UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ISABELA MARIA CARNIO

RELÉ DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM GERADORES APLICADO À PCH MANTOVILIS

CUIABÁ – MT
JUNHO, 2023

ISABELA MARIA CARNIO

RELÉ DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM GERADORES APLICADO À PCH MANTOVILIS

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Enrique Portugal Poma

CUIABÁ – MT

JUNHO, 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

C289r Carnio, Isabela Maria.
Relé de proteção diferencial em geradores aplicado à pch mantovilis [recurso eletrônico] / Isabela Maria Carnio. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 73 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Carlos Enrique Portugal Poma.
TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2023.
Modo de acesso: World Wide Web: https://bdm.ufmt.br.
Inclui bibliografia.

1. Relé de proteção; diferencial de corrente; restrição percentual; gerador síncrono. I. Poma, Carlos Enrique Portugal, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

RELÉ DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM GERADORES APLICADO À PCH MANTOVILIS

ISABELA MARIA CARNIO

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

APROVADO PELA BANCA EXAMINADORA

Cuiabá, 06 de JUNHO de 2023.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Carlos Enrique Portugal Poma

_____

Prof. Dr. Nicolas Eusebio Cortez Ledesma

_____

Prof. Dr. Rogerio Lucio Lima

CUIABÁ – MT

JUNHO, 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.037299/2023-50

Interessado: ISABELA MARIA CARNIO

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA: RELÉ DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM GERADORES APLICADO À PCH MANTOVILIS

ALUNA: ISABELA MARIA CARNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 06 de junho de 2023.

Nota: **08,675**

BANCA EXAMINADORA:

- Professor Orientador: **Carlos Enrique Portugal Poma**
- Professor/Engenheiro examinador: **Rogerio Lucio Lima**
- Professor/Engenheiro examinador: **Nicolás Eusebio Cortez Ledesma**

Documento assinado eletronicamente por **NICOLAS EUSEBIO CORTEZ LEDESMA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 06/06/2023, às 19:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **CARLOS ENRIQUE PORTUGAL POMA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 08/06/2023, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **ISABELA MARIA CARNIO**, **Usuário Externo**, em 08/06/2023, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **ROGERIO LUCIO LIMA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 08/06/2023, às 17:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5861329** e o código CRC **6311052C**.

Referência: Processo nº 23108.037299/2023-50 SEI nº 5861329

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda e qualquer crença que um dia acreditei e ei de acreditar.

Aos meus familiares que fizeram o que podiam por mim, principalmente me dar bons exemplos de valores para formar caráter e me apoiarem em toda minha trajetória até aqui. À minha família, Sandra Carnio, Valdomiro Carnio, Sebastiana de Almeida, Juliana Carnio e até quem participou tão pouco em tempo, mas que fez diferença em nossas vidas, João Pedro Carnio.

Meu mais profundo e sincero agradecimento ao fim.

Mas também aos muitos momentos memoráveis que me deparei pelo caminho, ao lado de pessoas incríveis que faço questão de levar comigo por toda a vida como, além de uma boa memória, amigos e colegas de profissão. Definitivamente a jornada ao lado de vocês foi mais leve e feliz.

Por fim, agradeço a Universidade Federal de Mato Grosso e alguns de seus bons professores que para além de conhecimento acadêmico, nos transmitiram a essência de ser um bom profissional.

RESUMO

CARNIO, I.M. **Relé de proteção diferencial em geradores aplicado à PCH Mantovilis**. 2023. 64f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2023.

Os sistemas de proteção dos equipamentos de um Sistema Elétrico de Potência desempenham um papel fundamental na garantia da confiabilidade e segurança da rede. O estudo de proteção e seletividade assume grande importância ao estabelecer os ajustes dos dispositivos que atuam no sistema, com o objetivo de preservar os equipamentos em situações de falha, minimizando a área afetada e reduzindo o tempo de interrupção do serviço. No presente trabalho, é apresentado o funcionamento da proteção diferencial na PCH Mantovilis, juntamente com suas variáveis, sendo descrita de forma matemática e por meio de gráficos. Ao ser aplicada em um cenário real, foi avaliado a efetividade dessa proteção, levando em consideração as exigências do sistema. A operacionalidade da proteção foi confirmada por meio dos resultados de testes realizados no dispositivo SEL700G, utilizando-se de um equipamento específico para essa finalidade, a mala CE6006.

Palavras-chave: relé de proteção; diferencial de corrente; restrição percentual; gerador síncrono.

ABSTRACT

The protection systems of an Electrical Power System (EPS) equipment play a fundamental role in ensuring the reliability and security of the network. The study of protection and selectivity assumes great importance in establishing the settings of the devices that operate in the system, aiming to preserve the equipment in case of failures, minimize the affected area, and reduce service interruption time. In this paper, the operation of the differential protection on PCH Mantovilis is presented, along with its variables, described mathematically and through graphics. When applied in a real scenario, the effectiveness of this protection it was evaluated, taking into consideration the system requirements. The operability of the protection systems was confirmed through the results of tests performed on the SEL700G device, using a specific equipment for this purpose, the CE6006 test set.

Keywords: protection relay; current differential; percent restriction; synchronous generator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Definição da zona protegida pela proteção diferencial. 21
Figura 2: Defeito fora da zona de proteção. 22
Figura 3: Defeito dentro da zona de proteção. 23
Figura 4: Correntes de operação e restrição no sistema de proteção diferencial. 24
Figura 5: Curva característica diferencial percentual básico. 25
Figura 6: Curva característica diferencial percentual com limite de corrente. 26
Figura 7:Relé diferencial percentual eletromecânico em condições normais de sistema. 27
Figura 8: Relé diferencial percentual eletromecânico em atuação. 28
Figura 9: esquema do relé diferencial simplificado 30
Figura 10:Diagrama de relé estado-sólido. 31
Figura 11:Diagrama de relé digital simples. 32
Figura 12: Curva diferencial com dois slopes variáveis. 33
Figura 13: Diagrama de fases segregadas. 34
Figura 14:Proteção diferencial dos enrolamentos do gerador síncrono. 35
Figura 15: Arranjo de um transformador de corrente ideal e real. 37
Figura 16: Relé SEL700G. 41
Figura 17: Configuração do relé de diferencial. 44
Figura 18: Configuração de pick-up e alarme da proteção diferencial. 45
Figura 19: Configuração da curva Diferencial Percentual. 47
Figura 20: Curva diferencial percentual em vigor na PCH Mantovilis. 48
Figura 21: Configuração de restrição de harmônicos. 49
Figura 22: Mala de testes de relés hexafásica. 50
Figura 23: Tela inicial CTC. 51
Figura 24: Diagrama unifilar simplificado da UG01. 52
Figura 25: Informações gerais. 54
Figura 26: Informações do sistema. 55
Figura 27: Informações dos equipamentos. 55
Figura 28: Ajustes da proteção diferencial. 56
Figura 29: Definições da curva de restrição percentual variável. 57
Figura 30: Inserindo Pontos de Teste. 58
Figura 31: Gráfico diferencial com pontos a serem testados. 59

Figura 32: Faltas A-B-C (pontos 1 a 10).....65
Figura 33: Faltas A-B (pontos 11 a 16). 66
Figura 34: Faltas B-C (pontos 17 a 22). 66
Figura 35: Faltas C-A (pontos 23 a 28). 67
Figura 36: Faltas A-E (A para Terra) (pontos 29 a 32). 67
Figura 37: Faltas B-E (B para Terra) (pontos 33 a 36). 68
Figura 38: Faltas C-E (C para Terra) (pontos 37 a 40).....68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados dos TCs utilizados.....37
Tabela 2:Proteções ativas no relé de proteção de gerador.....43
Tabela 3: Correntes nos Enrolamentos Secundários. 59
Tabela 4: Resultados e Competências dos Testes. 64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	American National Standards Institute
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
RTC	Relação de Transformação do Transformador de Corrente
CTC	Conprove Test Center
SEL	Schweitzer Engineering Laboratories
UG	Unidade Geradora
PCH	Pequena Central Hidrelétrica

SUMÁRIO

1 Introdução 16
1.1 Objetivos 17
1.1.1 Objetivo Geral 17
1.1.2 Objetivos Específicos 17
1.2 Estrutura do Trabalho 18
2 Referencial Teórico 19
2.1 Filosofia de Proteção de Sistemas Elétricos 19
2.2 Proteção Diferencial 20
2.2.1 Princípio da Proteção Diferencial 21
2.2.2 Proteção Diferencial Percentual 23
2.2.3 Curva do Relé Diferencial Percentual 25
2.3 Relé Diferencial Percentual Eletromecânico 27
2.4 Relé Diferencial Percentual Digital 31
2.4.1 Curva de Restrição Percentual Variável 32
2.5 Proteção Diferencial Percentual do Gerador 34
3 Materiais e Métodos 36
3.1 Transformadores de Corrente 36
3.1.1 Reatância do TC 38
3.1.2 Erro do TC 38
3.1.3 Classe de Exatidão do TC 39
3.1.4 Fator Térmico 40
3.2 Dispositivo de proteção 40
3.2.1 Relé SEL700G 41
3.2.2 Configurações de Elementos Diferenciais 43
3.3 Equipamento de Medição e Teste 49
4 Testes e Resultados 51
4.1 Configurações da Mala de Teste 51

4.2 Realização dos Testes 58
5 Considerações Finais 70
REFERÊNCIAS 72

1 Introdução

A evolução tecnológica tem sido evidente ao longo dos anos, até os dias de hoje, e muito disso se deve ao avanço do setor elétrico. Essa relação é bidirecional, já que, em grande maioria, a tecnologia utiliza de eletricidade, assim como a eletricidade requer de tecnologia para se manter e suprir suas demandas com qualidade.

O setor elétrico tem um crescimento considerável dia após dia, somente no primeiro trimestre de 2023 houve um aumento de 2.746,5 megawatts de potência instalada no Brasil (ANEEL, 2023), fazendo com o que o sistema fique maior, logo mais complexo. São diversos canais de geradores e consumidores interligados, onde os riscos de anormalidades no Sistema Elétrico de Potência (SEP) se tornam cada vez mais elevados. Muitos equipamentos fundamentais para o funcionamento do sistema estão sendo submetidos a danos irreversíveis e financeiramente desastrosos. Assim entramos no aspecto tecnológico de proteção de um sistema elaborado.

Atualmente existem Proteções de Seletividade para os diferentes tipos de falhas, acontecendo elas isoladamente ou em conjunto, que afetam não apenas os equipamentos em risco, mas também toda a cadeia de geração, transmissão e consumo. Para isso conta-se fielmente com dispositivos que sensibilizam ao decorrer de uma falta, de forma rápida para que possam atuar no ponto em que estão inseridos e evitar panes em maior escala, simplesmente isolando ou desarmando uma pequena parte do sistema. Esses dispositivos são conhecidos como Relés.

Os relés são dispositivos eletrônicos utilizados em sistemas elétricos para detectar e isolar falhas. Eles são fundamentais para a segurança do sistema elétrico, pois, em caso de sobrecarga, curto-circuito ou outras falhas, o relé detecta o problema e age rapidamente, isolando a área afetada e evitando o alastre da falha para outras partes do sistema. Além disso, os relés podem ser programados para desempenhar funções específicas, como proteção contra sobrecarga ou subcorrente, proteção de máquinas elétricas, entre outras. Essa flexibilidade permite que os relés sejam utilizados em diversos tipos de sistemas elétricos, desde os mais simples até os mais complexos, como os sistemas de geração de energia em altas potências. Por isso, é fundamental que os relés sejam projetados e instalados corretamente, garantindo sua eficácia e confiabilidade em caso de falhas no sistema elétrico.

Neste trabalho será analisada uma proteção em específico da Pequena Central Hidrelétrica Mantovilis, situada no território de Santo Antônio de Leverger-MT. A capacidade de potência instalada é de 5,2MW e seu contrato de venda para a Energisa Mato Grosso conta com 100% de sua capacidade, sendo o ponto de conexão e repasse de tensão definido em 34,5kV.

A proteção abordada neste texto é definida pelo Instituto Nacional de Padrões Americanos (ANSI) como Relé de Proteção Diferencial, designada pelo código de número 87. Ao decorrer será apresentada a proteção e os princípios de seu funcionamento, avaliar a aplicabilidade e competência para a PCH Mantovilis e, por meio de testes, demonstrar que o equipamento escolhido e os parâmetros definidos são capazes de manter os equipamentos seguros contra o diferencial de corrente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar por meio de cálculos, e testes, o comportamento do estudo de proteção vigente na PCH Mantovilis, para a proteção diferencial. Se esta atende as demandas necessárias para a proteção e segurança das Unidades Geradoras instaladas. As informações obtidas e os testes apresentam um histórico real e não fictício.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre a proteção diferencial e suas características de aplicação;
- Calcular e avaliar comparativamente os valores apropriados para o bom desempenho da função de proteção diferencial;
- Estimar a curva de atuação da proteção diferencial para os valores calculados;
- Calcular e avaliar comparativamente o modelo de transformador de corrente eleito para compor o sistema;
- Configurar o dispositivo de proteção utilizado para desempenhar a função;

- Realizar testes para verificar a eficácia da proteção diferencial na detecção e isolamento de correntes diferenciais;
- Elaborar conclusões e recomendações baseadas nos resultados obtidos nos testes e análises.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este documento se organiza da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta a revisão teórica dos princípios de funcionamento da proteção diferencial e diferencial percentual, bem como sua relação matemática para aplicação. Demonstra-se a construção dos gráficos que correspondem a proteção e seu modelo aplicado em gerador.

No Capítulo 3, é abordado a definição do equipamento de transformação de corrente e a verificação quanto ao dimensionamento adequado, do equipamento sensor que analisa o estado do sistema (relé) e seus meios de proteção contra diferencial de corrente e do equipamento utilizado para realizar os testes de verificação da proteção.

Os testes e seus resultados são analisados e descritos no Capítulo 4, assim como o procedimento de ajustes para sua realização.

Por fim, no Capítulo 5, destacam-se as conclusões sobre o trabalho.

2 Referencial Teórico

2.1 Filosofia de Proteção de Sistemas Elétricos

Em todos os sistemas elétricos, o objetivo principal das proteções é garantir um serviço contínuo, seguro e com o menor custo possível, evitando a interrupção de todo o sistema e retirando de operação apenas a parte afetada pelo problema. Dessa forma, busca-se assegurar que o sistema interligado continue a funcionar sem a presença desse pequeno trecho isolado onde ocorreu a falha.

Existem atributos que determinam a qualidade e eficiência das proteções, como a sensibilidade e a rapidez de atuação para extinguir a falha. Uma corrente de curto-circuito elevada, se mantida por um longo período, pode causar uma crise irreversível na rede. Portanto, os ajustes e parâmetros das proteções visam mitigar a falha em questão de milésimos de segundo, pois quanto mais rápido for o tempo de resposta, menor será o impacto na segurança, nos custos e nas interrupções generalizadas de energia no sistema (COTOSCK, 2009).

Existem diversos elementos que contribuem para a eficiência e funcionalidade dos sistemas de proteção elétrica. Entre esses elementos, encontram-se equipamentos comuns, tais como Transformadores de Corrente (TCs), Transformadores de Potência (TPs), Disjuntores, Seccionadoras, Elos e Chaves Fusíveis, além dos indispensáveis Relés. Esses componentes são essenciais para garantir um sistema completo e operacional. É necessário realizar uma seleção criteriosa desses equipamentos, levando em consideração cálculos de dimensionamento que garantam a harmonia entre as classes de tensões, corrente nominal, corrente de curto-circuito, fator e polaridade (MERLIN, 2019).

Nos valores de curto-circuito, é de extrema importância destacar os Transformadores de Corrente, uma vez que eles devem ser capazes de suportar correntes muito elevadas e garantir uma relação de transformação precisa em seu enrolamento secundário. Essa relação é diretamente utilizada na leitura dos relés, que podem atuar ou não com base nos parâmetros de atuação definidos. Em casos de falta não detectada pelo relé localizado próximo à ocorrência, é esperado que um relé subsequente atue e, caso isso não ocorra, um relé posterior assumirá essa função, seguindo uma cadeia de proteção em cascata. É fundamental que todo o sistema, em suas diferentes etapas e pontos de conexão, funcione harmonicamente, garantindo

assim a seletividade. O estudo de proteção e seletividade é essencial para assegurar o correto funcionamento do sistema (MERLIN, 2019).

A seletividade é um elemento essencial para garantir o adequado funcionamento e a sincronia das proteções no sistema elétrico. Quando ocorre uma falta em uma determinada área, é imprescindível que a proteção responsável por esse trecho atue prontamente, isolando-o do restante do circuito e evitando que a falha se propague e prejudique outros pontos, mantendo-os em pleno funcionamento. Além disso, é crucial manter a coerência entre as proteções, de modo que, caso uma proteção de menor impacto não atue, uma proteção de maior nível seja acionada em cascata, conforme mencionado anteriormente.

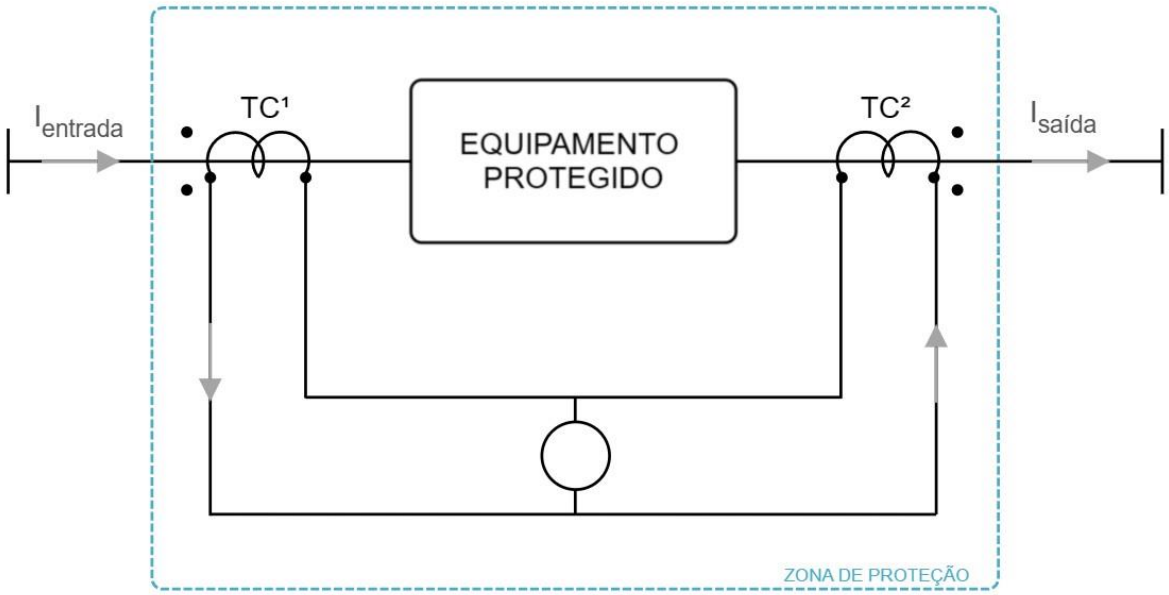
Para alcançar essa sincronia, é necessário ajustar adequadamente os parâmetros, como os valores de corrente de *pick-up* e corrente de atuação. É importante seguir uma hierarquia entre as proteções, de modo que a sobreposição das curvas não ultrapasse os limites das outras, evitando efeitos indesejados (MERLIN, 2019).

