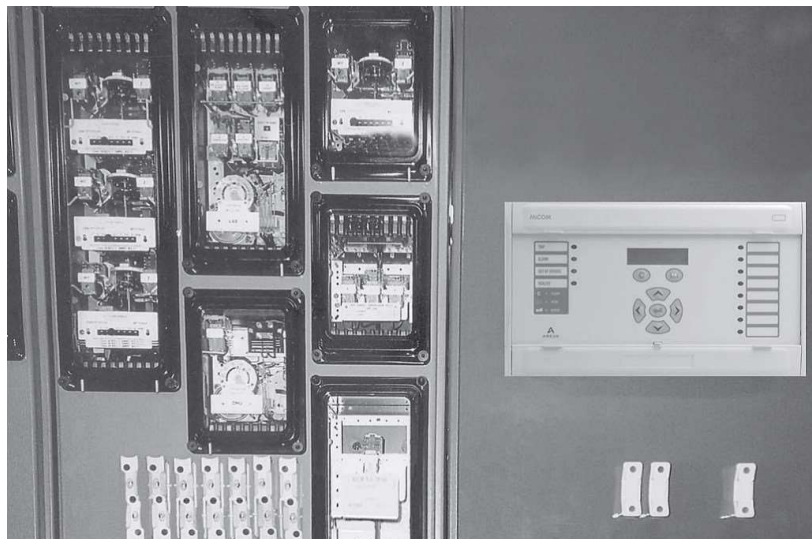


Fonte: (JOI, 2021).

Por mais avançado que seja o sistema elétrico é inevitável a ocorrência de falhas. Uma das principais diferenças entre o modelo do início do século XX, e o modelo atual estão no sistema de proteção. De acordo com o Engenheiro João Mamede (MAMEDE FILHO, 2013) o primeiro relé digital foi implementado por volta da década de 1980, visto a célere evolução da microeletrônica.

Os dispositivos de proteção, como relés de proteção, disjuntores e chaves seccionadoras, devem ser escolhidos e dimensionados de acordo com as características e demandas do sistema elétrico em questão. É essencial que esses dispositivos estejam devidamente instalados e em funcionamento para garantir a proteção eficaz do sistema contra falhas e surtos elétricos. Na Figura 2 nota-se a evolução dos relés eletromecânicos para os relés digitais.

Figura 2 – Relés eletromecânicos x relés inteligentes.



Fonte: (RUSH, 2011).

O processo de digitalização dos dispositivos de proteção é o tema central deste trabalho. A digitalização consiste em transformar algo analógico em digital. No caso da proteção em subestações, a digitalização dos dispositivos de proteção permite que os dados sejam coletados, armazenados e analisados de forma mais eficiente e precisa. Isso possibilita que os operadores do sistema elétrico possam tomar decisões mais rápidas e precisas em caso de falhas ou anomalias no sistema.

Durante o desenvolvimento do trabalho, serão abordados os avanços e inovações na tecnologia de proteção em subestações, além das adaptações necessárias para que essas instalações acompanhem tais mudanças. Será ressaltada a importância da proteção para a segurança e confiabilidade do sistema elétrico. A incapacidade de identificar e isolar falhas pode resultar em riscos graves, como incêndios, explosões e choques elétricos, comprometendo a segurança das pessoas. Além disso, interrupções ou falhas no fornecimento de energia podem causar grandes prejuízos financeiros para empresas, indústrias e residências, além de gerar insatisfação entre os usuários. Nesse contexto, a digitalização dos dispositivos de proteção se destaca como um avanço crucial para garantir a segurança e a eficiência do sistema.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Analisar a digitalização do sistema de proteção da subestação de alta tensão “SE BH ADELAIDE - 138kV”, por meio de um estudo de caso, acompanhando os desafios ao longo do processo e verificando os ganhos com a atualização. Identificar as melhores práticas e promover recomendações para a implementação bem-sucedida da digitalização em outras subestações.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Realizar uma análise crítica dos sistemas de proteção digitais em comparação aos demais tipos de sistemas de proteção, apresentando uma avaliação qualitativa desses sistemas;
- Avaliar a vantagem espacial da modernização, calculando a redução no espaço ocupado pelos equipamentos e o impacto dessa economia de espaço;
- Analisar a viabilidade da modernização do sistema elétrico, com foco na determinação do prazo de retorno sobre o investimento.

1.2 **Justificativa**

A digitalização do sistema de proteção traz um sistema único de supervisão que interliga todo o sistema elétrico, tornando possível o monitoramento e a atuação na proteção de diferentes equipamentos com variadas cargas. Além disso, o relé de proteção digital permite a comunicação entre subestações, aumentando a eficiência na detecção das faltas e determinação das suas características, auxiliando no restabelecimento do SEP em tempos menores.

Atualmente, a digitalização dos dispositivos de proteção está revolucionando o campo da proteção de sistemas elétricos, permitindo aprimoramentos significativos em termos de eficiência e confiabilidade. Portanto, a investigação sobre a digitalização da proteção de sistemas elétricos é de grande importância para garantir a segurança do fornecimento de energia elétrica.

No sistema elétrico a maioria dos relés de proteção são analógicos, mas já existem muitos desses equipamentos sendo substituídos por Dispositivos Eletrônicos Inteligentes – IEDs, também conhecidos como relés digitais, ou microprocessados. Isso se deve ao grande avanço da tecnologia, pois os equipamentos dispostos em subestações geralmente não possuem uma tecnologia avançada que o faça comunicar com outros equipamentos.

Existem diversos tipos de relés que fazem a proteção do SEP entre eles estão os relés com diferentes funções de proteções, relés de monitoração, relés de regulação e relés de sincronização. A grande vantagem da substituição destes relés analógicos por relés digitais é que eles podem agregar mais de uma destas funções simultaneamente, além de funções adicionais, como lógicas que podem ser implementadas, comandos e comunicações de falhas e automatismo por rede.

Quando se compara o relé digital com o analógico o custo de investimento inicial pode parecer alto, porém quando se leva em consideração os ganhos de manutenção, a redução de cabos utilizados na instalação, baixo custo de operação e melhor gerenciamento de planta, os IEDs estão em grande vantagem. Além disso, os relés digitais são mais tolerantes aos desgastes e possuem menos influência externa quando comparados às tecnologias já empregadas.

1.3 Colocação do Problema

A partir do estudo de caso da modernização do vão 3K da SE BH ADELAIDE, como a digitalização das proteções de subestações impacta a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema elétrico de potência? Além disso, quais são as vantagens financeiras específicas obtidas por meio desse processo de digitalização? Quais são as vantagens espaciais proporcionadas pela modernização destas proteções?

1.4 Organização do Texto

Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo, são abordados os conceitos introdutórios relacionados ao sistema de proteção e à digitalização desses sistemas. Também se destaca a importância do tema e a formulação do problema, além de apresentar os objetivos gerais e específicos, bem como a estruturação do trabalho.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: Este capítulo reúne a base teórica do estudo, tratando da estrutura do sistema elétrico de potência, tipos recorrentes de falhas no sistema, e relés de proteção eletromecânicos e digitais.

Capítulo 3 – Metodologia: Aqui é descrita a metodologia de pesquisa, detalhando os passos seguidos para a digitalização dos equipamentos de proteção. Explica-se o motivo da digitalização e como os dados serão apresentados nos resultados.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão: Apresenta os resultados obtidos e as discussões sobre o processo de digitalização, destacando as principais mudanças nos equipamentos, otimizações de espaço no painel de proteção, uma análise do diagrama CA, e uma avaliação financeira.

Capítulo 5 – Conclusão: São apresentadas as considerações finais sobre a implementação do sistema de proteção microprocessado, seguidas de propostas para trabalhos futuros.

Por fim, são incluídas as referências utilizadas na elaboração deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estrutura do sistema elétrico de potência

O sistema elétrico de potência (SEP) é uma rede complexa de elementos interconectados que trabalham juntos para fornecer energia elétrica de forma confiável e eficiente aos usuários finais. Entre esses elementos estão geradores, transformadores, linhas de transmissão e subestações (CAMINHA, 1977).

A geração de energia elétrica é realizada em usinas geradoras, que podem utilizar diferentes fontes de energia para produzir eletricidade, como hidráulica, térmica, eólica, solar, nuclear, entre outras. Cada fonte de energia possui características específicas que influenciam na escolha da tecnologia utilizada na geração (MAMEDE FILHO, 2013).

Após a geração, ela é transmitida por meio de linhas de transmissão de alta tensão, que levam esta energia a grandes distâncias. Essa etapa é responsável por transportar a energia produzida pelas usinas geradoras até as subestações, que são pontos de conexão com as redes de distribuição.

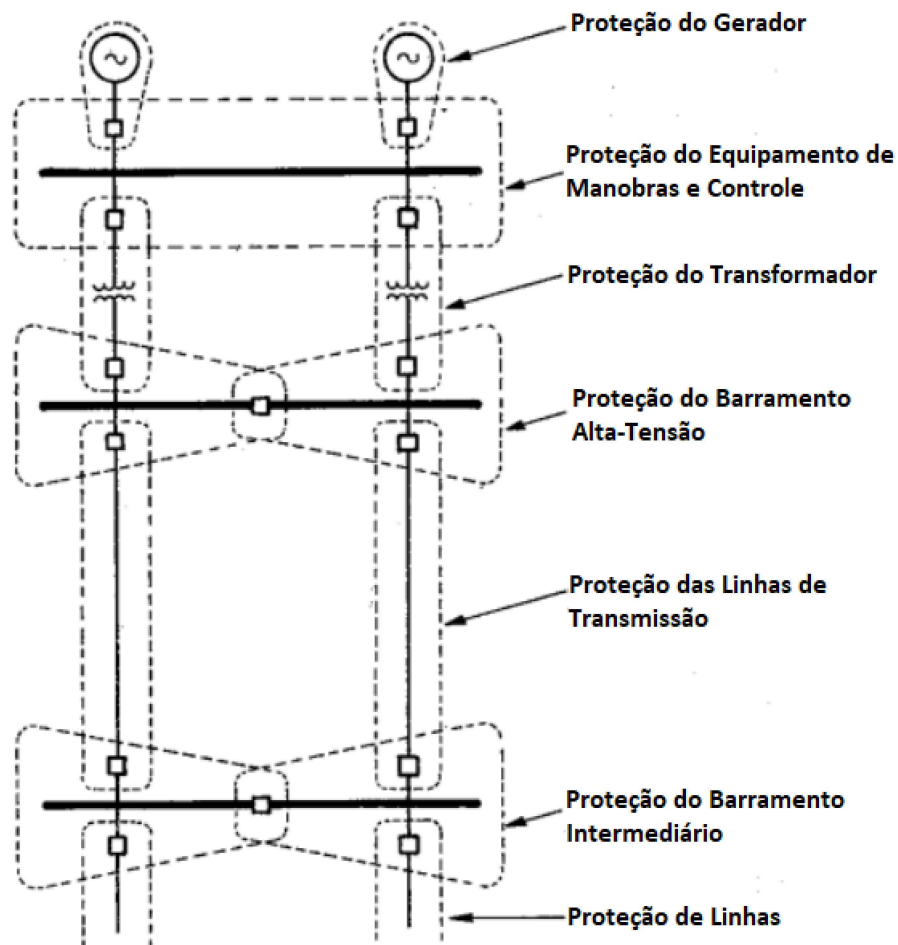
A distribuição é a última etapa do processo de fornecimento aos consumidores finais. Essa etapa é responsável por levar a energia elétrica até os locais de consumo, como residências, indústrias, comércios, entre outros. A distribuição é feita por meio das redes de distribuição, que são compostas por linhas de média e baixa tensão, transformadores e outros equipamentos.

Cada etapa do processo de geração, transmissão e distribuição possui desafios técnicos e operacionais específicos, como a necessidade de adequar a capacidade da rede elétrica para atender a demanda de energia em diferentes horários, o monitoramento constante da qualidade da energia fornecida aos consumidores e a manutenção preventiva da rede elétrica para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema (SCHMIDT, 2009).

Portanto, a geração, transmissão e distribuição são etapas interdependentes do processo de fornecimento de energia elétrica aos consumidores finais, que exigem tecnologias, equipamentos e estratégias de operação específicas para garantir a eficiência, segurança e qualidade do fornecimento.

Para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico, é essencial a implementação de um sistema de proteção abrangente. Esse sistema de proteção atua em diversas partes do SEP, dependendo do tipo de proteção e do equipamento a ser protegido. Entre as partes do SEP onde o sistema de proteção pode atuar estão geradores, transformadores, disjuntores, linhas de transmissão, subestações e cargas como mostra o diagrama unifilar na Figura 3 (CAMINHA, 1977).

Figura 3 – Zoneamento de proteção.



Fonte: Adaptado de (CAMINHA, 1977).

2.2 Tipos de faltas

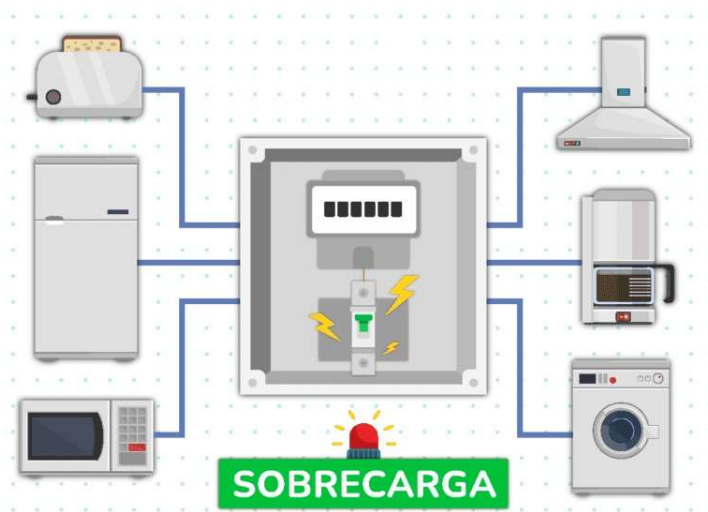
É importante entender as faltas e suas causas principais para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico. Existem vários tipos de faltas elétricas que podem ocorrer em um sistema elétrico de potência. Algumas das principais faltas são curto-circuito, sobretensão, subtensão, sobrecorrente, subcorrente, sobrefrequência, subfrequência, interrupção momentânea e interrupção prolongada.

