

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME ARIMORI SAKUGAVA

**A TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER APLICADA
A PROTEÇÃO DE BARRAS**

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2024**

GUILHERME ARIMORI SAKUGAVA

**A TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER APLICADA
A PROTEÇÃO DE BARRAS**

The discrete Fourier transform applied to busbar protection

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Silvio Aparecido de Souza.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Guilherme Arimori Sakugava

A Transformada Discreta de Fourier Aplicada a Proteção de Barras

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:20hs do dia 20/12/2024 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Avaliadora composta pelos professores(as) abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - Presidente (Orientador(a))

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

Prof(a). Me(a). João Cesar de Paula Salve - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me dar força, saúde e determinação para concluir esta etapa tão importante da minha vida.

À minha família, pelo apoio, pelos valores transmitidos e por acreditarem em mim em todos os momentos. Aos meus colegas e amigos, pela troca de experiências, pelo apoio mútuo, pelos momentos de descontração e as palavras de encorajamento nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Aparecido de Souza, pela paciência, dedicação e orientação valiosa ao longo deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais para o meu aprendizado e para o desenvolvimento deste projeto.

Aos professores do curso, que compartilharam seus conhecimentos e inspiraram meu crescimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo implementar uma metodologia de proteção diferencial de barras baseada na lógica de operação do relé REB500, do fabricante ABB. O objetivo é avaliar a resposta do relé para faltas internas e externas no barramento, simulando faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas, variando parâmetros como localização e ângulo de incidência da falta. As simulações foram realizadas no software ATPDraw e os dados gerados foram exportados para o MATLAB, afim de calcular a componente fundamental por meio da Transformada Discreta de Fourier, possibilitando calcular as correntes de operação e restrição, essenciais para a análise das curvas características do relé REB500. A análise gráfica foi gerada separadamente para cada fase, demonstrando que a metodologia foi capaz de atuar com precisão para faltas internas ao barramento, e não atuar para faltas externas. Esses resultados evidenciam a alta seletividade e confiabilidade da metodologia empregada, confirmando sua eficácia na proteção diferencial de barra.

Palavras-chave: proteção diferencial; relé de proteção; ATPDraw; barramento.

ABSTRACT

The present study aims to implement a methodology for differential busbar protection based on the operational logic of the REB500 relay, manufactured from ABB. The objective is to evaluate the relay's response to internal and external faults on the busbar by simulating single-phase, two-phase, and three-phase faults, varying parameters such as location and angle of incidence of the fault. The simulations were carried out using the ATPDraw software, and the generated data was exported to MATLAB to calculate the fundamental component using the Discrete Fourier Transform. This enabled the calculation of operating and restraint currents, which are essential for analyzing the characteristic curves of the REB500 relay. Graphical analysis was conducted separately for each phase, demonstrating that the methodology accurately detected internal busbar faults while rejecting external faults. These results highlight the high selectivity and reliability of the employed methodology, confirming its effectiveness in bus differential protection.

Keywords: differential protection; protection relay; ATPDraw; busbar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de proteção	15
Figura 2 – Diagrama unifilar	16
Figura 3 – Proteção diferencial de um barramento	17
Figura 4 – Configuração barramento simples	18
Figura 5 – Configuração barramento principal e transferência	19
Figura 6 – Configuração barramento simples seccionado.....	20
Figura 7 – Configuração barramento duplo, 1 disjuntor/4 chaves.....	21
Figura 8 – Configuração barramento duplo e disjuntor e meio	22
Figura 9 – Configuração barramento com disjuntor duplo	23
Figura 10 – Proteção diferencial percentual com dois ajustes de declividade..	24
Figura 11 – Conexão da proteção diferencial percentual	25
Figura 12 – Falta interna no barramento	26
Figura 13 – Curva característica de operação de relé REB500	28
Figura 14 – Princípio de comparação dos ângulos de fase.....	29
Figura 15 – Lógica da proteção de barra	30
Figura 16 – Sistema elétrico simulado	33
Figura 17 – Área de interesse	34
Figura 18 – Fluxograma da proteção de barramento	35
Figura 19 – Curva característica	36
Figura 20 – Falta trifásica interna do ponto de vista do TC1.....	38
Figura 21 – Falta trifásica interna do ponto de vista do TC2.....	39
Figura 22 – Falta trifásica interna do ponto de vista do TC3.....	39
Figura 23 – Falta trifásica interna ao barramento sobre a curva característica de proteção	40
Figura 24 – Comparação dos ângulos de fase para falta trifásica interna	41
Figura 25 – Falta trifásica externa do ponto de vista do TC1	42
Figura 26 – Falta trifásica externa do ponto de vista do TC2	42
Figura 27 – Falta trifásica externa do ponto de vista do TC3	43
Figura 28 – Falta trifásica externa ao barramento sobre a curva característica de proteção	43
Figura 29 – Comparação dos ângulos de fase para falta trifásica externa	44
Figura 30 – Falta bifásica interna do ponto de vista do TC1	46
Figura 31 – Falta bifásica interna do ponto de vista do TC2	46
Figura 32 – Falta bifásica interna do ponto de vista do TC3	47
Figura 33 – Falta bifásica interna ao barramento sobre a curva característica de proteção	47
Figura 34 – Comparação dos ângulos de fase para falta bifásica interna	48
Figura 35 – Falta bifásica externa do ponto de vista do TC1	49
Figura 36 – Falta bifásica externa do ponto de vista do TC2	49
Figura 37 – Falta bifásica externa do ponto de vista do TC3	50
Figura 38 – Falta bifásica externa ao barramento sobre a curva característica de proteção	50
Figura 39 – Comparação dos ângulos de fase para falta bifásica externa.....	51
Figura 40 – Falta monofásica interna do ponto de vista do TC1.....	53
Figura 41 – Falta monofásica interna do ponto de vista do TC2.....	54
Figura 42 – Falta monofásica interna do ponto de vista do TC3.....	54

Figura 43 – Falta monofásica interna ao barramento sobre a curva característica de proteção	55
Figura 44 – Comparação dos ângulos de fase para falta monofásica interna...	56
Figura 45 – Falta monofásica externa do ponto de vista do TC1	56
Figura 46 – Falta monofásica externa do ponto de vista do TC2.....	57
Figura 47 – Falta monofásica externa do ponto de vista do TC3.....	57
Figura 48 – Falta bifásica externa ao barramento sobre a curva característica de proteção	58
Figura 49 – Comparação dos ângulos de fase para falta bifásica externa.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros do algoritmo de proteção	27
Quadro 2 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta trifásica interna.	40
Quadro 3 – Corrente de operação e restrição para falta trifásica interna	41
Quadro 4 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta trifásica externa.....	44
Quadro 5 – Corrente de operação e restrição para falta trifásica externa	44
Quadro 6 – Resultados das simulações de faltas trifásicas.....	45
Quadro 7 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta bifásica interna.....	48
Quadro 8 – Corrente de operação e restrição para falta bifásica interna.....	48
Quadro 9 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta bifásica externa	51
Quadro 10 – Corrente de operação e restrição para falta bifásica externa.....	51
Quadro 11 – Resultados das simulações de faltas bifásicas fases A e B.....	52
Quadro 12 – Resultados das simulações de faltas bifásicas fases A e C.....	52
Quadro 13 – Resultados das simulações de faltas bifásicas fases B e C.....	52
Quadro 14 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta monofásica interna.	55
Quadro 15 – Corrente de operação e restrição para falta monofásica interna ..	55
Quadro 16 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta monofásica externa	58
Quadro 17 – Corrente de operação e restrição para falta monofásica externa .	58
Quadro 18 – Resultados das simulações de faltas monofásicas fase A.....	59
Quadro 19 – Resultados das simulações de faltas monofásicas fase B.....	59
Quadro 20 – Resultados das simulações de faltas monofásicas fase C.....	60

LISTA DE SIGLAS

ATP	Alternative Transients Program
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potência
LT	Linha de Transmissão
TR	Transformador
BT	Barramento de Transferência
BP	Barramento Principal
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
DIT	Demais Instalações de Transmissão
SIN	Sistema Interligado Nacional

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivos gerais	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Sistema de Proteção	14
2.2 Características dos relés de proteção	16
2.3 Proteção diferencial de barramento	17
2.4 Zonas de proteção de barramentos	17
2.5 Configurações de barramentos	18
2.5.1 Barramento simples	18
2.5.2 Barramento principal e transferência	19
2.5.3 Barramento simples e seccionado	19
2.5.4 Barramento duplo, 1 disjuntor /4 chaves	20
2.5.5 Barramento duplo e disjuntor e meio	21
2.5.6 Barramento duplo com disjuntor duplo	22
2.6 Proteção diferencial de alta impedância	23
2.7 Proteção diferencial percentual de barra	23
2.8 Característica da proteção implantada	27
2.9 Extração da Componente Fundamental	30
3 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA UTILIZADO	32
3.1 Estudo de curto-circuito da ONS	32
3.2 Software ATP	32
3.3 Dados do sistema simulado	33
4 METODOLOGIA DA PESQUISA	35
4.1 Modelagem de um SEP no ATPDraw©	35
4.2 Banco de dados com faltas internas e externas do barramento	35
4.3 Aquisição das correntes de falta	35
4.4 Extração dos fasores fundamentais	36
4.5 Cálculo das correntes de operação e restrição	36
4.6 Verificação gráfica da proteção diferencial	36
4.7 Validação dos resultados	37
5 TESTES E RESULTADOS	38
5.1 Resultados para Faltas Trifásicas	38
5.1.1 Falta Trifásica Interna	38
5.1.2 Falta Trifásica Externa	41

5.1.3 Resultados das Simulações de Faltas Trifásicas	45
5.2 Resultados para Faltas Bifásicas	45
5.2.1 Falta Bifásica Interna.....	45
5.2.2 Falta Bifásica Externa.....	49
5.2.3 Resultados das Simulações de Faltas Bifásicas	52
5.3 Resultados para Faltas Monofásicas	53
5.3.1 Falta Monofásica Interna	53
5.3.2 Falta Monofásica Externa.....	56
5.3.3 Resultados das Simulações de Faltas Monofásicas	59
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

O objetivo de um sistema elétrico de potência (SEP) é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica para os consumidores. Os geradores são responsáveis pela transformação da energia mecânica em energia elétrica e injetam essa energia na rede de transmissão. Para diminuir as perdas que ocorrem na transmissão entre as usinas geradoras até os centros de carga, é efetuado nas subestações uma elevação de tensão através dos transformadores elevadores, que transformam a potência gerada dos níveis de tensão de geração para níveis de tensão de transmissão [1]. Os centros de carga não operam com a tensão em níveis de transmissão, sendo assim, necessário reduzir a tensão através de transformadores abaixadores para realizar a distribuição da energia.

Como dito anteriormente, é na subestação de energia que ocorre a transformação dos níveis de tensão e, uma outra função da subestação, é o chaveamento dos dispositivos do SEP, que proporciona a proteção e manutenção da subestação. Com isso, deve ser feito um estudo específico para definir a configuração de barra, tendo em vista aumentar a segurança da manutenção [2].

A função do barramento é interligar os circuitos e os equipamentos existentes na subestação. A sua composição física deve atender às especificações técnicas do circuito e suportar os esforços de tração impostos pela estrutura da subestação. (CARLETO, 2017, p. 20).

Comparando estatisticamente as falhas nos barramentos com as demais falhas do sistema elétrico, nota-se que essas falhas são pouco frequentes, enquanto as faltas em barramentos não ultrapassam os 10%, o sistema de transmissão possui uma incidência em torno de 60%. Apesar do menor índice, uma proteção ineficaz de barramentos pode colocar em risco a integridade de todo o sistema [4], visto que o barramento principal de uma subestação possui muitas derivações para atender as cargas elétricas [5].

As configurações ou arranjos de barras são fundamentais para o sistema elétrico e a escolha desses arranjos influencia na flexibilidade operacional. Existe vários tipos de arranjos de barramento, dos mais simples para os mais complexos, que garante um maior nível de confiabilidade. À proporção que se adicionam recursos operacionais, aumenta por consequência o valor do investimento [4].

Portanto, neste contexto, este trabalho tem por finalidade implementar um sistema de proteção diferencial em um barramento, utilizando a Transformada Discreta de Fourier (TDF).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Mediante o uso da transformada discreta de Fourier, implementar uma metodologia de identificação de faltas internas ou externas a um barramento do sistema elétrico de potência.

1.1.2 Objetivos específicos

- Implementar um algoritmo de filtragem da componente fundamental de corrente, utilizando a transformada discreta de Fourier;
- Aplicar o conceito de proteção diferencial de barramento para identificar faltas internas ou externas ao barramento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é realizado uma análise mais detalhada sobre o tema abordado, e serão apresentados tópicos como: sistema de proteção, característica dos relés, relé utilizado e, por fim, o método de proteção diferencial de barramento, o qual é o foco do trabalho.

2.1 Sistema de Proteção

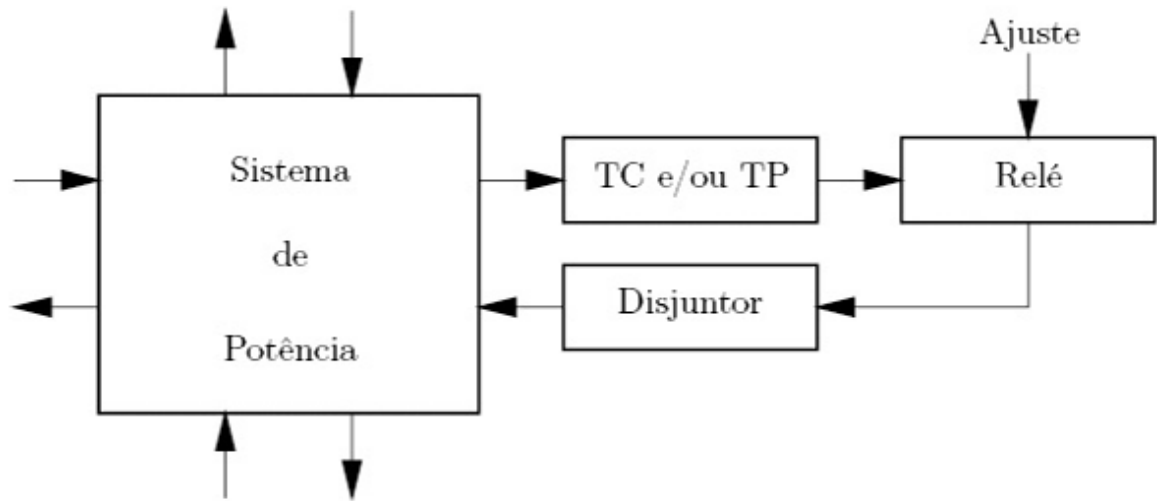
Para o consumidor em geral o sistema elétrico parece comportar-se sempre em estado permanente, imperturbável, constante e com capacidade inesgotável; entretanto, por abranger uma vasta área, ele está sujeito a constantes perturbações causadas por fenômenos naturais, condições ambientais adversas, falhas de equipamentos ou por ações humanas inapropriadas. (SATO; FREITAS, 2015, p. 328).

Para reduzir as áreas afetadas e acelerar o restabelecimento da energia elétrica, o sistema de potência utiliza procedimentos operacionais predefinidos e automatismos adequados. Um dos dispositivos automáticos é o relé de proteção, que, junto a outros equipamentos conectados ao sistema, detecta condições indesejáveis em uma zona de proteção e isola a parte afetada [10].