2.2 Proteção Diferencial

A proteção diferencial é uma técnica bastante efetiva para proteger os equipamentos elétricos de alta potência. O princípio de funcionamento é bastante simples: a proteção opera comparando a corrente que entra com a corrente que sai da zona protegida, muitas vezes esta zona contém apenas um equipamento. Se houver uma diferença significativa entre essas correntes, o relé é acionado para desligar o circuito. O grande benefício dessa técnica é que ela é sensível apenas à diferença de corrente, não importando o valor total que circula no circuito, o que faz com que a proteção diferencial tenha uma sensibilidade maior do que outros tipos de relés (BLACKBURN, 1997).

Outro ponto positivo dessa proteção é a alta seletividade, ou seja, ela é capaz de identificar precisamente a área em que ocorreu a falha, devido à localização dos TCs que envolvem a zona protegida, como ilustrado na Figura 1. Com isso, o relé pode atuar rapidamente, sem precisar esperar por um intervalo de tempo de coordenação, o que aumenta a confiabilidade do sistema elétrico e reduz o tempo de parada em caso de falhas.

Figura 1: Definição da zona protegida pela proteção diferencial.



Fonte: Adaptada de SEL (2016).

Vale destacar que a configuração dos parâmetros da proteção diferencial deve ser feita com cuidado para garantir a sua eficácia e evitar disparos indevidos. É importante que os valores da corrente de *pick-up* e da corrente de atuação sigam uma ordem hierárquica entre os diferentes relés, evitando a superposição das curvas de atuação e o disparo equivocado do sistema. Com essas precauções, a proteção diferencial é uma das melhores formas de garantir a segurança e a confiabilidade do sistema (BLACKBURN, 1997).

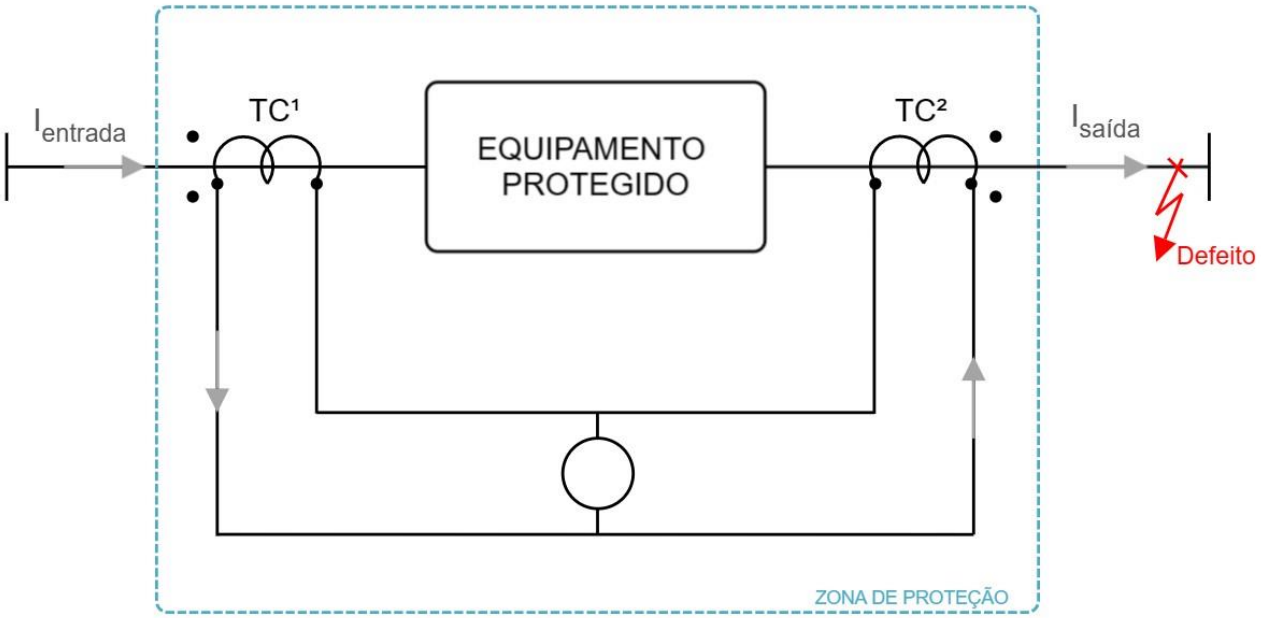
2.2.1 Princípio da Proteção Diferencial

O relé de proteção diferencial utiliza a comparação entre as correntes de entrada e saída de um equipamento elétrico para protegê-lo, e pode ser conectado de várias maneiras diferentes. Essa proteção é baseada na Primeira Lei de Kirchhoff, que estabelece que a soma de todas as correntes que entram no equipamento deve ser igual à soma de todas as correntes que saem. Portanto, um sistema está operando normalmente quando não há operação do relé diferencial, como na Figura 1 (KINDERMANN, 1999).

Em casos de faltas externas a zona de proteção também não ocorrerá a operação do relé, uma vez que os dois TCs que delimitam a zona continuarão

entregando o mesmo valor de corrente nos secundários ligados ao dispositivo, como ilustrado a seguir.

Figura 2: Defeito fora da zona de proteção.

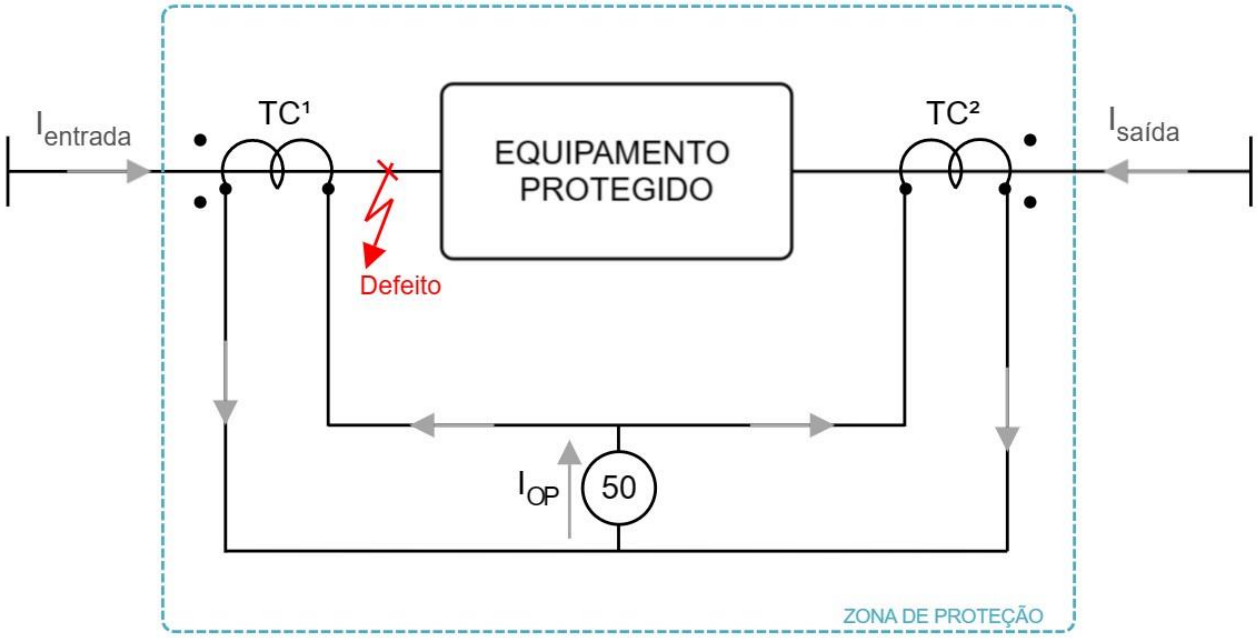


Fonte: Adaptada de SEL (2016).

Contudo, o sistema deve estar preparado para situações de faltas externas à zona de proteção muito próximas e com valores de corrente elevadíssimos. Nestes casos podem ocorrer a saturação de um ou mais TC, e este fornecer uma corrente menor que a prevista pela relação de transformação, ocasionando em uma falsa corrente diferencial.

Para faltas dentro da zona protegida as correntes passam a convergir para o ponto do defeito, mudando o sentido da corrente de saída da zona $I_{saída}$. Essa nova situação permite a origem de uma corrente diferencial, sensibilizando o relé de sobrecorrente (instantâneo ou temporizado) (SEL, 2019). Essa corrente diferencial, como chamamos na Figura 3, corrente de operação I_{OP} irá atuar o relé quando seu módulo for maior que o valor ajustado no dispositivo – o *pick-up* do relé.

Figura 3: Defeito dentro da zona de proteção.

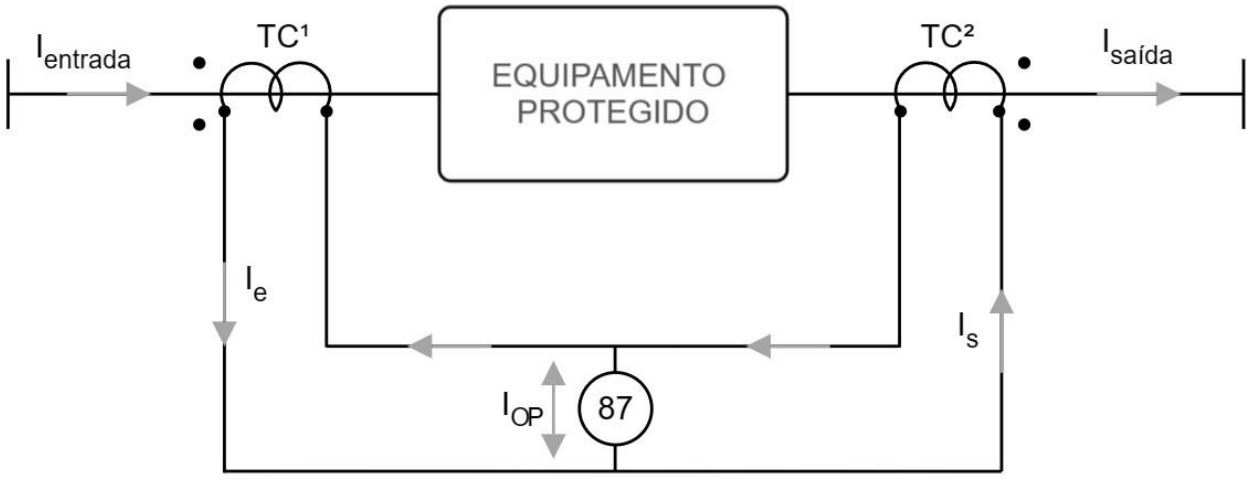


Fonte: Adaptada de SEL (2016).

2.2.2 Proteção Diferencial Percentual

O relé diferencial com restrição porcentual é uma variação bem comum do conceito diferencial (BLACKBURN, 1997). Esta proteção compara a grandeza de operação com uma nova grandeza de restrição. Toma-se como base a corrente de restrição I_{RT}, que representa a faixa de não atuação do relé e pode ser definida como a média do módulo das correntes secundárias do TC¹ e TC², conforme Equação (1):

Figura 4: Correntes de operação e restrição no sistema de proteção diferencial.



Fonte: Adaptada de SEL (2016).

$$I_{RT} = \frac{|\overline{I_e}| + |\overline{I_s}|}{2} \quad (1)$$

$$\overline{I_{OP}} = \overline{I_e} + \overline{I_s} \quad (2)$$

A corrente de operação I_{OP}, é a soma das correntes secundarias nos TCs, como indica a Equação (2), e está em constante comparação com uma proporção da corrente I_{RT}. O relé opera quando a corrente de operação I_{OP} for maior ou igual a multiplicação entre a corrente de restrição I_{RT} por k, como demonstra a Equação (3):

$$I_{OP} \geq k \times I_{RT} \quad (3)$$

Substituindo (1) e (2) em (3), tem-se a relação entre as correntes secunárias dos TCs com os critérios avaliados no relé, Equação (5):

$$I_{OP} \geq k \times \frac{|\overline{I_e}| + |\overline{I_s}|}{2} \quad (4)$$

$$\overline{I_e} + \overline{I_s} \geq k \times \frac{|\overline{I_e}| + |\overline{I_s}|}{2} \quad (5)$$

Essa proporção é chamada de Constante de Proporcionalidade, k ou mesmo Slope.

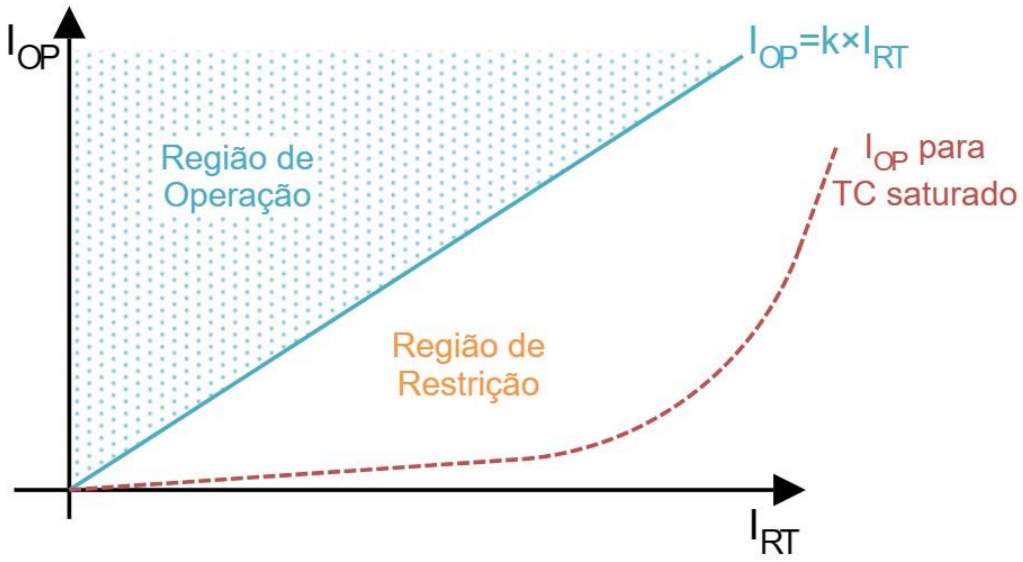
A corrente de restrição adotada aqui apresenta uma magnitude elevada para faltas externas severas, o que significa que mesmo se houver uma corrente de operação significativa, a restrição será tão grande que o relé não vai operar. Isso garante que a proteção não seja ativada por faltas externas, que não representam uma ameaça ao equipamento protegido (SEL, 2019).

No caso de uma falta interna no equipamento, a corrente de operação é consideravelmente maior do que a corrente de restrição, permitindo que o relé opere. Esse tipo de proteção é muito útil em sistemas com alta impedância de falta, onde as correntes de falta são baixas e a proteção diferencial convencional pode não detectar faltas internas. A proteção diferencial porcentual pode ser aplicada em transformadores de grande porte, geradores, barramentos, entre outros equipamentos.

2.2.3 Curva do Relé Diferencial Percentual

Pode-se representar a característica diferencial percentual graficamente, como relaciona-se as grandezas citadas anteriormente e o vínculo que a constante de proporcionalidade traz com elas. O slope, traduzido do inglês como rampa ou inclinação, quando possível de ajuste do usuário, pode ser encontrado em dois formatos: porcentagem ou por unidade, dependendo do modelo do relé, e em valores típicos de 10% a 80% ou 0,1 a 0,8 (SEL, 2016).

Figura 5: Curva característica diferencial percentual básico.



Fonte: Adaptada de SEL (2016).

Na Figura 5, nota-se que a reta definida pela Equação (3) e toda a corrente resultante igual ou superior a esta, se encontra na Região de Operação (área hachurada no gráfico) fazendo com que o relé opere. Abaixo disso têm-se a Região de Restrição no qual o sistema se encontra em pleno funcionamento de condições normais.

Ainda pode-se observar uma curva tracejada que também representa condição de atuação do relé, porém ela está bem abaixo da Região de Operação. Essa curva advém de falta externas com diferentes magnitudes, onde a corrente de falta é baixa e proporcionalmente, as correntes de restrição e operação são igualmente baixas. Já para faltas externas de maior magnitude, os transformadores de corrente podem saturar de forma desigual, o que leva a um aumento da corrente de operação. Nesse caso, a corrente de restrição também aumenta, o que impede o relé de operar indevidamente para defeitos fora da zona de proteção (SEL, 2016).

É possível melhorar a resposta do relé incluindo um limite para a corrente de restrição, será nomeado como I_{LR}:

Figura 6: Curva característica diferencial percentual com limite de corrente.

Fonte: Adaptada de SEL (2016).

O valor da corrente de limite I_{LR}, independe da corrente de restrição I_{RT}, ele é constante e pode ser considerado o *pick-up* da proteção diferencial. Agora tem-se um relé que opera nas seguintes condições equacionais:

$$I_{OP} \geq I_{LR} + k \times I_{RT} \quad (6)$$

Supondo que em faltas externas, com correntes de baixas magnitudes, os transformadores de corrente não saturam e essa nova corrente de *pick-up* serve para dessensibilizar o relé para a corrente diferencial sem uma falta.

2.3 Relé Diferencial Percentual Eletromecânico

O esquema de proteção diferencial em relés eletromecânicos conta com a interação de duas bobinas, este é o esquema pontapé para os equipamentos de proteção digitais de função 87. Os termos apresentados agora já foram introduzidos anteriormente, será acrescentado apenas alguns para melhor descrição do sistema.

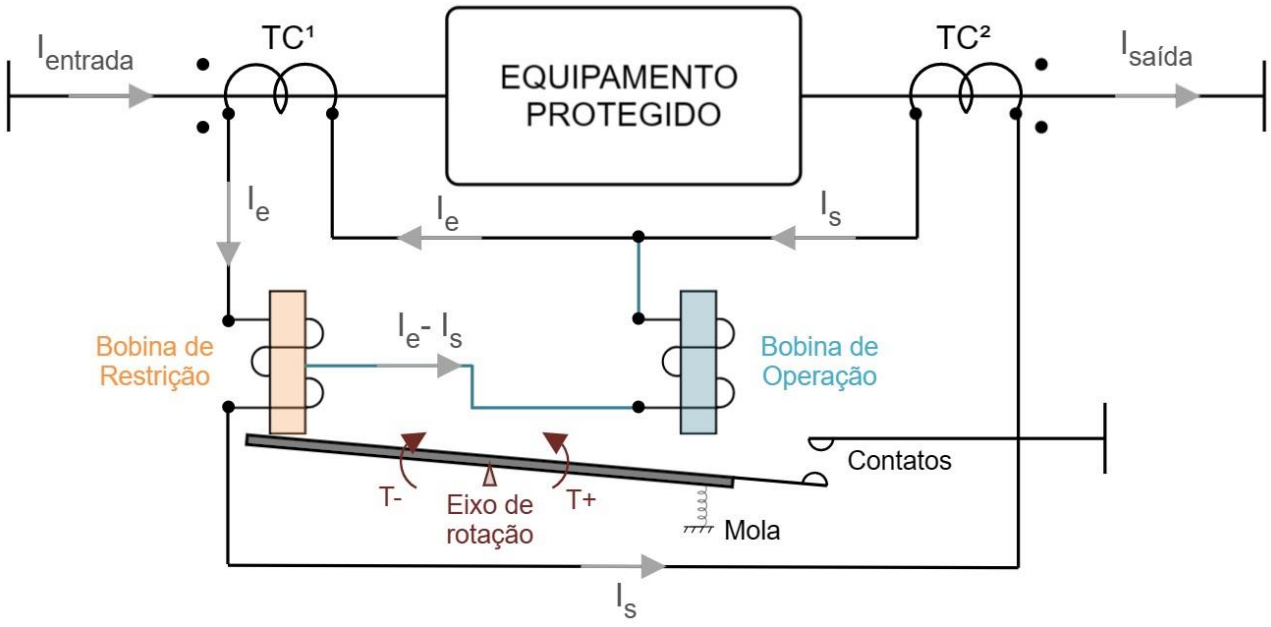
Na Figura 7 tem-se uma bobina de restrição com ramificação na sua metade e uma outra bobina de operação.