Os eventos causadores das faltas são as condições climáticas, sobrecarga, falhas em equipamentos, danos em infraestrutura e atividades de terceiros. Mesmo que os eventos não possam ser previstos, é possível e necessário implementar um sistema de proteção adequado para evitar possíveis danos e interrupções no fornecimento de energia elétrica.

2.2.1 Sobrecarga

Sobrecarga é uma condição em que a corrente elétrica em um circuito ultrapassa o valor nominal para o qual o sistema foi projetado, João Mamede em seu livro "Proteção de Sistemas Elétricos de Potência", reforça a importância da compreensão e prevenção da sobrecarga em sistemas elétricos. O autor destaca que a sobrecarga pode ocorrer devido a diferentes fatores, como o uso excessivo de energia elétrica e falhas em equipamentos elétricos, e que o dimensionamento adequado do sistema elétrico é essencial para evitar essa condição (MAMEDE FILHO, 2013). Na Figura 4 é possível ver um cenário residencial de sobrecarga.

Figura 4 – Exemplo de uma situação de sobrecarga.



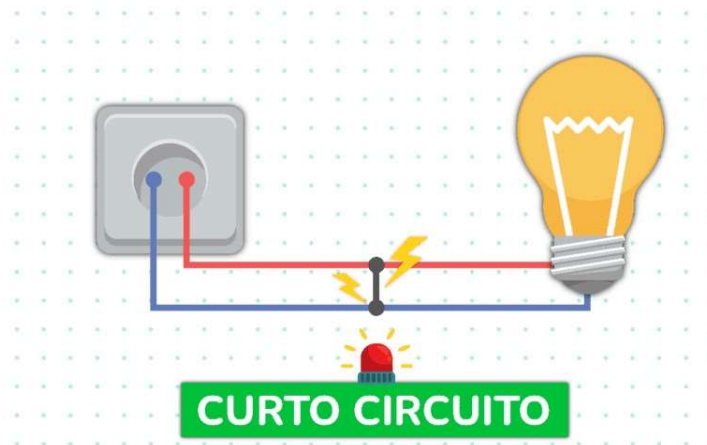
Fonte: (FURLAN, 2022).

Existem sobrecargas que devem ser previstas e toleradas, como por exemplo a partida dos motores elétricos de indução, que assume um alto valor de corrente de partida. Para isso o sistema elétrico deve ser projetado para permitir sobrecargas por um tempo limitado.

2.2.2 Curto-circuito

Um curto-circuito é uma falha elétrica em que ocorre a conexão direta entre dois ou mais condutores do sistema, conforme ilustrado na Figura 5, criando um caminho de baixa impedância. Isso pode resultar em uma corrente elétrica muito alta que pode danificar os equipamentos elétricos e até interromper o fornecimento de energia elétrica. É importante destacar que os eventos de curto-circuito podem ocorrer em um tempo muito curto, normalmente entre 50 e 1000 milissegundos, o que exige uma rápida resposta do sistema de proteção para minimizar os danos (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 5 – Exemplo de uma situação de curto-circuito.



Fonte: (FURLAN, 2022).

Os curtos-circuitos em um sistema elétrico de potência podem ocorrer em diferentes formas, como:

Curto-circuito trifásico ou simétrico: ocorre quando há uma conexão direta entre os três condutores do sistema, resultando em uma corrente de curto-circuito simétrica em todas as fases.

Curto-circuito bifásico sem contato de terra: ocorre quando há uma conexão direta entre dois condutores do sistema, sem contato com a terra.

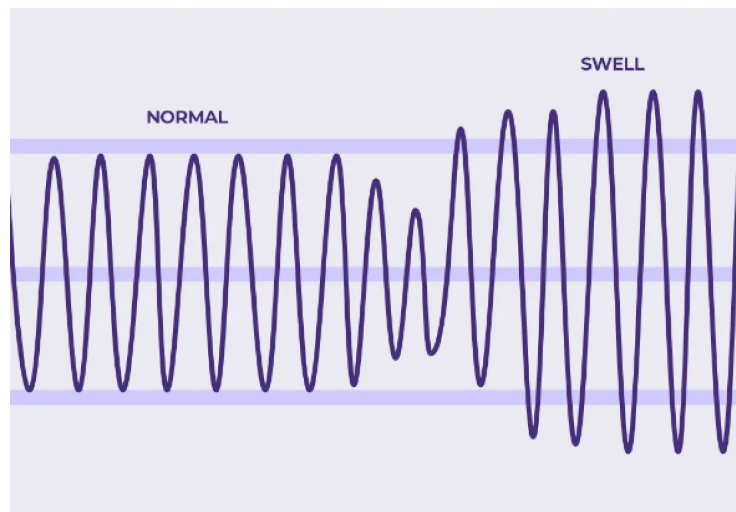
Curto-circuito bifásico com contato de terra: ocorre quando há uma conexão direta entre dois condutores do sistema com contato com a terra.

Curto-circuito monofásico ou curto para a terra: ocorre quando há uma conexão direta entre um condutor do sistema e a terra.

2.2.3 *Sobretensão e Subtensão*

A sobretensão é uma variação de tensão elétrica que permanece por mais de 1 minuto, sendo considerado uma sobretensão de curta duração (*SWELL*) quando essa variação permanece por menos de 1 minuto. Esse tipo de variação ocorre quando a tensão em um circuito elétrico ultrapassa o valor nominal para o qual o sistema foi projetado, Figura 6.

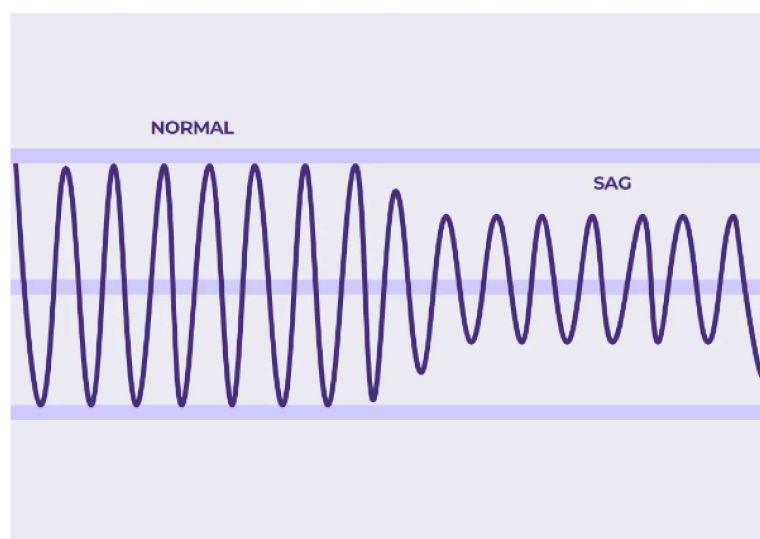
Essa variação pode ocorrer devido a descargas atmosféricas (diretas e indiretas induzidas), manobras de chaveamento em subestações elétricas ou falhas em equipamentos de proteção. A sobretensão pode danificar os equipamentos elétricos e, em casos extremos, causar incêndios. Para que o sistema funcione de forma eficiente os relés de sobretensão devem estar ajustados para evitar que a tensão máxima obtida não ultrapasse de 110% do valor da tensão nominal (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 6 – Forma de onda *SWELL*.

Fonte: (LOGMASTER, 2020).

A subtensão é uma variação de tensão elétrica em que a tensão em um circuito elétrico fica abaixo de 90% do valor nominal para o qual o sistema foi projetado, por mais de 1 minuto, sendo considerado afundamento de tensão (*SAG*) quando essa variação permanece por menos de 1 minuto, como demonstrado na Figura 7.

Como afirmou (BAILTELO, 2019), "a queda de tensão pode levar a uma operação inadequada dos equipamentos elétricos, como redução de desempenho ou falhas em motores, e afetar a qualidade do fornecimento de energia, comprometendo a operação do sistema elétrico como um todo". A subtensão pode ser causada por diversos fatores, como falhas em transformadores, sobrecarga no sistema ou queda de tensão na rede de distribuição.

Figura 7 – Forma de onda *SAG*.

Fonte: (LOGMASTER, 2020).

Com isso, é crucial contar com dispositivos adequados de proteção contra sobretensão e subtensão instalados em sistemas elétricos para monitorar e controlar a tensão, evitando ocorrências que possam comprometer a segurança dos equipamentos e das pessoas. Dentre os dispositivos de proteção mais utilizados estão os relés de sobretensão e subtensão, para-raios, protetores contra surto, reguladores de tensão, chaves de transferência automática (*Automatic Transfer Switch - ATS*) e outros equipamentos similares. Esses dispositivos desempenham um papel fundamental na prevenção de falhas e na manutenção da estabilidade do sistema elétrico, garantindo assim a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

2.2.4 Sobrecorrente e Subcorrente

A sobrecorrente e subcorrente são dois tipos de faltas elétricas que podem ocorrer em um sistema elétrico de potência, e é fundamental entender suas causas e impactos para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema. A sobrecorrente ocorre quando a corrente elétrica em um circuito elétrico ultrapassa o valor nominal para o qual o sistema foi projetado, podendo ser causada por sobrecarga, falha em equipamentos ou curto-circuito. Já a subcorrente ocorre quando a corrente elétrica em um circuito fica abaixo do valor nominal, podendo ser causada por falhas em transformadores ou circuitos abertos. Essa condição pode levar à operação inadequada dos equipamentos elétricos, como redução de desempenho ou falhas em motores (MAMEDE FILHO, 2013).

2.2.5 Sobrefrequência e Subfrequência

São fenômenos que ocorrem em sistemas elétricos de potência quando há uma variação na frequência da corrente elétrica em relação ao valor nominal que é 60 Hz aqui no Brasil. Uma das principais causas são a alteração da velocidade de rotação de máquinas girantes.

A sobrefrequência ocorre quando a frequência da corrente elétrica ultrapassa o valor nominal. Isso pode ocorrer em situações como quando há uma queda na demanda de energia elétrica, sem que haja redução da geração. Essa variação na frequência não afeta, em sua maioria, o pleno funcionamento dos componentes eletrônicos, porém afeta diretamente na qualidade da energia fornecida (MAMEDE FILHO, 2013).

Por outro lado, a subfrequência ocorre quando a frequência da corrente elétrica fica abaixo do valor nominal. Isso pode ocorrer em situações como quando há um aumento na demanda de energia elétrica e a geração não é suficiente para atender a demanda. Isso leva a uma diminuição na frequência da corrente elétrica, o que pode levar a uma queda na tensão elétrica e a uma interrupção do fornecimento.

Para evitar o aquecimento, vibrações indesejáveis, entre outras consequências da sobrefrequência e subfrequência, os sistemas elétricos de potência contam com dispositivos de proteção que atuam em faixas de frequência entre 25Hz e 70Hz acionando como disjuntores e

transformadores de corrente.

2.3 Dispositivos de proteção

Os relés de proteção ficam a todo momento monitorando os sinais de entrada (correntes e tensões fornecidas pelos transformadores de instrumentos) e atuam ao identificar algum tipo de falta de acordo com a suas programações e configurações.

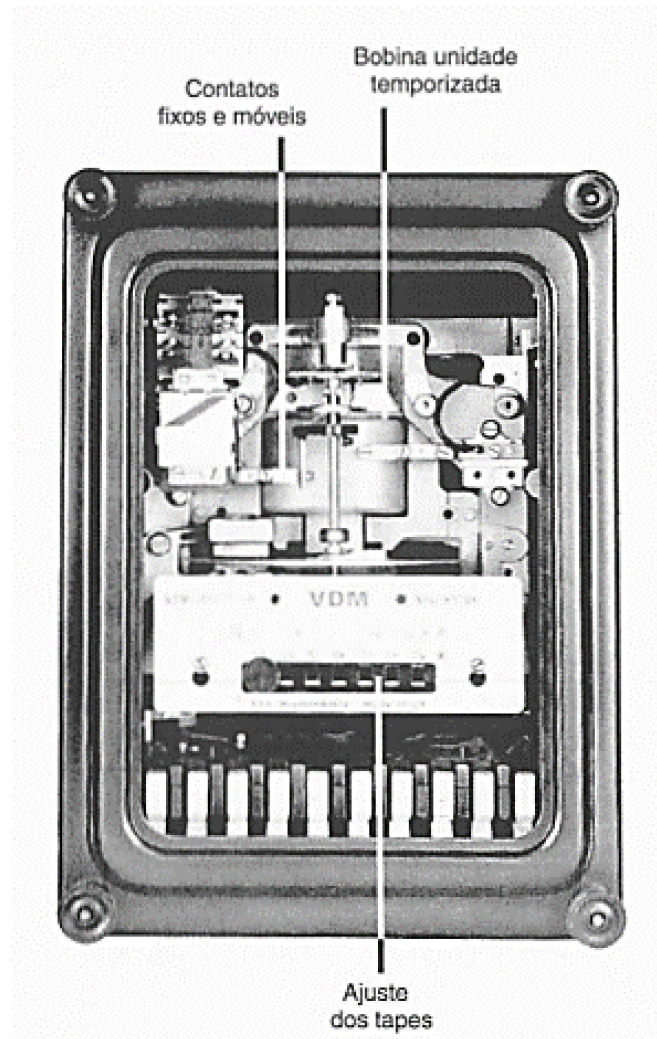
Todos os dispositivos de proteção não atuam independentemente, ao contrário, suas características de operação guardam entre si uma determinada relação, de modo que uma anormalidade no sistema possa ser isolada e removida sem que as outras partes do mesmo sejam afetadas. Isto é, os dispositivos de proteção devem ser coordenados para operação seletiva. (CAMINHA, 1977).

