



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

DIOGO GUILHERME FERREIRA

**Avaliação do Desempenho de Funções de Proteção
Aplicadas em Reatores Shunt**

GOIÂNIA

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES
E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Diogo Guilherme Ferreira

3. Título do trabalho

Avaliação do Desempenho de Funções de Proteção Aplicadas em Reatores Shunt

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
 - b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
- O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Leonor Silva De Almeida, Professora do Magistério Superior**, em 27/11/2024, às 10:43, 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 **Diogo Guilherme Ferreira, Discente**, em 27/11/2024, às 17:26, 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 https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4996082** e o código CRC **25C26E3C**.

DIOGO GUILHERME FERREIRA

Avaliação do Desempenho de Funções de Proteção Aplicadas em Reatores Shunt

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.
Área de concentração: Engenharia Elétrica
Linha de pesquisa: Sistemas Eletro-Eletrônicos

Orientador (a): Profa. Dra. Maria Leonor Silva de Almeida

GOIÂNIA

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Ferreira, Diogo Guilherme

Avaliação do Desempenho de Funções de Proteção Aplicadas em
Reatores Shunt [manuscrito] / Diogo Guilherme Ferreira. - 2024.
78 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Maria Leonor Silva de Almeida.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia,
2024.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. Reator Shunt. 2. Proteção Falta Restrita a terra. 3. Proteção
Direcional de Sequência Negativa. 4. Proteção Diferencial. 5. Proteção
de Distância. I. Almeida, Maria Leonor Silva de, orient. II. Título.

CDU 621.3

Processo:

23070.059421/2024-02

Documento:

4982104



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **07/2024** da sessão de Defesa de Dissertação de **Diogo Guilherme Ferreira**, que confere o título de Mestre em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica**.

Aos **Vinte e um dias do mês de novembro de dois mil e vinte e quatro**, a partir das **09h00min**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“Avaliação do Desempenho de Funções de Proteção Aplicadas em Reatores Shunt”**. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora **Maria Leonor Silva de Almeida - (EMC/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **Larissa Marques Peres - (IFG)** Membro Titular Externo e Professor Doutor **Giovanni Manassero Junior - (EPUSP/USP)** Membro Titular Externo, cujas participações ocorreram por videoconferência através do link: <https://meet.google.com/qoc-vtiz-yun>. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora **Maria Leonor Silva de Almeida**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **Vinte e um dias do mês de novembro de dois mil e vinte e quatro**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Maria Leonor Silva De Almeida, Professora do Magistério Superior**, em 21/11/2024, às 10:43, 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 **Giovanni Manassero Junior, Usuário Externo**, em 21/11/2024, às 10:45, 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 **Diogo Guilherme Ferreira, Discente**, em 21/11/2024, às 11:01, 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 **Larissa Marques Peres, Usuário Externo**, em 22/11/2024, às 10:51, 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 https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4982104** e o código CRC **8977050B**.

*Dedico este trabalho aos meus pais, Silvio e Marinete, que,
com sua humildade, me ensinaram o valor da educação.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Silvio e Marinete, pelo suporte e apoio durante toda minha formação. Obrigado por construírem a base para que eu tivesse a possibilidade de aproveitar as oportunidades que enriquecem meu desenvolvimento profissional.

Agradeço a minha esposa, Adriana, por me incentivar diariamente a ver os desafios como novas oportunidades de ser uma pessoa melhor.

Agradeço a Professora Maria Leonor Silva de Almeida por me orientar e pela disponibilidade de compartilhar conhecimento em áreas além da engenharia. Agradeço, também, pelas oportunidades que possibilitou e por todas as correções, as quais me acrescentaram muito.

Por fim, agradeço a Deus por sempre dar-me forças para seguir adiante, independente do obstáculo.