Os relés entram em ação após a ocorrência de perturbações, o que torna sua resposta rápida e essencial. Essa agilidade garante a proteção dos equipamentos, isolando-os das falhas antes que sofram danos. Além disso, os relés desempenham outras funções como, proteger a segurança das pessoas, reduzir o impacto sobre equipamentos próximos e, sobretudo, preservar a integridade do sistema elétrico, facilitando seu restabelecimento [10].

Além dos relés existem outros equipamentos que juntos, formam o sistema de proteção, representado pela Figura 1.

Figura 1 - Sistema de proteção.

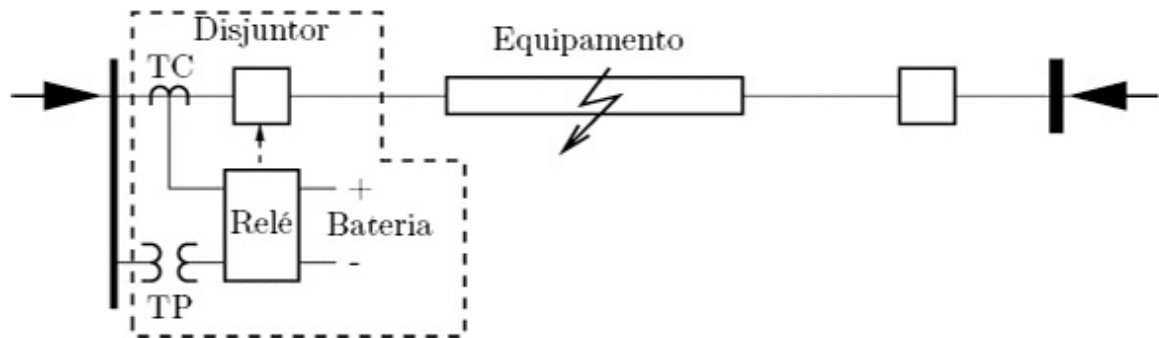


Fonte: SATO; FREITAS, 2015.

- **Transformadores**
Reduzem as medidas de corrente (TC) e de tensão (TP), isolando os relés da alta tensão, adequando os valores secundários.
- **Relé de proteção**
Compara o valor medido com valor previamente definido, sempre que o valor medido for superior ao valor definido, o relé irá atuar.
- **Disjuntor**
Dispositivo projetado para isolar partes do sistema ou circuitos que apresentem falhas, interrompendo a corrente quando ultrapassa os limites operacionais previstos.

Além dos equipamentos citados, também é necessário o uso de uma bateria para alimentar o sistema de proteção, sistema de controle e sistema de sinalização. Na Figura 2 é possível observar um diagrama unifilar de um sistema de proteção com a adição da bateria [10].

Figura 2 - Diagrama unifilar.



Fonte: SATO; FREITAS, 2015.

2.2 Características dos relés de proteção

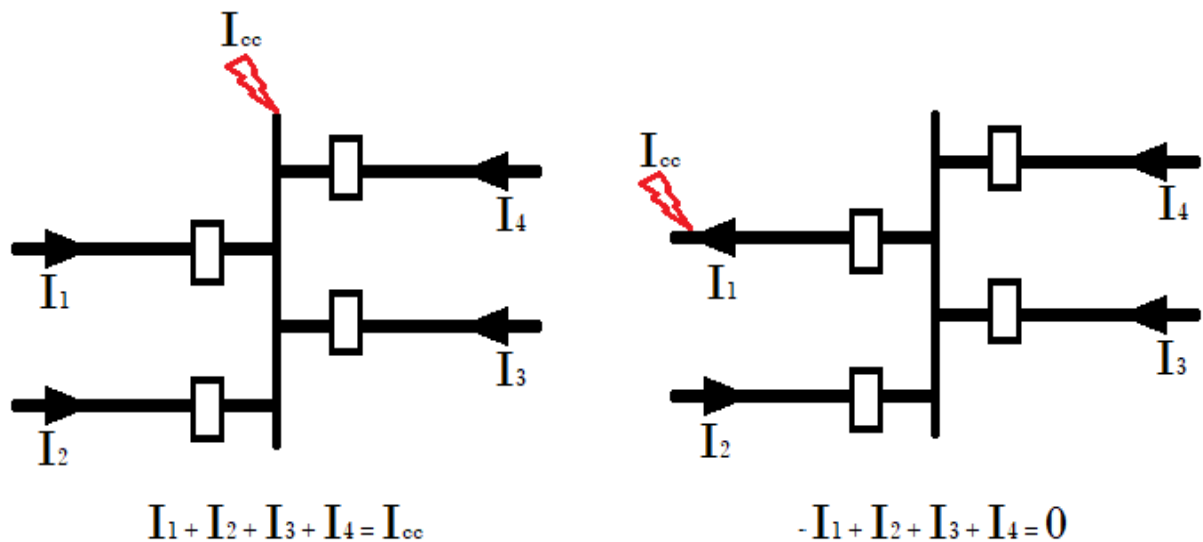
Segundo Sato (2015), para que o relé de proteção atue, são necessários alguns requisitos:

- **Confiabilidade e segurança**
É o nível de confiança na precisão da operação, evitando situações indesejadas, como a recusa de atuação (não atua quando necessário) e a atuação incorreta (atua sem necessidade).
- **Seletividade e zonas de proteção**
A seletividade é a capacidade do sistema de proteção para isolar somente a seção atingida pelo curto-circuito. Zona de proteção são áreas específicas dentro do sistema elétrico onde os relés estão configurados para atuar. Todos os componentes do sistema de potência devem estar protegidos por pelo menos uma zona.
- **Velocidade**
É esperado isolar a área atingida pela falta rapidamente a fim de minimizar os danos causados pela corrente de curto-circuito.

2.3 Proteção diferencial de barramento

Essa proteção utiliza o princípio da primeira Lei de Kirchoff [6], onde o somatório das correntes que entram em um nó deve ser igual ao somatório das correntes que saem. Quando o barramento apresenta uma falta interna, o somatório total das correntes que entram possui um valor diferente de zero. Por outro lado, quando esse valor for igual a zero, significa que a falta é externa ao barramento protegido, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Proteção diferencial de um barramento.



Fonte: Autoria Própria.

2.4 Zona de proteção de barramentos

A zona de proteção de barramentos possui duas características: detecção e eliminação de faltas. A detecção é definida pela localização dos TCs ligados ao barramento, e a eliminação é delimitada pela localização dos disjuntores conectados no arranjo do barramento. A proteção diferencial de barra (87B), deve atuar somente para faltas dentro da zona de proteção definida entre os TCs, deixando de atuar em faltas fora da zona de proteção ou em casos de manobras [7].

2.5 Configurações de barramento

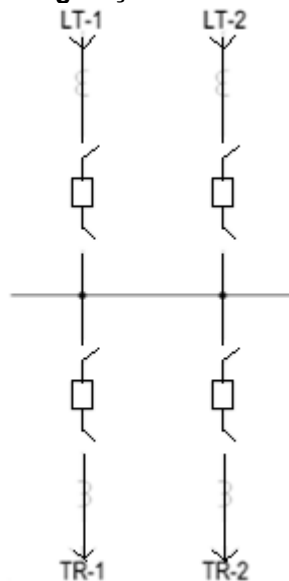
Apesar de não ser o foco deste trabalho, vários tópicos devem ser estudados para confirmar a configuração do barramento, alguns desses atributos são [2]:

- Custo;
- Flexibilidade operativa;
- Simplicidade do sistema de operação;
- Confiabilidade – Continuidade de serviço para os circuitos da subestação em decorrência de uma falta;
- Facilidade para expansão.

2.5.1 Barramento simples

Essa configuração é a mais simples encontrada em uma subestação. Tem como vantagens a economia e uma operação simplificada. Porém, apresenta baixa flexibilidade e possui a menor confiabilidade, sendo que para qualquer defeito e trabalhos de manutenção, sejam eles no barramento ou no disjuntor implicam no desligamento da subestação. A Figura 4 ilustra a configuração de barramento simples [4].

Figura 4 - Configuração barramento simples.



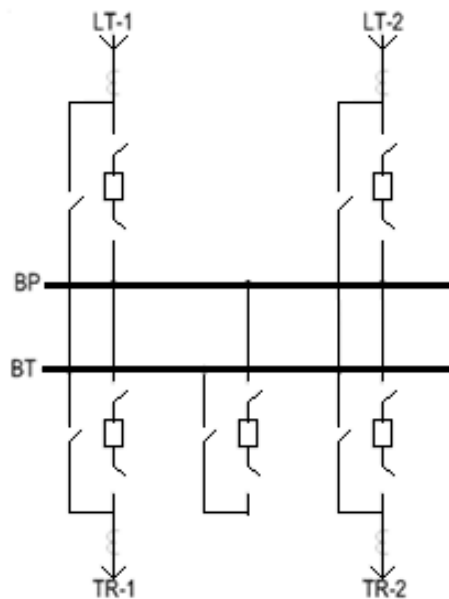
Fonte: Sergio Frontin [2].

2.5.2 Barramento principal e transferência

Na Figura 5 é vista uma configuração de barramento principal e transferência. Ao ser adicionado um barramento de transferência (BT) que se conecta com o barramento principal (BP) através de um disjuntor e este disjuntor em condições normais de operação permanece aberto. Caso seja necessário realizar um trabalho de manutenção nos demais disjuntores sem afetar a carga, o disjuntor de transferência passa de aberto para fechado, energizando assim o barramento de transferência [4].

Tem como vantagem uma maior flexibilidade para manutenção e reparos em disjuntores [2], aumentando assim a continuidade de fornecimento de energia para as cargas consumidoras. Apresenta como desvantagem defeitos no barramento principal, que necessita desligar toda a subestação [4].

Figura 5 - Configuração barramento principal e transferência.



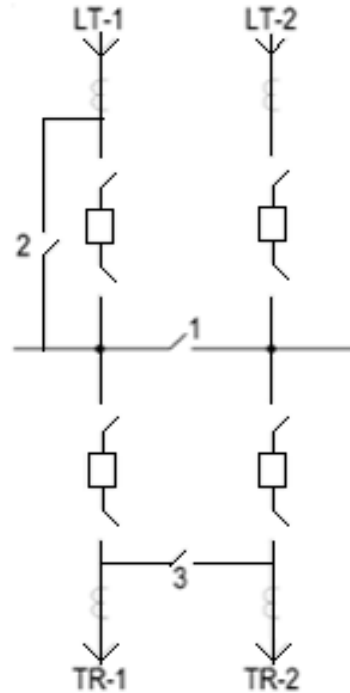
Fonte: Sergio Frontin [2].

2.5.3 Barramento simples seccionado

Essa configuração de barramento é muito parecida com o barramento simples, mas conta com uma melhoria, a chave seccionadora, que faz a conexão de dois barramentos. Em casos de manutenção ou falhas em um dos barramentos, o

outro pode funcionar normalmente [8], pois nesse arranjo é possível desligar o disjuntor que faz a interconexão, diminuindo assim as perdas das cargas de uma subestação. A Figura 6 ilustra a configuração de barramento simples seccionado.

Figura 6 - Configuração barramento simples seccionado.

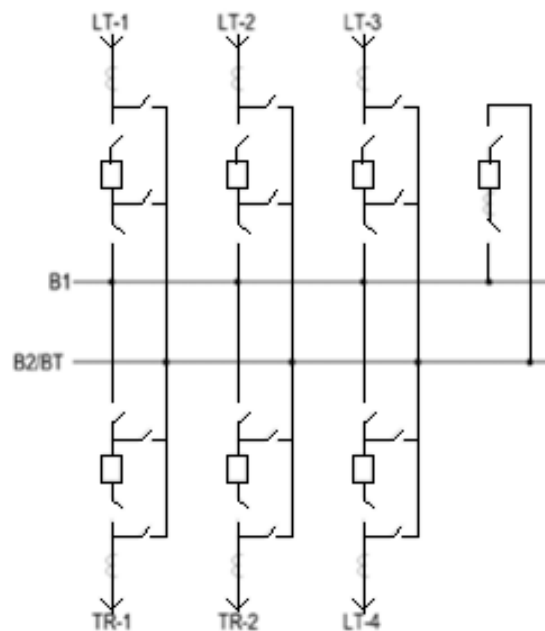


Fonte: Sergio Frontin [2].

2.5.4 Barramento duplo, 1 disjuntor/4 chaves

Esse arranjo é uma evolução do barramento principal e transferência [4]. O arranjo barramento duplo, 1 disjuntor/4 chaves, conforme Figura 7, possuiu um maior número de chaves seccionadoras instaladas, liberando assim todos os disjuntores para manutenção e reparos sem que seja necessário desligar o circuito correspondente [2]. Esta configuração apresenta boa flexibilidade de operação e continuidade de fornecimento, porém é necessário um investimento elevado.

Figura 7 - Configuração barramento duplo, 1 disjuntor/4 chaves.

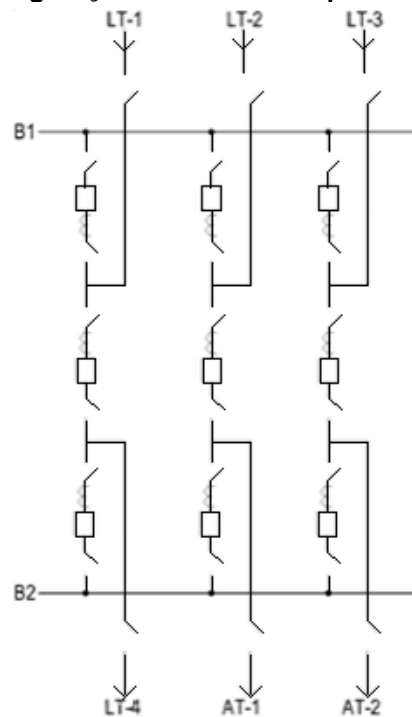


Fonte: Sergio Frontin [2].

2.5.5 Barramento duplo e disjuntor e meio

Nesse arranjo há um disjuntor central que faz a conexão dos circuitos com um dos barramentos. Em casos de falhas em um dos barramentos, o disjuntor central que é compartilhado por ambos circuitos, faz a reconexão. Qualquer defeito no disjuntor, chave ou barra não interrompe a carga associada, entretanto é necessário um elevado investimento e o esquema de proteção apresenta complexidade operacional [4]. A Figura 8 ilustra a configuração de barramento duplo e disjuntor e meio.

Figura 8 - Configuração barramento duplo e disjuntor e meio.

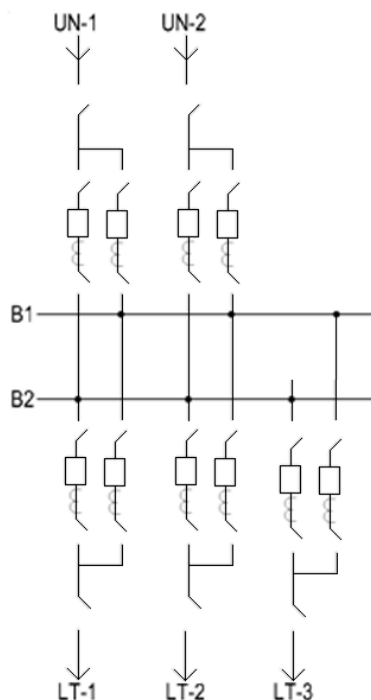


Fonte: Sergio Frontin [2].