2.3.1 Relés eletromecânicos

Os relés analógicos têm sido utilizados há aproximadamente 100 anos como componentes essenciais na proteção de sistemas elétricos (RUSH, 2011). Seu funcionamento baseia-se no princípio de respostas físicas a sinais elétricos, realizando operações de controle e proteção com precisão e confiabilidade em diversas aplicações.

Embora os relés eletromecânicos (Figura 8) já não sejam mais fabricados, continuam a ser amplamente utilizados em serviços de energia elétrica, fábricas, edifícios comerciais e outras instalações. Estes dispositivos têm uma longa vida útil, são robustos e possuem uma capacidade de operar em ambientes extremos, normalmente só são substituídos quando há necessidade de atualizar ou expandir o sistema de proteção da subestação, ou de melhorar o seu desempenho operacional (MAMEDE FILHO, 2013).

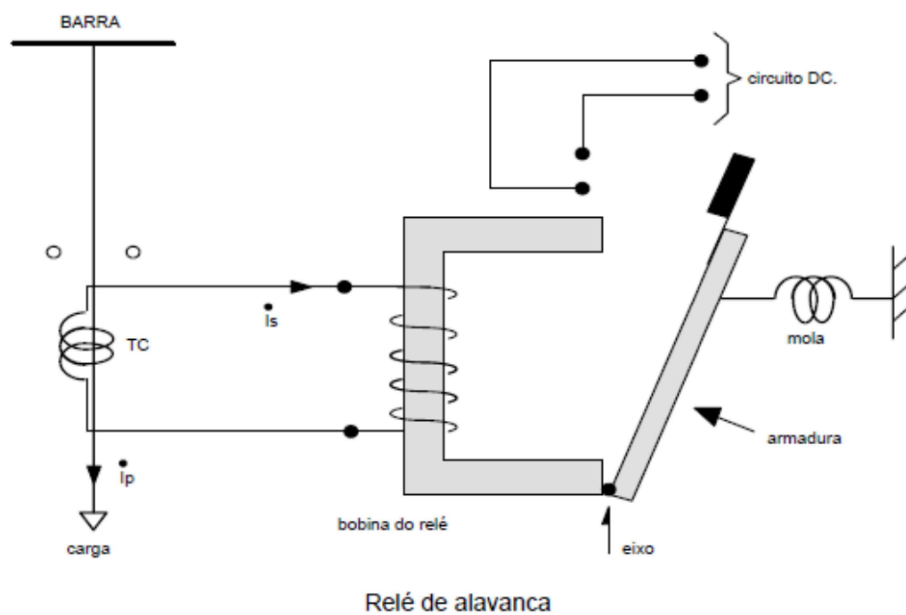
Figura 8 – Relé eletromecânico de indução.



Fonte: (MAMEDE FILHO, 2013).

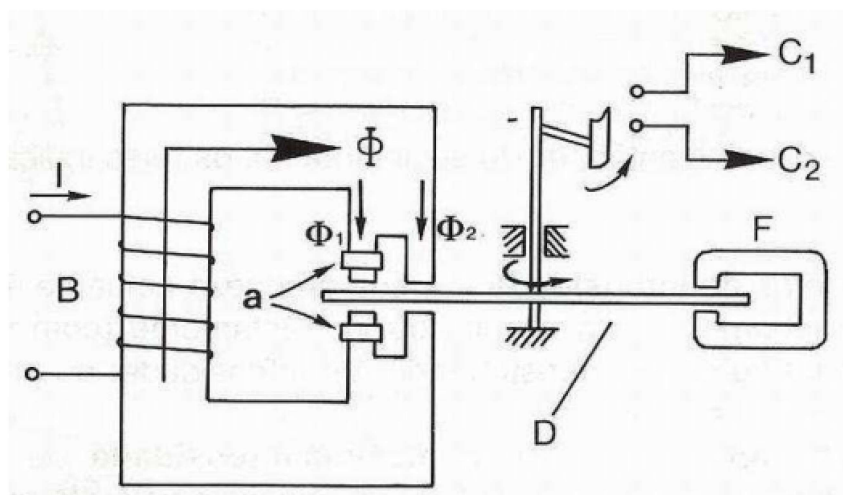
Estes relés operam com base em movimentos mecânicos gerados por campos elétricos e magnéticos, e seu funcionamento pode ser classificado em dois princípios principais: atração eletromagnética e indução eletromagnética, conforme ilustrado nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 – Relé de alavanca.



Fonte: (TEIXEIRA, 2017).

Figura 10 – Relé de disco de indução.



Fonte: (KINDERMANN, 2005).

No princípio da atração eletromagnética, um campo magnético é gerado pela corrente elétrica que passa pelo relé, atraindo uma armadura móvel. Esse movimento da armadura fecha ou abre os contatos do relé, ativando ou desativando o circuito. A intensidade da corrente afeta diretamente a força do campo magnético e, portanto, o movimento da armadura, fazendo com que esse tipo de relé seja amplamente utilizado em aplicações de controle e proteção (RUSH, 2011).

Por outro lado, no princípio da indução eletromagnética, dois fluxos magnéticos defasados são gerados pela corrente elétrica. Esses fluxos criam um torque que faz com que um disco ou bobina gire. À medida que o disco gira, ele aciona os contatos do relé. Nesse caso, a velocidade de rotação do disco é inversamente proporcional à corrente, o que significa que correntes mais altas resultam em menores tempos de resposta. Relés de indução utilizam essa característica para ajustar o tempo de atuação com base na intensidade da corrente, proporcionando uma resposta eficaz para diferentes condições de operação (KINDERMANN, 2005).

Esses princípios permitem que os relés ajustem sua operação conforme a corrente elétrica, desempenhando um papel crucial em sistemas elétricos ao garantir controle e proteção adequados.

2.3.2 Relés digitais

Conforme afirmou João Mamede (MAMEDE FILHO, 2013) “Os relés digitais oferecem, além das funções dos seus antecessores, novas funções aos seus usuários adicionando maior velocidade, melhor sensibilidade, interfaceamento amigável, acesso remoto, armazenamento de informações, etc”.

Os relés digitais são dispositivos que tem como base a tecnologia de microprocessadores para processar os sinais de entrada. A Figura 11 mostra como são subdivididos, dentre eles estão: subsistema de aquisição de dados, subsistema de processamento de dados, subsistema de comunicação e subsistema de saída de dados.

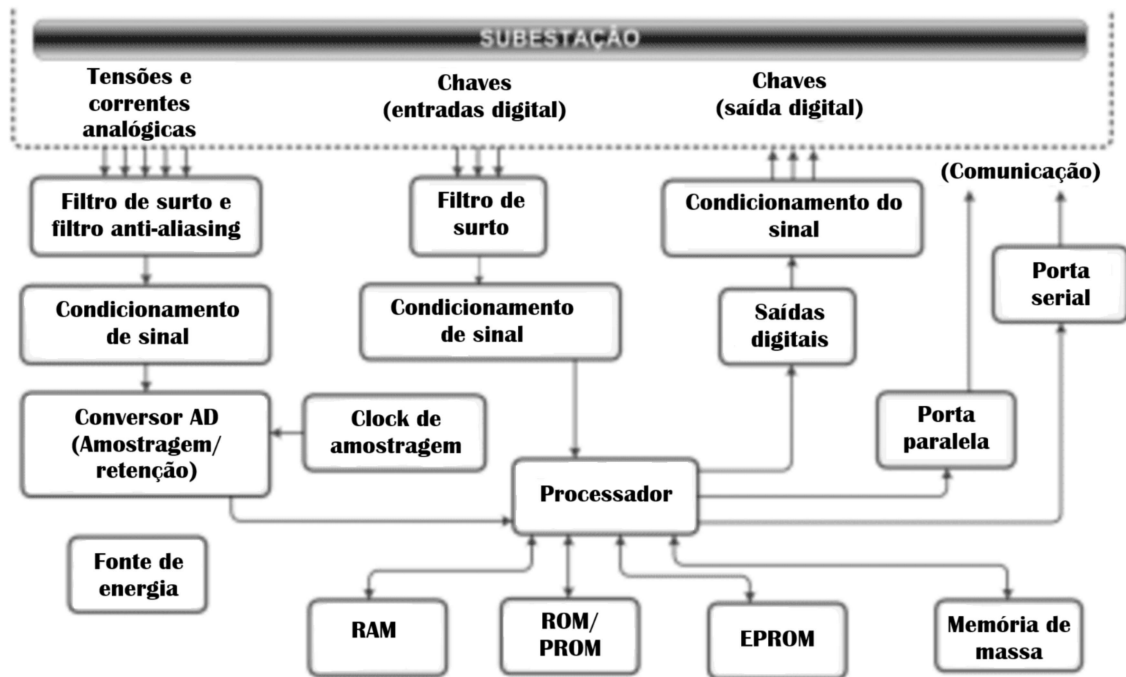
O funcionamento do subsistema de aquisição de dados tem como base a medição de sinais analógicos de entrada como tensão e corrente. Esses sinais de entrada passam pelos transformadores de entradas, são filtrados e condicionados, para garantir que as magnitudes dos sinais sejam adequadas para o nível de tensão do relé. Após o condicionamento é realizado a conversão do sinal analógico para digital, por meio de conversores analógico-digital (ADC). O sinal convertido para digital é processado juntamente aos sinais dos equipamentos de manobra.

O processador é responsável por executar as funções lógicas e matemáticas necessárias para determinar se a operação do sistema elétrico está dentro dos limites especificados ou se há condições de operação anormais.

O subsistema de comunicação é responsável pela comunicação do relé digital com outros dispositivos do sistema de proteção, como outros relés, controladores ou um sistema de supervisão e controle.

Por fim, o subsistema de saída de dados é responsável por emitir alarmes e atuar nos equipamentos de manobra, caso ocorra uma falha ou condição de operação anormal no sistema elétrico (FRAZAO, 2019).

Figura 11 – Subsistemas que compõem a arquitetura do relé digital.



Fonte: Adaptado de (FRAZAO, 2019).

Os relés microprocessados utilizam processadores de sinal digital (DSP) para converter sinais analógicos em dados digitais e processá-los com algoritmos matemáticos sofisticados. Esta tecnologia permite a centralização de várias funções em um único dispositivo, uma prática cada vez mais comum devido à redução dos custos de microprocessadores e componentes digitais. Embora a centralização possa levantar preocupações sobre confiabilidade e disponibilidade, já que uma falha pode afetar múltiplas funções, a experiência prática mostra que os relés digitais são tão confiáveis quanto os modelos anteriores.

Os parâmetros de proteção para atuação em caso de faltas não são predefinidos de fábrica, suas funções são configuradas através de um firmware disponibilizado pelo fabricante, elas devem ser parametrizadas de acordo com as necessidades específicas do sistema. Para personalizar suas funções, é necessário inserir informações detalhadas sobre os equipamentos primários, como tensão, corrente e potência. Além disso, problemas de software são gerenciados com rigorosos processos de desenvolvimento e a possibilidade de atualizações via comunicação remota. Com isso, os relés microprocessados oferecem uma combinação avançada de desempenho e economia de espaço, representando uma melhoria significativa em relação aos relés mais antigos.

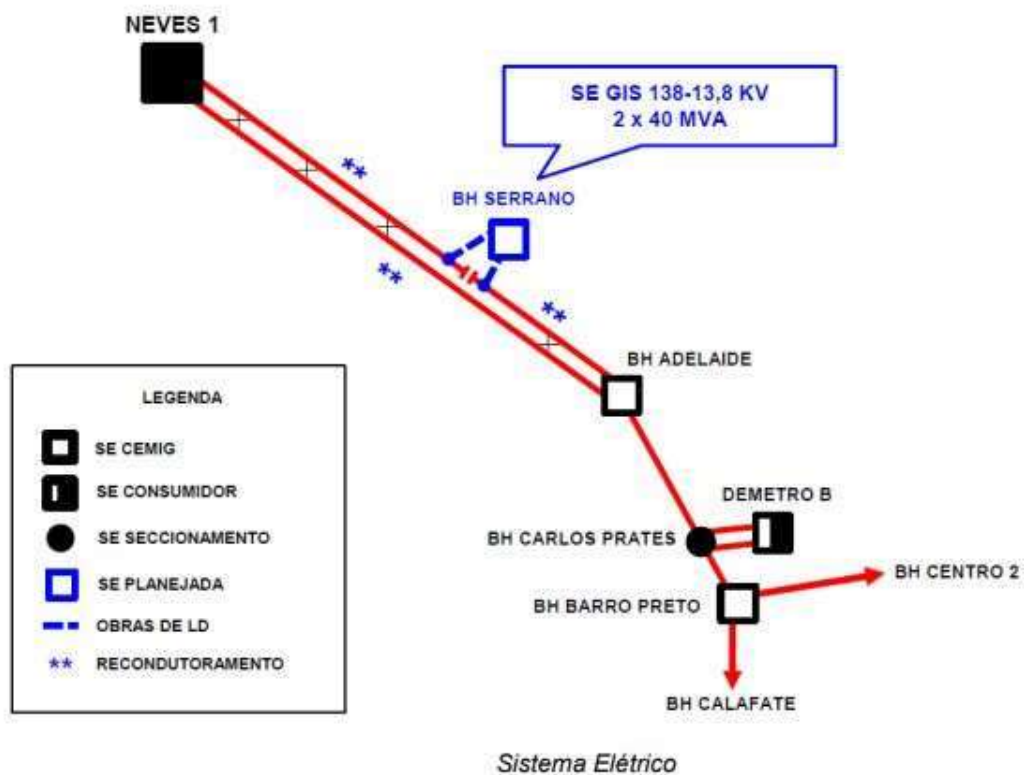
3 METODOLOGIA

O estudo de caso sobre a modernização da Subestação BH Adelaide, especificamente do vão 3K, envolveu uma investigação detalhada dos processos de *retrofit*, bem como de suas etapas. Para isso, foram utilizadas como fontes de pesquisa trabalhos acadêmicos, livros didáticos e pesquisa de campo, a fim de conhecer o processo detalhado. Inicialmente, foi realizado um levantamento teórico abrangente, abordando temas como a estrutura do Sistema Elétrico de Potência (SEP), os tipos de faltas, as funções de proteção, além de um comparativo entre os principais dispositivos de proteção, com ênfase nos equipamentos eletromecânicos e digitais.