Resumo

O aumento da extensão de linhas de transmissão com níveis elevados de tensão tem sido observado em países de vasta extensão territorial, resultando na demanda por recursos destinados ao controle desses níveis. Um dos possíveis artifícios atribuídos a regulação de tensão é o emprego de reatores *shunt* nas linhas. Esses equipamentos viabilizam a regulação de tensão pois, por meio da absorção do excesso de reativos capacitivos na linha, eles mantêm a tensão dentro de intervalos aceitáveis para a operação. Logo, dada a relevância dos reatores *shunt* para o adequado funcionamento das linhas de transmissão e do sistema elétrico, é essencial assegurar o correto funcionamento das funções de proteção aplicadas aos reatores *shunt*. Assim, apresenta-se neste trabalho uma investigação sobre aplicação de diferentes tipos de funções de proteção tradicionalmente empregadas pelos fabricantes em reatores, como proteção de falta restrita a terra (*REF*), proteção direcional de sequência negativa ($32Q_F$ e $32Q_R$), proteção diferencial (87) e proteção de distância (21), que normalmente é usada como retaguarda. A lógica de cada função citada visa garantir a operação e a seletividade da proteção em diferentes situações de curto-circuito. Diante disso, a fim de avaliar as proteções, foram realizadas simulações no *software Alternative Transient Program* (ATP), por meio do qual foi modelada uma linha de transmissão de 500 kV/60 Hz com 400 km de extensão e 60% de compensação *shunt*. Nas diferentes simulações, foram avaliados distintos cenários de curtos-circuitos internos no reator, abrangendo tanto o tipo espira-terra quanto entre espiras. Além disso, visando compreender melhor o funcionamento dos esquemas de proteção, foram aplicadas faltas externas ao equipamento. Ademais, foi realizada uma avaliação comparativa entre o desempenho das diferentes funções de proteção investigadas, variando diversos critérios como o tipo de falta, quantidade de espiras envolvidas no curto-circuito e os valores dos fatores de dispersão. Além do mais, foram realizadas análises transitórias e análises da sensibilidade paramétrica. Com base em todos os resultados obtidos, e comparando os diferentes esquemas de proteção implementados em relés comerciais disponíveis, verifica-se que as funções 21 e $32Q$ se destacaram, pois apresentaram melhor desempenho em relação as demais funções avaliadas. De modo geral, as funções 21 e $32Q$ operam para todas as faltas espira-terra e entre espiras, independentemente do número de espiras envolvidas e do valor do fator de dispersão. Comparativamente, a função distância demonstrou ser mais rápida, com tempo de operação inferior a um ciclo. Assim, afirma-se que a função de distância também pode ser utilizada como proteção principal, juntamente com outras funções tradicionalmente utilizadas, a fim de aumentar o desempenho do esquema de proteção do reator.

Palavras-chave: Reator *Shunt*. Proteção Falta Restrita a terra. Proteção Direcional de Sequência Negativa. Proteção Diferencial. Proteção de Distância.