2.5.6 Barramento duplo com disjuntor duplo

Esta configuração fica em desvantagem comparando com o barramento duplo e disjuntor e meio, pois não há disjuntor de interligação de barras. “Embora esta configuração seja de alto desempenho, uma eventual perda das duas barras (baixa probabilidade) provoca a perda total de conectividade na subestação”. (FRONTIN, 2013, p. 100). Outra desvantagem é o custo elevado da instalação. Na Figura 9 tem-se a representação da configuração de barramento com disjuntor duplo.

Figura 9 - Configuração barramento com disjuntor duplo.



Fonte: Sergio Frontin [2].

2.6 Proteção diferencial de alta impedância

Essa proteção é utilizada em subestações que possuem condutores com valor de impedância muito alta, devido as grandes dimensões no comprimento desses condutores dos circuitos secundário dos TCs [4]. Assim, faltas externas à zona de proteção o TC pode saturar, por causa da diferença das impedâncias dos condutores em relação ao relé.

Quando ocorre a saturação do TC, o somatório das correntes que entram é diferente da soma das correntes que saem, “provocando um desligamento intempestivo dos disjuntores envolvidos na proteção diferencial do barramento.” (MAMEDE, 2011, p. 504).

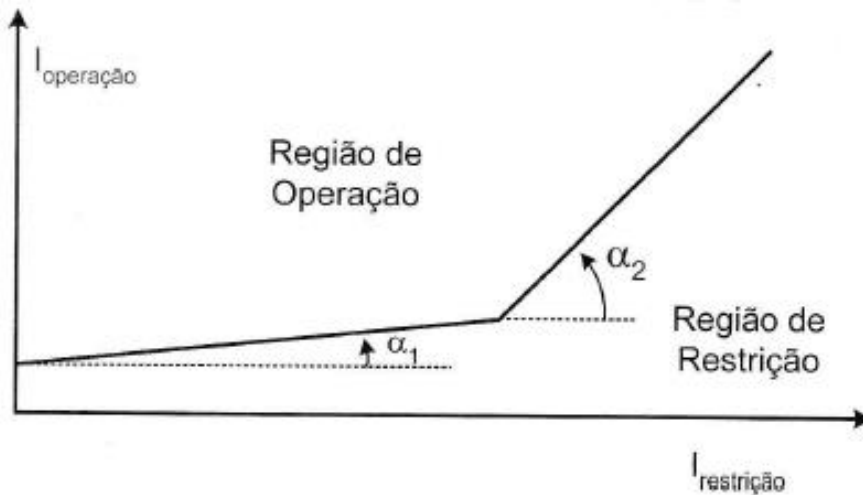
2.7 Proteção diferencial percentual de barra

A utilização dessa proteção “confere melhor qualidade à proteção, principalmente para os curtos-circuitos elevados fora da barra” (KINDERMANN, 2008, p. 138), devido a maior estabilidade da região de restrição, principalmente na ocorrência de saturação do TC. Pode ser usado dois ou mais ajustes de declividade

(slope), ajustando uma declividade baixa para valores menores de correntes e uma declividade alta para valores maiores (região de saturação do TC) [9].

A Figura 10 representa a característica de operação da proteção diferencial percentual com dois ajustes de declividade (slope) [9]. O primeiro ajuste, possui um valor de inclinação baixo, tornando a região mais sensível e destinada a detectar faltas internas. Já o segundo slope, apresenta uma inclinação mais elevada, o que reduz a sensibilidade da proteção, porém, aumenta a confiabilidade contra atuações indevidas.

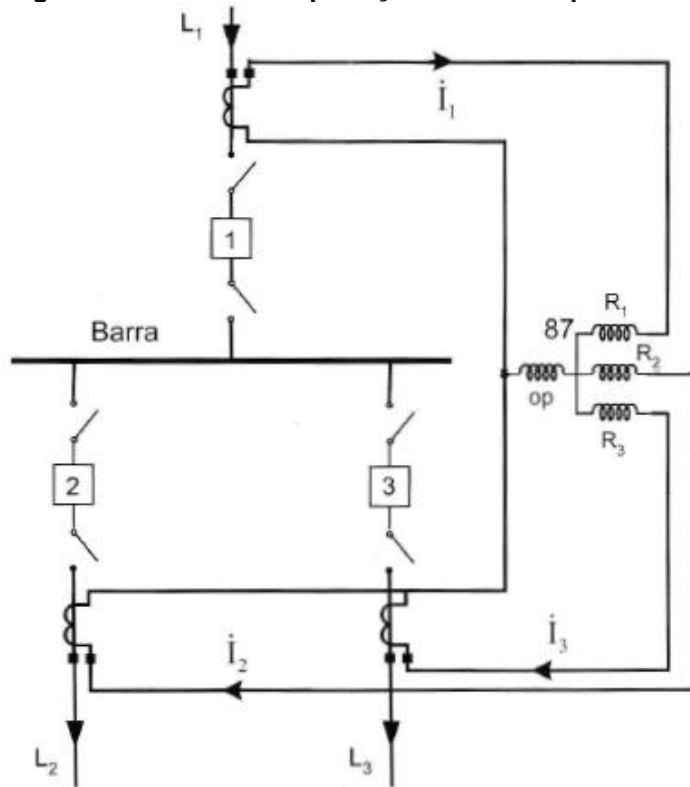
Figura 10 - Proteção diferencial percentual com dois ajustes de declividade.



Fonte: Geraldo Kindermann [9].

A Figura 11 mostra a conexão da proteção diferencial percentual em uma subestação.

Figura 11 - Conexão da proteção diferencial percentual.



Fonte: Geraldo Kindermann [9].

Em uma operação normal ou para faltas externas à barra, tem-se:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 \quad (1)$$

Desse modo, na proteção diferencial percentual (87), as correntes de operação e restrição ficam da seguinte forma [9]:

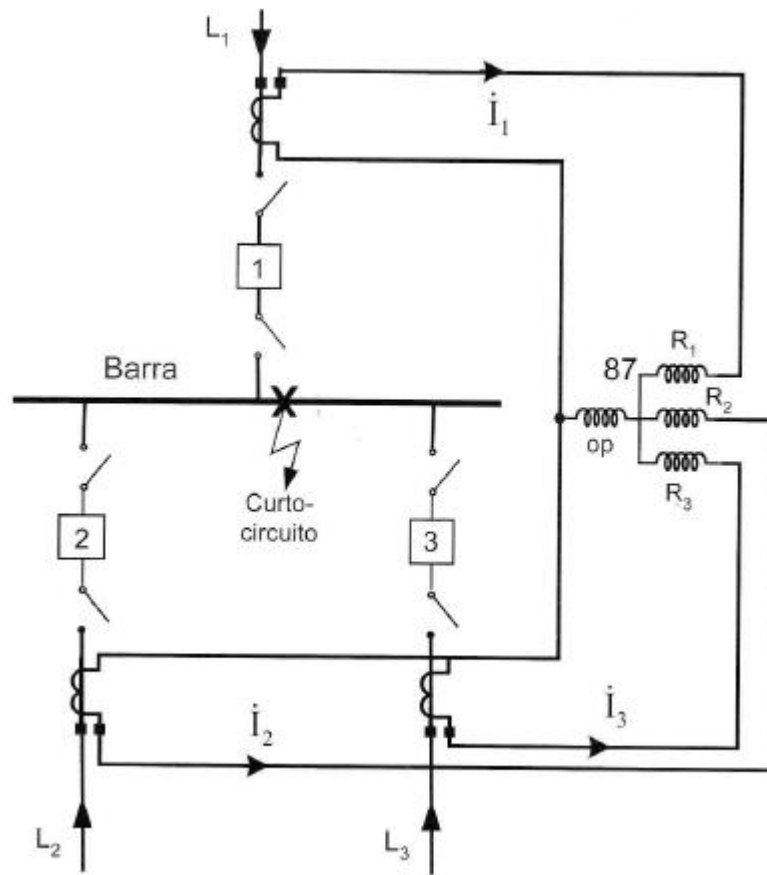
$$I_{\text{operação do 87}} = |\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3| = \text{zero} \quad (2)$$

$$I_{\text{restrição do 87}} = \frac{|\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3|}{3} = \text{Valor elevado} \quad (3)$$

Com um valor elevado de restrição e baixo na operação a proteção não irá atuar.

Para faltas internas à barra, Figura 12, pode-se notar que as correntes $\dot{I}_2$ e $\dot{I}_3$ acabam invertendo o sentido.

Figura 12 - Falta interna no barramento.



Fonte: Geraldo Kindermann [9].

$$I_{\text{operação do 87}} = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3| = \text{Valor elevado} \quad (4)$$

$$I_{\text{restrição do 87}} = \frac{|\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3|}{3} = \text{zero} \quad (5)$$

Como as correntes $\dot{I}_2$ e $\dot{I}_3$ inverteram o sentido, elas “anulam ou quase anulam a restrição da corrente $\dot{I}_1$. Portanto, a proteção 87 fica praticamente sem restrição interna” (KINDERMANN, 2008, p.140). Já a corrente de operação corresponde a somatória das correntes, um valor elevado, garantindo assim a atuação da proteção diferencial percentual [9].

2.8 Característica da proteção implantada

A lógica de proteção diferencial percentual de barra desse trabalho foi baseado no sistema de proteção do relé REB500, segundo o fabricante ABB. O sistema foi projetado para proteção seletiva de alta velocidade de instalações de barramento em média e alta tensão. Outra característica é a flexibilidade para se adaptar a diferentes configurações de subestações, como barramentos simples, duplos ou sistemas mais complexos, tendo uma capacidade para detectar e isolar falhas em até 32 zonas de proteção [11].

O algoritmo de proteção é baseado em dois princípios de medição, que foram comprovados com sucesso pela ABB.

Para o primeiro princípio, é necessário o cálculo da corrente diferencial (corrente de operação), cuja corrente é obtida ao comparar as correntes que entram e saem de uma zona de proteção no barramento. Além da corrente diferencial, são utilizados dois parâmetros para detectar as falhas, sendo eles:

1. I_{Kmin} : O parâmetro I_{Kmin} é a corrente mínima de falta que pode ser detectada pelo sistema;
2. K_{st} : O parâmetro K_{st} é um fator de sensibilidade, ajustado para evitar atuações indevidas.

Os seguintes parâmetros retratados no Quadro 1, podem ser utilizados nas configurações do algoritmo para a proteção.

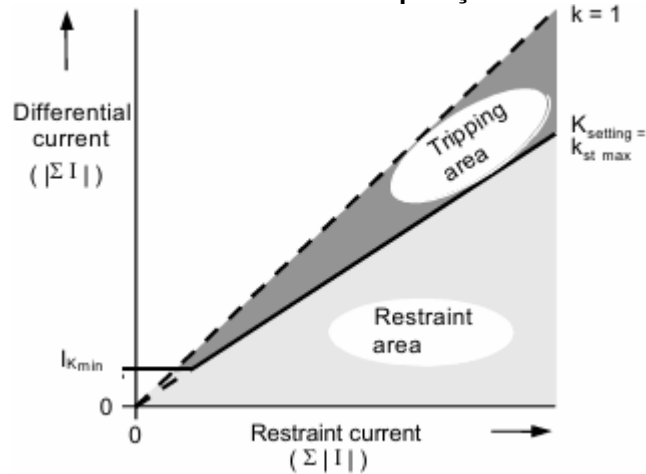
Quadro 1 – Parâmetros do algoritmo de proteção.

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Padrão	Unidade
I_{Kmin}	500	6000	1000	A
K_{st}	0.7	0.9	0.8	

Fonte: ABB, (2000).

A Figura 13, representa as áreas de atuação e restrição, onde o relé irá atuar na “Tripping area” e deixar de atuar na “Restraint area”.

Figura 13 - Curva característica de operação do relé REB500.



Fonte: ABB, (2000).

Para encontrar o valor da corrente diferencial, é realizado o cálculo do módulo do somatório das correntes, definida através da equação (6).

$$I_{Diff} = \left| \sum_{n=1}^N I_{Ln} \right| \quad (6)$$

Onde:

N: Total de números de correntes;

I_{Ln} : Fasor da corrente fundamental extraída pela TDF na fase L da corrente n.

Para a corrente de restrição, é realizado o somatório dos módulos das correntes, conforma a equação (7).

$$I_{Rest} = \sum_{n=1}^N |I_{Ln}| \quad (7)$$

Para o primeiro princípio se concretizar, são necessários dois fatores representados através da equação (8) e equação (9).

$$I_{Diff} > I_{Kmin} \quad (8)$$

$$K_{st} = \frac{I_{Diff}}{I_{Rest}} > K_{st\ max} \quad (9)$$

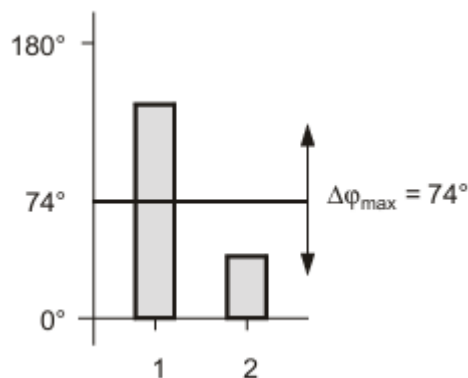
O segundo princípio, a lógica de proteção do relé REB500, faz a comparação dos ângulos de fase das correntes conectadas ao barramento, aumentando assim a precisão na hora de detectar falhas internas. Em condições normais ou durante faltas externas, essa comparação resulta em valores elevados. No entanto, em casos de faltas internas no barramento, os ângulos comparados apresentam valores reduzidos, a equação (10) define o critério de disparo com base no ângulo configurado ($\Delta\phi_{set}$).

$$\Delta\phi < \Delta\phi_{set} \quad (10)$$

Na Figura 14, a barra de número 1 representa uma situação de falta externa, já a barra de número 2, indica uma condição de falta interna ao barramento. Segundo a ABB, para uma operação adequada, é necessário excluir alimentadores que apresentam pouca ou nenhuma corrente da comparação dos ângulos de fase, evitando assim ruídos gerados por essas correntes.

O valor da diferença de fase para disparo é de 0° a 74° , ou seja, se os ângulos de fase de todas as correntes estiverem dentro de uma faixa de 74° , a função de comparação de fase decide que há uma falha interna [11].

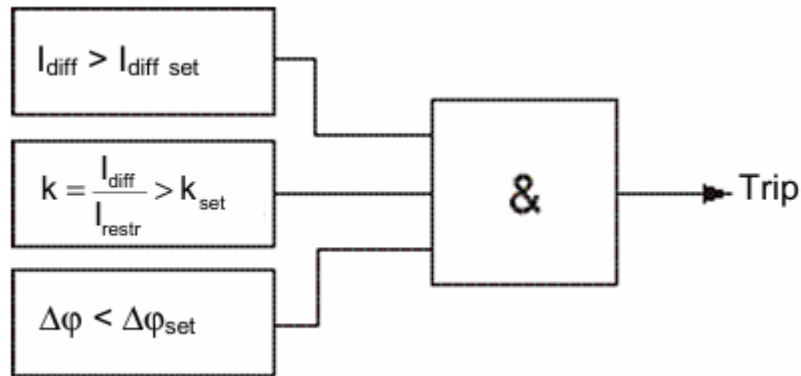
Figura 14 - Princípio de comparação dos ângulos de fase.



Fonte: ABB, (2000).

A Figura 15, representa a lógica do acionamento da proteção, se todos os princípios foram atendidos conforme as suas configurações, o relé irá atuar.