- A primeira trabalha na produção de um torque negativo ($T-$) causado pelo campo magnético gerado na mesma que atrai para perto de si um êmbolo.
- A segunda quando em ação de campo magnético atrai o mesmo êmbolo no sentido contrário da bobina de restrição, gerando um torque positivo ($T+$).

O relé entrará em operação quando $T+$ for maior que $T-$.

Em condições normais de desempenho do sistema ou defeitos fora da zona protegida, as correntes secundarias do TC¹ e TC² circulam no mesmo sentido na bobina de restrição, produzindo um torque forte no sentido negativo enquanto na bonina de operação a corrente é nula, $I_e - I_s = 0$ (em casos de as correntes I_e e $I_s$serem iguais em módulo). Por consequência o torque $T+$ é nulo também, garantindo a não operação do relé 87 (KINDERMANN, 1999).

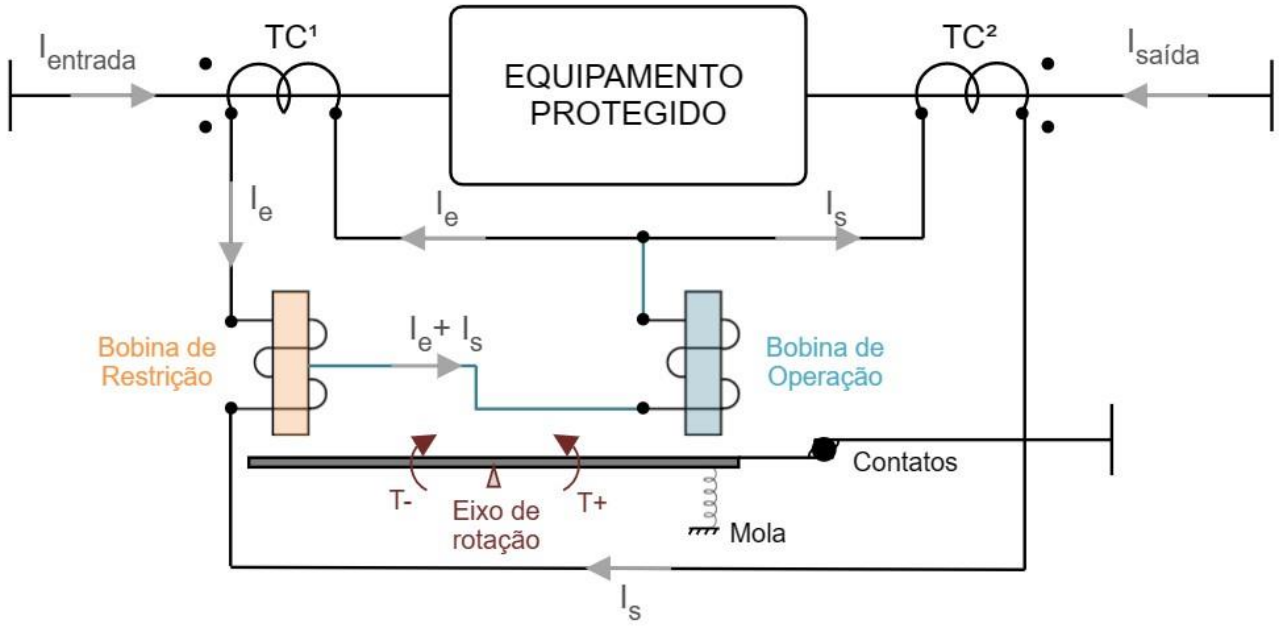
Figura 7:Relé diferencial percentual eletromecânico em condições normais de sistema.



Fonte: Adaptada de Kindermann (1999).

Quando em condições de defeito dentro da zona protegida, como ilustrado na Figura 8, supondo ainda que as correntes I_e e I_s sejam iguais em módulo, oberva-se que em meia bobina de restrição há a corrente em um sentido, enquanto na outra metade há corrente no sentido oposto. O campo magnético gerado por cada corrente é igualmente divergente, de maneira que em toda a bobina de restrição o campo magnético é nulo pois estes de cancelam, logo, o torque resultante de restrição $T-$ é igual a 0. Em contrapartida a corrente que circula na ramificação e entra na bobina de operação é máxima devido a somatória $I_e + I_s$, produzindo um torque de operação $T+$ elevado no sentido positivo. Esse movimento fecha os contatos garantindo a operação do relé.

Figura 8: Relé diferencial percentual eletromecânico em atuação.



Fonte: Adaptada de Kindermann (1999).

Tendo em conta os diagramas demonstrados por meio das figuras, pode-se descrever o torque de restrição e operação em função da força magnetomotriz, como demonstra a Equação (7), onde N é o número de espiras da bobina e I a corrente circulante na mesma:

$$\mathrm{F} = \mathrm{N} \times \mathrm{I} \tag{7}$$

$$\mathrm{F}_{RT} = N_{RT} \times \left(\frac{\mathrm{I}_e + \mathrm{I}_s}{2}\right) \tag{8}$$

$$\mathrm{F}_{OP} = N_{OP} \times \overline{I_e} + \overline{I_s} \tag{9}$$

A Equação (8) permite calcular a força na bobina de restrição e a Equação (9) na bobina de operação. Desprezando os efeitos de componentes auxiliares como

restrição da mola e particularidades do núcleo de ferro o torque será obtido usando a Equação (10):

$$\mathrm{T} = \mathrm{T}_{OP} - \mathrm{T}_{RT} \tag{10}$$

Onde:

$$\mathrm{T}_{RT} = k' \times \left[N_{RT} \times \left(\frac{\mathrm{I}_e + \mathrm{I}_s}{2}\right)\right]^2 \tag{11}$$

$$\mathrm{T}_{OP} = k'' \times [N_{OP} \times (\overline{I_e} + \overline{I_s})]^2 \tag{12}$$

Substituindo as Equações (11) e (12) em (10), tem-se:

$$\mathrm{T} = k'' \times [N_{OP} \times (\overline{I_e} + \overline{I_s})]^2 - k' \times \left[N_{RT} \times \left(\frac{\mathrm{I}_e + \mathrm{I}_s}{2}\right)\right]^2 \tag{13}$$

O relé opera à medida que o torque de operção passa a ser maior que o torque de restrição, conforme Equação (14):

$$k'' \times [N_{OP} \times (\overline{I_e} + \overline{I_s})]^2 > k' \times \left[N_{RT} \times \left(\frac{\mathrm{I}_e + \mathrm{I}_s}{2}\right)\right]^2 \tag{14}$$

Ou como já demonstrado na Equação (5):

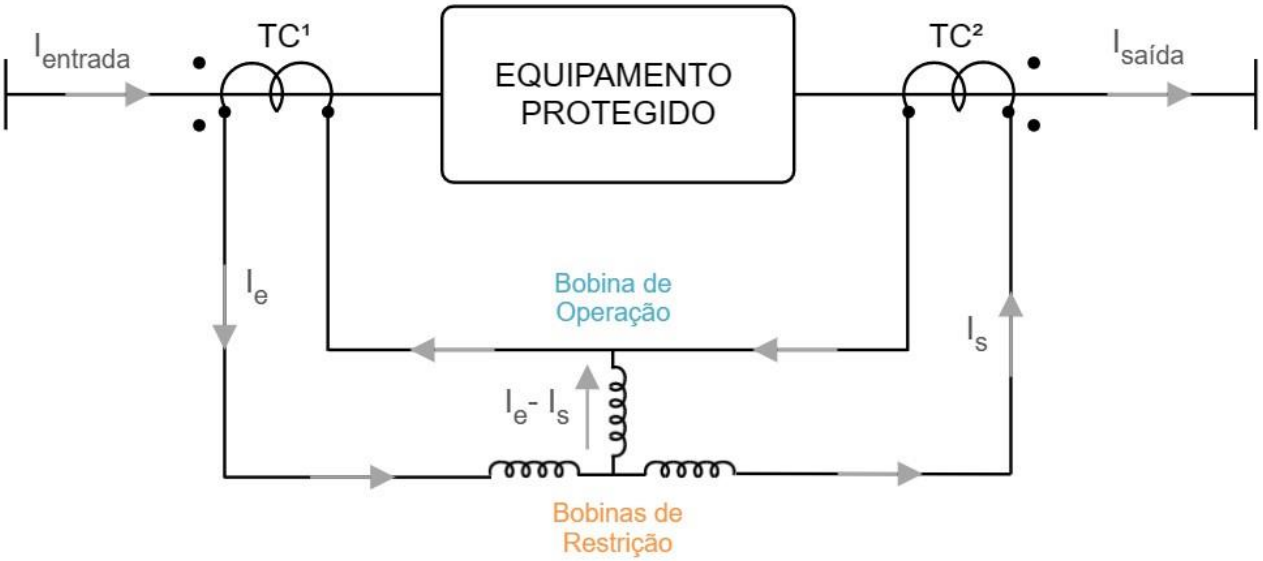
$$\overline{I_e} + \overline{I_s} \geq k \times \frac{\mathrm{I}_e + \mathrm{I}_s}{2} \tag{15}$$

Em que a constante k de *slope* é determinada pela Equação (16):

$$k = \sqrt{\frac{N_{RT}}{N_{OP}} \times \frac{k'}{k''}} \tag{16}$$

É possível simplificar o diagrama deste tipo de relé, apresentado nas Figuras 7 e 8, com o diagrama da Figura 9, apenas a representação de dois enrolamentos da bobina de restrição e saindo do meio o enrolamento da bobina de operação (KINDERMANN, 1999).

Figura 9: esquema do relé diferencial simplificado.



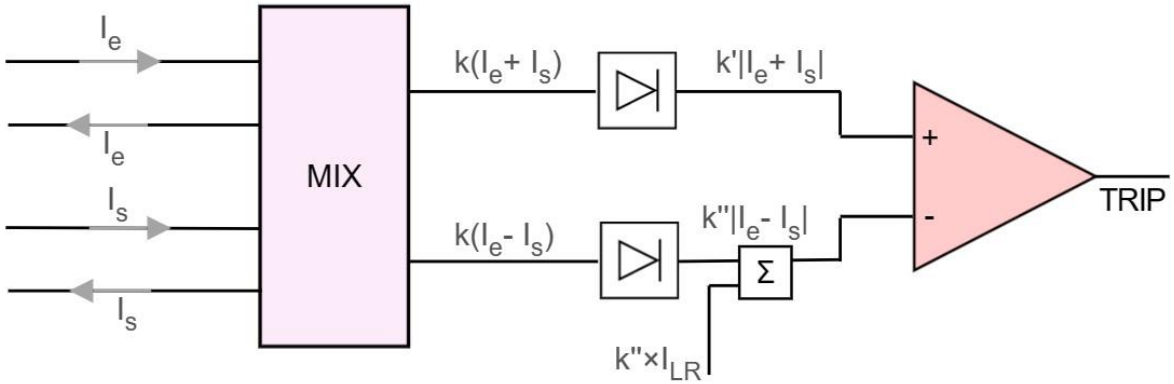
Fonte: Adaptada de Kindermann (1999).

2.4 Relé Diferencial Percentual Digital

Após os relés eletromecânicos e anterior aos relés digitais, foram desenvolvidos os relés de estado-sólido, que detêm de características evolutivas superiores aos eletromecânicos, e que abrigam todos recursos e funções presentes neste. Os dispositivos semicondutores e componentes eletrônicos permitiram sua fabricação e utilizam de circuitos discretos ou integrados (CARRAMASCHI, 2006).

A Figura 10 revela o diagrama de blocos simplificado de um relé diferencial em um relé de estado-sólido analógico que tem como componente principal o comparador de amplitude. As correntes que entram são misturadas (MIX), retificadas e filtradas para se obter sinais de tensão que se equiparam à magnitude das correntes de restrição e operação selecionadas. Após esse tratamento, soma-se um limite mínimo à grandeza de corrente de restrição e então entra em processo de comparação.

Figura 10:Diagrama de relé estado-sólido.



Fonte: Adaptada de SEL (2016).

É comum o uso do termo *trip* para referir-se ao ponto de operação de uma condição pré-definida para aquela determinada situação, como, o ponto de atuação do relé diferencial. Seu *trip* lógico programado exerce, por exemplo, a abertura de chaves disjuntores mitigando ou mesmo eliminando o defeito.

Em termos matemáticos, o relé irá operar para:

$$k'|\overline{I_e} + \overline{I_s}| \geq k"I_{LR} + k"(|\overline{I_e}| + |\overline{I_s}|) \quad (17)$$

Ou:

$$|\overline{I_e} + \overline{I_s}| \geq I_{LR} + (k"/k')|\overline{I_e} - \overline{I_s}| \quad (18)$$

Definindo e substituindo:

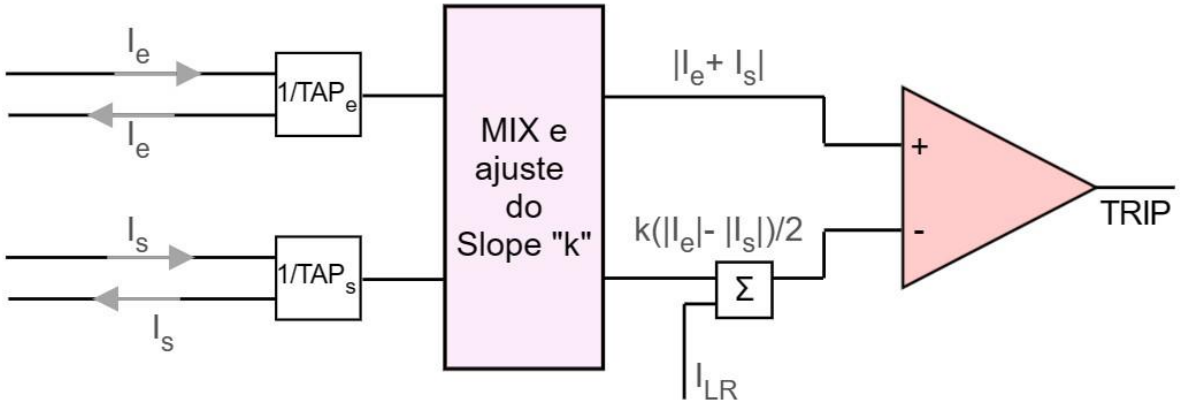
$$k"/k' = \frac{k}{2} \tag{19}$$

$$|\bar{I_e} + \bar{I_s}| \geq I_{LR} + \frac{k}{2}|\bar{I_e} - \bar{I_s}| \tag{20}$$

$$\therefore I_{OP} \geq I_{LR} + k \times I_{RT} \tag{21}$$

Os relés digitais advieram do avanço tecnológico e são comandados por um microcontrolador, controlado por *software* (CARRAMASCHI, 2006). A sua representação em diagramas de bloco, apresentado na Figura 11, é equivalente ao diagrama anterior – Figura 10, de relé de estado-sólido analógico.

Figura 11:Diagrama de relé digital simples.



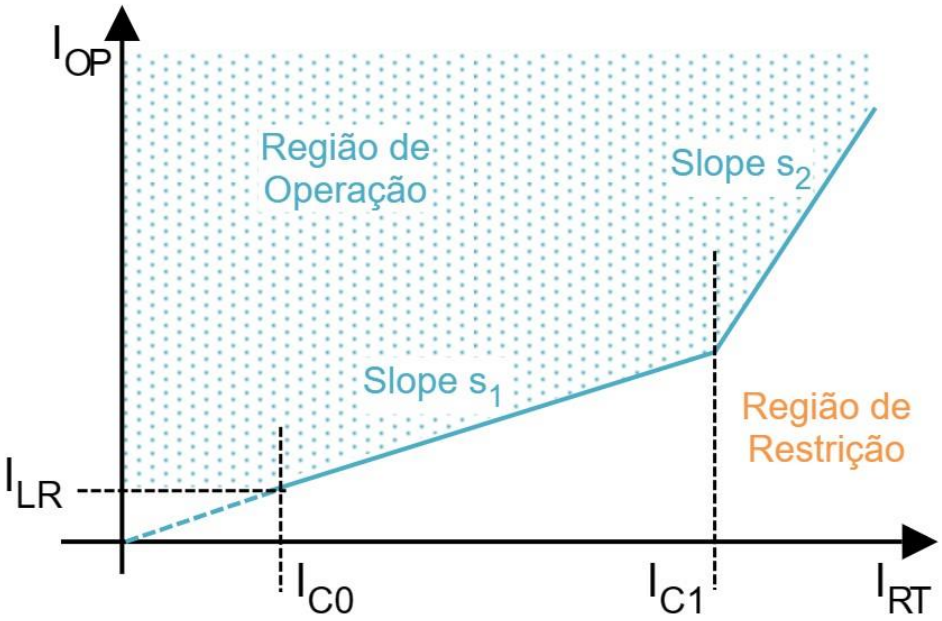
Fonte: Adaptada de SEL (2016).

Observa-se diferenças na construção do relé digital para o esquema apresentado na Figura 10, a começar pelos dois blocos de $1/TAP_e$ e $1/TAP_s$ nas entradas de corrente, executando a compensação de diferenças entre os transformadores de corrente. À frente, a corrente de restrição tem a forma distinta a anterior e o *slope* depende dessa corrente.

2.4.1 Curva de Restrição Percentual Variável

Muito utilizada em proteção diferencial de corrente em geradores, a restrição percentual variável traz a característica de duas rampas, ou seja, dois valores ajustáveis de slope como mostra a Figura 12.

Figura 12: Curva diferencial com dois slopes variáveis.



Fonte: Elaborada pela autora.

O princípio é o mesmo, o relé calcula a média da magnitude das correntes dos dois lados do gerador e a utiliza como a corrente de restrição, conhecida como I_{RT}. A corrente de operação, I_{OP}, se dá pela soma dos vetores das mesmas correntes de entrada e saída do equipamento. As Equações que representam essas correntes são (1) e (2), respectivamente.

Quando a corrente de operação ultrapassa o valor estabelecido pelo ajuste porcentual multiplicado pela corrente de restrição, o relé é acionado. Nesse caso, a região de operação está acima da linha *slope*, enquanto a região de restrição está abaixo dela. O valor do *slope* pode variar entre 5% e 50%, dependendo da combinação dos TCs e de outros erros de parâmetros do sistema. O segundo *slope* é ajustado para proporcionar maior tolerância aos erros dos TCs durante faltas com correntes elevadas, que podem levar à saturação destes (SEL, 2016).

Considerando o emprego de dois slopes, s_1 e s_2, pode-se definir as condições de operação do relé da seguinte maneira:

- $I_{OP} > I_{LR}$, para $I_{RT} < I_{C0}$;
- $I_{OP} > s_1 \times I_{RT}$, para $I_{C0} < I_{RT} < I_{C1}$;
- $I_{OP} > s_2 \times I_{RT} + v$, para $I_{RT} > I_{C1}$.