A modernização da rede elétrica, assim como a construção de novas subestações, é essencial para atender ao crescente aumento da demanda energética, especialmente em áreas urbanas em expansão. A implantação da nova Subestação BH Serrano atende a essa necessidade, proporcionando maior confiabilidade no fornecimento de energia para a região. Nesse contexto, tornou-se necessário revisar o traçado da linha de transmissão originalmente planejada, com o objetivo de otimizar o sistema de distribuição e garantir eficiência operacional.

Com a criação da nova subestação, a linha que anteriormente conectaria a Subestação BH Adelaide à Subestação Neves 1 foi seccionada, estabelecendo uma nova ligação entre a Subestação BH Adelaide e a Subestação BH Serrano, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Estudo de traçado - construção SE BH SERRANO.



Fonte: Projeto elétrico CEMIG

Essa mudança, juntamente com a construção da nova subestação, tornou necessário a modernização dos equipamentos no vão 3K e conseqüentemente atualizar o sistema de proteção. Com a implementação de novos relés de proteção microprocessados, as subestações estão interligadas de maneira otimizada, permitindo uma integração mais robusta e segura entre elas.

Neste estudo são analisadas as principais diferenças entre os projetos antes da digitalização e após sua ocorrência, examinando as características dos diagramas elétricos, a fim de elaborar um comparativo entre as principais diferenças físicas e operacionais. A seguir, são ilustrados o projeto com o relé de proteção eletromecânico, na Figura 13 e na Figura 14 é mostrado como ficou o diagrama elétrico após a digitalização da proteção.

Figura 13 – Projeto com proteção eletromecânica.

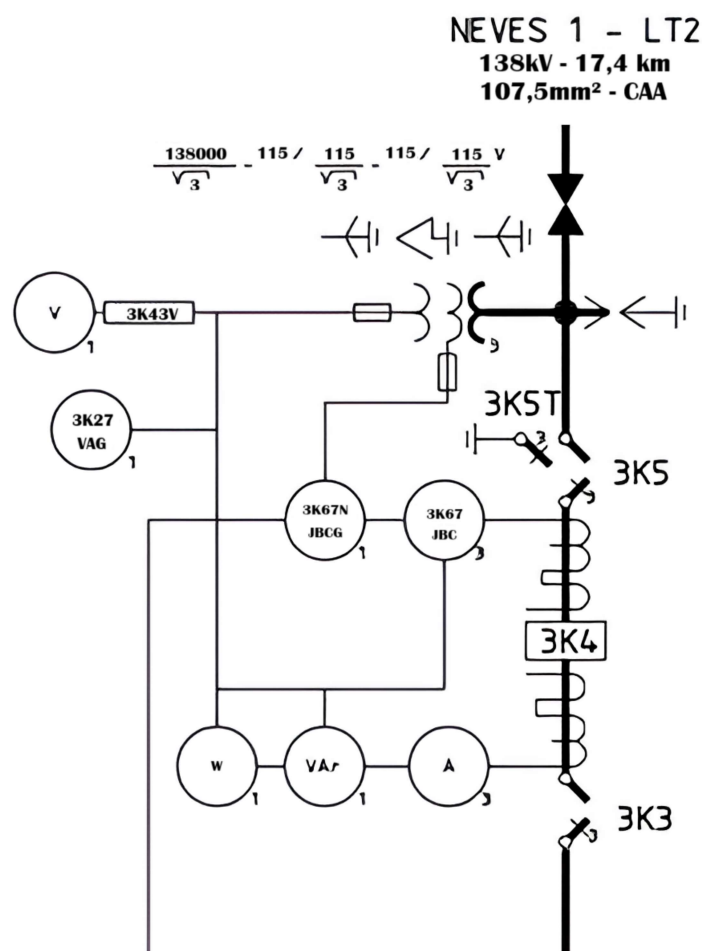
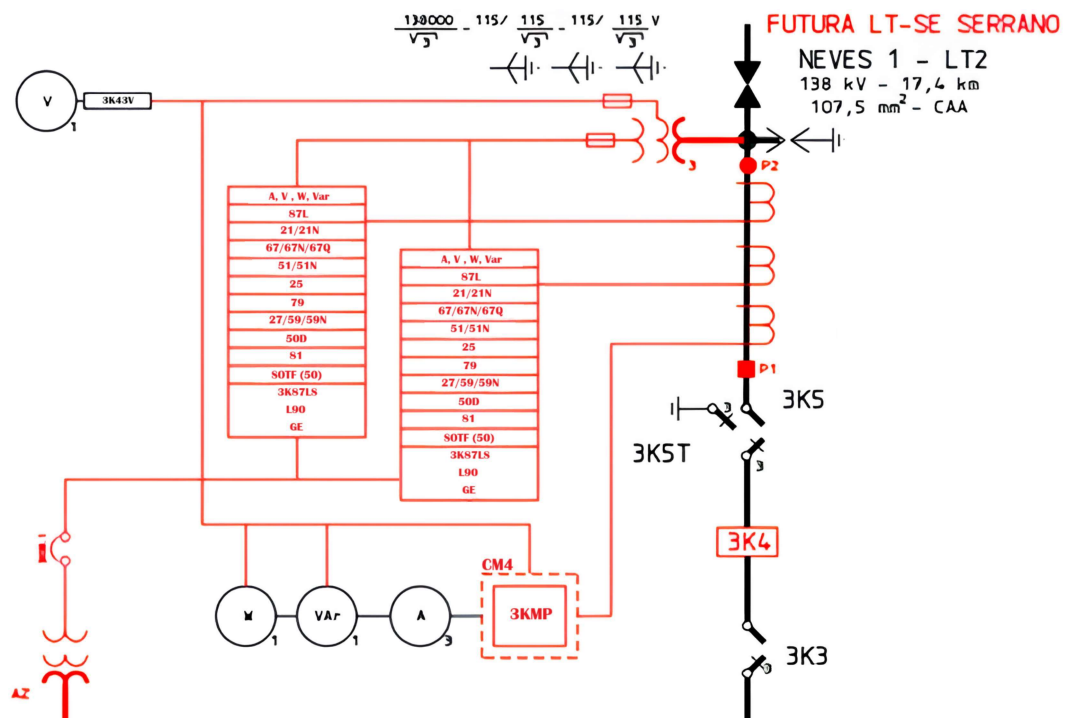


Figura 14 – Projeto com proteção digital.



Fonte: Projeto elétrico CEMIG

Além disso, são abordadas as vantagens espaciais dos relés microprocessados, como a redução do espaço necessário devido à sua tecnologia compacta, e realizada uma análise financeira que avalia a viabilidade econômica associada à modernização e ao aumento da eficiência operacional proporcionado pela digitalização do sistema de proteção.

Ao longo do processo de pesquisa, as conclusões do estudo são finalmente apresentadas e discutidas neste trabalho de conclusão de curso. São destacadas as principais características e implicações da digitalização dos sistemas de proteção, ressaltando seus impactos tanto técnicos quanto econômicos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos ao longo do estudo realizado, juntamente com uma discussão detalhada. Os resultados apresentados incluem uma análise dos equipamentos dispostos no vão, ou *bay*, contextualizando a relevância e motivos para a substituição dos mesmos. Uma análise quantitativa dos requisitos de espaço das áreas ocupadas pelos relés, e suas vantagens espaciais também são apresentadas. Além disso, é avaliada a redução no uso de componentes, como transdutores, fiação, fusíveis e chaves de aferições. Por último, uma análise financeira será abordada, fornecendo uma visão abrangente dos custos de investimento e operacionais, além de avaliar a viabilidade econômica do projeto.

4.1 Equipamentos

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é composto por diversos equipamentos, que podem estar distribuídos em diferentes vãos. Cada vão representa uma seção específica do sistema, onde estão alocados certos equipamentos destinados a funções, como proteção, controle e medição. A disposição desses equipamentos nos vãos é crucial para a eficiência e segurança do sistema, garantindo que cada componente desempenhe seu papel de forma adequada dentro do conjunto operacional do SEP.

A troca dos equipamentos primários é justificada por várias razões essenciais. Primeiramente, o planejamento para substituição destes baseia-se em uma análise detalhada do histórico de desempenho dos equipamentos, obsolescência e a superação da capacidade de corrente. A depreciação total também é um ponto crítico, uma vez que a ANEEL recomenda que os equipamentos operem dentro do período estipulado para sua vida útil, conforme o regulamento da agência.

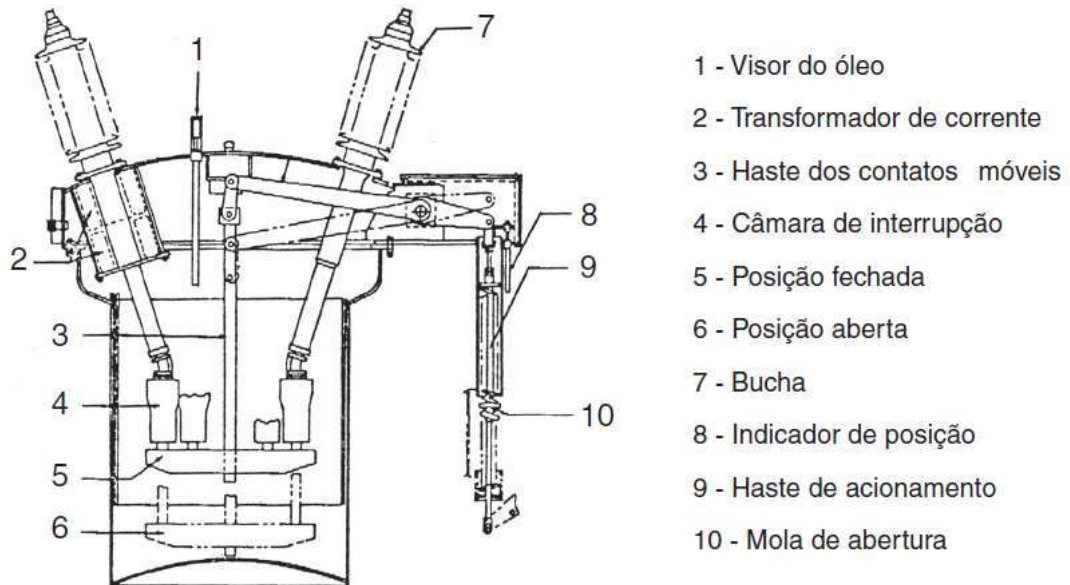
Levando em consideração a necessidade de aprimorar a eficiência e a segurança, as atualizações incluíram a substituição de equipamentos antigos por novos, além da implementação de sistemas de controle mais precisos. Essas melhorias resultaram em um desempenho otimizado, maior capacidade para suportar altas demandas e mudanças significativas na estrutura e nos métodos operacionais. A seguir, serão apresentados os detalhes das principais modernizações realizadas, destacando as diferenças entre os equipamentos anteriores e os novos.

O disjuntor de 138 kV (3K4) é do tipo GVO (Disjuntor a Grande Volume de Óleo) e possui aproximadamente 50 anos de operação, tendo ultrapassado sua vida útil conforme (ANEEL, 2015). Portanto, sua substituição tornou-se necessária. O disjuntor atual utiliza transformadores de corrente (TCs) de bucha, como mostrado na Figura 15. Com sua remoção, foi necessária a instalação de 3 novos TCs externos, garantindo uma operação mais confiável e eficaz do sistema elétrico.

Para os transformadores de potenciais (TPs), somente o transformador da fase BR do *bay* 3K foi substituído recentemente, sendo um modelo da ALSTOM de 2013. Os outros dois TPs, por

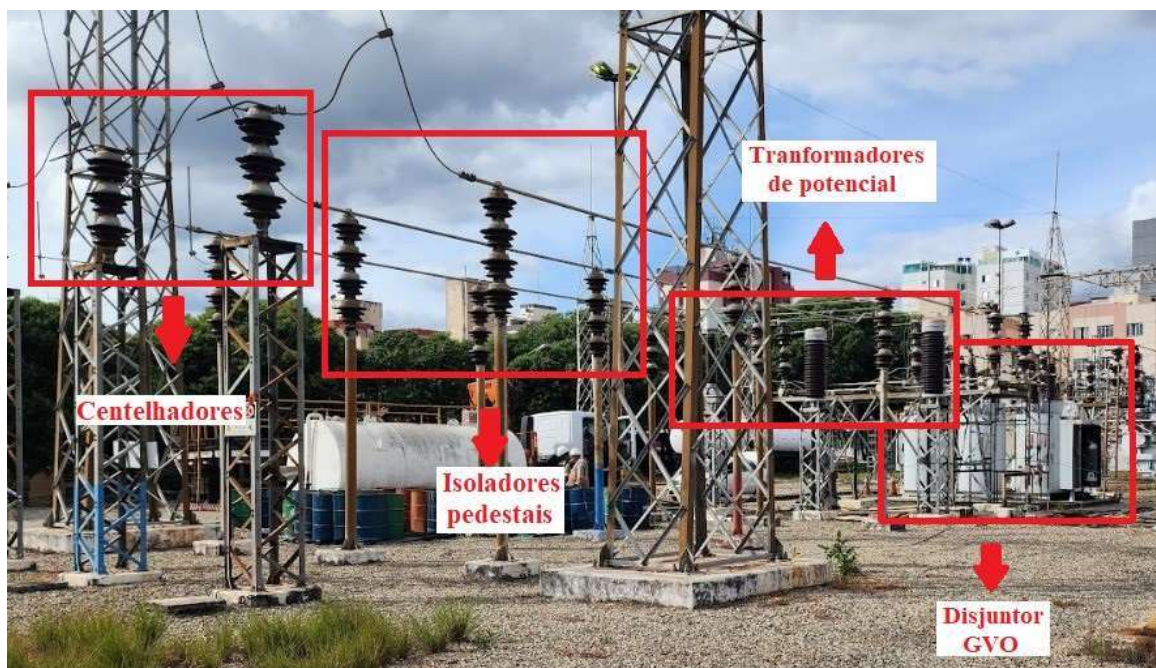
outro lado foram fabricados pela Balteau em 1972. Essa diferença tornou necessária a instalação de dois novos TPs para garantir a confiabilidade e a precisão das medições, além de alinhar o sistema aos padrões atuais de desempenho e segurança. A seguir, é apresentada a configuração da instalação antes da modernização nas Figuras 16 e 17, destacando os equipamentos mencionados anteriormente, enquanto a Figura 18 ilustra o processo de desmontagem do disjuntor.