Figura 15 - Lógica da proteção de barra.



Fonte: ABB, (2000).

2.9 Extração da Componente Fundamental

A partir das simulações realizadas e dos dados de corrente exportados para o MATLAB, o algoritmo procederá com a extração da componente fundamental utilizando a Transformada Discreta de Fourier (TDF).

A TDF, representada pela equação 11, é uma ferramenta essencial no processamento de sinais discretos. Ela transforma uma sequência finita de amostras de um sinal no tempo em uma representação no domínio da frequência, mostrando como as diferentes frequências estão distribuídas no sinal [12].

A TDF pode ser definida como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right) - j \sin\left(\frac{2\pi}{N}k\right) \quad (11)$$

Onde:

N: Número total de amostras;

x_n : Sequência temporal;

k: Índice de frequência, variando de 0 até N – 1;

$X[k]$: Valores complexos obtidos com a TDF.

A frequência de amostragem utilizada foi de 960 Hz. Com uma frequência fundamental de 60 Hz, teremos, portanto, $N = 16$ amostras em um ciclo de sinal. Dessa forma, a partir da extração dos fasores fundamentais obtidos pela TDF, é possível calcular as correntes de restrição e operação.

3 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA UTILIZADO

A modelagem de sistemas elétricos reais com ferramentas computacionais tornou-se indispensável ao longo dos anos. Isso permite prever falhas antes da implementação, dimensionar dispositivos de segurança, economizar recursos e entender melhor o sistema, aumentando a eficiência dos equipamentos. Nos sistemas de potência, onde o capital envolvido é alto, essa prática se popularizou como uma forma segura e econômica de realizar testes e implementações. (Santos 2018, p.31, apud FONSECA; LEAL,2003).

3.1 Estudo de curto-circuito da ONS

O Submódulo 11.3, relacionado aos estudos de curto-circuito, é fundamental para a administração e operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). Ele aborda questões de proteção de sistemas elétricos, com foco em estudos de curto-circuito. Os estudos realizados nesse submódulo envolvem o cálculo dos níveis de curto-circuito trifásico e monofásico, assim como a análise da relação X/R , para as barras da rede básica e as Demais Instalações de Transmissão (DIT). Esses parâmetros são essenciais para diversas análises elétricas, como o ajuste de proteções e adequação de disjuntores, no horizonte do Plano de Ampliações e Reforços na Rede Básica (PAR) e nas análises de perturbações no sistema [14].

3.2 Software ATP

Segundo Amon Filho e Pereira (2001).

O programa ATP/EMTP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz admitância de barras.

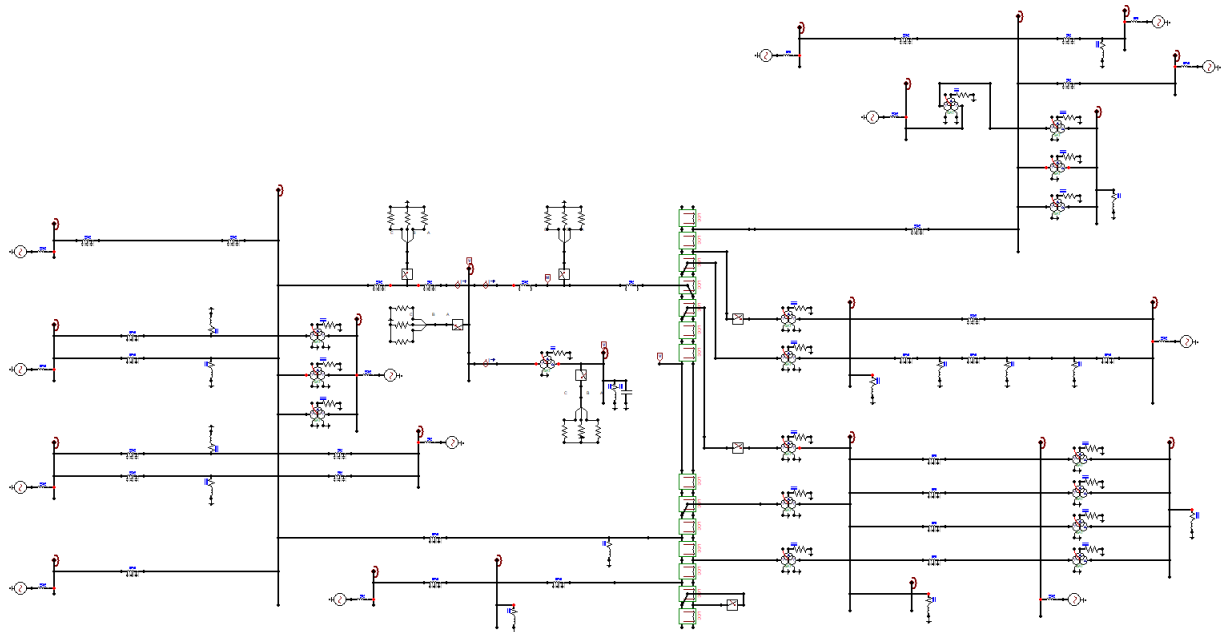
O ATPDraw, permite ao usuário construir circuitos elétricos usando uma ampla variedade de componentes que representam os principais elementos de uma rede elétrica, possibilitando a construção de circuitos monofásicas e trifásicos. Uma das vantagens do software é sua integração com o programa gráfico PLOTXY, que facilita o processamento e a visualização dos resultados simulados em gráficos, permitindo uma análise visual e eficaz dos dados simulados [15].

Além disso, o ATPDraw oferece ferramentas para configurar parâmetros dos elementos e simular diferentes condições de operação, tornando-se uma ferramenta versátil e amplamente utilizada na modelagem e análise de sistemas elétricos de potência.

3.3 Dados do sistema simulado

Na Figura 16, observa-se o sistema elétrico simulado por meio do software ATPDraw. Este SEP está sendo reutilizado devido às suas características de versatilidade e confiabilidade, que o tornam eficiente para a modelagem e simulação. A reutilização desse SEP baseia-se nos resultados positivos obtidos em estudos anteriores, garantindo a segurança das simulações.

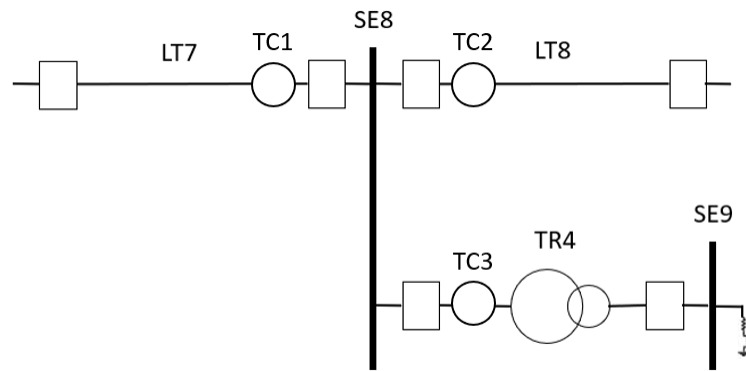
Figura 16 – Sistema elétrico simulado.



Fonte: Autoria Própria.

Para aplicar a metodologia, foi delimitada uma área de interesse representada através da Figura 17. Neste trabalho, serão utilizadas as linhas LT7, LT8 e TR4, trecho entre as duas subestações SE8 e SE9, além do barramento SE8. Com a área definida, serão realizadas medições das correntes nas linhas de transmissões e no barramento, possibilitando a utilização destes dados para análises.

Figura 17 – Área de interesse.



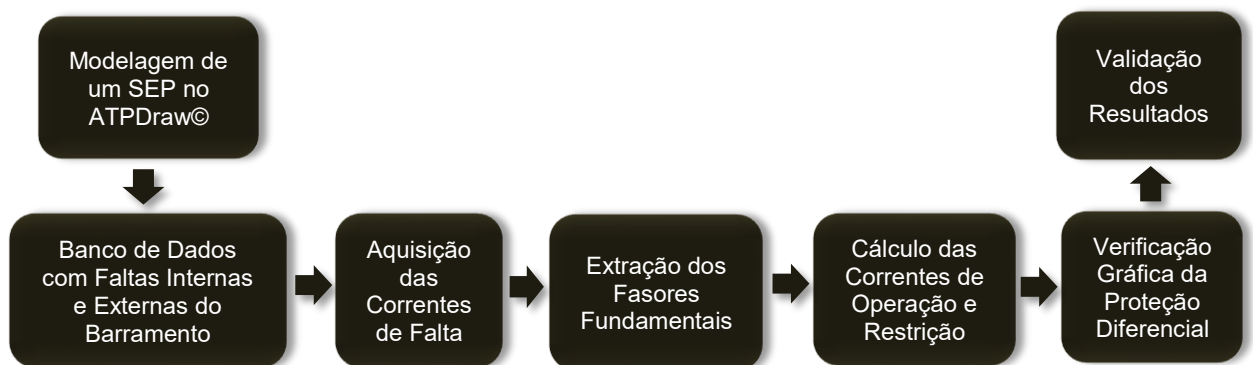
Fonte: Autoria Própria.

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste trabalho foram identificadas faltas internas e externas a um barramento de um sistema elétrico, utilizando a transformada discreta de Fourier para filtrar as componentes fundamentais das correntes dos bays conectados a este barramento, para posterior cálculo da identificação de falta interna ou externa a este.

Para facilitar o entendimento do leitor, a Figura 18 mostra um fluxograma das etapas realizadas.

Figura 18 - Fluxograma da proteção de barramento.



Fonte: Autoria Própria.

4.1 Modelagem de um SEP no ATPDraw©

Para iniciar, foi simulado um sistema elétrico de potência no ATPDraw© para identificar faltas internas e externas do barramento, conforme detalhado no capítulo 3.

4.2 Banco de dados com faltas internas e externas do barramento

Após as simulações das faltas, os valores obtidos foram armazenados em uma base de dados, totalizando 14 faltas internas e 42 faltas externas.

4.3 Aquisição das correntes de falta

Em seguida, com os registros oscilográficos, representando cada situação de falta aplicada no SEP, estes serão salvos e carregados no software MatLab.

4.4 Extração dos fasores fundamentais

Depois de obter as correntes de falta, foi utilizado a transformada discreta de Fourier para obter os fasores fundamentais das correntes envolvidas na análise.

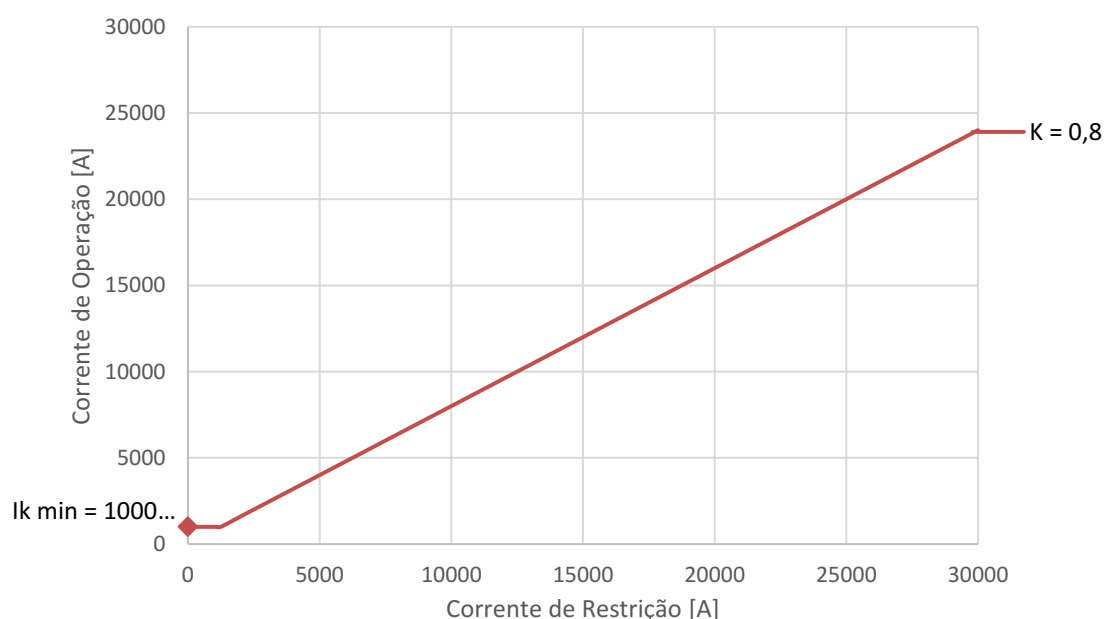
4.5 Cálculo das correntes de operação e restrição

Utilizando o MatLab e os fasores fundamentais de corrente, serão calculadas as correntes de operação e restrição, apresentadas na proteção diferencial percentual de barra, conforme equacionado na seção 8, do capítulo 2.

4.6 Verificação gráfica da proteção diferencial

Em seguida, será realizada uma validação gráfica da proteção diferencial. Para isso, a curva característica do relé REB500 será plotada utilizando os valores padrão do Quadro 1, onde o valor adotado para $I_{Kmin} = 1000\text{ A}$ e $K_{st} = 0,8$, conforme ilustrado na Figura 19. Como explicado no item 2.8, o relé será acionado se a corrente de curto-circuito apresentar um valor superior a 1000 A e a relação entre a corrente de operação pela corrente de restrição for maior que $0,8$. Além do princípio de comparação dos ângulos de fase apresentar um $\Delta\phi < 74^\circ$, valor máximo para a função de comparação de fase decidir que há uma falha interna.

Figura 19 - Curva característica.



Fonte: Autoria Própria.

4.7 Validação dos resultados

Por fim, após a execução de todas as etapas anteriores, será realizada a validação dos resultados obtidos. Essa etapa é fundamental para assegurar a precisão e confiabilidade dos dados processados, verificando se, com os parâmetros adotados, as simulações de faltas internas e externas no barramento encontram-se nas áreas esperadas.

5 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados referentes aos ajustes da função diferencial no relé selecionado, resultados das faltas simuladas e desempenho da proteção diferencial.

Ao todo, foram realizadas 56 simulações de faltas, incluindo 14 faltas internas e 42 externas, bem como, faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas, além disso, também foi alterado o ângulo de incidência da falta em 0 e 90 graus.

Conforme explicado no item 2.8, para realizar os cálculos das diferenças dos ângulos, foi considerado apenas as correntes das linhas LT7 e LT8, desconsiderando assim, a corrente do TR4, devido aos baixos valores das suas fases.

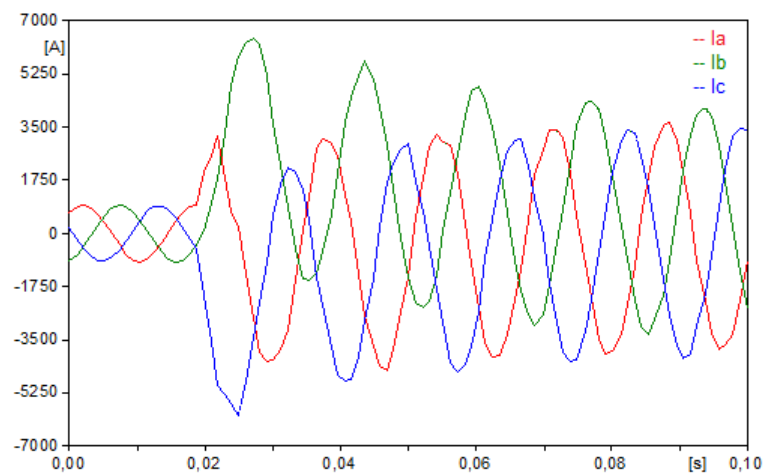
5.1 Resultados para Faltas Trifásicas

Serão apresentados dois casos característicos de faltas trifásicas. Para o primeiro, explicado no tópico 5.1.1, foi simulado uma falta trifásica interna ao barramento, já o segundo caso, representa uma falta externa ao barramento, mais específico na linha de transmissão 8 (LT8).