Onde a constante v é definida na Equação (22):

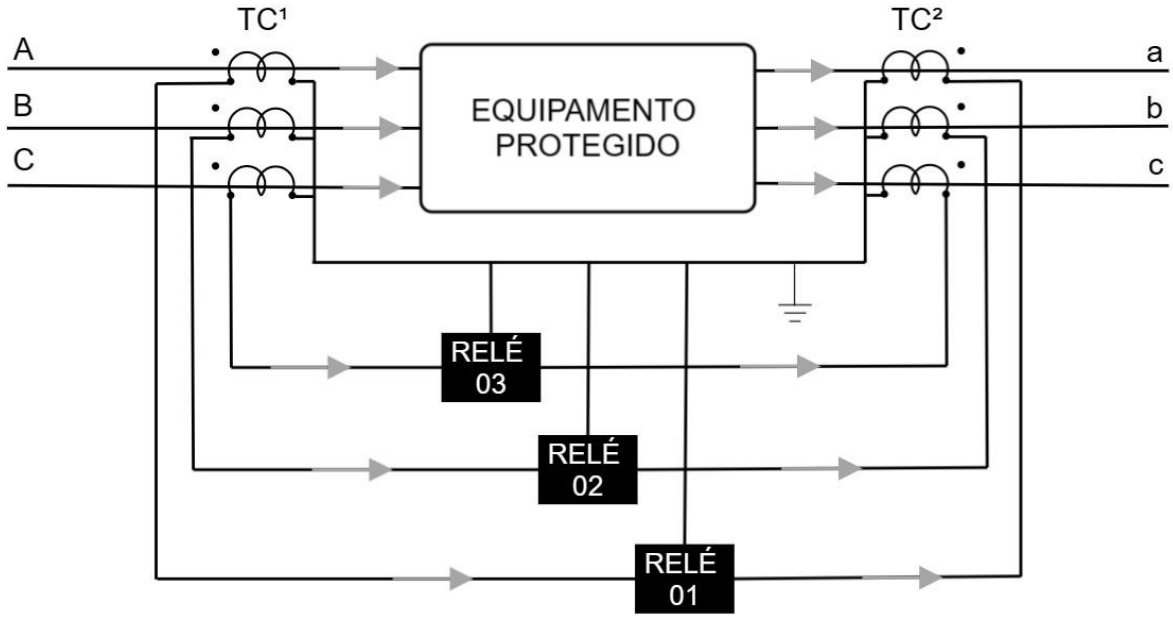
$$v = (s_1 - s_2) \times I_{C1} \quad (22)$$

A curva traçada pelo s_2 difere da primeria, s_1, por uma constante v, isso se dá devido ao *slope* 2 não ter inicio na origem do gráfico, e sim no ponto de interseção definido por I_{C1}.

2.5 Proteção Diferencial Percentual do Gerador

Até o momento abordou-se a proteção em sistemas monofásicos, mas circuitos de potência em sua grande maioria são trifásicos. Pode-se observar na Figura 13 o diagrama que exemplifica o arranjo de fases segregadas da proteção diferencial, contendo três transformadores de corrente, e três dispositivos relés, um para cada fase.

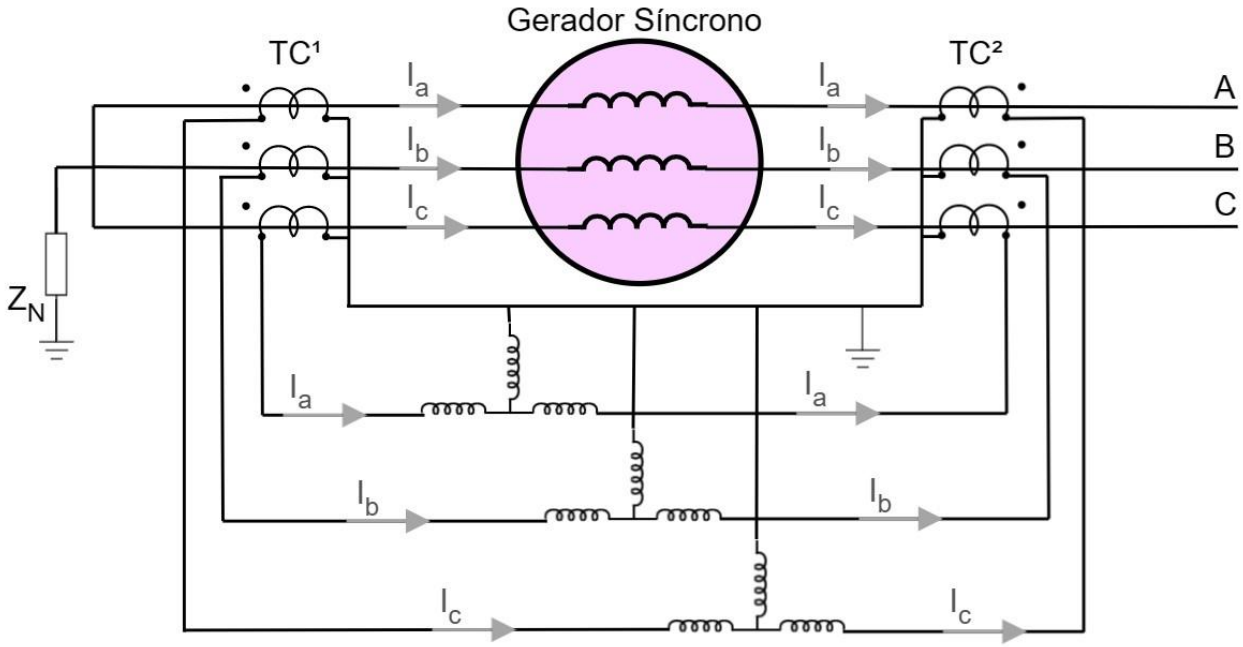
Figura 13: Diagrama de fases segregadas.



Fonte: Adaptada de SEL (2016).

Em geradores síncronos, a função 87 protege o equipamento para defeitos na bobina do estator, ou seja, na armadura do gerador (KINDERMANN, 1999). As ligações esquemáticas são as mesmas, com a diferença de que não há necessidade de correções de corrente por meio de TCs, uma vez que as correntes que entram e saem do motor são iguais, logo os transformadores são dimensionados apenas uma vez e adquire-se equipamentos idênticos para ambas as posições. Essa particularidade é positiva para o sistema pois diminui os erros de relação de transformação, comuns em transformadores de potência (SEL, 2016).

Figura 14:Proteção diferencial dos enrolamentos do gerador síncrono.



Fonte: Adaptada de Kindermann (2008).

A Figura 14 mostra o arranjo de proteção diferencial clássico com enrolamentos de operação e restrição, como na Figura 9. Em geral, é comum a presença de um TAP de ajuste em cada enrolamento de restrição, a fim de permitir a regulagem da relação entre corrente de restrição e a corrente de operação que ativa o relé.

A corrente de restrição é a média aritmética dos módulos das correntes de fase, e a corrente de operação é a soma dos vetores de correntes de fase.

O elemento diferencial porcentual entrará em operação quando a corrente de operação ultrapassar o valor de ajuste porcentual da corrente de restrição, tal como o valor de corrente de *pick-up* ajustada previamente. Esta proteção é muito conveniente contra defeitos que originam curtos-circuitos nos enrolamentos das bobinas do estator, como:

- Curto-circuito trifásico;
- Curto-circuito bifásico;
- Curto-circuito monofásico para carcaça, em gerador síncrono com aterramento sólido do neutro;
- Curto-circuito monofásico para terra com restrição, em gerador com aterramento com alta impedância no neutro (KINDERMANN, 1999).

3 Materiais e Métodos

3.1 Transformadores de Corrente

Entre os diversos equipamentos utilizados nos sistemas de controle, medição e proteção, os transformadores de corrente e de potencial desempenham um papel fundamental. Em redes de alta tensão e corrente, não é prático realizar medições e alimentar os equipamentos diretamente devido às condições perigosas envolvidas. Os transformadores permitem obter medições precisas e confiáveis das grandezas elétricas do sistema, ao mesmo tempo em que protegem os demais equipamentos e circuitos contra as altas tensões e correntes presentes na rede.

O transformador de corrente é projetado para isolar os equipamentos de controle, medição e proteção dos circuitos de alta tensão. Ele fornece, em seu enrolamento secundário, uma corrente proporcional à corrente do enrolamento primário, com uma magnitude adequada para a operação dos equipamentos. As correntes nominais do enrolamento secundário geralmente são de 5A nas normas ABNT ou ANSI, e 1A em normas europeias (HENCHENSKI, 2020).

Em termos eletromagnéticos, o transformador de corrente é semelhante a um transformador convencional, como demonstrado na Figura 15. Sob condições normais de operação, o TC é tratado como um transformador ideal, e a relação entre as correntes no enrolamento primário e secundário é expressa pela Equação (23):

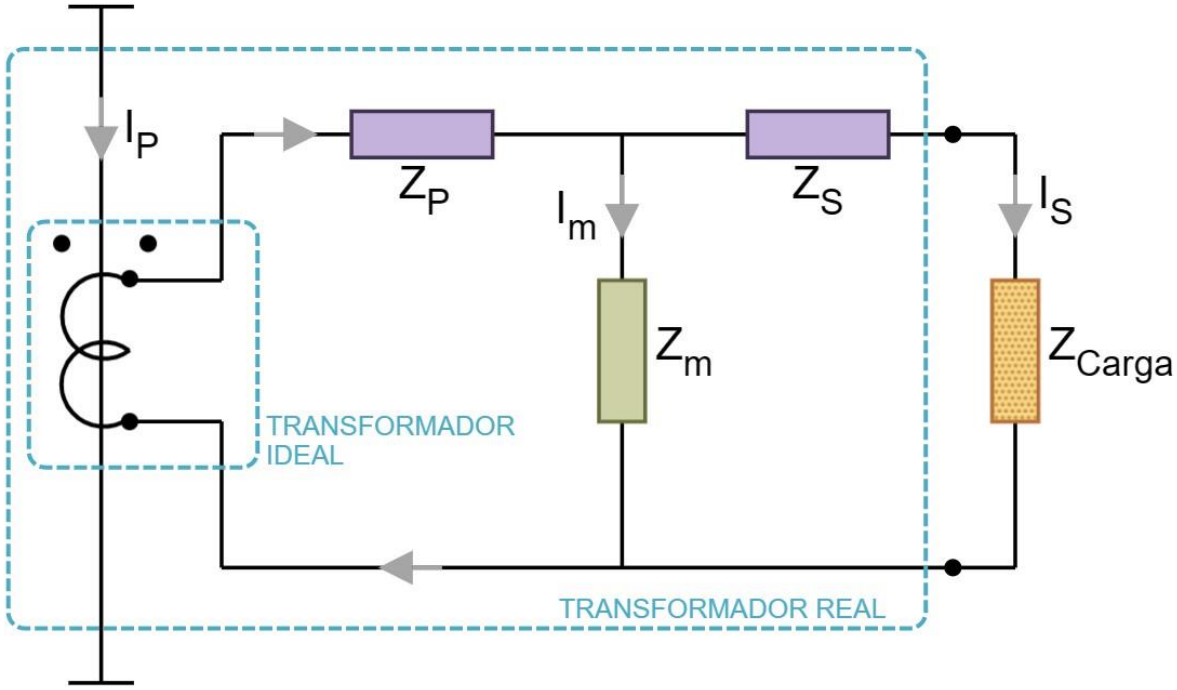
$$I_S = \left(\frac{N_P}{N_S}\right) \times I_P \tag{23}$$

I_S representa a corrente secundária;

I_P a corrente primária;

Onde N_P e N_S são o número de espiras nos enrolamentos primário e secundário respectivamente, e a divisão entre eles é conhecido como a Relação de Transformação de Corrente (RTC). Essa relação também pode ser calculada com as correntes primarias e secundárias, pois são valores fornecidos na placa do equipamento:

Figura 15: Arranjo de um transformador de corrente ideal e real.



Fonte: Adaptada de Henchenski (2020).

O enrolamento primário do TC é conectado em série com a carga, portanto, o condutor usado deve ter uma seção transversal grande e poucas espiras, a fim de apresentar uma resistência e reatância baixas, evitando quedas de tensão na carga. Os dispositivos ou instrumentos conectados ao secundário, também devem ser ligados em série, evitando a formação de um circuito divisor de corrente que comprometeria as medições e leituras. O dimensionamento adequado do TC deve ser realizado de forma a garantir um desempenho satisfatório em situações de baixa corrente, corrente nominal e corrente de curto-circuito (HENCHENSKI, 2020).

Para a aplicação em questão, foram selecionados transformadores de corrente com as seguintes características apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1: Dados dos TCs utilizados

Descrição	Valor
Relação de Transformação (RTC)	400/5-5 A
Classe de Exatidão (ABNT)	10B100
Fator Térmico	1,2
Fator de Sobrecorrente	20

A seguir, realiza-se a análise para garantir que as especificações mencionadas na Tabela 1 sejam adequadas e estejam em conformidade com o sistema em que os transformadores de corrente serão instalados.

3.1.1 Reatância do TC

Existem dois tipos de TCs com características diferentes em relação à sua construção e funcionamento. Os TCs de alta reatância possuem a bobina primária enrolada no núcleo, o que melhora a sensibilidade e a qualidade da medição. Esses, requerem isolamento para suportar a alta tensão, e a reatância de dispersão no circuito secundário é relevante. Na norma ABNT, esses TCs são identificados pela letra A, enquanto na norma ANSI são identificados pela letra H

No entanto, devido às altas correntes no enrolamento primário, pode ser inviável que a bobina envolva completamente o núcleo. Para contornar esse problema, é mais prático envolver o condutor com o núcleo do TC. Esses, são conhecidos como TCs de baixa reatância, também chamados de tipo bucha ou tipo barra, e possuem uma relação de transformação de $Ns/1$. O enrolamento secundário é projetado com o maior número de espiras possível para envolver completamente o núcleo e minimizar a reatância de dispersão, que pode ser desprezada. Na norma ABNT, esses TCs são identificados pela letra B, enquanto na norma ANSI são identificados pela letra L.

3.1.2 Erro do TC

O TC possui uma corrente de magnetização I_m no seu núcleo, correspondente ao erro na transformação de correntes. Ela pode ser relacionada com a corrente primaria (I_P) e secundária (I_S) como:

$$I_S = \left(\frac{I_P}{RTC}\right) - I_m \tag{24}$$

Tal corrente de magnetização é linear até a saturação do núcleo. Em sistemas de proteção, não é necessário ter uma precisão absoluta, como é exigido em sistemas de medição. Durante eventos de corrente de curto-circuito, é aceitável uma precisão de 2,5% a 10% nas correntes medidas no secundário do TC. Essa precisão é

alcançada no ponto ANSI. O valor de 10% é o mais comumente utilizado nesses casos.

3.1.3 Classe de Exatidão do TC

O fator de sobrecorrente FS, é a proporção entre a corrente máxima de curto-circuito I_{CC}, e a corrente nominal primária do TC I_P, como demonstra a Equação (25), necessária para manter a precisão da classe de exatidão do transformador de corrente.

$$FS = \frac{I_{CC}}{I_P} \tag{25}$$

A norma ABNT estabelece valores padronizados para o FS, que são 5, 10, 15, 20 e 30. Por sua vez, a norma ANSI utiliza apenas o valor de 20. Por exemplo, considerando um TC com uma relação de transformação de 400/5 e FS igual a 20, com uma margem de erro de 10%, a corrente de curto-circuito no primário pode chegar a 20 vezes 400, ou seja, 8kA, para que o erro na corrente do secundário seja igual ou inferior a 10%. Logo, para mantermos a classe de exatidão, deve-se satisfazer a seguinte condição:

$$I_P \geq \frac{I_{CC}}{FS} \tag{26}$$

$$400 \geq \frac{3037}{20} \tag{27}$$

$$400 \geq 151{,}85A \tag{28}$$

Como o valor de I_P é $400A$. e a relação de I_{CC} FS é igual a $151{,}85A$, a condição estabelecida pela Equação (26) foi satisfeita.

A classe de exatidão, conforme definida pela norma ANSI, é determinada pela tensão máxima no enrolamento secundário durante a corrente máxima de curto-circuito, levando em consideração o fator de sobrecorrente. Agora, de acordo com a ABNT, é determinada pela potência aparente (VA) no secundário do transformador de corrente quando submetido à corrente nominal de 5A. Durante a ocorrência de um curto-circuito, é importante garantir que a potência aparente no secundário do transformador não exceda o limite de erro estabelecido pela classe de exatidão. Isso significa que o transformador de corrente deve ser capaz de manter sua precisão

dentro dos limites especificados, mesmo durante condições de curto-circuito (HENCHENSKI, 2020).

3.1.4 Fator Térmico

O fator térmico (FT) de um TC representa a máxima corrente que pode suportar continuamente, sem comprometer sua vida útil. Os valores mais utilizados para o fator térmico são 1, 1,2, 1,3, 1,5 e 2 vezes a corrente nominal. Esses valores proporcionam uma margem de segurança em caso de aumento de carga no circuito, evitando a necessidade de substituição imediata do TC. Dessa forma, o fator térmico permite que o TC opere de maneira adequada e duradoura mesmo em condições de carga mais elevadas. Define-se o FT como:

$$FT = \frac{I_N}{I_P} \tag{29}$$

Onde I_N é a corrente nominal fornecida pelo sistema em plena operação, circulando no primário do TC e I_P a corrente nominal primária do TC. Escolhendo o valor de 1,2 e aplicando, o TC deve cumprir com a seguinte condição:

$$I_P \geq \frac{I_N}{FT} \tag{30}$$

$$400 \geq \frac{258{,}21}{1{,}2} \tag{31}$$

$$400 \geq 215{,}17A \tag{32}$$

A relação I_N por FT é igual a $215{,}17A$, valor inferior a I_P, portanto a condição é cumprida.

3.2 Dispositivo de proteção

Os relés desempenham um papel fundamental como equipamentos de proteção no sistema elétrico. Eles estão conectados ao sistema por meio de transformadores de medição, que reduzem as correntes e tensões das linhas para níveis adequados. Esses transformadores permitem que os instrumentos de medição e proteção fiquem isolados da rede à qual estão conectados.

Estes dispositivos de proteção têm a capacidade de detectar falhas e enviar comandos de atuação aos disjuntores. Os relés funcionam como dispositivos

"sensores" que acionam a abertura do disjuntor quando ocorrem condições anormais de operação. Para isso, eles analisam e avaliam uma ampla variedade de parâmetros, como corrente, tensão, potência, impedância, ângulo de fase, entre outros, a fim de determinar as ações necessárias.

3.2.1 Relé SEL700G

O relé SEL-700G, ilustrado na Figura 16, é um dispositivo projetado pela Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), amplamente utilizado na indústria de energia para proteção de geradores especificamente, oferecendo proteções completas e abrangentes, dependendo do modelo específico.

Este relé possui uma série de recursos avançados que garantem uma proteção confiável para geradores de pequeno a grande porte. Ele possui a capacidade de compensação de conexão de transformadores de potência e TCs, permitindo uma inclusão conveniente do transformador a zona de proteção diferencial do gerador.

O dispositivo também oferece recursos de medição, monitoramento, controle e comunicação. Com opções de entrada/saída analógica e digital e proteção baseada em RTD (Resistência de Temperatura de Detecção), o relé permite um controle preciso e eficiente do gerador (SEL, 2022).

Figura 16: Relé SEL700G.

Fonte: SEL (2020).

Quando especificado, o SEL-700G detecta falhas no estator usando uma função de diferencial de corrente segura e sensível, e que possui um elemento diferencial de porcentagem restrita e um elemento não restrito. O relé permite a escolha entre bloqueio harmônico, restrição harmônica ou ambos, fornecendo uma proteção diferencial confiável durante condições de fluxo de magnetização do transformador. Harmônicos de número par (segundo e quarto) fornecem segurança durante a energização, enquanto o bloqueio do quinto harmônico fornece segurança para condições de sobre-excitação. A característica de restrição de porcentagem de duplo declive melhora a segurança do elemento para condições de falta (SEL,2022).

Dentre as várias proteções presentes no relé, pode-se citar proteções para: sobrecorrente instantâneo (50), sobrecorrente temporizado (51), diferencial (87), detector de terra (64), reversão ou desbalanceamento de corrente (46), subexcitação de campo (40), sobrexcitação ou volts por hertz (24), distância (21), sub/sobre frequência (81), sub tensão (27), sobre tensão (59), aumento térmico (49), verificação de sincronismo (25) e direcional de potência (32) – códigos definidos pela ANSI. Cada proteção ainda possui subdivisões com ênfase em pontos específicos que podem ser trabalhados, melhorando assim o desempenho de operação do relé diante as diversas possíveis falhas em que o sistema está sujeito.