Figura 15 – Partes Internas de um Disjuntor GVO.



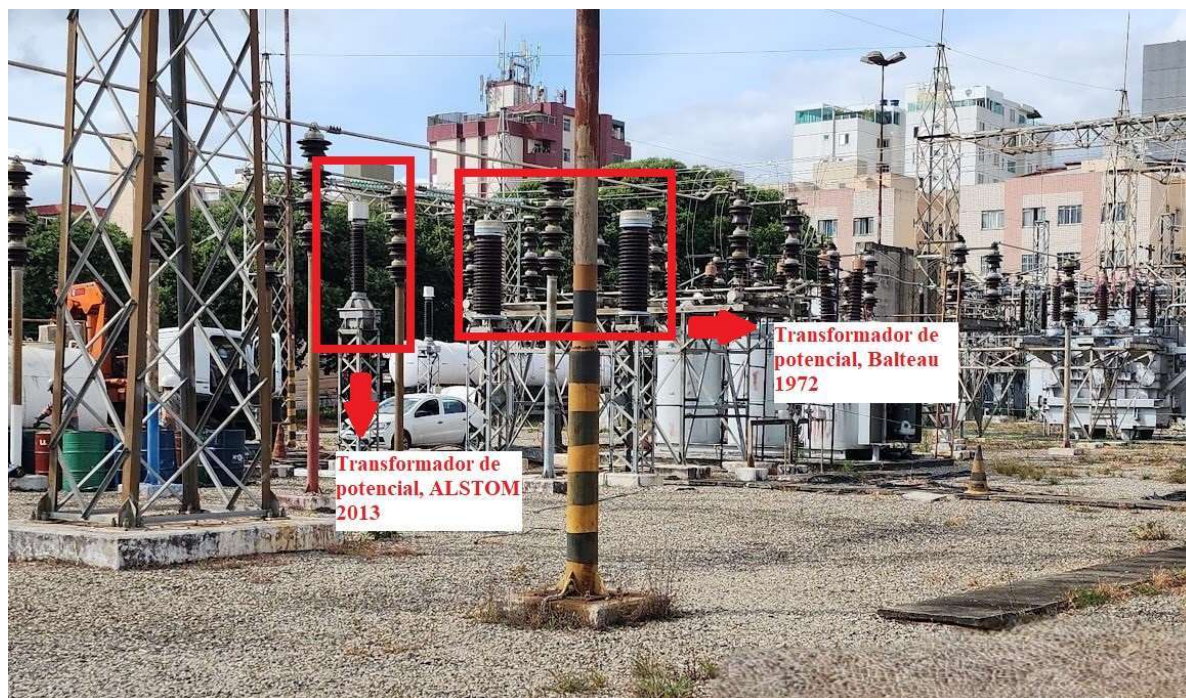
Fonte: (EBAH, 2016).

Figura 16 – Bay 3K.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 17 – Equipamentos antes da modernização.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 18 – Disjuntor sendo retirado.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Nos próximos passos, será possível destacar as diferenças significativas entre o sistema anterior e o modernizado, além de analisar o funcionamento de cada elemento. Esse comparativo permitirá uma avaliação detalhada dos benefícios concretos das mudanças revelando as vantagens obtidas com a modernização e enfatizando as melhorias em capacidade, segurança e desempenho do sistema.

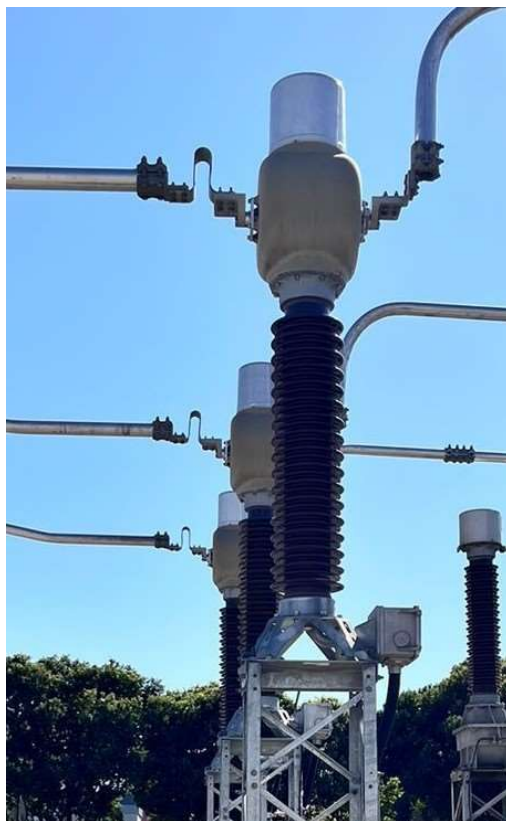
Na primeira estrutura com os equipamentos no ponto onde a linha de transmissão de alta tensão chega à subestação na Figura 16, há três centelhadores, que protegem os equipamentos contra sobretensões transitórias que acontecem na linha de transmissão, como as causadas por descargas atmosféricas. Esses centelhadores não foram modificados após a modernização, ou *retrofit*.

O barramento de alta tensão é constituído por barras condutoras de alumínio, apoiadas em isoladores de pedestal de porcelana, que fornecem suporte mecânico e isolamento elétrico. Esses barramentos têm a função de distribuir a energia até os diversos equipamentos, como transformadores de corrente (TC), transformadores de potencial (TP), seccionadoras e disjuntores, garantindo a continuidade e a segurança do fluxo elétrico em um mesmo vão.

Ao comparar os diâmetros dos tubos no vão 3K, observa-se que os tubos antigos, com diâmetro de 1.1/2 polegadas, foram substituídos por tubos de 3 polegadas. Essa mudança foi necessária para atender à nova capacidade de carregamento das linhas.

Os transformadores de corrente (Figura 19) têm a função de reduzir as correntes elevadas das linhas de transmissão para valores seguros e mensuráveis, facilitando a medição. Já os transformadores de potencial (Figura 20) são responsáveis por reduzir a tensão das linhas de alta tensão para níveis seguros dentro dos parâmetros dos relés de proteção, permitindo a medição e proteção do sistema. Esses equipamentos são essenciais para fornecer ao relé de proteção informações em tempo real sobre o estado da rede, para que o mesmo possa atuar nas possíveis situações de falha ou anomalia, garantindo a proteção adequada do sistema e a continuidade do fornecimento de energia.

Figura 19 – Transformadores de corrente após modernização.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 20 – Transformadores de potencial após substituição.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

As seccionadoras representadas nas Figuras 21 e 22 são responsáveis pelo isolamento de partes específicas do circuito. Esses dispositivos permitem a realização de manutenções ou operações sem carga de forma segura, garantindo tanto a proteção dos trabalhadores quanto a continuidade do serviço. É importante destacar que, mesmo após o *retrofit* no *bay*, as seccionadoras não sofreram alterações significativas.

Figura 21 – Seccionadora com lâmina de terra.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 22 – Seccionadora sem lâmina de terra.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O disjuntor desmontado (Figura 18) foi substituído por um disjuntor a gás SF₆ (hexafluoreto de enxofre), ilustrado na Figura 23. Esse tipo de disjuntor oferece desempenho superior em aplicações de alta tensão, garantindo alta eficiência na comutação sem sofrer degradação ao longo do tempo. Além disso, é capaz de operar de forma confiável em condições ambientais extremas. Os disjuntores protegem o circuito contra curtos-circuitos e sobrecargas, interrompendo a corrente elétrica quando necessário. Ele recebe comandos dos relés de proteção, que monitoram as condições do circuito e acionam o disjuntor em caso de falhas, garantindo a segurança e integridade do sistema elétrico.

Figura 23 – Disjuntor.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O barramento principal, Figura 24, conecta os vários circuitos de uma subestação, facilitando a distribuição de energia. Ele possui uma estrutura robusta, composta de material condutor, como cobre ou alumínio. Além disso, o barramento é equipado com isoladores, que permitem o isolamento de partes específicas após a abertura das chaves seccionadoras, garantindo maior flexibilidade e segurança na operação e manutenção do sistema. Suas principais alterações foram nas seções dos cabos, que foram substituídos por modelos de maior diâmetro para suportar a nova capacidade demandada pelo sistema.

Já o transformador regulador representado na Figura 25, altera os níveis de tensão para adequar a transmissão de energia às necessidades dos consumidores. Neste caso, o transformador de potencial de 138 kV reduz a tensão para 13,8 kV, para que alimente os ramais de média tensão, garantindo que a energia seja distribuída de forma eficiente e segura aos consumidores finais. O mesmo também não sofreu alterações durante o processo de modernização.

Figura 24 – Barramento principal.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 25 – Transformador regulador.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Embora os equipamentos substituídos ainda estivessem operacionais devido a manutenções regulares, sua substituição foi necessária para garantir o funcionamento ideal do sistema e evitar possíveis compromissos na eficiência. A decisão de modernizar a infraestrutura visou incorporar tecnologias avançadas de proteção e assegurar a continuidade e a confiabilidade do sistema, promovendo uma operação mais eficiente e duradoura a longo prazo.

4.2 Vantagens espaciais no painel de proteção

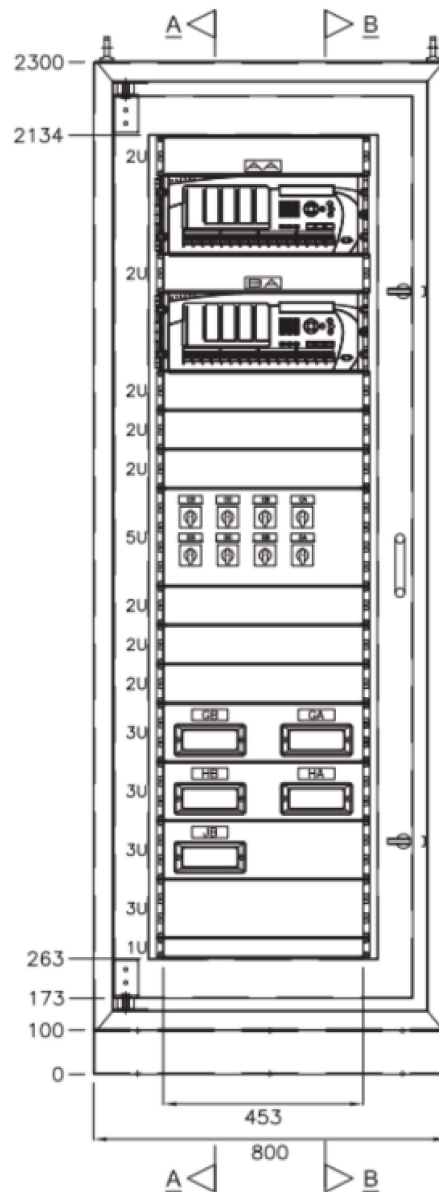
Conforme ilustrado na Figura 3 do Capítulo 2, a proteção dentro do Sistema Elétrico de Potência (SEP) abrange diversas áreas de atuação. Este estudo de caso foca na avaliação da proteção das linhas no vão 3K da Subestação BH Adelaide, que é alimentado pela linha de transmissão BH Adelaide - BH Serrano. As proteções desta subestação foram ajustadas em resposta a este novo plano de investimento da CEMIG.

A digitalização desta proteção, por meio do uso de Relés de Proteção Inteligentes (IEDs), foi essencial para salvaguardar a subestação contra possíveis falhas que possam ocorrer na linha de transmissão. Esses dispositivos IEDs permitem a detecção precisa e rápida de anomalias, garantindo respostas automáticas e imediatas para isolar o trecho defeituoso, minimizando assim o impacto de falhas. Além disso, a integração dos IEDs com o sistema de comunicação das subestações possibilita uma conexão em tempo real entre a Subestação BH Adelaide e a nova Subestação Serrano. Essa conexão permite a coordenação e o controle eficaz dos sistemas de proteção, garantindo maior confiabilidade e segurança operacional em toda a linha de transmissão.

Ao analisar o projeto, pode-se observar melhorias quanto à quantidade de funções de proteção. Na Figura 6, percebe-se que antes do *retrofit* somente era implementada a função 67/67N (proteção de sobrecorrente direcional de fase e de neutro) e a função 27 (proteção de subtensão). Após a implementação do relé microprocessado houve o acréscimo de oito funções: a função 87L (proteção diferencial de linha), 21/21N (proteção de distância), 51/51N (proteção de sobrecorrente temporizado), 25 (proteção de verificação de sincronismo ou sincronização), 79 (proteção de religamento), 59/59N (proteção de sobretensão), 50D (proteção de sobrecorrente instantâneo) e 81 (proteção de sub/sobrefrequência) mantendo ainda as proteção 67/67N e 27, conforme Figura 14.

Conforme a Figura 26, os relés microprocessados são instalados em 2 unidades: relé principal e o outro que funciona como relé de retaguarda, para uma eventual falha ou para que seja possível realizar uma manutenção, sem que a linha fique desprotegida. Ocupando aproximadamente 807,2cm² para cada um deles.