5.1.1 Falta Trifásica Interna

Na Figura 20, é possível verificar o comportamento das fases após a aplicação de uma falta trifásica a 90° no barramento. A corrente apresentada corresponde especificamente ao trecho LT7, com as medições do TC1.

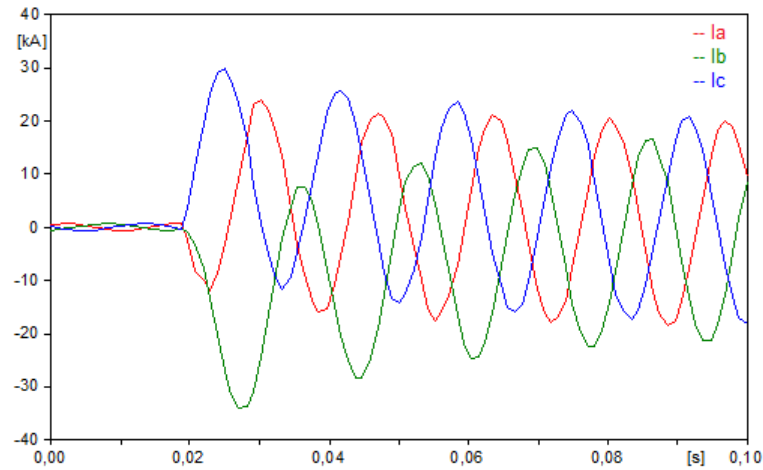
Figura 20 – Falta trifásica interna do ponto de vista do TC1.



Fonte: Autoria Própria.

Em sequência, a Figura 21 retratada a mesma falta trifásica, porém, analisando o trecho LT8, TC2.

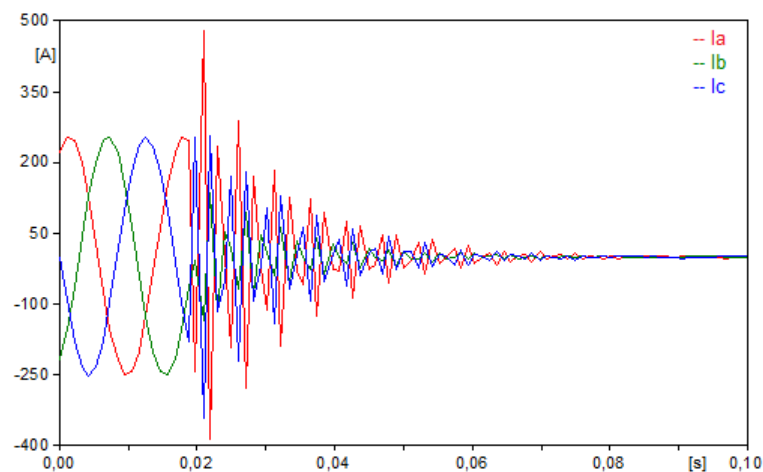
Figura 21 – Falta trifásica interna do ponto de vista do TC2.



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, a Figura 22, representa o trecho entre as duas subestações SE8 e SE9, TC3.

Figura 22 – Falta trifásica interna do ponto de vista do TC3.

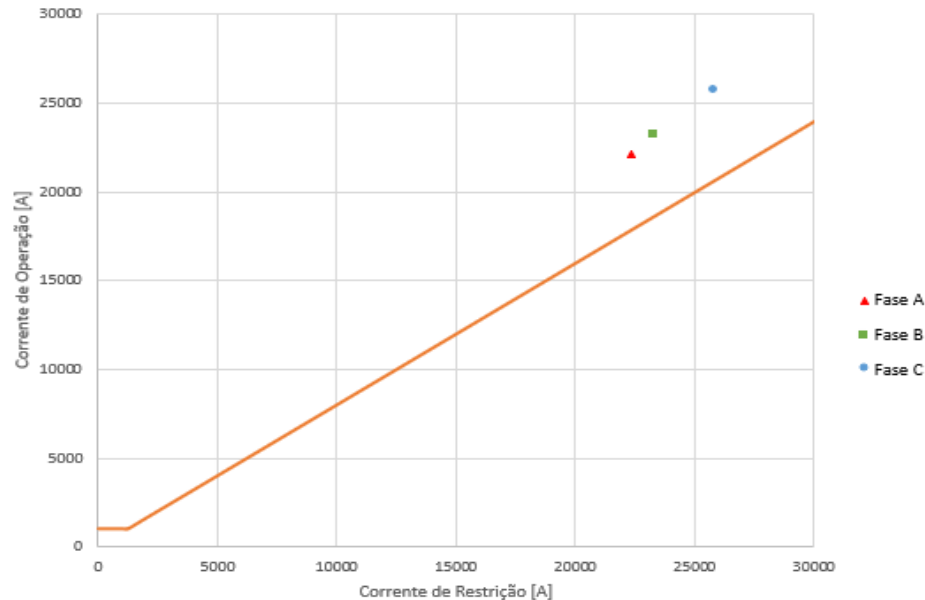


Fonte: Autoria Própria.

Após as extrações dos fasores fundamentais, foram realizados os cálculos da corrente de operação, corrente de restrição e comparação das fases. Na Figura 23, é possível observar as três fases A, B e C sobre os parâmetros utilizados na lógica do

relé REB500, levando a atuação da proteção diferencial. Na Figura 24 é vista a comparação das fases.

Figura 23 – Falta trifásica interna ao barramento sobre a curva característica de proteção.



Fonte: Autoria Própria.

Observa-se, através da Figura 23, que as fases A, B e C apresentam valores da corrente de operação superiores ao valor mínimo considerado no item 3.6, além da relação entre a corrente de restrição dividido pela corrente de operação apresentar um valor superior ao fator de sensibilidade “K”, assim, os dois primeiros critérios foram validados.

Os valores obtidos na simulação de falta trifásica interna estão apresentados nos Quadros 2 e 3. O Quadro 2 representa os valores das correntes após a aplicação da TDF, enquanto no Quadro 3 é possível verificar os valores das correntes de operação, restrição e suas relações.

Quadro 2 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta trifásica interna.

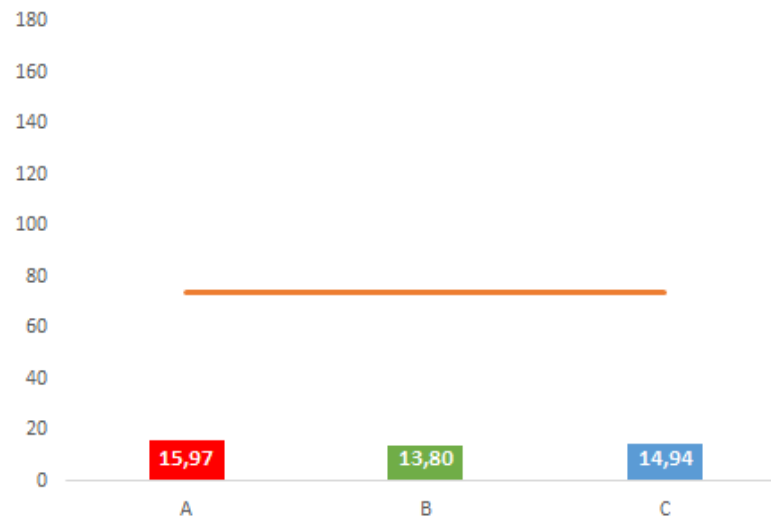
	Corrente TC1	Corrente TC2	Corrente TC3
Fase A	3813,33 $\angle$ -57,28 A	18488,22 $\angle$ -73,25 A	34,09 $\angle$ 164,36 A
Fase B	3975,38 $\angle$ -170,22 A	19334,83 $\angle$ 175,98 A	19,23 $\angle$ -21,13 A
Fase C	4304,70 $\angle$ 64,45 A	21501,29 $\angle$ 49,51 A	15,06 $\angle$ -8,6 A

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 3 – Corrente de operação e restrição para falta trifásica interna

	Corrente de Operação	Corrente de Restrição	Operação / Restrição
Fase A	22160 A	22336 A	0,992 A
Fase B	23197 A	23329 A	0,994 A
Fase C	25692 A	25821 A	0,995 A

Fonte: Autoria Própria.

Figura 24 – Comparação dos ângulos de fase para falta trifásica interna.

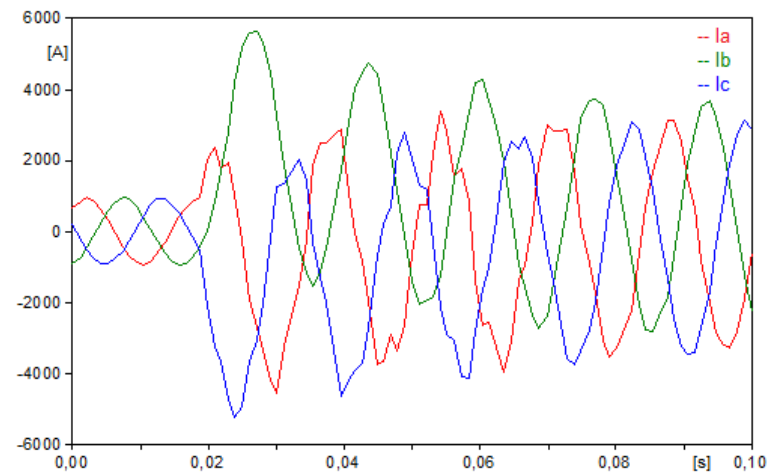
Fonte: Autoria Própria.

Já o terceiro critério para acionar a proteção, está representado na Figura 24, onde as comparações dos ângulos das três fases apresentam valores inferiores a 74° , comprovando ser um defeito interno.

5.1.2 Falta Trifásica Externa

Na simulação de uma falta externa ao barramento, foi considerada uma falta no trecho da linha de transmissão 8. A Figura 25, representa as fases da corrente que passa no trecho LT7, TC1.

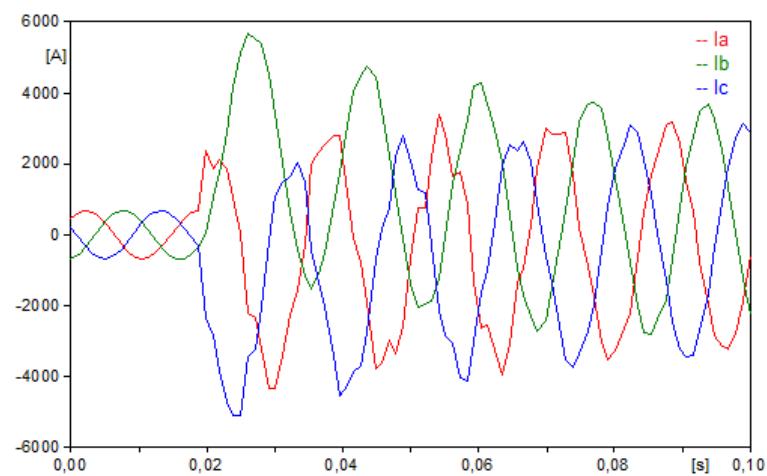
Figura 25 – Falta trifásica externa do ponto de vista do TC1.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 26, é retratada as fases A, B e C, porém, analisando o trecho LT8, TC2.

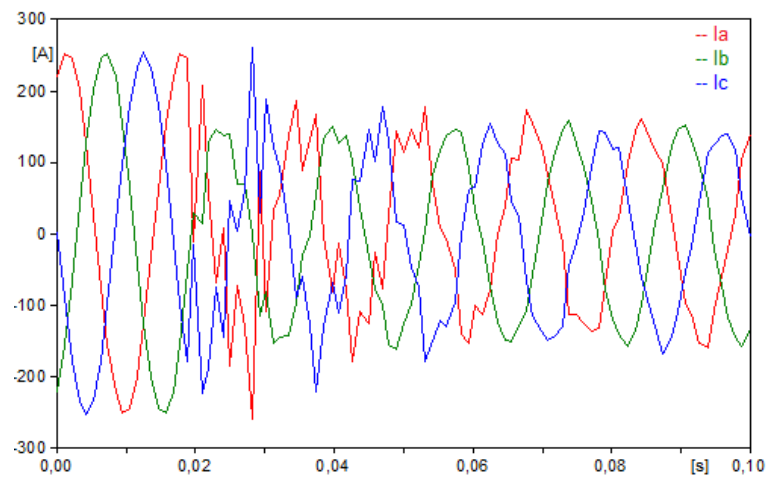
Figura 26 – Falta trifásica externa do ponto de vista do TC2.



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, a Figura 27, representa as fases da corrente do trecho entre as duas subestações SE8 e SE9, TC3.

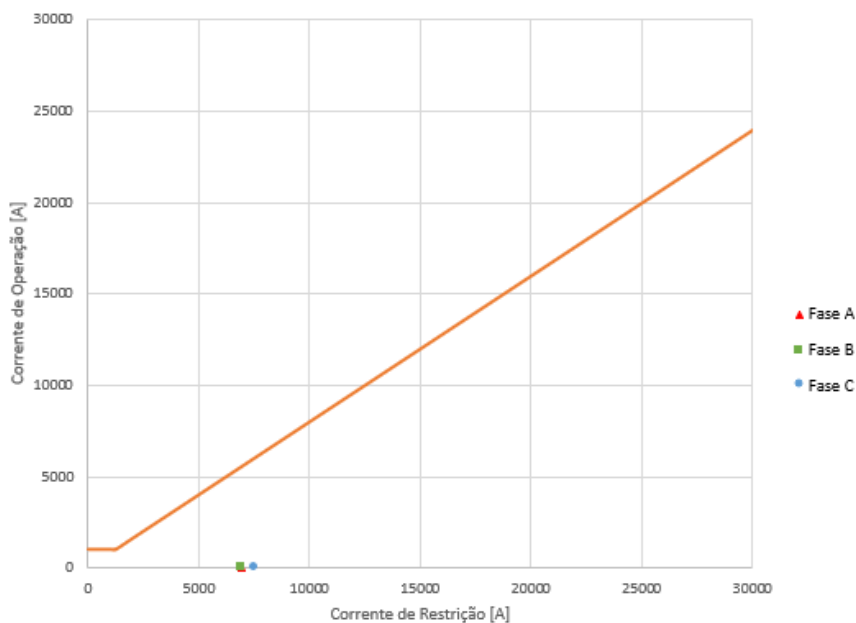
Figura 27 – Falta trifásica externa do ponto de vista do TC3.



Fonte: Autoria Própria

Da mesma forma, após as extrações dos fasores fundamentais, foram realizados os cálculos da corrente de operação, corrente de restrição e comparação das fases, na Figura 28, é possível observar as três fases A, B e C sobre os parâmetros utilizados na lógica do relé REB500.

Figura 28 – Falta trifásica externa ao barramento sobre a curva característica de proteção.



Fonte: Autoria Própria.

Conforme pode ser visto na Figura 28, as fases A, B e C estão na área de restrição da curva característica do relé, dessa forma, pode-se concluir que a proteção não atuou perante a falta trifásica externa ao barramento.