As proteções ativas no relé implantado em cada Unidade Geradora da PCH Mantovilis estão na Tabela 2:

Tabela 2:Proteções ativas no relé de proteção de gerador

Código ANSI	Descrição
87	Proteção diferencial percentual de fase
64G ou 64TN	Proteção de faltas à terra do estator
51V	Proteção de sobrecorrente temporizada de fase com restrição de tensão
40	Proteção de perda de campo ou subexcitação
46	Proteção de desbalanço de corrente
24	Proteção de sobrexcitação
78	Proteção de sincronismo
50	Proteção de sobrecorrente instantânea
81	Proteção de sub e sobre frequência
27	Proteção de sub tensão
59	Proteção de sobre tensão

3.2.2 Configurações de Elementos Diferenciais

Há configurações de definição para operação relé SEL-700G para diversas proteções, e o usuário tem o poder de ativar quais julga necessário para um desempenho satisfatório. A janela de elementos diferenciais inicia-se com a escolha do equipamento a ser protegido, GEN (gerador somente), TRAN (transformador dentro da zona de proteção junto ao gerador) ou NONE para manter desabilitada a função de proteção diferencial. A seleção deste último bloqueia a edição de todos os próximos parâmetros para essa função, uma vez que ela não estará ativa.

Conforme mencionado, o equipamento a ser protegido é somente o gerador síncrono, logo os dois elementos seguintes são inativos (Figura 17), pois referem-se à máxima potência de transformação e necessidade de correção de desafasem das correntes, configurações estas utilizadas para transformadores.

Figura 17: Configuração do relé de diferencial.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na sequência deve-se inserir o valor de *pick-up* de corrente de operação, ou seja, valor mínimo requerido para operação. O ajuste desse elemento deve apresentar um valor pequeno para o aumento da sensibilidade, mas alto o suficiente para evitar operações indesejadas devido a cargas não monitoradas, erros em TCs ou corrente de excitação do transformador de força. O termo $O87P$ é equivalente ao I_{LR}, já abordado, e deve ser maior ou igual a:

$$\mathrm{O87P} \geq 0{,}10 \times \frac{I_N}{TAP} \tag{33}$$

Onde:

I_N é a corrente nominal do relé, neste caso $5A$;

TAP a corrente nominal do gerador referida na baixa do TC, calculada a seguir:

$$TAP = \frac{S}{RTC \times \sqrt{3} \times V_N} = \frac{(3{,}086 \times 10^6)}{80 \times \sqrt{3} \times (6{,}9 \times 10^3)} = 3{,}23A \tag{34}$$

S a potência do gerador;

RTC, relação de transformação estabelecida anteriormente;

V_N a tensão nominal do gerador.

Tem-se:

$$\mathrm{O87P} \geq 0{,}10 \times \frac{5}{3{,}23} = 0{,}15 \tag{35}$$

Para garantia da cobertura da condição, adota-se $O87P = 0{,}30$

Além da Equação (33), deve-se satisfazer a seguinte condição:

$$(0{,}10 \times I_N) \leq (\mathrm{O87P} \times TAP) \tag{36}$$

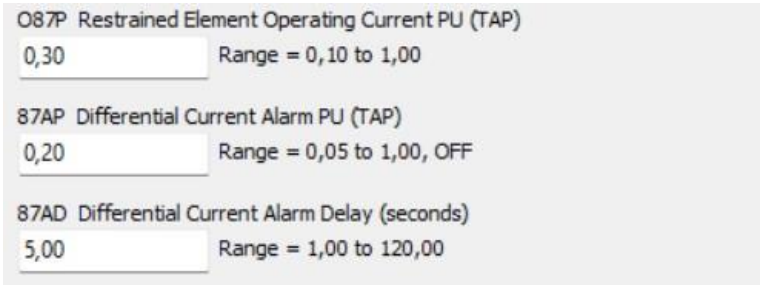
$$(0{,}10 \times 5) \leq (0{,}30 \times 3{,}23) \tag{37}$$

$$0{,}5 \leq 0{,}97 \tag{38}$$

As condições são todas satisfeitas.

O relé SEL700G conta com recurso de alarme para aviso de quando a atividade do sistema está incompatível com o esperado, mas ainda com valores abaixo do ajustado para operação. Por isso, ajusta-se o nível de corrente de alarme em $87AP = 0{,}20$, conforme Figura 18. Em casos de variações onde a corrente atinge o valor de alarme, mas retorna a seu estado regular, adiciona-se um tempo de retardo para a ativação de $87AD = 5s$.

Figura 18: Configuração de pick-up e alarme da proteção diferencial.



Fonte: Elaborada pela autora.

O relé admite as configurações de porcentagem de *slope* de restrição para distinguir entre faltas internas e externas. O ajuste do $SLP1$ – anteriormente citado como s_1 –acomoda as diferenças de corrente em relação ao estado estacionário ou regime permanente e erros proporcionais, como troca de TAP de transformador de potência, erros de TC e erros de relé. Já o ajuste $SLP2$ – s_2 – para acomodar erros transitórios causados pela saturação do TC.

A utilização de suas rampas melhora a sensibilidade na região onde o erro do TC é menor e aumenta a segurança na região de corrente alta onde o erro do TC é maior. Define-se valor para ambos *slopes*, assim como o limite ou ponto $IRS1$ – visto até então como I_{C1} – onde $SLP1$ e $SLP2$ se cruzam. A escolha dos valores para cada parâmetro pode variar de acordo com cada relé, faz-se necessário o manual do equipamento específico para maior assertividade.

O cálculo de seleção de $SLP1$ leva em consideração a margem de erros dos equipamentos conectados.

Consideram-se os erros dos TCs em ±10% ($e = 0{,}1$). Considera-se também, quando aplicável, que a variação da relação de tensão do transformador de força na mudança de TAP com carga, está entre 90% e 110% ($a = 0{,}1$, não aplicável neste caso, logo, $a = 0$). Leva-se em conta a pior condição de operação, onde uma corrente diferencial aparece quando todas as correntes de entrada são medidas com erro positivo máximo nos TCs e todas as correntes de saída são medidas com erro negativo máximo nos TCs, sendo compensada pela variação máxima de relação de tensão do transformador de força. Então a corrente diferencial máxima esperada para essas condições é igual a:

$$I_{DMáx} = (1 + e) - \frac{(1 - e)}{(1 + a)} \tag{39}$$

Desenvolvendo e aplicando, $I_{DMáx}$ em porcentagem da corrente de enrolamento:

$$\frac{(2 \times e) + a + (e \times a)}{1 + a} \times 100 \tag{40}$$

$$\frac{(2 \times 0{,}1) + 0 + (0{,}1 \times 0)}{1 + 0} \times 100 = 20\% \tag{41}$$

Além do erro calculado acima, deve-se considerar os erros adicionais, como o da corrente de excitação de transformador (± 3%, não aplicável a este caso) e o erro de medição do relé (≤ 5%, consultar o valor para cada dispositivo). Assim, o erro total máximo vai para aproximadamente 25% ($20 + 5$). Logo, um ajuste conservador seria mais ou menos 30%, garantindo a não atuação do relé sob erros esperados.

Os próximos dois parâmetros, $SLP2$ e $IRS1$, são definidos automaticamente pelo relé, uma vez selecionado que a zona de proteção abrange apenas o gerador. O $SLP2$ é fixado em 70% e $IRS1$ em 6,0.

Em caso de possibilidade de ajuste desses dois parâmetros, uma boa escolha para $IRS1$ é mais ou menos a 3,0 vezes o TAP, como mostrado na Equação (42), enquanto o $SLP2$ deve ser alto para evitar problemas com saturação dos TCs, consequentemente maior que $SLP1$, conforme Equação (43).

$$IRS1 = 3 \times TAP = 3 \times 3{,}23 = 9{,}69 \tag{42}$$

$$SLP2 \geq SLP1 \Rightarrow 100\% > 30\% \tag{43}$$

Porém, o dispositivo SEL700G tem uma particularidade onde a corrente de restrição, I_{RT}, difere de outros relés por um fator de 2. Adaptando o valor a ser inserido, tem-se:

$$SLP1 = \frac{30\%}{2} = 15\% \quad (44)$$

$$IRS1 = \frac{9{,}69}{2} = 4{,}84 \quad (45)$$

$$(valor\ bloqueado\ em\ 6{,}0)$$

$$SLP2 = \frac{100\%}{2} = 50\% \quad (46)$$

$$(valor\ bloqueado\ em\ 70\%)$$

O próximo valor a ser inserido refere-se à corrente instantânea sem restrição, a qual o relé deve reagir rapidamente a níveis muito altos de corrente que claramente indicam uma falha interna. O próprio relé sugere que configure o nível de atuação $U87P$ para 8 a 10 vezes o valor do TAP. Este elemento diferencial sem restrição responde apenas ao componente de frequência fundamental da corrente de operação diferencial, ou seja, não é afetado pelas configurações $SLP1$, $SLP2$, $IRS1$, $PCT2$ ou $PCT5$. Portanto, é necessário configurar o nível de atuação do elemento com um valor alto o suficiente para não reagir a grandes correntes de partida, dentro das condições estabelecidas pelo relé SEL700G. Escolheu-se o valor $U87P = 10$.

$$(0{,}10 \times I_N) < (U87P \times TAP) \quad (47)$$

$$(0{,}10 \times 5) < 10 \times 3{,}23 \quad (48)$$

$$0{,}5 < 32{,}3 \quad (49)$$

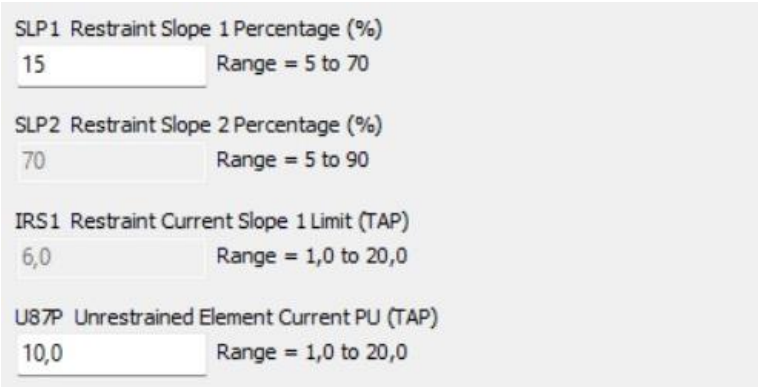
$$\text{U87P} \leq 31 \times \frac{I_N}{TAP} \quad (50)$$

$$10 < 31 \times \frac{5}{3{,}23} \quad (51)$$

$$10 < 47{,}98 \quad (52)$$

O valor escolhido corresponde com as condições.

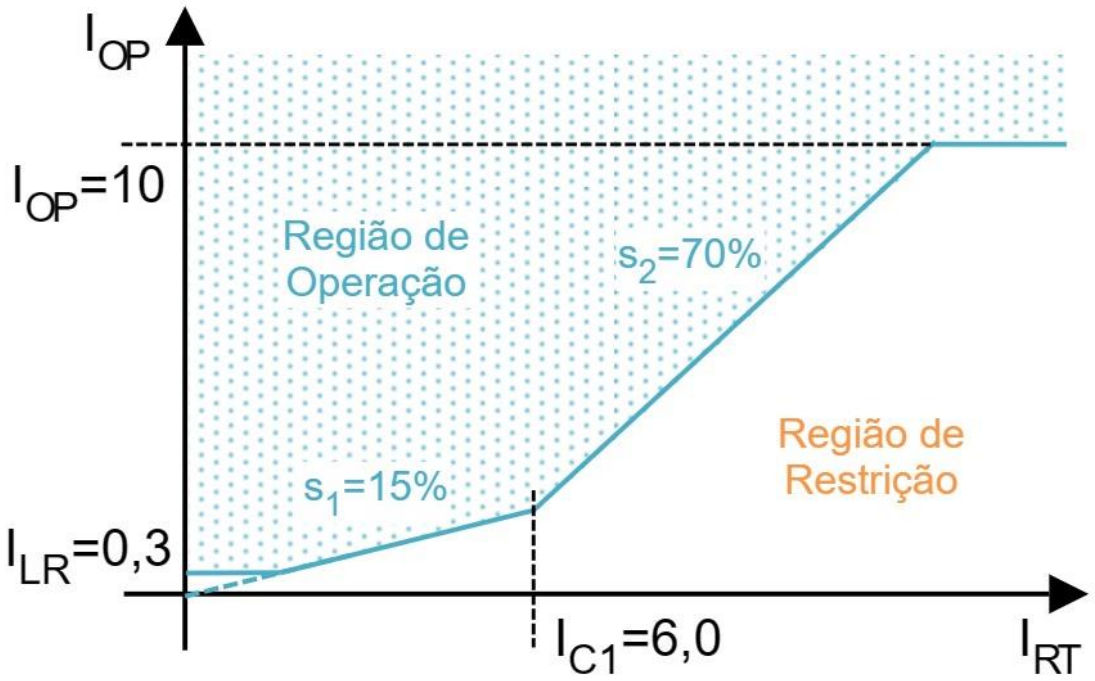
Figura 19: Configuração da curva Diferencial Percentual.



Fonte: Elaborada pela autora.

As configurações apresentadas nas Figuras 18 e 19 resultam na seguinte curva ilustrada na Figura 20:

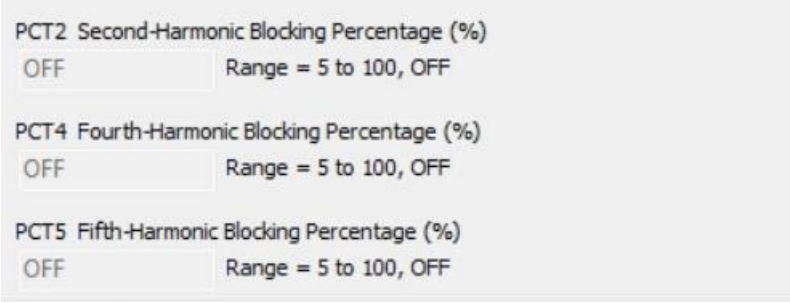
Figura 20: Curva diferencial percentual em vigor na PCH Mantovilis.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os ajustes subsequentes são bloqueados quando $\mathrm{E87} = \mathrm{GEN}$ (Figura 21), uma vez que referem-se a componentes harmônicas estarão disponíveis para a opção $E87 = TRAN$. Durante a energização de um transformador, ocorre um fluxo temporário de corrente de magnetização de partida em um dos terminais, enquanto o outro terminal não é afetado por essa corrente. Essa corrente diferencial pode causar uma operação incorreta do relé. É possível utilizar a medição de correntes de harmônicos pares para identificar esse fenômeno e evitar operações indesejadas do relé configurando as opções $PCT2$ e $PCT4$. Além disso, a sobreexcitação do transformador, que ocorre quando a relação entre a tensão e a frequência excede os valores de referência, pode gerar correntes de harmônicos ímpares. O relé SEL700G é capaz de medir a corrente de quinto harmônico e realizar a comparação com a configuração de $PCT5$ para proteger contra esse fenômeno.

Figura 21: Configuração de restrição de harmônicos.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3 Equipamento de Medição e Teste

Para a realização dos testes de proteção e seletividade do relé SEL700G foi utilizado o dispositivo CE-6006 (Figura 22), produzido e distribuído pela empresa Conprove.

O CE-6006 é um equipamento completo de testes do sistema de proteção elétrica, que pode ser utilizado tanto em campo quanto em laboratório. É capaz de testar, calibrar e aferir diversos dispositivos, como relés, medidores, transdutores e qualímetros.

O equipamento possui saídas de corrente e tensão de alta precisão para realizar diferentes tipos de testes. É totalmente controlado por *software*, permitindo testes manuais e automáticos. Seu *software* Conprove Test Center (CTC) oferece ao usuário soluções de *software* para testar uma variedade de funções, como sobrecorrente, diferencial, distância, direcional, sequência negativa, sobre e sub frequência, sobre e sub tensão, entre outras.

Figura 22: Mala de testes de relés hexafásica.

Fonte: Conprove (2020).

4 Testes e Resultados

4.1 Configurações da Mala de Teste

O equipamento CE6006 possui, visando a praticidade do usuário, áreas de trabalhado moldadas para a realização de testes de diferentes tipos de proteções, pode-se observar as opções na Figura 23. A proteção diferencial pode ser facilmente ensaiada na opção $Differential$.

Figura 23: Tela inicial CTC.

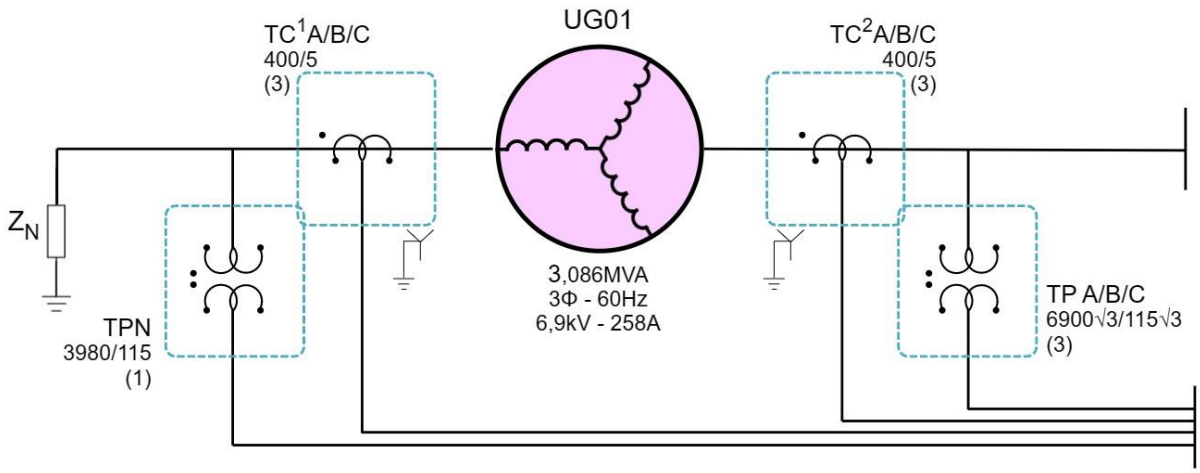
Fonte: Elaborada pela autora.

Para dar-se início aos testes de verificação, é necessária a configuração da Mala de Testes com os respectivos valores parametrizados para a proteção. É opcional a adição de informações gerais identificando o dispositivo de proteção e o

local de instalação deles, conforme Figura 25. A PCH Mantovilis tem seu sistema construído por duas Unidades Geradoras (UG01 e UG02) com potência de 3,086kVA cada, e sistema de proteção diferencial individual. Logo, são dois relés SEL700G instalados, um para cada UG. Os testes foram realizados em ambas as unidades, mesmos pontos e valores foram testados, portanto apenas os testes da UG01 serão demonstrados.

Cada gerador conta com 2 grupos de transformadores de corrente, esquema ilustrado na Figura 24, cada grupo com 3 unidades. Ao todo são 12 TCs para realizar as leituras, todos detém as mesmas características construtivas abordadas na Tabela 1. O estator dos geradores está ligado em Estrela e os transformadores de corrente em Estrela Aterrado. Há também um conjunto de 3 transformadores de potencial na saída e um único TP no neutro de cada gerador.

Figura 24: Diagrama unifilar simplificado da UG01.



Fonte: Elaborada pela autora.