Abstract

The increase in the length of transport lines with high voltage levels has been distributed in countries with large territorial extensions, resulting in the demand for resources destined to control these levels. One of the possible adjustments attributed to voltage regulation is the use of *shunt* reactors in the lines. This equipment makes voltage regulation possible because, by absorbing excess capacitive reactives in the line, they maintain voltage within acceptable ranges for operation. Therefore, given the relevance of *shunt* reactors for the proper functioning of transmission lines and the electrical system, it is essential to ensure the correct functioning of the protection functions applied to *shunt* reactors. Therefore, this work presents an investigation into the application of different types of protection functions traditionally employed by manufacturers in reactors, such as restricted earth fault protection (*REF*), directional protection of negative sequence ($32Q_F$ and $32Q_R$), differential protection (87) and distance protection (21), which is normally used as a backup. The logic of each specific function aims to guarantee the operation and selectivity of protection in different short circuit situations. Therefore, in order to evaluate the protections, simulations were carried out in the *software Alternative Transient Program* (ATP), through which a 500 kV/60 Hz transmission line 400 km long and 60% *shunt* compensation was modeled. In the different simulations, different scenarios of internal short circuits in the reactor were evaluated, covering both the type of turn-to-ground faults and turn faults. Furthermore, we will understand the best functioning of protection schemes, external faults were applied to the equipment. Furthermore, we will understand the best functioning of protection schemes, external faults were applied to the equipment. Furthermore, a comparative evaluation was carried out between the performance of the different protection functions investigated, varying several criteria such as the type of fault, number of coils involved in the short circuit and the values of the leakage factors. Furthermore, transient analyzes and parametric sensitivity analyzes were performed. Based on all the results obtained, and comparing different protection schemes implemented in available commercial relays, it appears that the 21 and $32Q$ functions stand out, as similar and better performances were highlighted in relation to the other functions evaluated. In general, the 21 and $32Q$ functions work for all turn-to-ground faults and turn faults, regardless of the number of turns involved and the value of the leakage factor. Comparatively, the distance function proved to be faster, with an operating time of less than one cycle. Thus, it is stated that the distance function can also be used as main protection, together with other traditionally used functions, in order to increase the performance of the reactor protection scheme.

Keywords: Reactor *Shunt*. Restricted Earth Fault. Overvoltage Protection. Negative Sequence Directional Protection. Differential Protection. Distance Protection.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Modelo Linha de Transmissão	21
Figura 2.2 – Conexão de Reatores <i>Shunt</i> ao Sistema Elétrico de Potência	22
Figura 2.3 – Conexões de Reatores.	22
Figura 2.4 – Reator <i>Shunt</i> de núcleo de ar do tipo seco.	23
Figura 2.5 – Reator <i>Shunt</i> com núcleo de ferro imerso em óleo.	24
Figura 2.6 – Detalhes: Reator <i>Shunt</i> do tipo seco com núcleo a ar.	26
Figura 2.7 – Detalhes: Terminais e bastão de duto de fibra de vidro.	27
Figura 2.8 – Circuito Equivalente Reator <i>Shunt</i>	28
Figura 2.9 – Característica de magnetização dos reatores <i>shunt</i> com núcleo de ferro e a ar.	29
Figura 2.10–Faltas em reatores <i>shunt</i>	31
Figura 3.1 – Diagrama de blocos - <i>REF</i>	38
Figura 3.2 – Delimitação da área protegida para falta externa.	43
Figura 3.3 – Delimitação da área protegida para falta interna.	44
Figura 3.4 – Comportamento das correntes em casos de falta entre espiras.	44
Figura 4.1 – Modelo do Sistema de Potência Analisado.	48
Figura 4.2 – Modelo de Reator com o elemento <i>RL Acoplado</i>	50
Figura 4.3 – Curtos-circuitos para o modelo de reator empregado.	51
Figura 5.1 – Caso 1 - Comportamento da corrente durante a energização.	59
Figura 5.2 – Estado lógico das variáveis dos Casos 1 e 2.	59
Figura 5.3 – Estado lógico das variáveis dos Casos 3 e 4.	60
Figura 5.4 – Estado lógico das variáveis dos Casos 5 e 6.	60
Figura 5.5 – Estado lógico das variáveis dos Casos 7 e 8.	61
Figura 5.6 – Estado lógico das variáveis dos Casos 9 e 10.	61
Figura 5.7 – Modelo Modificado do Sistema de Potência Analisado.	62
Figura 5.8 – Estado lógico das variáveis dos Casos 11 e 12.	63
Figura 5.9 – Estado lógico das variáveis dos Casos 13 e 14.	63
Figura 5.10–Estado lógico das variáveis e corrente do Caso 15.	64
Figura 5.11–Estado lógico das variáveis dos Casos 16 e 17.	66
Figura 5.12–Estado lógico das variáveis dos Casos 18 e 19.	66
Figura 5.13–Estado lógico das variáveis dos Casos 20 e 21.	67