Os valores obtidos na simulação de falta trifásica interna estão apresentados nos Quadros 4 e 5. O Quadro 4 representa os valores das correntes após a aplicação da TDF, enquanto no Quadro 5 é possível verificar os valores das correntes de operação, restrição e suas relações.

Quadro 4 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta trifásica externa.

	Corrente TC1	Corrente TC2	Corrente TC3
Fase A	3454,58 $\angle$ -54,97 A	3424,88 $\angle$ 124,43 A	46,54 $\angle$ 175,07 A
Fase B	3487,64 $\angle$ -169,39 A	3467,78 $\angle$ 10,6 A	19,87 $\angle$ 12,81 A
Fase C	3760,02 $\angle$ 67,4 A	3762,74 $\angle$ -113,03 A	28,25 $\angle$ -17,29 A

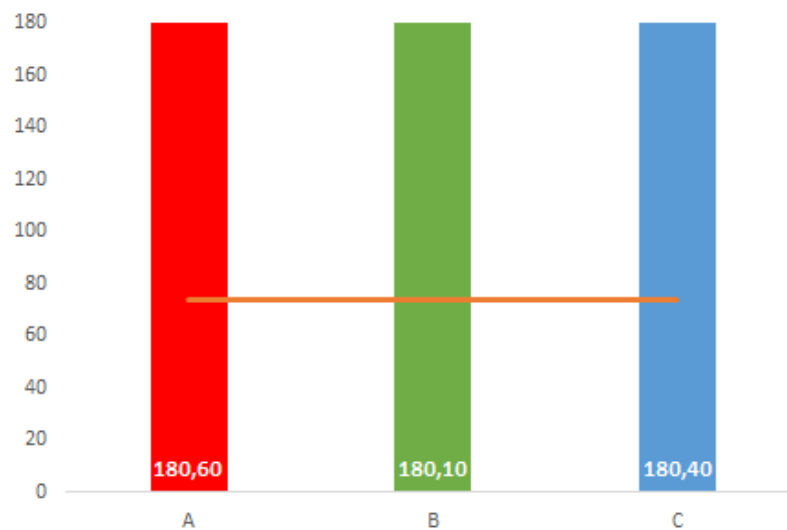
Fonte: Autoria Própria.

Quadro 5 – Corrente de operação e restrição para falta trifásica externa.

	Corrente Operação	Corrente de Restrição	Operação / Restrição
Fase A	0 A	6926 A	0
Fase B	0 A	6975 A	0
Fase C	0 A	7551 A	0

Fonte: Autoria Própria.

Figura 29 – Comparação dos ângulos de fase para falta trifásica externa.



Fonte: Autoria Própria.

Através da Figura 29, também é possível concluir que a não atuou, pois o $\Delta\phi$ dos ângulos apresentam valores superiores do limite.

5.1.3 Resultados das Simulações de Faltas Trifásicas

Os resultados para todas as simulações de faltas trifásicas estão apresentados no Quadro 6, onde é possível verificar se a proteção operou ou restringiu.

Quadro 6 – Resultados das simulações de faltas trifásicas.

Faltas Trifásicas		
Localizações	Incidência a 0º	Incidência a 90º
Interna ao Barramento	Operou	Operou
Linha de Transmissão 7	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão 8	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão TR4	Restringiu	Restringiu

Fonte: Autoria Própria.

Como apresentado no Quadro 6, o relé operou nas duas faltas internas ao barramento protegido e deixou de atuar nas seis faltas aplicadas externamente.

Assim, a metodologia empregada demonstrou-se eficaz para as faltas trifásicas simuladas, confirmando a seletividade e confiabilidade da lógica proposta.

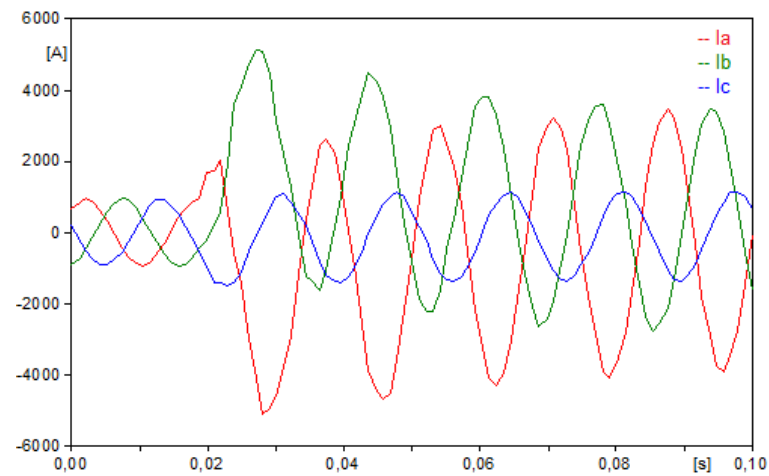
5.2 Resultados Para Faltas Bifásicas

A seguir, serão apresentados dois casos de faltas bifásicas. O primeiro, descrito no item 5.2.1, corresponde a uma falta bifásica interna ao barramento protegido, ocorrendo entre as fases A e B. No segundo caso, foi simulada uma falta bifásica externa entre as fases A e B, localizada na linha de transmissão 8 (LT8).

5.2.1 Falta Bifásica Interna

Na Figura 30, é possível verificar o comportamento das fases após a aplicação de uma falta bifásica a 90º no barramento. A corrente apresentada corresponde especificamente ao trecho LT7, TC1.

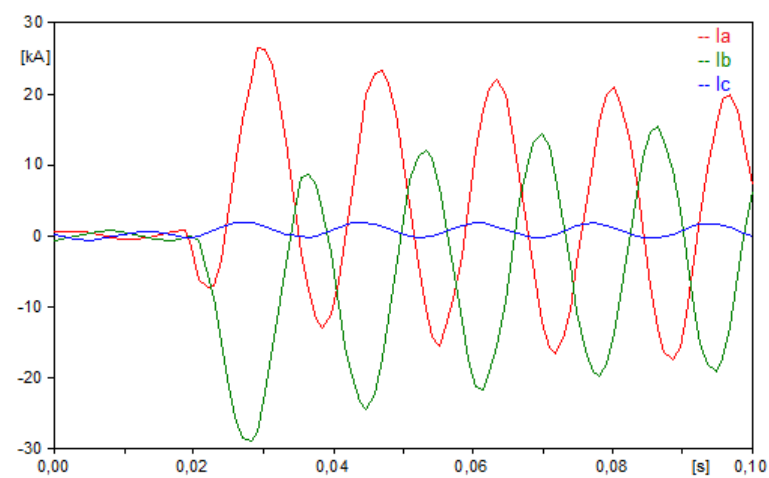
Figura 30 – Falta Bifásica interna do ponto de vista do TC1.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 31, é retratada a mesma falta bifásica, porém, analisando o trecho LT8, TC2.

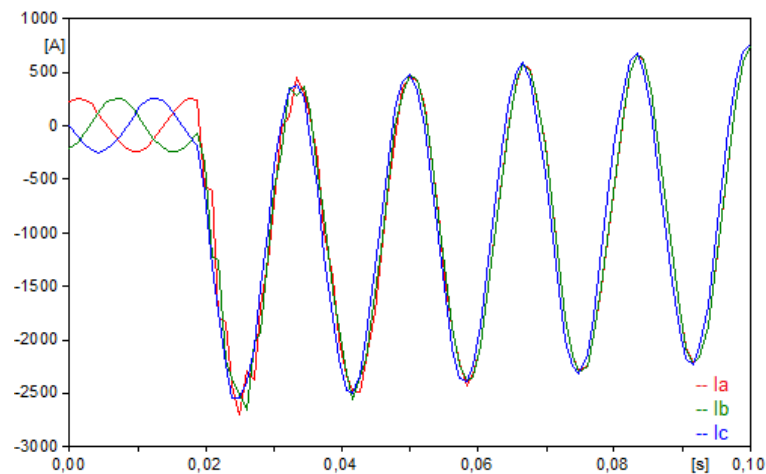
Figura 31 – Falta bifásica interna do ponto de vista do TC2.



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, a Figura 32, representa o trecho entre as duas subestações SE8 e SE9, TC3.

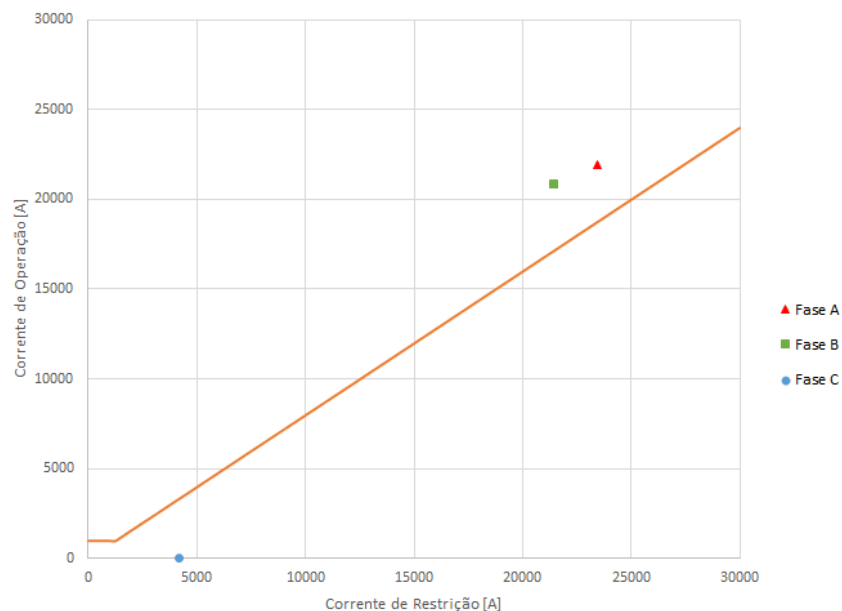
Figura 32 – Falta bifásica interna do ponto de vista do TC3.



Fonte: Autoria Própria.

Após as extrações dos fasores fundamentais, foram calculadas a corrente de operação, corrente de restrição e realizada a comparação das fases. Na Figura 33, é possível observar as três fases A, B e C com base nos parâmetros utilizados na lógica do relé REB500.

Figura 33 – Falta bifásica interna ao barramento sobre a curva característica de proteção.



Fonte: Autoria Própria.

Observa-se, através da Figura 33, que as fases A e B apresentam valores da corrente de operação superiores ao valor mínimo considerado no item 3.6, além da relação entre a corrente de restrição dividido pela corrente de operação apresentar

um valor superior ao fator de sensibilidade “K”, assim, os dois primeiros critérios foram validados.

Os valores obtidos na simulação de falta trifásica interna estão apresentados nos Quadros 7 e 8. O Quadro 7 representa os valores das correntes após a aplicação da TDF, enquanto no Quadro 8 é possível verificar os valores das correntes de operação, restrição e suas relações.

Quadro 7 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta bifásica interna.

	Corrente TC1	Corrente TC2	Corrente TC3
Fase A	3748,66 $\angle$ -41,73 A	18094,76 $\angle$ -63,06 A	1597,21 $\angle$ -141,31 A
Fase B	3181,53 $\angle$ 179,33 A	16673,68 $\angle$ 169,86 A	1568,30 $\angle$ -139,69 A
Fase C	1383,75 $\angle$ 97,34 A	1200,30 $\angle$ -7,14 A	1588,99 $\angle$ -129,66 A

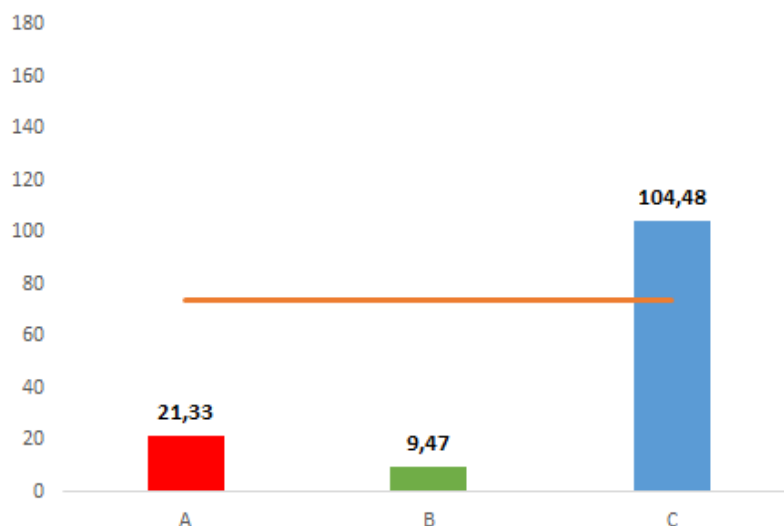
Fonte: Autoria Própria.

Quadro 8 – Corrente de operação e restrição para falta bifásica interna.

	Corrente Operação	Corrente de Restrição	Operação / Restrição
Fase A	21913 A	23441 A	0,934
Fase B	20882 A	21424 A	0,974
Fase C	0 A	4173 A	0

Fonte: Autoria Própria.

Figura 34 – Comparação dos ângulos de fase para falta bifásica interna.



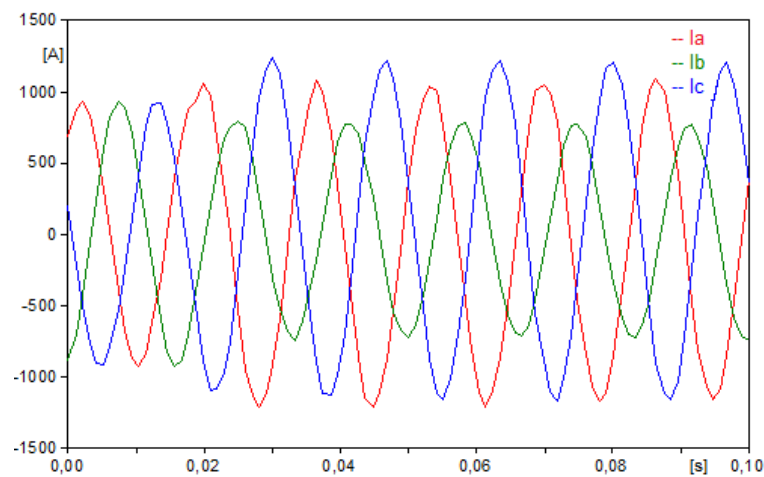
Fonte: Autoria Própria.

Já o terceiro critério para acionar a proteção, está representado na Figura 34, onde as comparações dos ângulos as fases A e B apresentam valores inferiores a 74°, já a fase C apresenta um valor superior.

5.2.2 Falta Bifásica Externa

A seguir, será apresentado o comportamento das fases após a aplicação de uma falta bifásica nas fases A e B, com ângulo de incidência da falta de 90° , na linha de transmissão entre as subestações SE8 e SE9. A Figura 35 ilustra essa falta especificamente ao trecho LT7, TC1.