As informações do sistema são obrigatórias para que o *software* realize alguns cálculos antes de automatizar pontos de teste e correntes suportadas pelo circuito secundário. Grande parte das informações pode ser extraída da Figura 24. A frequência de geração do sistema é de $60Hz$ e segue a sequência de fase positiva ABC.

A potência de fase é igual a:

$$S_{1\emptyset} = \frac{S_{3\emptyset}}{3} = \frac{(3{,}086 \times 10^6)}{3} \cong 1{,}03MVA \tag{53}$$

Sendo a tensão fase-fase primária igual a $6{,}9kV$, a tensão fase-neutro é:

$$V_{FN} = \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} = \frac{(6{,}9 \times 10^3)}{\sqrt{3}} = 3{,}98kV \tag{54}$$

Corrente primária é calculada na Equação (55) e para obter-se a corrente secundária basta dividir pela RTC, calculado em (57):

$$I_P = \frac{(3{,}086 \times 10^6)}{\sqrt{3} \times (6{,}9 \times 10^3)} \cong 258{,}2A \quad (55)$$

$$I_S = \frac{I_P}{RTC} = \frac{258{,}2}{80} \cong 3{,}23A \quad (56)$$

$$RTC = \frac{I_P}{I_S} = \frac{400}{5} = 80 \quad (57)$$

As tensões secundárias de fase-fase circulando no TP são iguais a:

$$V_S = \frac{V_P}{RTP} = \frac{6{,}9 \times 10^3}{60} = 115V \quad (58)$$

Onde RTP se dá pela divisão das tensões nominais do TP:

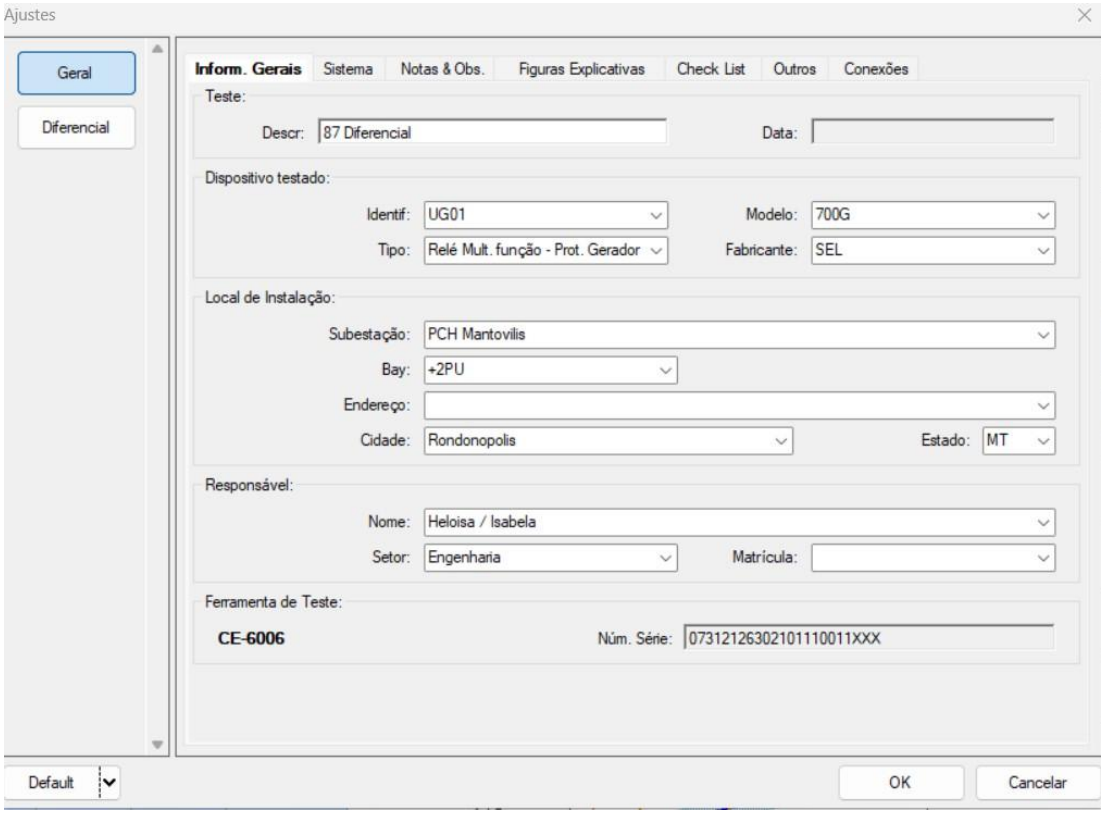
$$RTP = \frac{V_P}{V_S} = \frac{6{,}9 \times 10^3 \times \sqrt{3}}{115 \times \sqrt{3}} = 60 \quad (59)$$

E a tensão fase-neutro será de:

$$V_{FN} = \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} = \frac{115}{\sqrt{3}} \cong 66{,}40V \quad (60)$$

As informações gerais são inseridas na Figura 25:

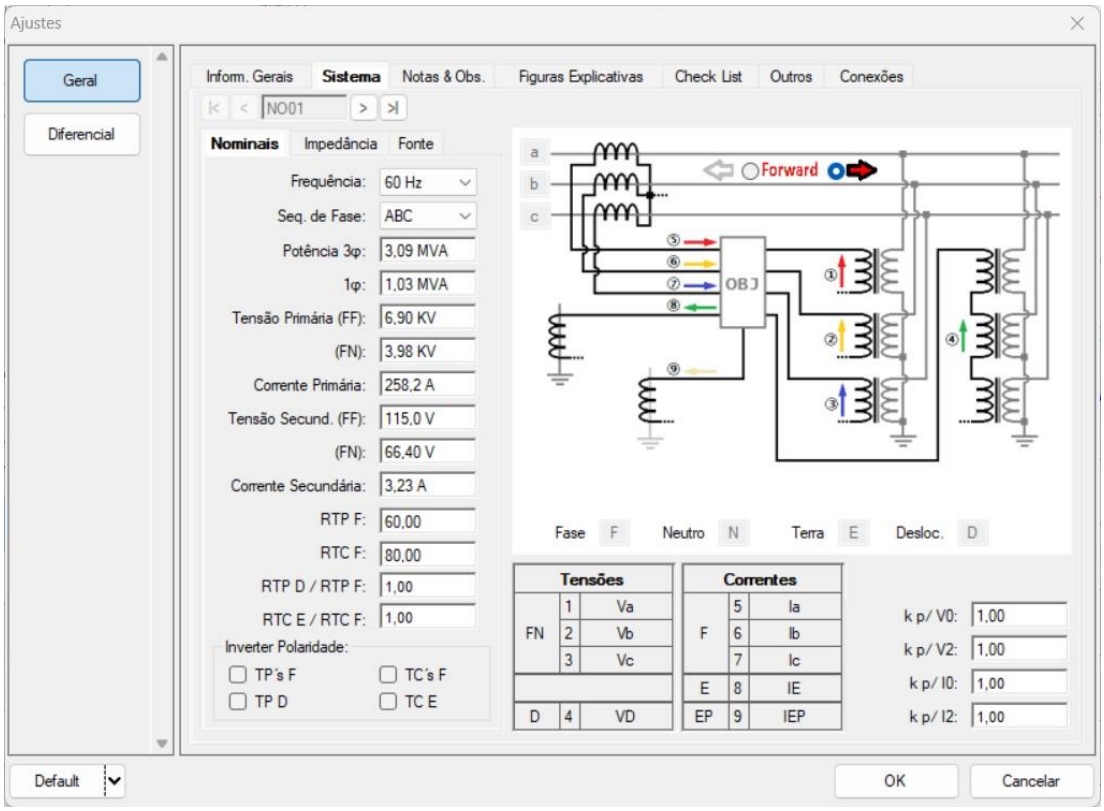
Figura 25: Informações gerais.



Fonte: Elaborada pela autora.

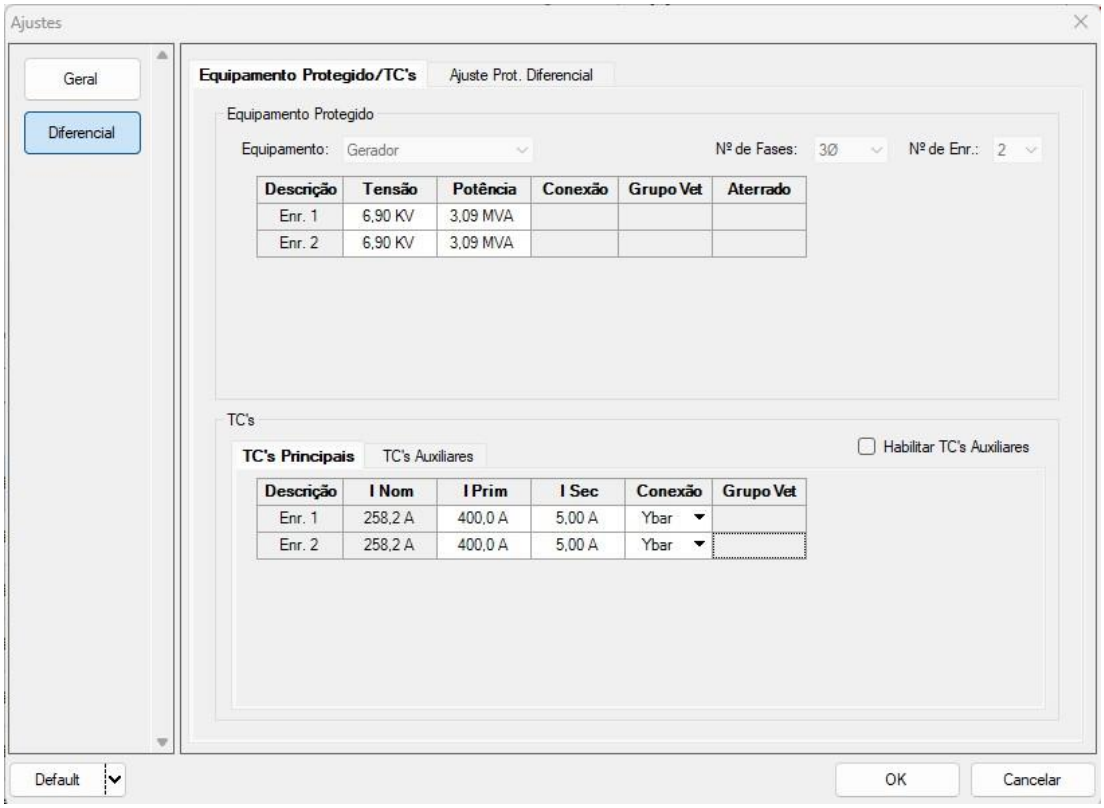
É necessária a inserção das informações sobre o sistema, Figura 26, e os equipamentos envolvidos na zona de proteção, Figura 27, para que a automatização dos cálculos seja efetiva. Os termos $Enr.1$ e $Enr.2$ referem-se respectivamente as bobinas de entrada e saída do equipamento. O gerador mantém as tensões e correntes na entrada iguais a de saída do equipamento, logo as opções de enrolamento 1 e enrolamento 2 têm os mesmos valores, diferentemente de transformadores de força.

Figura 26: Informações do sistema.



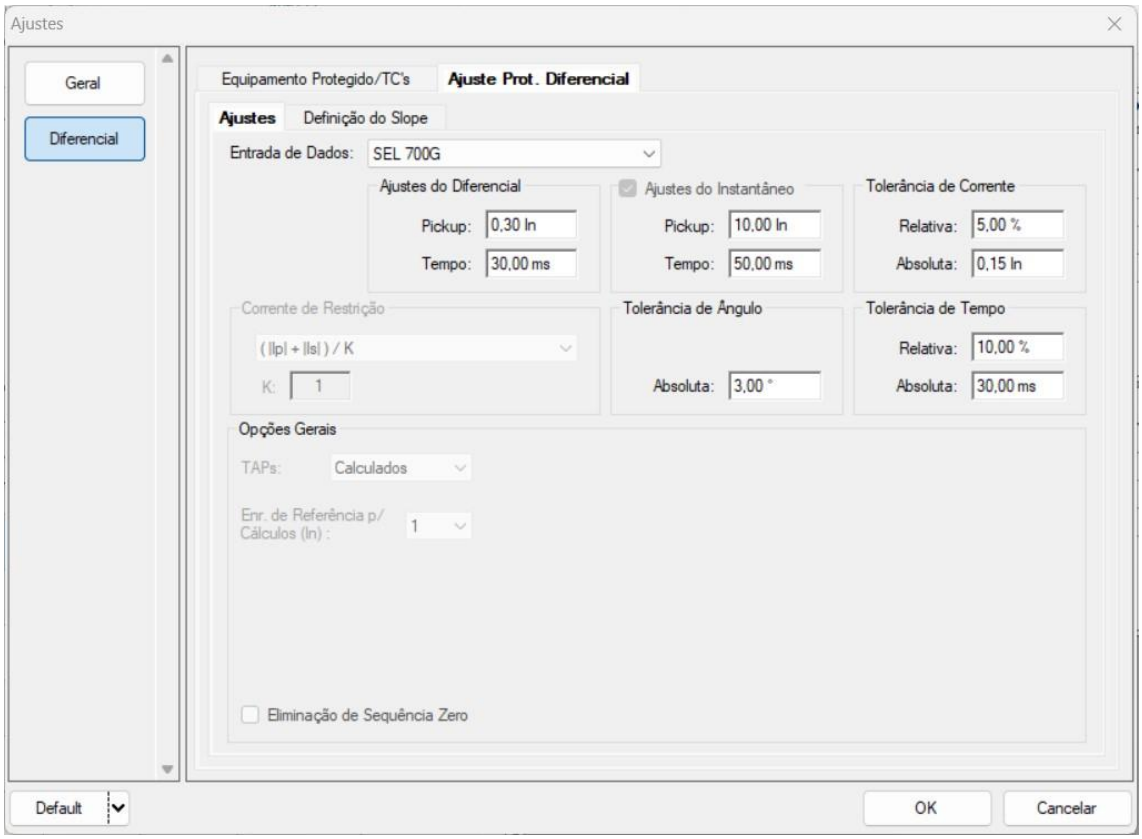
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 27: Informações dos equipamentos.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 28: Ajustes da proteção diferencial.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os ajustes da proteção são inseridos na aba apresentada na Figura 28, onde se relacionam com o que foi apresentado até então como:

- Ajustes Diferencial:

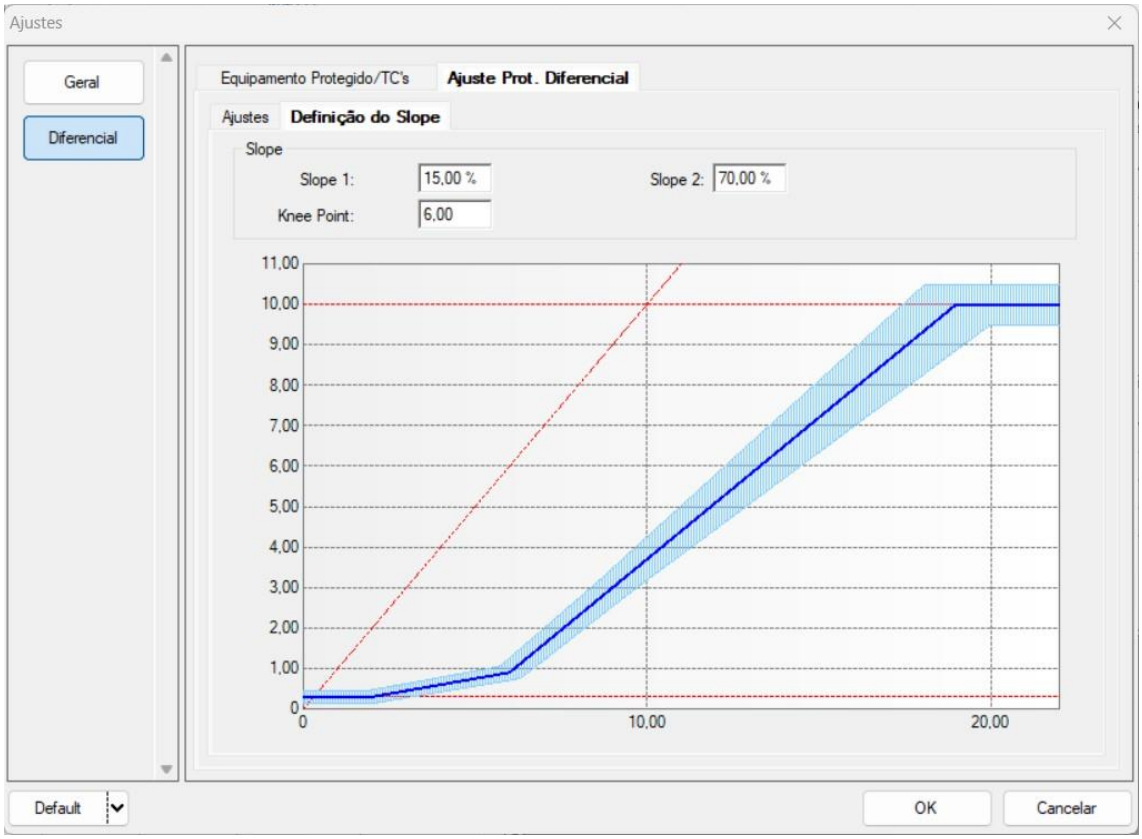
$$Pickup \equiv O87p \equiv I_{LR} \tag{61}$$

- Ajustes do Instantâneo:

$$Pickup \equiv U87P \equiv I_{OP} \tag{62}$$

Insere-se também valores de tolerância para os valores de corrente e de tempo de resposta do relé, pois aparelhos reais estão suscetíveis a pequenos erros aproximados.

Figura 29: Definições da curva de restrição percentual variável.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 29, após incluir o percentual de cada nível de rampa e o ponto de conexão entre elas, o $Knee\ Point$, o *software* retorna o gráfico com as características.

$$Knee\ Point \equiv I_{C1} \equiv IRS1 \tag{63}$$

O próximo passo é incluir os pontos onde se deseja testar as competências do relé para os parâmetros dimensionados neste estudo de caso.

4.2 Realização dos Testes

O *software* CTC, visando agilidade, permite adicionar vários pontos de uma sequência, partindo de um valor de corrente de inicial e incrementando um valor pré-estabelecido para cada ponto de avanço até o valor final. Esse valor é chamado de $passo$ e soma-se ao ponto anterior quantas vezes couberem dentro do intervalo de corrente de $Início$ e $Final$. Escolhe-se o tipo de falta e confirma-se para adicionar o os pontos no gráfico, como demonstra a Figura 30.