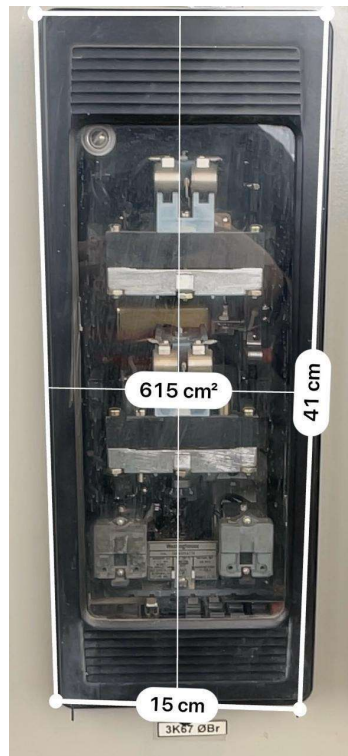
Figura 26 – Diagrama painel de proteção digital.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

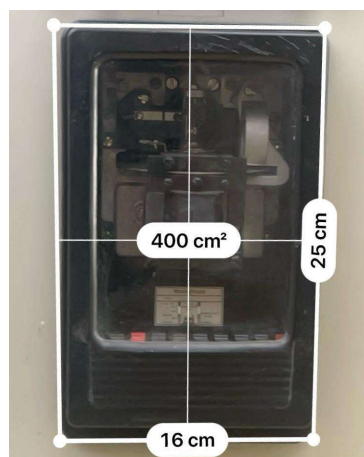
Quando comparados aos relés microprocessados, os relés eletromecânicos exigem um maior número de equipamentos para implementar as mesmas funções e medições, como ilustrado no diagrama de ocupação da Figura 32. As medições realizadas estão representadas nas Figuras a seguir: na Figura 27 é possível identificar a área de ocupação do relé eletromecânico de sobrecorrente, enquanto na Figura 28 ilustra a área do relé de proteção de subtensão. Além disso, os equipamentos de medição são destacados da seguinte forma: o amperímetro é apresentado na Figura 29, o varímetro na Figura 30, e o wattímetro na Figura 31.

Figura 27 – Dimensões do Relé eletromecânico de sobrecorrente.



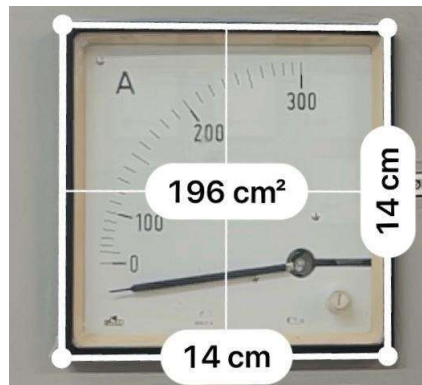
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 28 – Dimensões do Relé eletromecânico de subtensão.



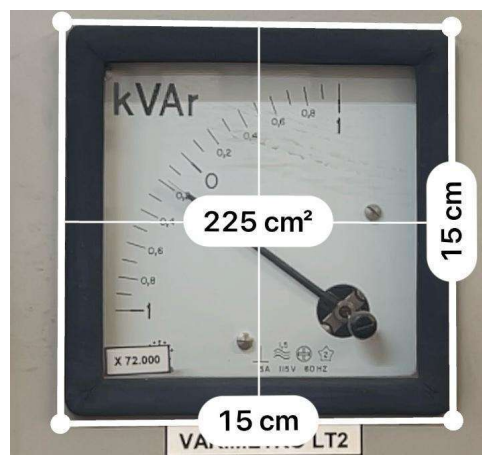
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 29 – Dimensões do Amperímetro.



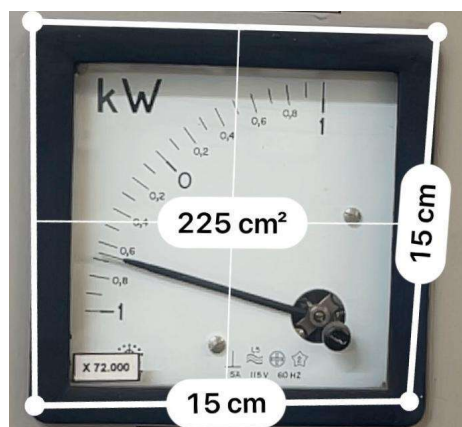
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 30 – Dimensões do Varímetro.



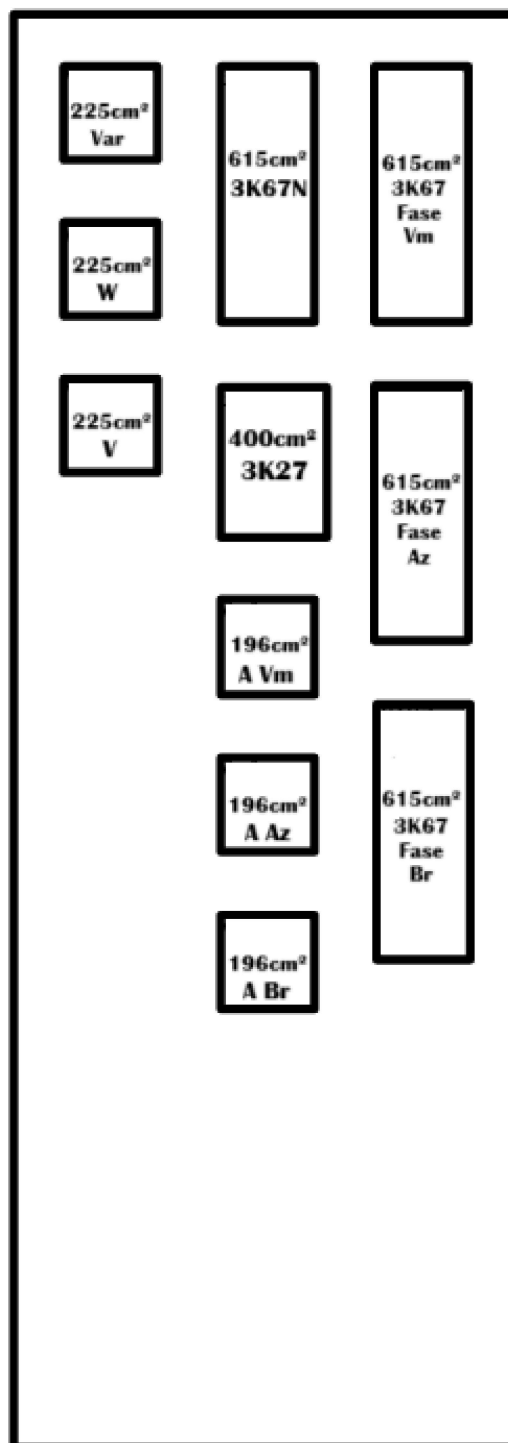
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 31 – Dimensões do Wattímetro.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 32 – Diagrama de ocupação do painel de proteção eletromecânico.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O painel com os relés microprocessados possui uma área de ocupação de 1.614,2 cm², enquanto o painel com os relés eletromecânicos ocupa 4.123 cm². Isso demonstra uma significativa diferença de espaço necessário, destacando a maior compactação e eficiência em termos de ocupação física dos relés microprocessados em comparação aos relés eletromecânicos.

O grande diferencial entre os Relés Eletromecânicos e os Relés microprocessados, é que para os relés IEDs há possibilidade de atuar em diferentes tipos de faltas e também são utilizados para realizar a medição das grandezas envolvidas. Além disso, essa multifuncionalidade dos IEDs resulta em uma significativa economia de espaço, com a instalação ocupando até 3 vezes menos espaço, levando em consideração as características da proteção estudada, em comparação com os relés eletromecânicos que necessitariam de dispositivos separados para cada função.

4.3 Diagrama CA

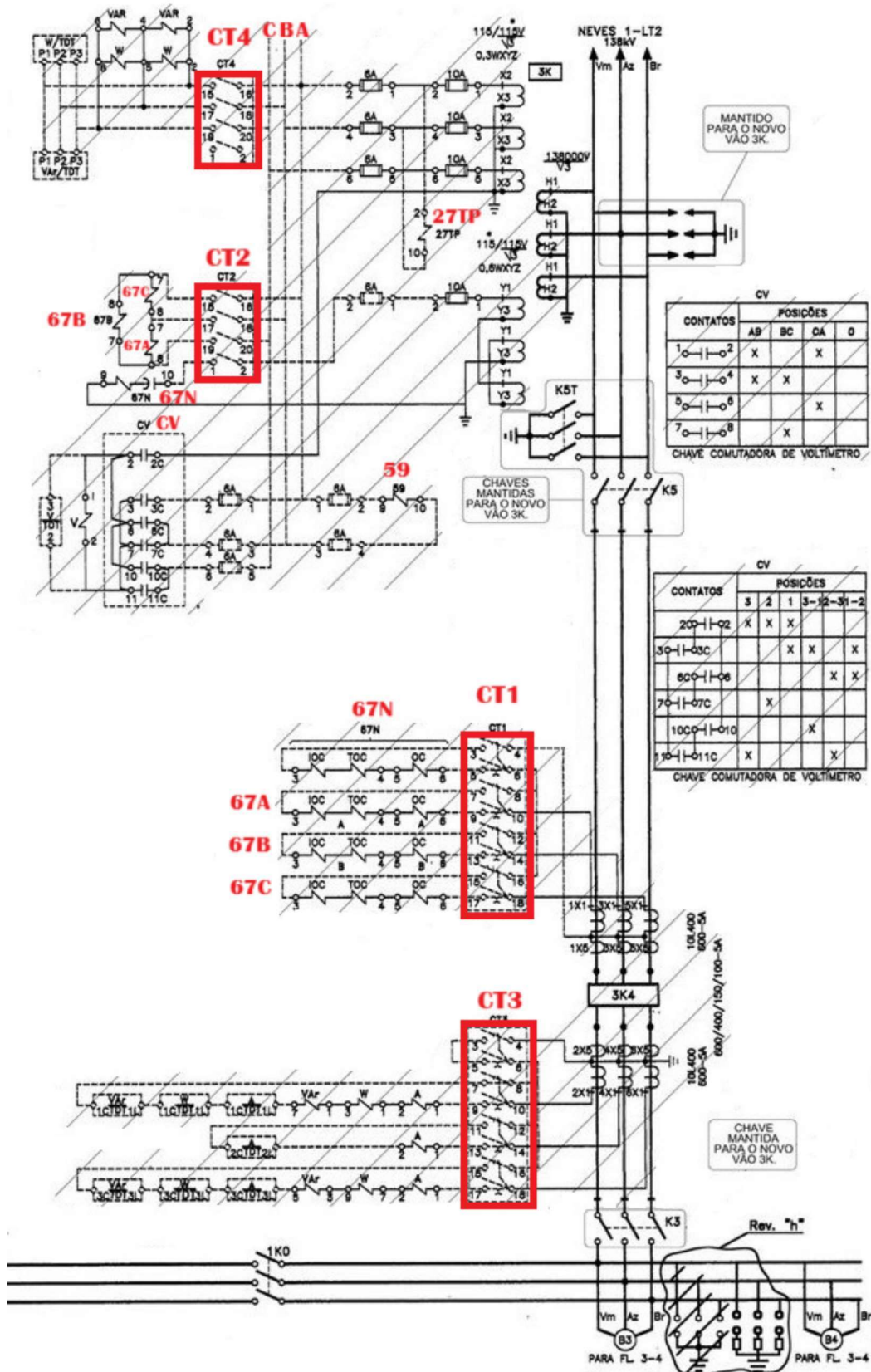
Nesta seção, é abordada a análise dos diagramas esquemáticos CA dos relés eletromecânicos antes do *retrofit* e dos relés microprocessados após a modernização dos equipamentos no *bay* 3K. Esses diagramas detalham a disposição e a alimentação das bobinas dos relés, que são cruciais para o acionamento das proteções em situações de falta. A análise foca nas conexões dos diferentes componentes do sistema, assegurando que as proteções operem de forma eficaz em situação de falta.

A Figura 33 ilustra a disposição dos equipamentos antes da modernização, incluindo as alimentações das bobinas dos relés, evidenciando a configuração original do sistema e a interligação dos dispositivos. No primeiro quadrante, observa-se a saída do primeiro secundário do Transformador de Potencial (TP) alimentando as fases A, B e C com $\frac{115}{\sqrt{3}}$ volts, com as bobinas configuradas em estrela. A bobina do relé de proteção de subtensão 27TP está alimentada pelas fases A e B. Em seguida, notam-se as medições de potências ativas e reativas por meio da chave de aferição de tensão CT4 e dos transdutores de potência ativa e reativa.

Ainda na saída do primeiro secundário, as bobinas 67A, 67B e 67C, do relé direcional, são alimentadas através da chave de aferição CT2. Já a bobina 67N está alimentada na saída do segundo secundário, com fechamento em triângulo, com 115 volts, também utilizando a chave CT2. Um pouco abaixo, nota-se a bobina do relé de proteção de sobretensão 59 que é alimentada pelas fases A e B e, ao lado, a chave comutadora de voltímetro (CV) alimenta a bobina do transdutor que indica a tensão.

No secundário do transformador de corrente da bucha do disjuntor, conectado à chave de aferição de corrente CT1, encontra-se a alimentação das bobinas internas do relé 67. Já segundo secundário na chave CT3, é representado o circuito de corrente dos transdutores no canto inferior, que indica as potências ativas e reativas das fases vermelha e branca e a corrente de todas as fases. Todos os transdutores são responsáveis por enviar e coletar as grandezas elétricas em escalas adequadas para comunicação, além de alimentar os indicadores analógicos nos painéis.

Figura 33 – Diagrama CA de alimentação dos relés eletromecânicos.



Fonte: Projeto CEMIG.