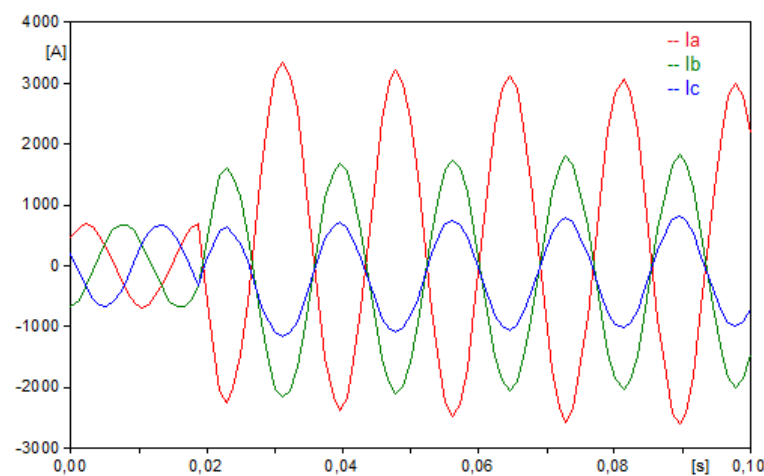
Figura 35 – Falta Bifásica externa do ponto de vista do TC1.



Fonte: Autoria Própria.

Já a Figura 36, retrata a mesma falha bifásica, porém, analisando o trecho LT8, TC2.

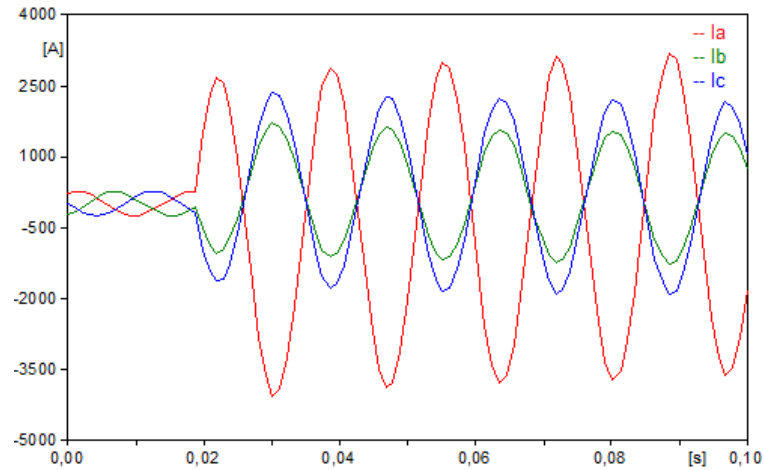
Figura 36 – Falta bifásica externa do ponto de vista do TC2.



Fonte: Autoria Própria.

Enquanto a Figura 37, representa o comportamento entre as duas subestações SE8 e SE9, TC3.

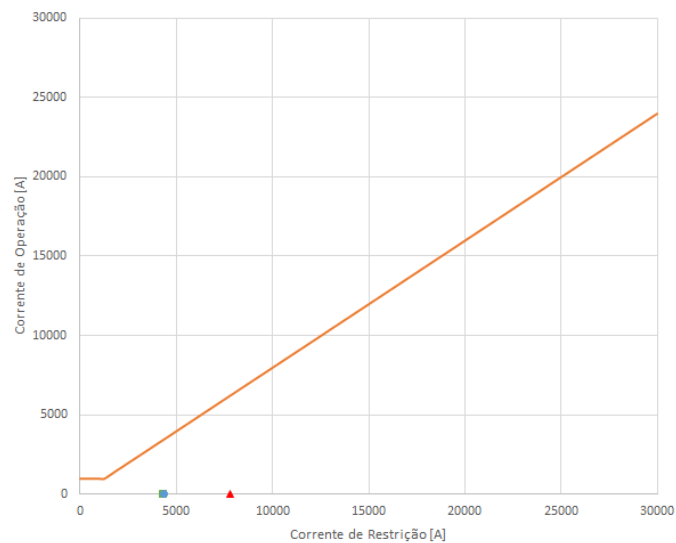
Figura 37 – Falta bifásica externa do ponto de vista do TC3.



Fonte: Autoria Própria.

Da mesma forma, após as extrações dos fasores fundamentais, foram realizados os cálculos da corrente de operação, corrente de restrição e comparação das fases e na Figura 38, é possível observar as três fases A, B e C sobre os parâmetros utilizados na lógica do relé REB500.

Figura 38 – Falta bifásica externa ao barramento sobre a curva característica de proteção.



Fonte: Autoria Própria.

Conforme pode ser visto na Figura 38, as fases A, B e C estão na área de restrição da curva característica do relé, dessa forma, pode-se concluir que a proteção não atuou perante a falta bifásica externa ao barramento.

Os valores obtidos na simulação de falta trifásica interna estão apresentados nos Quadros 7 e 8. O Quadro 7 representa os valores das correntes após a aplicação da TDF, enquanto no Quadro 8 é possível verificar os valores das correntes de operação, restrição e suas relações.

Quadro 9 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta bifásica externa.

	Corrente TC1	Corrente TC2	Corrente TC3
Fase A	1206,80 $\angle$ -22,88 A	2976,01 $\angle$ -90,89 A	3605,80 $\angle$ 107,19 A
Fase B	817,97 $\angle$ -128,6 A	2018,46 $\angle$ 88,33 A	1450,36 $\angle$ -71,86 A
Fase C	1261,17 $\angle$ 118,49 A	958,04 $\angle$ 90,75 A	2155,71 $\angle$ -73,45 A

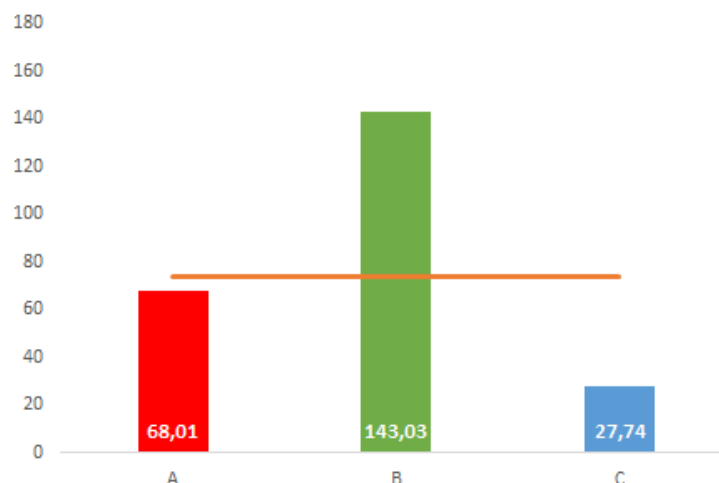
Fonte: Autoria Própria.

Quadro 10 – Corrente de operação e restrição para falta bifásica externa.

	Corrente Operação	Corrente de Restrição	Operação / Restrição
Fase A	0 A	7789 A	0
Fase B	0 A	4287 A	0
Fase C	0 A	4375 A	0

Fonte: Autoria Própria.

Figura 39 – Comparação dos ângulos de fase para falta bifásica externa.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 39, a diferença dos ângulos para a fase B, apresenta um valor superior ao limite, enquanto as diferenças para as fases A e C apresentam valores

inferiores, porém, como os dois primeiros critérios não foram atendidos, o relé não irá atuar para nenhuma fase.

5.2.3 Resultados das Simulações de Faltas Bifásicas

Os resultados para todas as simulações de faltas Bifásicas estão apresentados nos Quadros 11, 12 e 13, onde é possível verificar se a proteção operou ou restringiu.

Quadro 11 – Resultados das simulações de faltas bifásicas fases A e B.

Faltas Bifásicas Fase A - B		
Localizações	Incidência a 0º	Incidência a 90º
Interna ao Barramento	Operou	Operou
Linha de Transmissão 8	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão 7	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão TR4	Restringiu	Restringiu

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 12 – Resultados das simulações de faltas bifásicas fases A e C.

Faltas Bifásicas Fase A - C		
Localizações	Incidência a 0º	Incidência a 90º
Interna ao Barramento	Operou	Operou
Linha de Transmissão 7	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão 8	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão TR4	Restringiu	Restringiu

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 13 – Resultados das simulações de faltas bifásicas fases B e C.

Faltas Bifásicas Fase B - C		
Localizações	Incidência a 0º	Incidência a 90º
Interna ao Barramento	Operou	Operou
Linha de Transmissão 7	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão 8	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão TR4	Restringiu	Restringiu

Fonte: Autoria Própria.

Como apresentado nos Quadros, o relé atuou para todas as seis faltas internas ao barramento protegido e deixou de atuar nas 18 faltas aplicadas externamente.

Portanto a metodologia empregada mostrou-se eficaz para as faltas bifásicas simuladas, confirmando a seletividade e confiabilidade da lógica proposta.

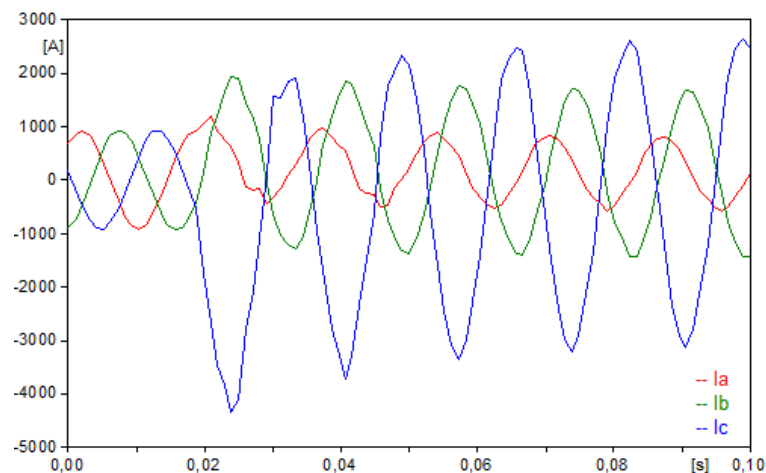
5.3 Resultados Para Falta Monofásicas

A seguir, serão apresentados dois casos de faltas monofásicas. O primeiro, descrito no item 5.3.1, corresponde a uma falta monofásica interna ao barramento protegido, ocorrendo na fase C. No segundo caso, foi simulada uma falta monofásica externa ao barramento na fase C, localizada na linha de transmissão 7.

5.3.1 Falta Monofásica Interna

Na Figura 40, é possível verificar o comportamento das fases após a aplicação de uma falta monofásica a 90° no barramento. A corrente apresentada corresponde especificamente ao trecho LT7, TC1.

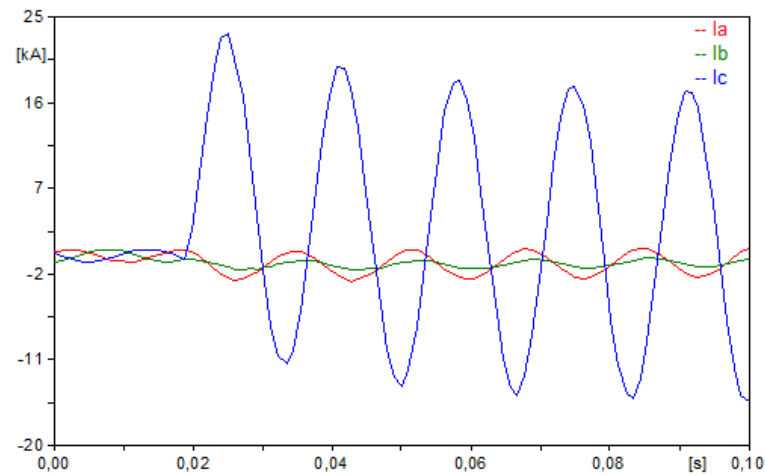
Figura 40 – Falta monofásica interna do ponto de vista do TC1.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 41, é retratada a mesma falha bifásica, porém, analisando o trecho LT8, TC2.

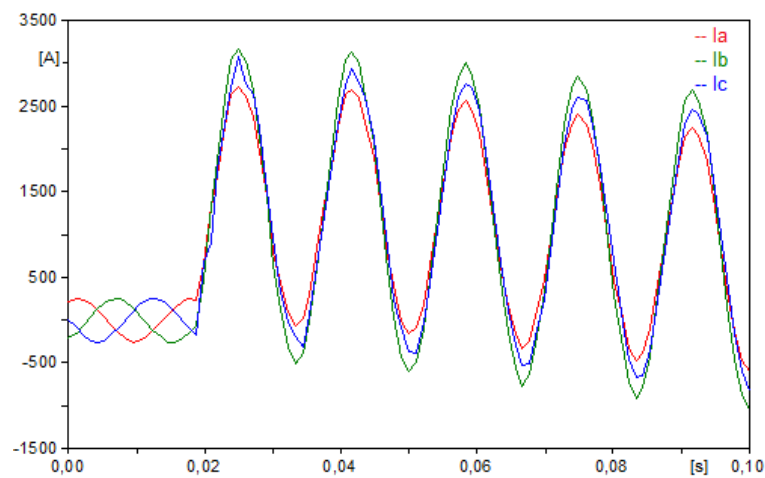
Figura 41 – Falta monofásica interna do ponto de vista do TC2.



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, a Figura 42, representa o trecho entre as duas subestações SE8 e SE9, TC3.

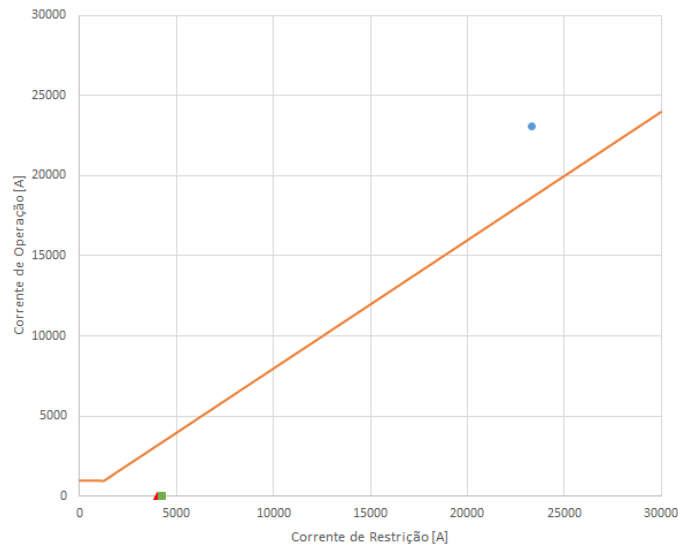
Figura 42 – Falta monofásica interna do ponto de vista do TC3.



Fonte: Autoria Própria.

Após as extrações dos fasores fundamentais, foram calculadas a corrente de operação, corrente de restrição e realizada a comparação das fases. Na Figura 43, é possível observar as três fases A, B e C com base nos parâmetros utilizados na lógica do relé REB500.

Figura 43 – Falta monofásica interna ao barramento sobre a curva característica de proteção.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 43 mostra que a corrente de operação da fase C está acima do valor mínimo definido no item 3.6, além da relação entre a corrente de restrição e a corrente de operação exceder o fator de sensibilidade “K”, validando assim os dois primeiros critérios.

Os valores obtidos na simulação de falta trifásica interna estão apresentados nos Quadros 14 e 15. O Quadro 14 representa os valores das correntes após a aplicação da TDF, enquanto no Quadro 15 é possível verificar os valores das correntes de operação, restrição e suas relações.

Quadro 14 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta monofásica interna.