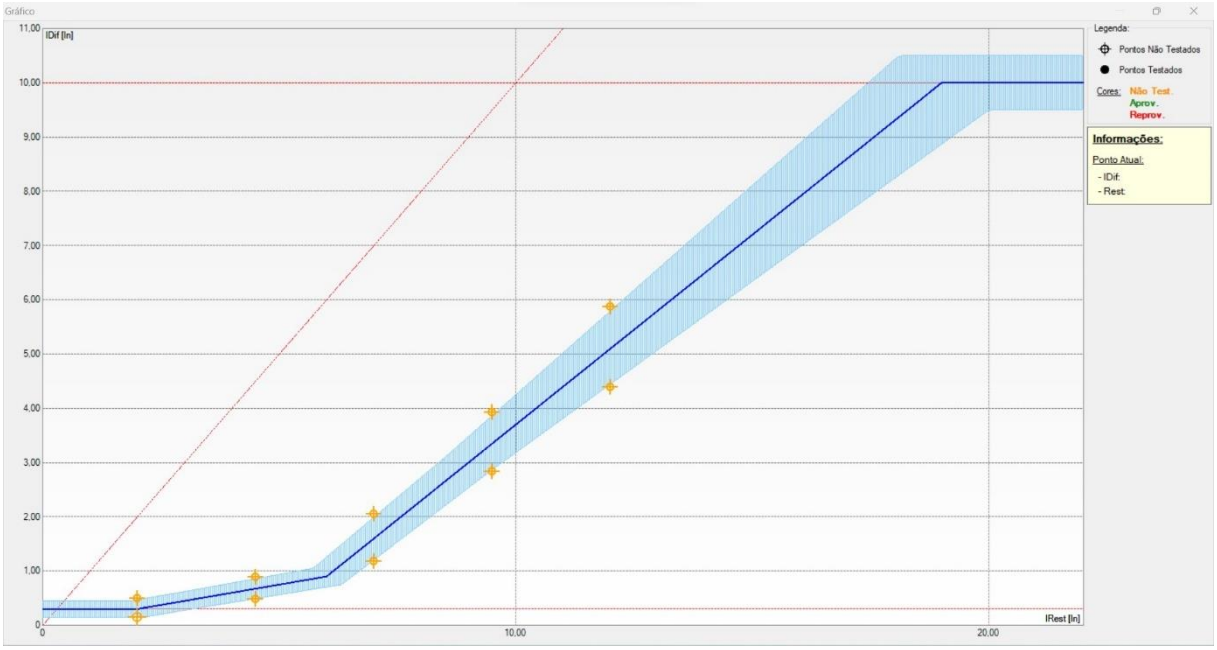
Figura 30: Inserindo Pontos de Teste.

Fonte: Elaborada pela autora.

Os pontos adicionados seguem a margem de erro do relé, onde a faixa azul delimita a zona de possíveis erros toleráveis, apesar de ser um valor grande de margem, os erros costumam acontecer apenas sobre a linha que delimita a região de operação e restrição. Em cima desta linha pode acontecer de o relé operar ou não, é um ponto indefinido para os relés reais.

O conjunto de pontos, mostrados na Figura 31, correspondem as correntes passantes nos enrolamentos secundários de cada TC descritas na Tabela 3. Para cada ponto injeta-se aos terminais do relé duas correntes diferentes, em módulo, ângulo ou modulo e ângulo. A segunda coluna indica o enrolamento que a corrente está sendo aplicada, $Enr.1$ ou $Enr.2$, simulando a corrente fornecida pela entrada ou saída do sistema primário. As correntes Ia, Ib e Ic estão expressas em módulo e ângulo de ampère. O *software* denomina a unidade de corrente de In.

Figura 31: Gráfico diferencial com pontos a serem testados.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 3: Correntes nos Enrolamentos Secundários.

Ponto	Enr.	Ia		Ib		Ic	
1	1	3,01	∟180º	3,01	∟60º	3,01	∟300º
	2	3,45	∟0º	3,45	∟240º	3,45	∟120º
2	1	2,44	∟180º	2,44	∟60º	2,44	∟300º
	2	4,02	∟0º	4,02	∟240º	4,02	∟120º
3	1	6,50	∟180º	6,50	∟60º	6,50	∟300º
	2	8,03	∟0º	8,03	∟240º	8,03	∟120º
4	1	5,85	∟180º	5,85	∟60º	5,85	∟300º
	2	8,68	∟0º	8,68	∟240º	8,68	∟120º
5	1	9,42	∟180º	9,42	∟60º	9,42	∟300º
	2	13,18	∟0º	13,18	∟240º	13,18	∟120º
6	1	8,01	∟180º	8,01	∟60º	8,01	∟300º
	2	14,58	∟0º	14,58	∟240º	14,58	∟120º
7	1	10,78	∟180º	10,78	∟60º	10,78	∟300º
	2	19,88	∟0º	19,88	∟240º	19,88	∟120º
8	1	15,33	∟228,7º	15,33	∟108,7º	15,33	∟348,7º
	2	15,33	∟0º	15,33	∟240º	15,33	∟120º

Ponto	Enr.	Ia		Ib		Ic	
9	1	19,37	∟222,8º	19,37	∟102,8º	19,37	∟342,8º
	2	19,37	∟0º	19,37	∟240º	19,37	∟120º
10	1	19,37	∟238,5º	19,37	∟118,5º	19,37	∟358,5º
	2	19,37	∟0º	19,37	∟240º	19,37	∟120º
11	1	0,427	∟180º	0,427	∟0º	-	-
	2	0,863	∟0º	0,863	∟180º	-	-
12	1	0,109	∟180º	0,109	∟0º	-	-
	2	1,40	∟0º	1,40	∟180º	-	-
13	1	6,36	∟180º	6,36	∟0º	-	-
	2	7,84	∟0º	7,84	∟180º	-	-
14	1	5,71	∟180º	5,71	∟0º	-	-
	2	8,49	∟0º	8,49	∟180º	-	-
15	1	10,18	∟180º	10,18	∟0º	-	-
	2	16,93	∟0º	16,93	∟180º	-	-
16	1	8,60	∟180º	8,60	∟0º	-	-
	2	18,51	∟0º	18,51	∟180º	-	-
17	1	-	-	0,750	∟180º	0,750	∟0º
	2	-	-	1,19	∟0º	1,19	∟180º
18	1	-	-	0,217	∟180º	0,217	∟0º
	2	-	-	1,72	∟0º	1,72	∟180º
19	1	-	-	6,08	∟180º	6,08	∟0º
	2	-	-	7,47	∟0º	7,47	∟180º
20	1	-	-	5,44	∟180º	5,44	∟0º
	2	-	-	8,12	∟0º	8,12	∟180º
21	1	-	-	9,85	∟180º	9,85	∟0º
	2	-	-	15,32	∟0º	15,32	∟180º
22	1	-	-	8,35	∟180º	8,35	∟0º
	2	-	-	16,82	∟0º	16,82	∟180º
23	1	3,01	∟0º	-	-	3,01	∟180º
	2	3,45	∟180º	-	-	3,45	∟0º

Ponto	Enr.	Ia		Ib		Ic	
24	1	2,44	∟0º	-	-	2,44	∟180º
	2	4,02	∟180º	-	-	4,02	∟0º
25	1	8,02	∟0º	-	-	8,02	∟180º
	2	10,05	∟180º	-	-	10,05	∟0º
26	1	7,34	∟0º	-	-	7,34	∟180º
	2	10,73	∟180º	-	-	10,73	∟0º
27	1	10,62	∟0º	-	-	10,62	∟180º
	2	19,08	∟180º	-	-	19,08	∟0º
28	1	14,85	∟47,24º	-	-	14,85	∟14,85º
	2	14,85	∟180º	-	-	14,85	∟0º
29	1	4,42	∟180º	2,21	∟0º	2,21	∟0º
	2	5,26	∟0º	2,63	∟180º	2,63	∟180º
30	1	3,81	∟180º	1,90	∟0º	1,90	∟0º
	2	5,87	∟0º	2,94	∟180º	2,94	∟180º
31	1	9,96	∟180º	4,98	∟0º	4,98	∟0º
	2	15,86	∟0º	7,93	∟180º	7,93	∟180º
32	1	8,44	∟180º	4,22	∟0º	4,22	∟0º
	2	17,39	∟0º	8,69	∟180º	8,69	∟180º
33	1	2,90	∟0º	5,81	∟180º	2,90	∟0º
	2	3,55	∟180º	7,10	∟0º	3,55	∟180º
34	1	2,58	∟0º	5,17	∟180º	2,58	∟0º
	2	3,87	∟180º	3,87	∟0º	3,87	∟180º
35	1	5,04	∟0º	10,07	∟180º	5,04	∟0º
	2	8,20	∟180º	16,40	∟0º	8,20	∟180º
36	1	4,26	∟0º	8,52	∟180º	4,26	∟0º
	2	8,97	∟180º	17,95	∟0º	8,97	∟180º
37	1	1,66	∟0º	1,66	∟0º	3,32	∟180º
	2	1,89	∟180º	1,89	∟180º	3,78	∟0º
38	1	1,36	∟0º	1,36	∟0º	2,71	∟180º
	2	2,19	∟180º	2,19	∟180º	4,39	∟0º

Ponto	Enr.	Ia		Ib		Ic	
39	1	4,84	∟0º	4,84	∟0º	9,69	∟180º
	2	7,26	∟180º	7,26	∟180º	14,52	∟0º
40	1	4,11	∟0º	4,11	∟0º	8,22	∟180º
	2	7,99	∟180º	7,99	∟180º	15,98	∟0º

Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 4, foram realizados testes em diferentes módulos e ângulos de corrente para todos os tipos de faltas que o *software* concede. É possível visualizar na tabela que em cada ponto há um tipo de falta – falta trifásica (ABC), falta entre fases (AB, BC e CD) e falta fase-terra (AE, BE e CE). Cada tipo de falta dispõe de uma característica:

Os gráficos, após verificação, são marcados com pontos verdes os resultados que coincidem com o que já se esperava, operação do relé para pontos acima da curva de restrição percentual ou não operação em pontos abaixo da curva, Figura 32 a Figura 38. Os pontos que não resultam de acordo com o calculado são marcados em vermelho. A tabela de resultados traz o número do ponto testado, para que possa relacionar com as correntes aplicadas na Tabela 3, e os valores de corrente de restrição I_{RT} e corrente de operação I_{OP}, expressas nos termos $IRest$ e $IDif$ respectivamente.

A corrente $IRest$ é relacionada ao eixo horizontal dos gráficos e $IDif$ ao eixo vertical. Visualiza-se ainda, uma coluna com a informação de qual a região o ponto se encontra na curva, região de operação ou restrição, e outra coluna com o comportamento do relé ao final do teste, se atuou ou não no ponto em questão. Ao limite esquerdo da Tabela 4, tem-se o tempo que o dispositivo levou para atuar após atingir seu limite máximo de restrição e entrar em operação.

Pegando por exemplo os pontos 1 e 2, localizados paralelos ao nível mínimo de corrente de operação pela curva. Ambos estão no mesmo nível de corrente de restrição, porém devido as características das correntes de entrada e saída simuladas nos terminais do relé, a relação com a corrente de operação difere, fazendo com o que um ponto fique na zona de restrição, com apenas $0{,}135In$ de $IDif$ (ponto 1), e o segundo ponto na zona de operação com $0{,}498In$ de $IDif$ (ponto 2). O limite mínimo ou *pick-up* estabelecido foi:

$$Pickup \equiv O87p \equiv I_{LR} = 0{,}30In \tag{64}$$

Portanto, o relé atua quando:

$$IDif > Pickup \quad (65)$$

$$0{,}135 < 0{,}30 \quad (66)$$

$$0{,}498 > 0{,}30 \quad (67)$$

Logo, o relé atua no ponto 2 e permanece inoperante para o ponto 1.

Nos pontos 25 e 26, a corrente $IRest$ é de $5{,}6In$, para esse ponto a curva de operação ainda está dentro das características do *slope* 1, afinal o ponto de encontro entre o *slope* 1 e *slope* 2 foi definido em:

$$Knee\ Point \equiv I_{C1} \equiv IRS1 = 6{,}0In \quad (68)$$

Para essa corrente, o ponto limite de regiões I_{OP} da curva é dado como:

$$I_{OP} = IRest \times slope1 \quad (69)$$

$$I_{OP} = 5{,}6 \times 15\% = 0{,}84In \quad (70)$$

Valores de $IDif$ acima do I_{OP} calculado em (70), são valores de acionamento do relé:

$$IDif > I_{OP} \quad (71)$$

$$0{,}629 < 0{,}84 \quad (72)$$

$$1{,}05 > 0{,}84 \quad (73)$$

Conclui-se que para o ponto 25 o relé não deve atuar ($IDif = 0{,}629In$) e para o ponto 26 ($IDif = 1{,}05In$) deve atuar. Os pontos podem ser observados na Figura 35.

Para os pontos 31 e 32, a rampa que avalia o desempenho do relé é o *slope* 2, uma vez que a corrente $IRest$ é igual a $8{,}0In$, valor maior que o $Knee\ Point$ de $6{,}0In$.

Os pontos que traçam a curva do *slope* 2 diferem do *slope* 1 por uma constante já apresentada na Equação (22), tem-se:

$$I_{OP} = IRest \times slope2 + v \quad (74)$$

Onde v é igual a:

$$v = (slope1 - slope2) \times Knee\ Point \quad (75)$$

$$v = (15\% - 70\%) \times 6 = -3{,}3 \quad (76)$$

Aplicando a Equação (74), o valor limite entre as regiões de operação e restrição para esta corrente $IRest$ é igual a:

$$I_{OP} = 8{,}0 \times 70\% - 3{,}3 = 2{,}3In \quad (77)$$

Comparando os valores $IDif$ do ponto 31 ($IDif = 1{,}83In$) e 32 ($IDif = 2{,}77In$) como na Equação (71):

$$1{,}83 < 2{,}31 \quad (78)$$

$$2{,}77 > 2{,}31 \quad (79)$$

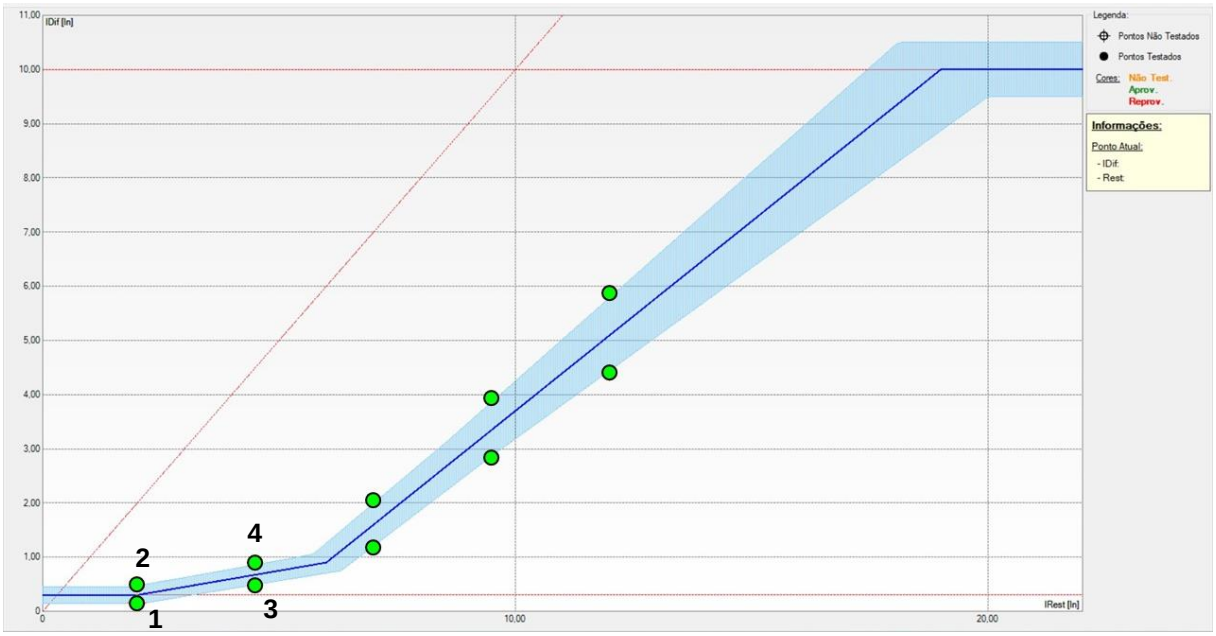
Constata-se que para o ponto 31 o relé não deve atuar e para o ponto 32 deve. Os resultados conferem com o esperado e podem ser visualizados na Tabela 4 e Figura 36.

Tabela 4: Resultados e Competências dos Testes.

Ponto	Tipo de Falta	$IDif$	$IRest$	Região	Atuou	Tempo
1	ABC	0,135 In	2,0 In	Ñ operação	Não	-
2	ABC	0,498 In	2,0 In	Operação	Sim	36,26ms
3	ABC	0,472 In	4,5 In	Ñ operação	Não	-
4	ABC	0,877 In	4,5 In	Operação	Sim	31,52ms
5	ABC	1,17 In	7,0 In	Ñ operação	Não	-
6	ABC	2,03 In	7,0 In	Operação	Sim	28,23ms
7	ABC	2,82 In	9,5 In	Ñ operação	Não	-
8	ABC	3,92 In	9,5 In	Operação	Sim	26,47ms
9	ABC	4,38 In	12,0 In	Ñ operação	Não	-
10	ABC	5,87 In	12,0 In	Operação	Sim	32,54ms
11	AB	0,135 In	0,40 In	Ñ operação	Não	-
12	AB	0,465 In	0,40 In	Operação	Sim	31,02ms
13	AB	0,458 In	4,40 In	Ñ operação	Não	-
14	AB	0,861 In	4,40 In	Operação	Sim	25,12ms
15	AB	2,09 In	8,40 In	Ñ operação	Não	-
16	AB	3,07 In	8,40 In	Operação	Sim	26,41ms
17	BC	0,135 In	0,60 In	Ñ operação	Não	-
18	BC	0,465 In	0,60 In	Operação	Sim	27,52ms
19	BC	0,430 In	4,20 In	Ñ operação	Não	-
20	BC	0,830 In	4,20 In	Operação	Sim	31,41ms
21	BC	1,69 In	7,80 In	Ñ operação	Não	-
22	BC	2,63 In	7,80 In	Operação	Sim	28,52ms
23	CA	0,135 In	2,00 In	Ñ operação	Não	-
24	CA	0,489 In	2,00 In	Operação	Sim	26,51ms

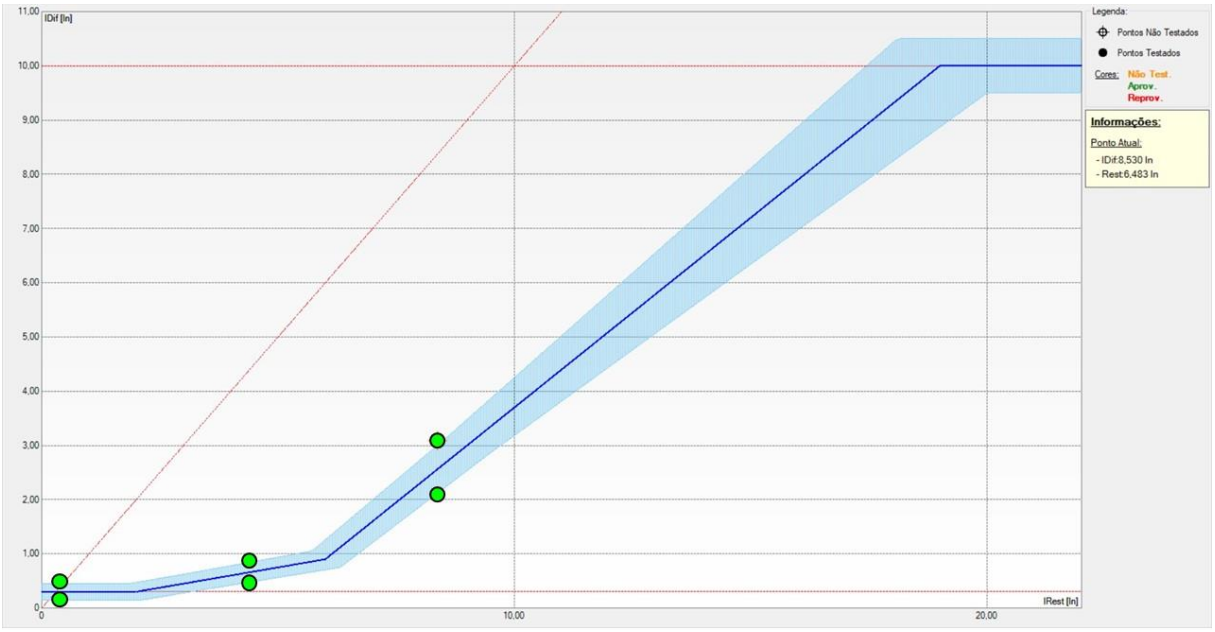
Ponto	Tipo de Falta	$IDif$	$IRest$	Região	Atuou	Tempo
25	CA	0,629 In	5,60 In	Ñ operação	Não	-
26	CA	1,05 In	5,60 In	Operação	Sim	28,36ms
27	CA	2,62 In	9,20 In	Ñ operação	Não	-
28	CA	3,69 In	9,20 In	Operação	Sim	31,05ms
29	AE	0,260 In	3,00 In	Ñ operação	Não	-
30	AE	0,640 In	3,00 In	Operação	Sim	35,21ms
31	AE	1,83 In	8,00 In	Ñ operação	Não	-
32	AE	2,77 In	8,00 In	Operação	Sim	30,54ms
33	BE	0,402 In	4,00 In	Ñ operação	Não	-
34	BE	0,798 In	4,00 In	Operação	Sim	29,51ms
35	BE	1,96 In	8,20 In	Ñ operação	Não	-
36	BE	2,92 In	8,20 In	Operação	Sim	32,46ms
37	CE	0,140 In	2,20 In	Ñ operação	Não	-
38	CE	0,520 In	2,20 In	Operação	Sim	38,27ms
39	CE	1,50 In	7,50 In	Ñ operação	Não	-
40	CE	2,40 In	7,50 In	Operação	Sim	32,14ms

Figura 32: Faltas A-B-C (pontos 1 a 10).