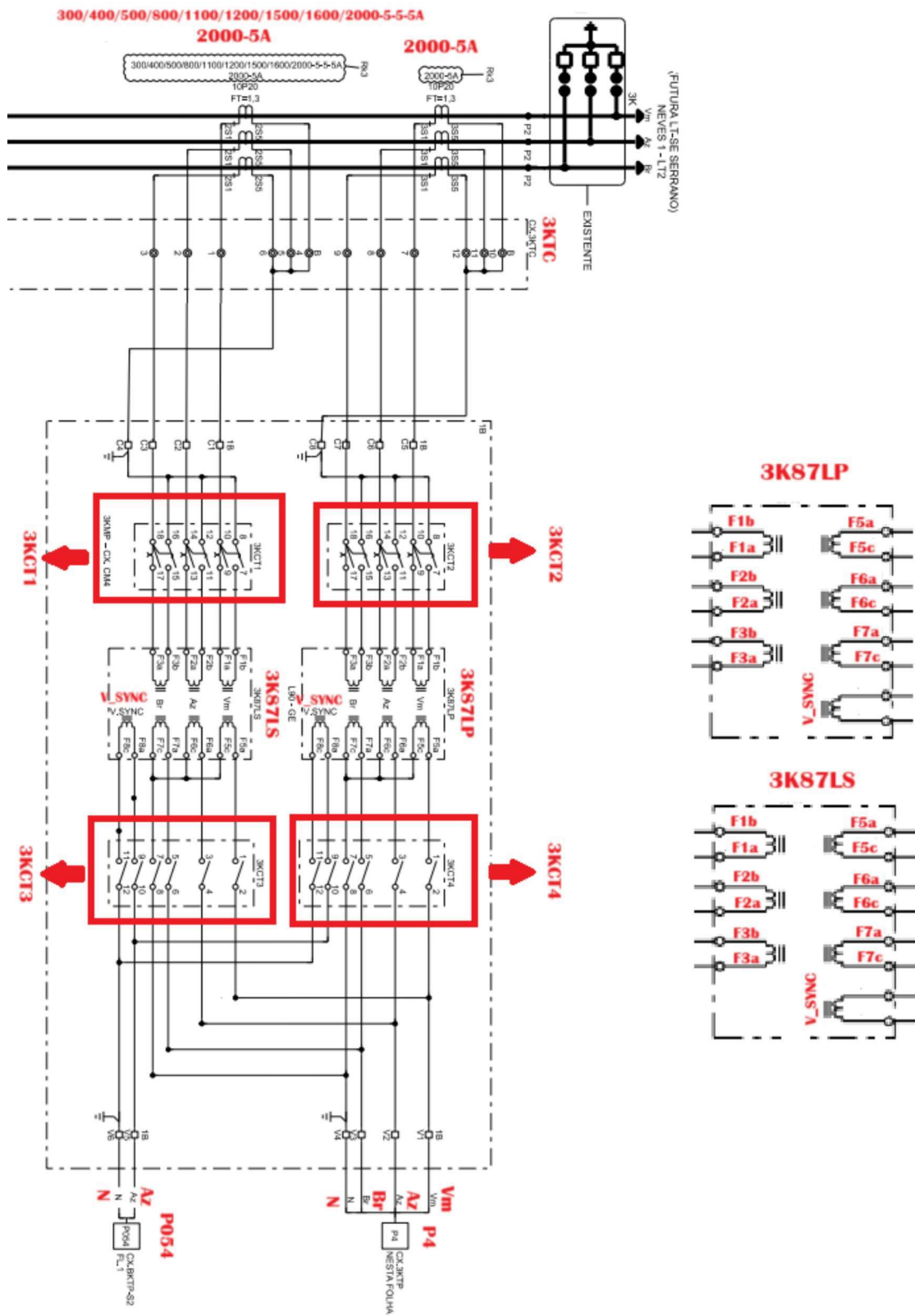
O hachurado no diagrama indica os itens que foram removidos após o processo de modernização. Este padrão de hachura é utilizado para destacar visualmente as mudanças realizadas no projeto, permitindo uma identificação rápida e fácil dos componentes descontinuados em comparação com a revisão do documento atual.

Um ponto importante a destacar é que o relé eletromecânico 67 possui bobinas alimentadas tanto por corrente quanto por tensão. Essa combinação é essencial para determinar a direcionalidade da falta, ou seja, para identificar a direção da corrente de falta em relação ao sistema protegido. Essa característica permite que o relé responda de forma adequada, acionando a proteção correta de acordo com a localização e a natureza da falha.

O diagrama CA após a modernização está representado nas figuras subsequentes, destacando as alterações realizadas e a nova disposição dos equipamentos e alimentações. As chaves de aferição de corrente CT1 e CT2, ilustradas na Figura 34 são alimentadas pelos secundários dos Transformadores de Corrente (TCs), com uma relação de transformação de 2000-5A. Essas chaves estão conectadas às bobinas internas do relé microprocessado F1, F2 e F3. Na Figura 35, a saída do primeiro secundário do Transformador de Potencial (TP), identificada como P4, fornece 115V e alimenta as chaves de aferição CT3 e CT4, que, por sua vez, alimentam as bobinas internas dos relés F5, F6 e F7.

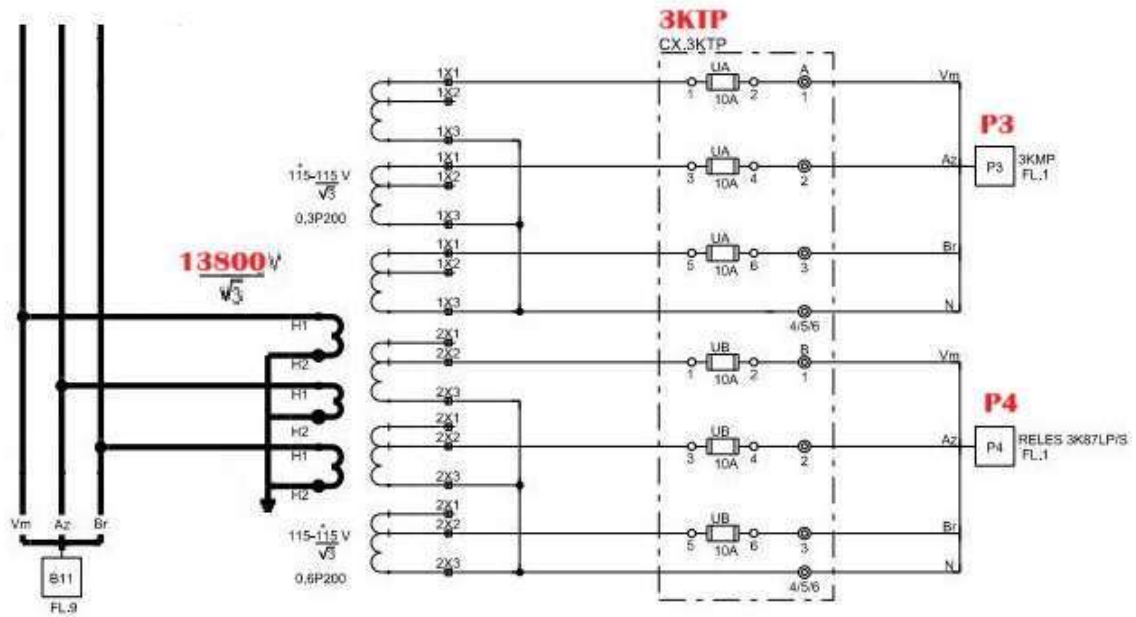
Adicionalmente, o ponto P054, também mostrado na Figura 34, representa a saída do TP monofásico da barra, ilustrado na Figura 36. Observa-se que o secundário está configurado para fornecer $\frac{115}{\sqrt{3}}$ volts, com um disjuntor de 10A como proteção. Essa saída é utilizada para alimentar a bobina V_{sync} nos dois relés (principal e secundário), que comparam o sincronismo da barra com a linha.

Figura 34 – Diagrama CA de alimentação dos relés microprocessados.



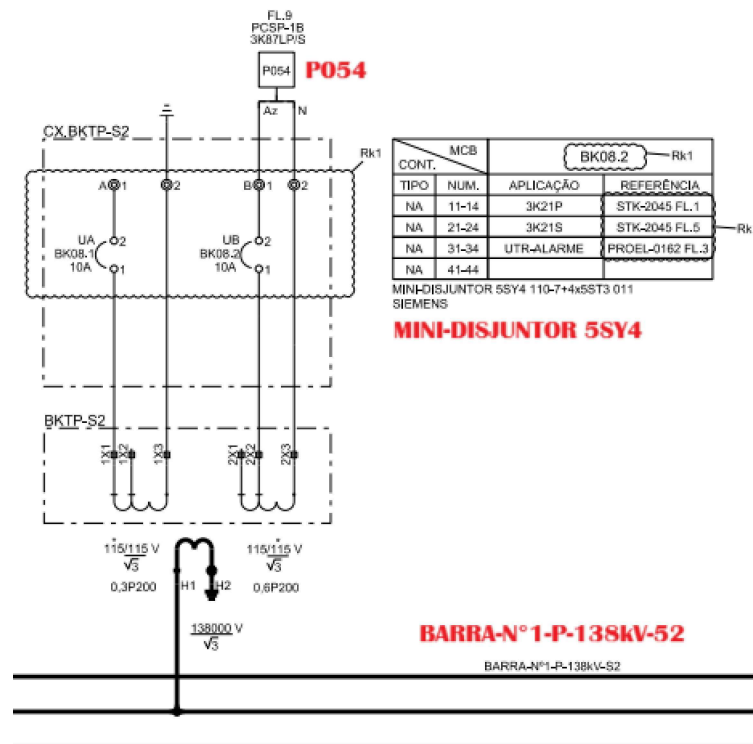
Fonte: Projeto CEMIG.

Figura 35 – Diagrama CA da saída do transformador de potência do bay.



Fonte: Projeto CEMIG.

Figura 36 – Diagrama CA da saída do transformador de potência da barra.



Fonte: Projeto CEMIG.

Nos Quadros 1 e 2, são apresentados as relações de todos os equipamentos secundários

mencionados antes e após a conclusão da modernização. A partir dessa relação, é possível identificar a configuração anterior dos dispositivos, bem como a quantidade de cada um, permitindo uma comparação direta com as alterações implementadas durante o processo de modernização.

Quadro 1 – Relação de equipamentos secundários antes da modernização.

Componentes	Quantidade
Chave de aferição de corrente	2 peças
Chave de aferição de tensão	2 peças
Fusíveis de 6A	9 peças
Fusíveis de 10A	4 peças
Transdutor de corrente	3 peças
Transdutor de potência ativa	1 peça
Transdutor de potência reativa	1 peça
Indicador analógico de tensão	2 peças
Indicador analógico de corrente	3 peças
Indicador de potência ativa	1 peça
Indicador de potência reativa	1 peça

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Quadro 2 – Relação de equipamentos secundários após a modernização.

Componentes	Quantidade
Chave de aferição de corrente	2 peças
Chave de aferição de tensão	2 peças
Minidisjuntor de 10A	9 peças
Fusíveis de 10A	3 peças

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Com isso, é possível identificar uma redução de conexões e componentes, diminuindo consequentemente, os custos de instalação em até 44,8% em componentes quando comparado ao relé eletromecânico. Lembrando que esta redução está diretamente ligada ao tipo de instalação, distância entre os equipamentos entre outros fatores.

4.4 Análise Financeira

Neste seção, serão discutidos os custos financeiros associados à modernização dos equipamentos e do sistema de proteção de uma linha de transmissão. O foco principal será a viabilidade

econômica da modernização dos equipamentos de proteção no Sistema Elétrico de Potência (SEP), destacando as implicações econômicas da transição para tecnologias mais avançadas.

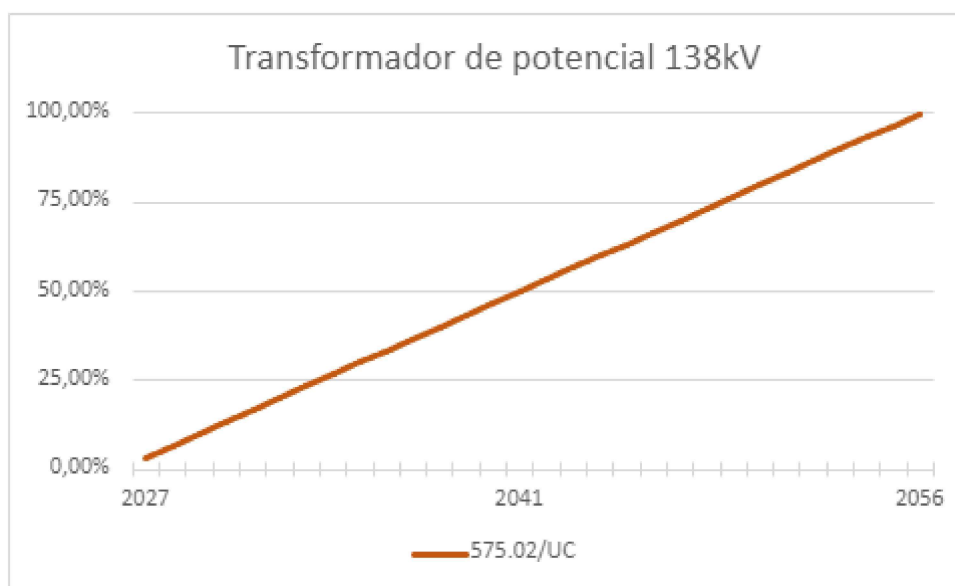
No contexto da avaliação de equipamentos de transmissão é fundamental distinguir entre três tipos de vida útil: a vida útil regulatória, econômica e física.

A vida útil regulatória, definida pelo Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico (ANEEL, 2015), estabelece taxas de depreciação de diversas unidades de cadastro. A vida útil econômica refere-se ao período necessário para amortizar o investimento, variando conforme o tipo de concessão ou autorização.

Já a vida útil física é o período durante o qual o equipamento continua a operar satisfatoriamente, e pode variar significativamente conforme diversos fatores. Segundo o Relatório de Análise de Impacto Regulatório (ANEEL, 2021), essa variação é influenciada por decisões iniciais de investimento, que podem envolver a escolha de equipamentos mais robustos, bem como pelas técnicas de manutenção utilizadas, condições operacionais e ambientais, e o obsolescimento das tecnologias.