	Corrente TC1	Corrente TC2	Corrente TC3
Fase A	1206,80 $\angle$ -22,88 A	2976,01 $\angle$ -90,89 A	3605,80 $\angle$ 107,19 A
Fase B	817,97 $\angle$ -128,6 A	2018,46 $\angle$ 88,33 A	1450,36 $\angle$ -71,86 A
Fase C	1261,17 $\angle$ 118,49 A	958,04 $\angle$ 90,75 A	2155,71 $\angle$ -73,45 A

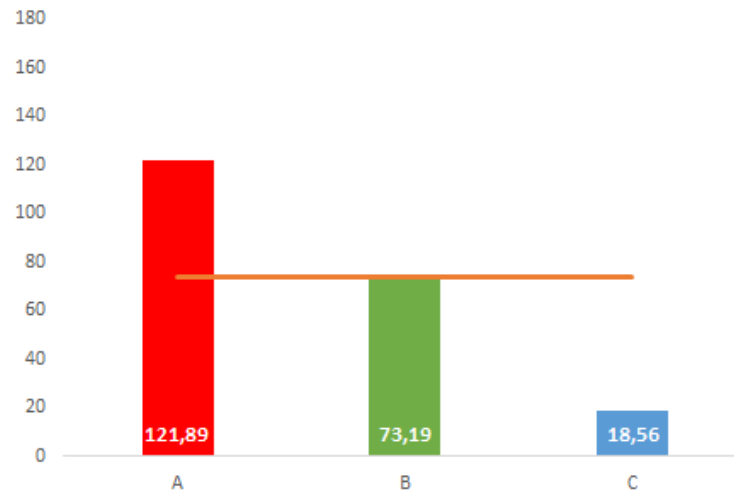
Fonte: Autoria Própria.

Quadro 15 – Corrente de operação e restrição para falta monofásica interna.

	Corrente Operação	Corrente de Restrição	Operação / Restrição
Fase A	0 A	7789 A	0
Fase B	0 A	4287 A	0
Fase C	0 A	4375 A	0

Fonte: Autoria Própria.

Figura 44 – Comparação dos ângulos de fase para falta monofásica interna.



Fonte: Autoria Própria.

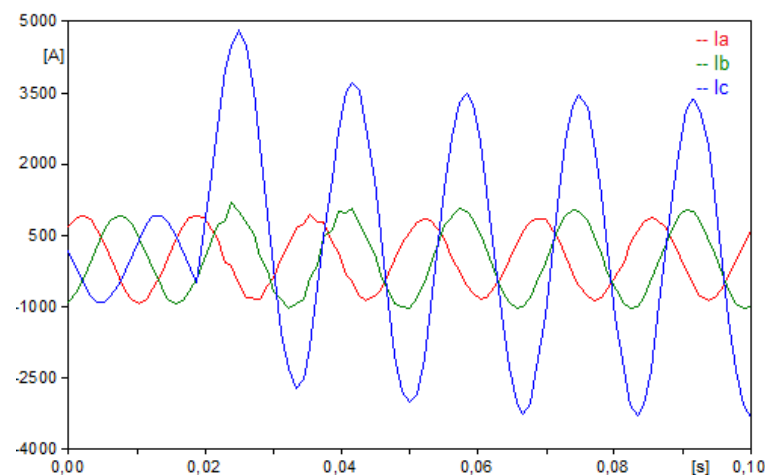
O terceiro critério para acionar a proteção é ilustrado na Figura 44, onde a comparação dos ângulos mostra que a fase C apresenta valor inferior a 74° .

5.3.2 Falta Monofásica Externa

A seguir, será apresentado o comportamento das fases após a aplicação de uma falta monofásica na fase C, com ângulo de incidência de falta de 90° , na linha de transmissão 7.

A Figura 45 apresenta uma visão detalhada dessa ocorrência especificamente no trecho LT7, TC1, ilustrando as variações da corrente registradas em função da falta monofásica aplicada.

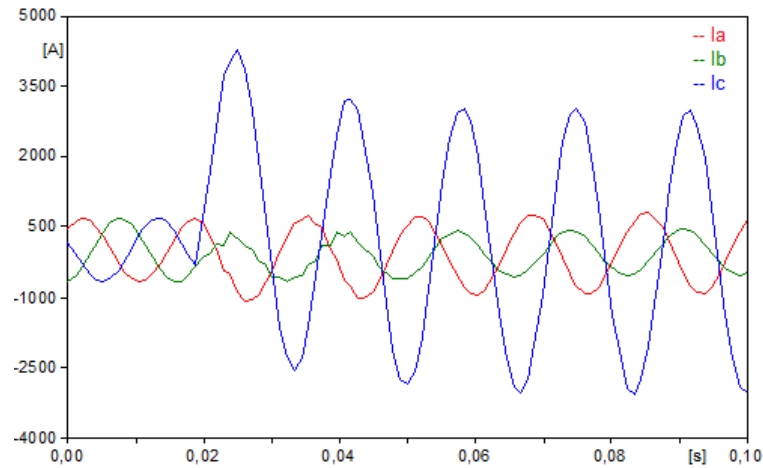
Figura 45 – Falta Monofásica externa do ponto de vista do TC1.



Fonte: Autoria Própria.

Em sequência, a Figura 46 retrata a mesma falta monofásica, mas aplicada ao trecho LT8,TC2.

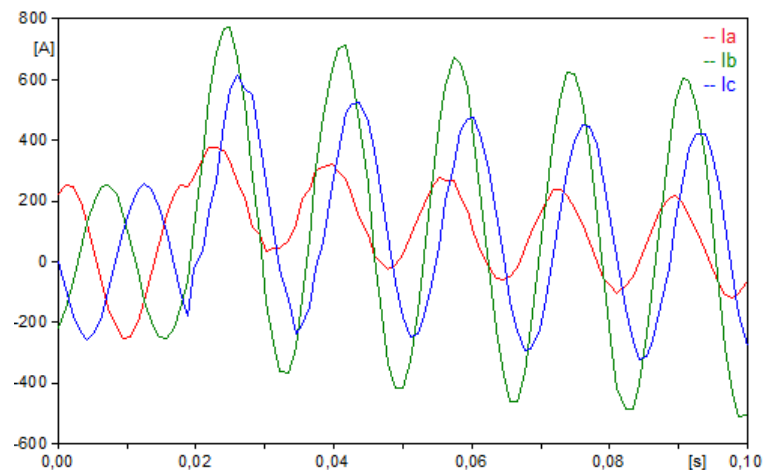
Figura 46 – Falta monofásica externa do ponto de vista do TC2.



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, Figura 47, demonstra o comportamento da corrente entre as duas subestações SE8 e SE9, TC3.

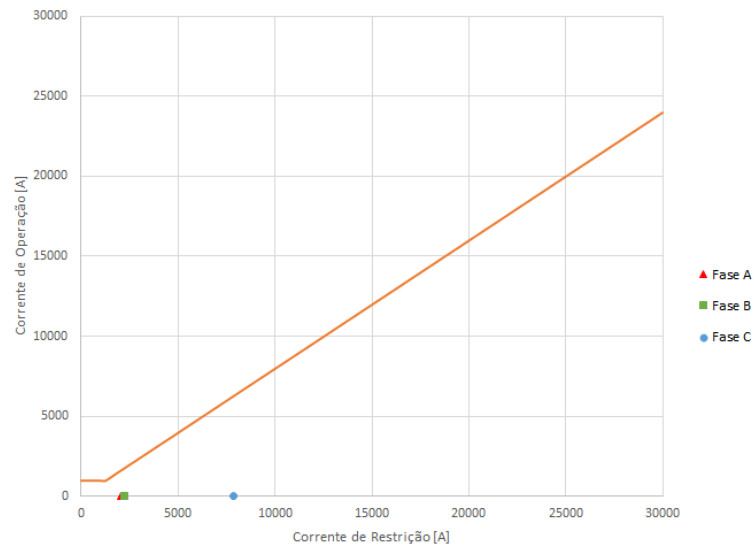
Figura 47 – Falta monofásica externa do ponto de vista do TC3.



Fonte: Autoria Própria.

Da mesma forma, após as extrações dos fasores fundamentais, foram realizados os cálculos da corrente de operação, corrente de restrição e comparação das fases, na Figura 48, é possível observar as três fases A, B e C sobre os parâmetros utilizados na lógica do relé REB500.

Figura 48 – Falta monofásica externa ao barramento sobre a curva característica de proteção.



Fonte: Autoria Própria.

Conforme pode ser visto na Figura 48, a fase C está na área de restrição da curva característica do relé, dessa forma, pode-se concluir que a proteção não atuou perante a falta monofásica externa ao barramento.

Os valores obtidos na simulação de falta trifásica interna estão apresentados nos Quadros 16 e 17. O Quadro 16 representa os valores das correntes após a aplicação da TDF, enquanto no Quadro 17 é possível verificar os valores das correntes de operação, restrição e suas relações.

Quadro 16 – Correntes obtidas após a aplicação da transformada discreta de Fourier para falta monofásica externa.

	Corrente TC1	Corrente TC2	Corrente TC3
Fase A	928,34 $\angle$ -2,75 A	928,93 $\angle$ -171,02 A	189,82 $\angle$ 92,93 A
Fase B	1102,34 $\angle$ -117,78 A	492,25 $\angle$ 66,99 A	613,17 $\angle$ 58,38 A
Fase C	3883,08 $\angle$ -128,89 A	3550,67 $\angle$ 55,09 A	420,70 $\angle$ 15,25 A

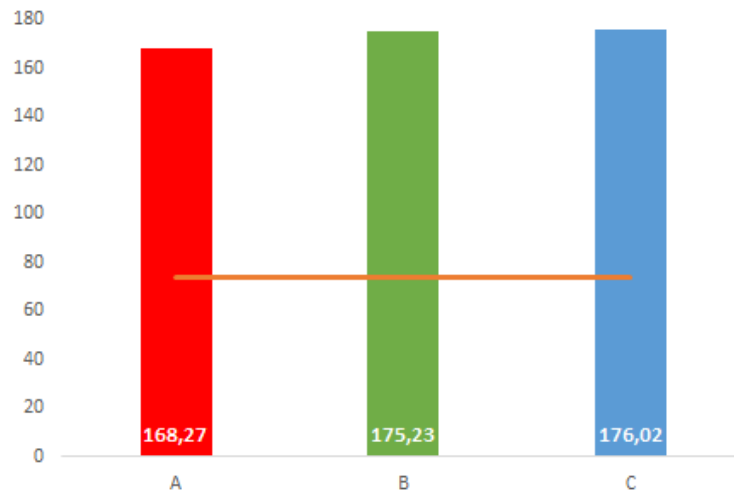
Fonte: Autoria Própria.

Quadro 17 – Corrente de operação e restrição para falta monofásica externa.

	Corrente Operação	Corrente de Restrição	Operação / Restrição
Fase A	0 A	2047 A	0
Fase B	0 A	2208 A	0
Fase C	0 A	7854 A	0

Fonte: Autoria Própria.

Figura 49 – Comparação dos ângulos de fase para falta monofásica externa.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 49, a diferença dos ângulos para as três fases apresenta valores superiores ao limite, como nenhum critério da lógica foi atendido o relé não irá atuar.

5.3.3 Resultados das Simulações de Faltas Monofásicas

Os resultados para todas as simulações de faltas monofásicas estão apresentados nos Quadros 18, 19 e 20, onde é possível verificar se a proteção operou ou restringiu.

Quadro 18 – Resultados das simulações de faltas monofásicas fase A.

Faltas Monofásicas Fase A		
Localizações	Incidência a 0º	Incidência a 90º
Interna ao Barramento	Operou	Operou
Linha de Transmissão 7	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão 8	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão TR4	Restringiu	Restringiu

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 19 – Resultados das simulações de faltas monofásicas fase B.

Faltas Monofásicas Fase B		
Localizações	Incidência a 0º	Incidência a 90º
Interna ao Barramento	Operou	Operou
Linha de Transmissão 7	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão 8	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão TR4	Restringiu	Restringiu

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 20 – Resultados das simulações de faltas monofásicas fase C.

Faltas Monofásicas Fase C		
Localizações	Incidência a 0º	Incidência a 90º
Interna ao Barramento	Operou	Operou
Linha de Transmissão 7	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão 8	Restringiu	Restringiu
Linha de Transmissão TR4	Restringiu	Restringiu

Fonte: Autoria Própria.

Como apresentado nos Quadros, o relé atuou corretamente para as seis faltas monofásicas internas ao barramento protegido e deixou de atuar nas 18 faltas aplicadas externamente. Portanto, metodologia empregada mostrou-se eficaz para as faltas simuladas, confirmando a seletividade e confiabilidade da lógica proposta.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo implementar e apresentar uma metodologia de proteção de barras para sistemas elétricos de potência, utilizando a Transformada Discreta de Fourier (TDF) como técnica principal para a detecção e análise de faltas internas e externas no barramento.

A análise mostrou que, os resultados obtidos utilizando a TDF para o processamento dos sinais de corrente mais a lógica de proteção do relé REB 500, possibilitou a identificação rápida e precisa para os diferentes tipos de faltas. Evidencia-se, portanto, a seletividade do sistema ao responder apenas às faltas internas, como esperado. A metodologia foi avaliada em três locais de um sistema elétrico, mais o barramento protegido, demonstrando sua eficiência em identificar corretamente a localização da falha em todas as situações simuladas.

Durante as 56 simulações, a proteção implementada oferece excelente desempenho, sendo capaz de operar com precisão tanto em faltas com baixas magnitudes quanto em situações de maior complexidade.

Assim, conclui-se que a proteção diferencial de barras com a metodologia proposta neste trabalho é altamente eficaz para identificar e responder às faltas internas, proporcionando a seletividade e confiabilidade essenciais para a segurança para as subestações. Os resultados reforçam a importância desta técnica para proteger os barramentos de sistemas de potência, assegurando uma operação segura e evitando a propagação de falhas ao longo do sistema.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se a continuidade a partir de novas simulações, utilizando subestações com configurações de barras mais complexas, obtendo assim, um maior número de correntes para serem analisadas. Além de, adotar novos valores de parâmetros para a lógica de proteção do relé REB 500.

REFERÊNCIAS

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2011.

FRONTIN, S. O. **Equipamentos de Alta Tensão**. 1ed Brasília: Goya Editora LTDA, 2013.

NIVALDO, C. **Subestações Elétricas**. NT Editora, 2017

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

MARDEGAN, C. **Proteção de Barramentos**. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2011/03/ed61_fasc_protecao_capXIV.pdf>. Acesso em: 30 jun. de 2021.

RUSH, P. **Proteção e Automação de Redes**: conceito e aplicação. São Paulo: Blucher, 2011.

ALVARENGA, M. T. S. **Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Alta Impedância de Barramentos no Software ATP**. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, Dez. 2014.

CURSO EAD: Fundamentos do setor elétrico. **ANEEL**, 2017. Disponível em: <http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl10.html>. Acesso em: 6 jul. de 2021.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistema elétricos de potência**. Florianópolis, 2008.

SATO, F. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção Elétrica**. Florianópolis, 2008.

ABB. **Numerical Busbar and Breaker Failure Protection Type REB 500 (BU02).** ABB, 2000.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete Time Signal Processing.** 3. ed. New Jersey: Pearson, 2009.

SANTOS, G.O. **Implementação de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada para Proteção de Retaguarda.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

ONS. **Submódulo 11.3 - Estudos de curto-circuito.** 2009. Disponível em: <[http://www.ons.org.br//ProcedimentosDeRede/Módulo 11/Submódulo 11.3/Submódulo 11.3_Rev_1.0.pdf](http://www.ons.org.br//ProcedimentosDeRede/Módulo%2011/Submódulo%2011.3/Submódulo%2011.3_Rev_1.0.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2024.

FILHO, J. A.; PEREIRA, M. P. **Novos Desenvolvidos dos programas ATP/EMTP e ATPDraw.** In: XVI SNPTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Campinas, 2001.