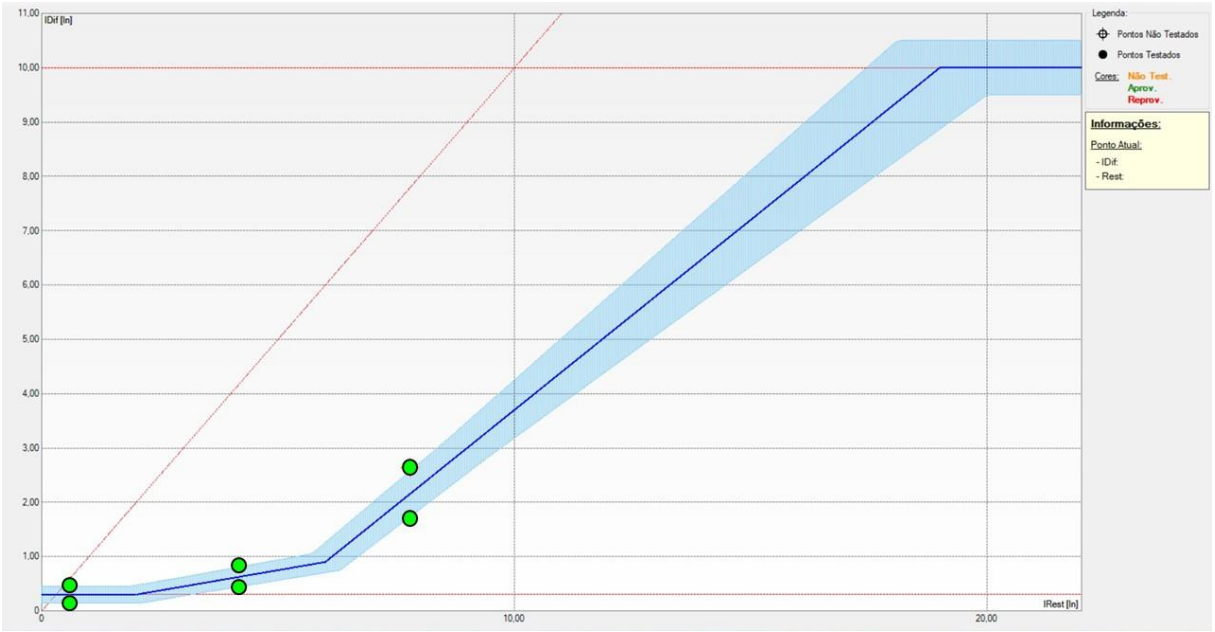
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 33: Faltas A-B (pontos 11 a 16).



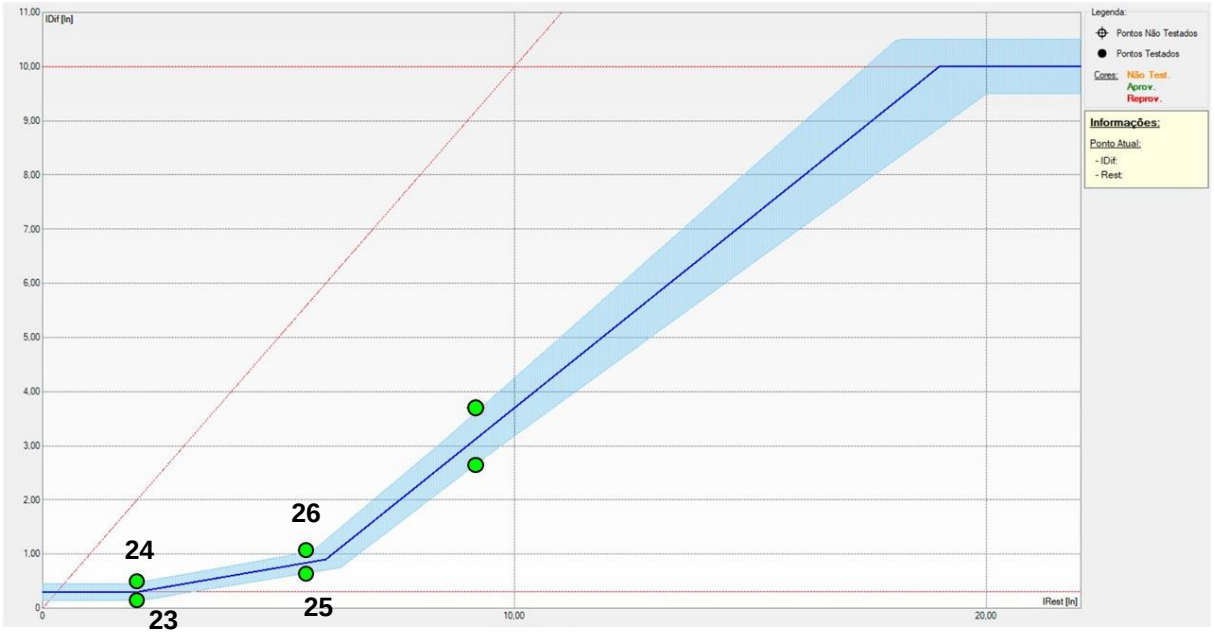
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 34: Faltas B-C (pontos 17 a 22).



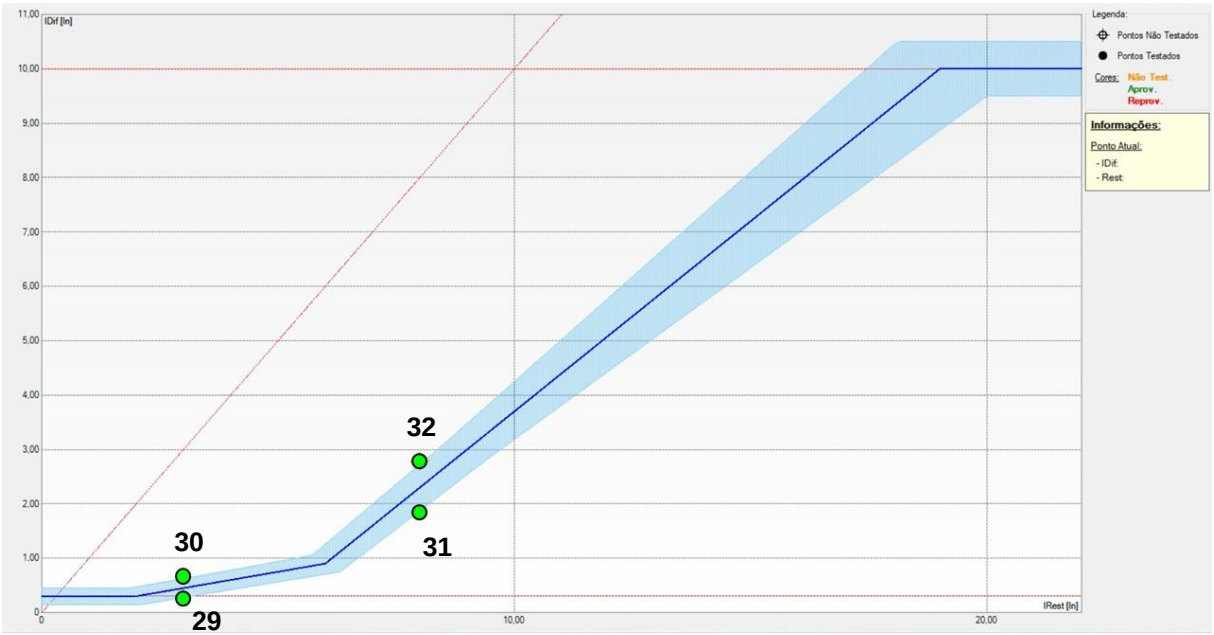
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 35: Faltas C-A (pontos 23 a 28).



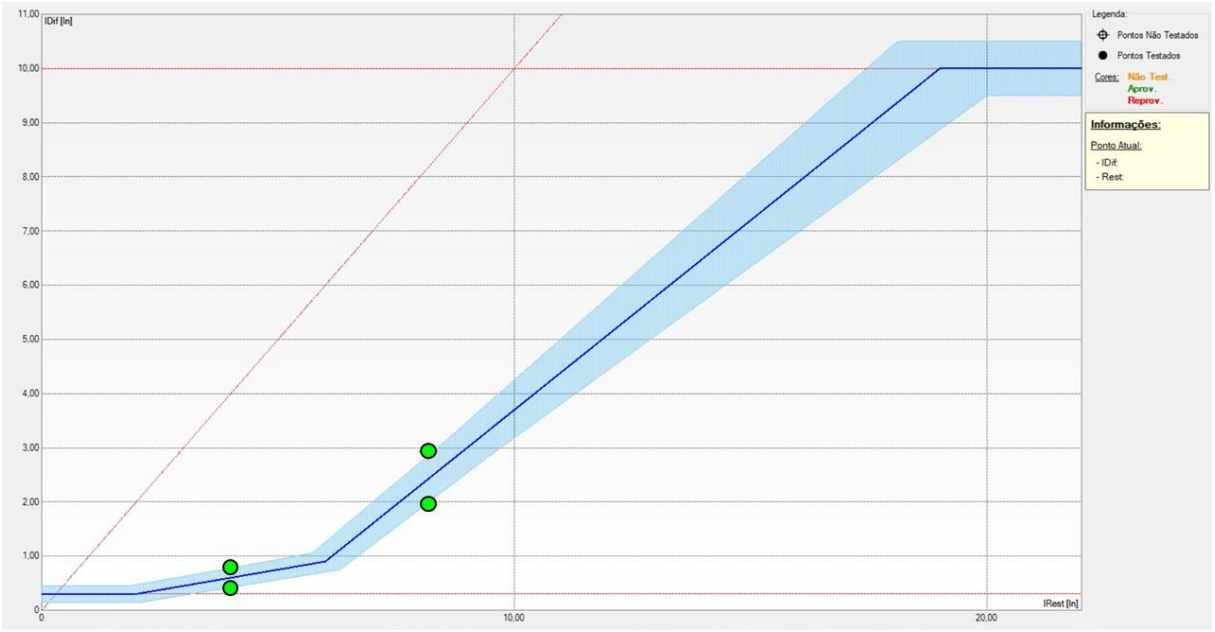
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 36: Faltas A-E (A para Terra) (pontos 29 a 32).



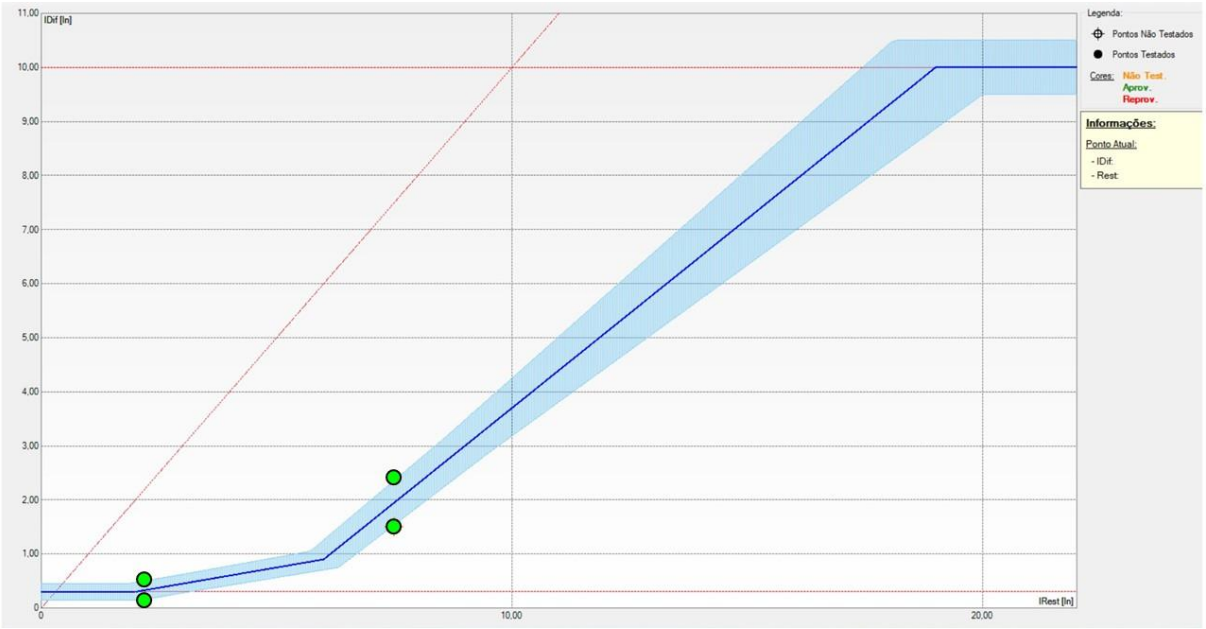
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 37: Faltas B-E (B para Terra) (pontos 33 a 36).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 38: Faltas C-E (C para Terra) (pontos 37 a 40).



Fonte: Elaborada pela autora.

Todos os pontos podem ser observados nas Figuras 32 a Figura 38, e seguem a mesma linha de raciocínio apresentada anteriormente. Pontos mais altos, que exigem correntes de entrada no relé igual ou superior a $20In$ não foram possíveis de simular, uma vez que a Mala de Testes CE6006 fornece em cada terminal o limite máximo de corrente igual a $20In$, portanto a zona instantânea de atuação não foi viável

de realização de testes. Mas, para qualquer valor de $IDif$ igual ou maior que 10, o relé deve operar. Todos os testes realizados foram bem-sucedidos e seguiram de acordo com a teoria e cálculos abordados. Foi possível traçar a curva de diferencial percentual com base nas equações demonstradas e estimar para quais valores de corrente diferencial o relé deveria operar, tudo em conformidade com o sistema proposto de estudo e os ajustes desenvolvidos especificamente para o caso. Os resultados das verificações comprovam a importância correto dimensionamento garantindo a operacionalidade do sistema em situações de diferenças não tão significantes de corrente, como por exemplo diferenças por erros dos equipamentos envolvidos e saturação de TCs.

5 Considerações Finais

O presente trabalho teve como objetivo estudar e avaliar a proteção diferencial nos geradores da PCH Mantovilis, utilizando o relé SEL-700G. Após a realização de extensivos testes, pode-se concluir que o desempenho do relé foi excepcional, pois todos foram aprovados com sucesso.

Foi possível abordar toda a teoria e explicar os princípios da proteção, de forma clara e objetiva. O estudo de proteção é de fundamental importância para que se preserve a integridade dos equipamentos a serem protegidos ao se ajustar a proteção correspondente com sistema a qual é inserida.

Foram aplicados os cálculos do dimensionamento para uma situação real e traçar a curva de diferencial percentual mais adequada para o estudo de caso. Também foram calculadas as características construtivas dos transformadores de corrente utilizados para melhor atender o sistema e constatou-se, através dos cálculos, que o equipamento selecionado é qualificado. O efeito dos cálculos de dimensionamento mostrou-se capaz de suprir as necessidades esperadas. As zonas de proteção foram adequadamente definidas, levando em consideração as características do gerador e as condições de operação, garantindo uma proteção abrangente e franca.

Os ajustes foram implantados no relé SEL700G de acordo com sua estrutura e propriedades particulares, modulando entre as opções disponíveis buscando o que melhor atende ao sistema e adaptando as que necessitassem de adaptação.

Realizou-se a configuração do equipamento CE6006, utilizado para a elaboração de testes do relé previamente parametrizado. Correntes de diferentes módulos e ângulos foram inseridos nos terminais do relé, simulando as correntes de entrada e saída do gerador a ser protegido, e foi gravado o comportamento do relé para cada combinação (pontos). O relé demonstrou uma atuação precisa e eficiente nas zonas de operação, detectando de forma confiável qualquer falta ou anomalia que pudesse ocorrer no sistema do gerador. Além disso, foi observado que o relé não atuou indevidamente nas zonas de restrição, garantindo assim a seletividade adequada e evitando disparos desnecessários.

Os resultados obtidos evidenciam a importância da proteção diferencial em geradores e a eficácia do relé SEL-700G nesse contexto. A utilização do relé oferece

uma solução proficiente para a proteção dos geradores, contribuindo para a segurança e a operação adequada do sistema elétrico como um todo.

REFERÊNCIAS

KINDERMANN, Geraldo. **PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA - Volume 2**. 1. ed. Florianópolis-SC: Edição do Autor, 1999. v. 2. 207p.

KINDERMANN, Geraldo. **PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA - Volume 3**. 1. ed. Florianópolis-SC: Edição do Autor, 2008. v. 2. 279p.

AGÊNCIA Nacional de Energia Elétrica. *In:* **Novas usinas em operação comercial no primeiro trimestre de 2023 somam 2,7 GW**. 6 abr. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/novas-usinas-em-operacao-comercial-no-primeiro-trimestre-de-2023-somam-2-7-gw. Acesso em: 14 abr. 2023.

ANSI. (American Standard C37.2-1991). “**Tabela de Numerações e Funções**”.

COTOSCK, Kelly Regina. **Proteção de Sistemas Elétricos: Uma Abordagem Técnico-Pedagógica**. 2009. 109 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2009.

MERLIN, Victor. **Filosofias de Proteção**. EA - Engenheiros Associados, 13 nov. 2019. Disponível em: https://curtocircuitoeseletividade.com.br/filosofias-de-protecao/. Acesso em: 28 fev. 2023.

BLACKBURN, J. Lewis; DOMIN, Thomas J. **Protective Relaying: Principles and Applications**. 3. ed. Boca Raton-FL: CRC Press, 2006. 664 p.

CARRAMASCHI, Isa H. Castro. **Avaliação do Desempenho de uma Proteção Digital de Distância Frente a Alguns Algoritmos**. 2006. 77 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2006.

Schweitzer Engineering Laboratories. **P4 - Filosofias de Proteção de Geradores**. Campinas-SP: Universidade SEL, 2019. 540 p.

Schweitzer Engineering Laboratories. **Memória de Cálculo para os Ajustes do Relé de Proteção de Gerador SEL-700G**. Campinas-SP. 2022. 443 p.

Schweitzer Engineering Laboratories. **Instruction Manual**. 2022. 1446 p

Conprove Indústria e Comércio. **Conprove Test Center (CTC): Manual de Utilização dos Softwares**. Uberlândia-MG. 2022. 854 p.