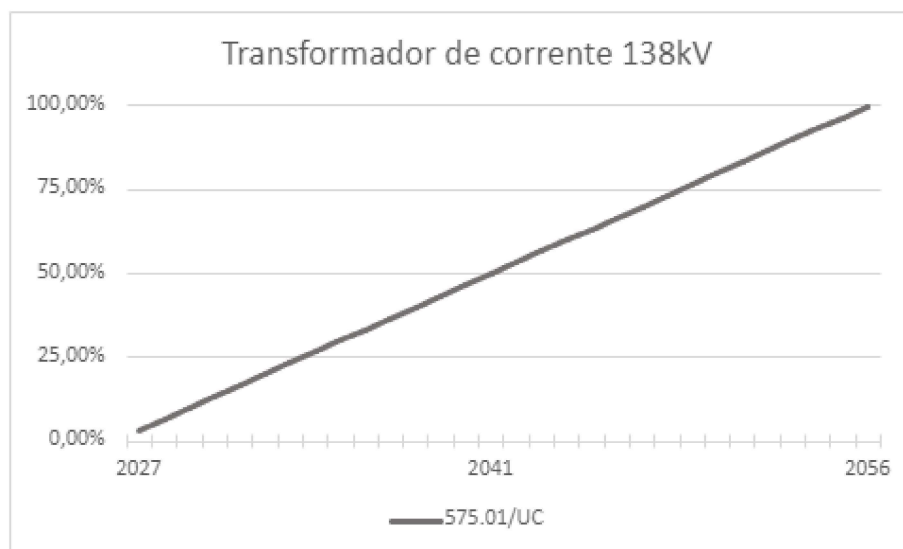
De acordo com o MCPSE (Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico) (ANEEL, 2015), cada equipamento possui uma vida útil específica relacionada ao tipo de unidade de cadastro (TUC). Para os transformadores de medida, como os TPs e TCs com tensão igual ou superior a 69 kV, a vida útil é de 30 anos, com uma taxa de depreciação de 3,33% ao ano, correspondente a 0,2775% ao mês. Nas Figuras 37 e 38 nota-se a representação da relação de depreciação ao longo dos anos para estes equipamentos, nota-se que ambos atingem sua depreciação total em 2056.

Figura 37 – Relação de depreciação ao longo dos anos - Transformador de potencial 138kV.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

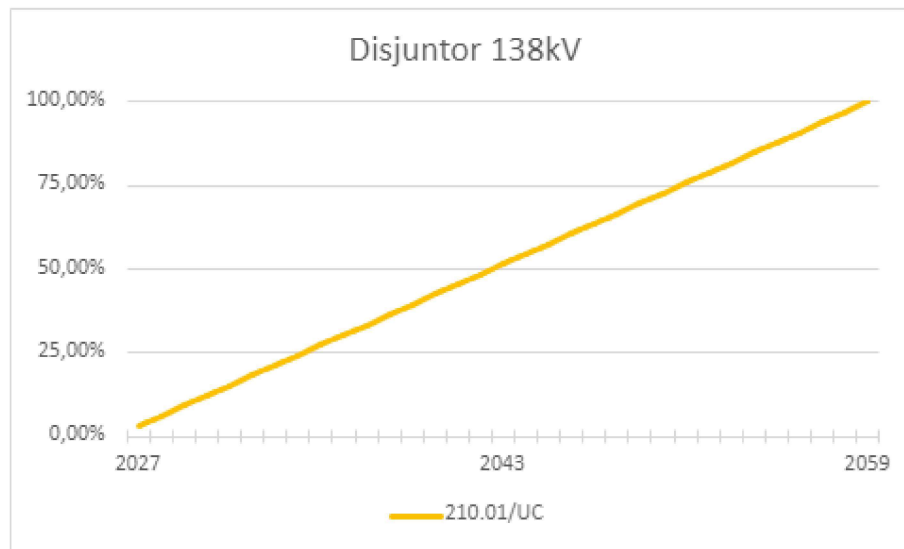
Figura 38 – Relação de depreciação ao longo dos anos - Transformador de corrente 138kV.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

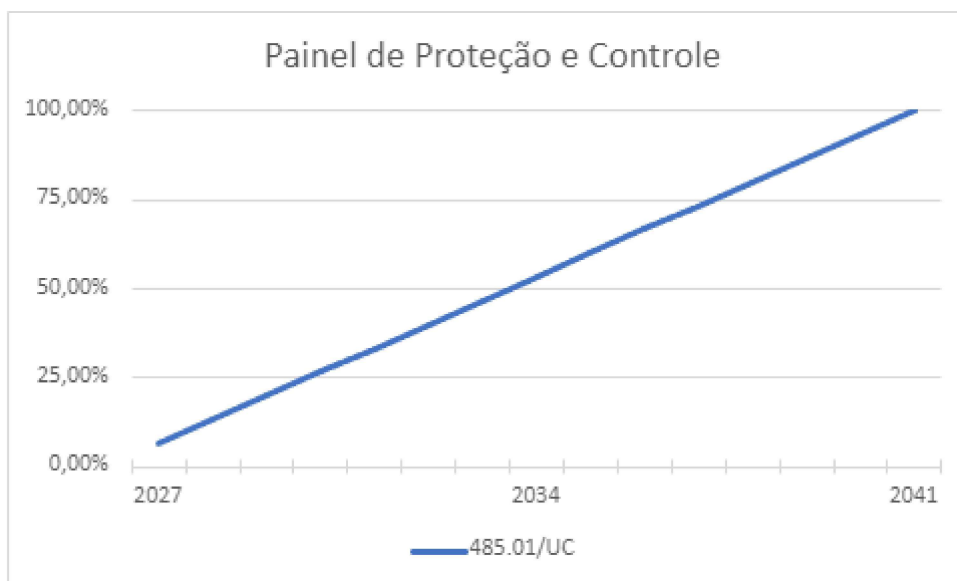
No caso dos disjuntores, a vida útil é de 33 anos, com uma taxa de depreciação anual de 3,03%, ou 0,2525% ao mês, Figura 39. Para os painéis de supervisão, controle e proteção (PSCPs), a vida útil é de 15 anos, com uma taxa de depreciação de 6,67% ao ano, equivalente a 0,5558% ao mês, conforme ilustra a Figura 40. Os relés de proteção, de acordo com o MCPSE, são cadastrados como Unidade de Adição e Retirada (UAR) e vinculados à Unidade de cadastro (UC) principal, incluindo os custos de instalação e aquisição nos custos gerais do painel, levando em consideração também os custos de instalações dos cabos que são reconhecidos como Componentes Menores (COM).

Figura 39 – Relação de depreciação ao longo dos anos - Disjuntor 138kV.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 40 – Relação de depreciação ao longo dos anos - PSCP.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Nos Quadros 3 e 4, são apresentados os custos de mão de obra e os equipamentos, juntamente com seus respectivos códigos TUC (Tipo de Unidade de Cadastro), que é referente ao conjunto (família) de bens (UCs) que têm a função idêntica ou semelhante, conforme regulamentação da ANEEL.

Quadro 3 – Códigos TUC - de mão de obra.

Mão de obra	
Código TUC	Tipo
210.01/CA	Medição da montagem do disjuntor Sf6 138kV
485.01/CA	Medição da montagem do PSCP
485.01/CA	Lançamento de cabos
575.01/CA	Medição da montagem dos Transformadores de corrente 138kV
575.02/CA	Medição da montagem dos Transformadores de potenciais 138kV

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

CA = Custo Adicional.

Quadro 4 – Códigos TUC - equipamentos.

Materiais e equipamentos		
Código TUC	Tipo	Quantidade
210.01/UC	Disjuntor Sf6 138kV	1 uni
485.01/UC	Painel	1 uni
485.01/UAR	Relé microprocessado	2 uni
485.01/COM	Cabos	2049 m
575.01/UC	Transformadores de corrente 138kV	3 uni
575.02/UC	Transformadores de potenciais 138kV	2 uni

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

As taxas de depreciação são valores definidos pelo órgão, assegurando o retorno do investimento para a concessionária ao ano após o fim do ciclo tarifário. Este ciclo para a renovação de ativos da CEMIG ocorre a cada 5 anos. Assim, os investimentos realizados durante esse período são reconhecidos pelo órgão regulador ao seu final, retroativamente à data de energização e capitalização do investimento.

O valor depreciável de um ativo deve ser alocado de maneira sistemática ao longo de sua vida útil estimada. De acordo com o MCPSE, a “vida útil regulatória” define as taxas de depreciação utilizadas pelas empresas do setor de transmissão para ajustar o valor dos ativos, possibilitando o abatimento dos resultados (ANEEL, 2021).

Com base nos dados apresentados, é possível identificar que, após 33 anos, ao final do ano 2059, o valor acumulado a ser amortizado atinge o montante total previsto. Essa análise demonstra que, ao longo desse período, a depreciação dos ativos segue um padrão consistente. A compreensão desse acumulado é crucial para avaliar a recuperação do investimento e para o planejamento financeiro futuro, garantindo que os ativos sejam devidamente depreciados e seus valores ajustados conforme a vida útil estimada.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção são apresentados de forma sucinta as principais conclusões e propostas de continuidade para o estudo de caso apresentado.

O estudo focou na modernização dos sistemas de proteção elétrica, com ênfase na substituição dos relés eletromecânicos por relés microprocessados. O trabalho envolveu a revisão de literatura técnica da área, procurando documentar de forma clara os conceitos envolvidos na modernização de sistemas de proteção.

A partir dos objetivos estabelecidos no início do trabalho, foi possível analisar de forma abrangente a digitalização do sistema de proteção da subestação “SE BH ADELAIDE - 138kV”. O objetivo geral, que envolvia acompanhar os desafios do processo e verificar os ganhos da atualização, foi plenamente alcançado. A modernização mostrou-se eficaz, trazendo melhorias significativas na eficiência e confiabilidade do sistema.

Destaca-se que, além de superar a despadronização dos relés eletromecânicos, os IEDs oferecem vantagens significativas, como a capacidade de executar múltiplas funções em um único dispositivo, resultando em maior eficiência e economia de espaço na instalação. Além disso, devido à substituição de vários equipamentos que estavam há anos em operação aumenta a expectativa de continuidade de funcionamento do sistema.

A análise dos diagramas CA revelou uma redução significativa no número de componentes necessários, uma vez que os sistemas de medições de grandezas como tensão, corrente e potência foram totalmente substituídos. Com o relé de proteção digital integrando todas essas funções em um único dispositivo, houve não apenas uma diminuição no número de equipamentos, mas também uma redução no comprimento dos cabos utilizados. Esse avanço simplifica a infraestrutura, otimiza o uso do espaço e melhora a organização do sistema.

A análise financeira, por sua vez, foi fundamental para entender os custos envolvidos na implementação desses novos sistemas, incluindo tanto os equipamentos e serviços necessários quanto os benefícios esperados, e como este investimento retorna para concessionária. Assim, todos os objetivos específicos foram atendidos, validando a eficácia da modernização do sistema.

Essa abordagem ajudou a proporcionar uma visão abrangente das implicações técnicas e econômicas da modernização dos sistemas de proteção elétrica no SEP, contribuindo para decisões em futuros projetos de modernização.

Com base nesses resultados, conclui-se que a digitalização do sistema de proteção não só é um avanço tecnológico necessário, mas também uma estratégia inteligente para a melhoria contínua da infraestrutura elétrica. Para futuras pesquisas, é possível ampliar o escopo da análise de *retrofit* para outras subestações, a fim de verificar a aplicabilidade e os benefícios obtidos em diferentes cenários e configurações de sistemas. Além disso, podem ser desenvolvidos estudos focados na investigação dos impactos da digitalização na longevidade dos equipamentos de proteção e sua manutenção, comparando com sistemas que não foram digitalizados. Também é

possível realizar uma investigação sobre a digitalização da proteção em função da capilarização provocada pela geração distribuída.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **MANUAL DE CONTROLE PATRIMONIAL DO SETOR ELÉTRICO MCPSE**. 2015. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/MCPSE_texto_definitivo_resol_674_2015.pdf. Acesso em: 22 out. 2023.
- _____. **Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 1/2021-SRT/SRM/SGT/SCT/SFE/SFF/ANEEL**. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/air2021001srt.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2024.
- BAILTELO, R. **Sistemas elétricos de potência: operação e controle**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2019.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. 1. ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1977.
- EBAH. **Equipamentos alta tensão**. 2016. Disponível em: <https://universoeletrico.wordpress.com/2016/08/13/disjuntores-a-oleo/>. Acesso em: 13 jul. 2024.
- FRAZAO, R. J. A. **Proteção do sistema elétrico de potência**. 1. ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019. 200 p.
- FURLAN, G. **Blog Schneider Electric - É curto circuito ou sobrecarga elétrica? Como evitar?** 2022. Disponível em: <https://blog.se.com/br/eletrica/2022/05/23/e-curto-circuito-ou-sobrecarga/>. Acesso em: 12 ago. 2024.
- JOI, E. E. **DIFERENÇA ENTRE LINHA DE DISTRIBUIÇÃO E TRANSMISSÃO**. 2021. Url <https://energes.com.br/diferenca-entre-linha-de-distribuicao-e-transmissao/>.
- KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos Potência**. 2. ed. Florianópolis: EEL, 2005.
- KLINGENBERG, G. Electricity Supply of Large Cities. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**, 1914.
- LOGMASTER. **Blog - 6 distúrbios de energia elétrica que você precisa conhecer**. 2020. Disponível em: <https://www.logmaster.com.br/6-disturbios-de-energia-eletrica-que-voce-precisa-conhecer>. Acesso em: 18 jan. 2024.
- MAMEDE FILHO, J. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- RUSH, P. **Proteção e automação de redes: conceito e aplicação**. São Paulo: Blucher: Schneider, 2011. 521 p.
- SCHMIDT, N. K. E. J. R. H. P. **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 230 p.
- TEIXEIRA, M. D. **Proteção de Sistemas Elétricos - Notas de Aula**. 2017. Disponível em: http://www.eletr.ufpr.br/p/_media/professores:mateus:te_131_-_capitulo_3.pdf. Acesso em: 16 jun. 2024.