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Limites de Tensão segundo ONS.	19
Tabela 4.1 – Parâmetros linha de transmissão.	49
Tabela 5.1 – Propriedades das faltas consideradas para as análises transitórias. . . .	57
Tabela 5.2 – Tempo de Operação das Funções de Proteção em milissegundos	58
Tabela 5.3 – Características das faltas avaliadas para Análise de Sensibilidade Para- métrica.	65
Tabela 5.4 – Porcentagem de Espiras para Operação das Funções de Proteção	65
Tabela 5.5 – Resumo do Comportamento da Operação das Funções Investigadas . .	70

Lista de abreviaturas e siglas

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
DC	<i>Decaimento Exponencial</i>
LT	<i>Linha de Transmissão</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema</i>
REF	<i>Restricted Earth Fault</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
SE	<i>Subestação</i>
RTC	<i>Relação de Transformação de Corrente</i>
TC	<i>Transformador de Corrente</i>
TP	<i>Transformador de Potencial</i>

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Contextualização do tema	13
1.2	Motivação	15
1.3	Objetivos	16
1.4	Organização do texto	17
1.5	Publicações	17
2	Reator <i>Shunt</i>	18
2.1	Aplicação no Controle de Tensão	19
2.2	Tipos de Conexões	20
2.3	Aspectos Construtivos	22
2.3.1	Detalhamento Construtivo: Reator <i>Shunt</i> do tipo seco com núcleo a ar	25
2.4	Características Operacionais Normais e Críticas	27
2.5	Proteções Empregadas em Reatores <i>Shunt</i>	32
3	Algoritmos e Funções de Proteção	34
3.1	Função Falta Restrita a terra	37
3.2	Função Direcional de Sequência Negativa	40
3.3	Função Diferencial	42
3.4	Função de Distância	45
4	Modelos Empregados	48
4.1	Modelo do Sistema Elétrico	48
4.2	Modelo Empregado para Reator <i>Shunt</i>	49
4.3	Implementação Computacional das Funções de Proteção	54
5	Análise dos Resultados	56
5.1	Análises Transitórias	57
5.2	Análise de Sensibilidade Paramétrica	64
5.3	Discussão das Análises	67
6	Conclusão	71
	Referências	74

1 Introdução

1.1 Contextualização do tema

O crescente avanço tecnológico na sociedade contemporânea está intrinsecamente ligado à demanda e à disponibilidade de energia elétrica, afetando setores vitais como indústrias, comunicações e transportes. No contexto nacional, o Brasil anseia otimizar seu sistema elétrico, conectando diversas regiões por meio do Sistema Interligado Nacional (SIN) para garantir a cooperação eficiente de diferentes fontes de energia, visando atender à demanda nacional.

Com o objetivo de atender à demanda energética e devido à extensão territorial do país, o uso estratégico de linhas de transmissão (LT) longas no SIN apresenta-se como meio facilitador para a transmissão de energia entre regiões distantes. Porém, as linhas extensas geralmente operam em níveis de tensões elevados, alta e extra-alta tensão, podendo ser intensificados em situações de excesso de reativos capacitivos, seja em circunstâncias de operação com carga reduzida ou após rejeição de carga.

O Operador Nacional do Sistema (ONS), com intuito de resguardar o sistema elétrico em relação às problemáticas decorrentes das sobretensões, determina valores limites para faixa de tensão conforme o nível de operação (ONS, 2011). Para adequar-se a esses limites e mitigar os efeitos das sobretensões, são utilizados bancos de reatores conectados tanto em série quanto em paralelo (*shunt*) às linhas de transmissão. Uma vez conectados em paralelo, os reatores consomem o excesso de energia reativa, ajustando os níveis de tensões dentro dos limites adequados (CIGRE, 2012).

Em sistemas com tensão igual ou superior a 230 kV, reatores com núcleo de ferro e imersos em óleo são geralmente empregados. Por outro lado, os reatores do tipo seco com núcleo de ar são tradicionalmente utilizados em tensões de até 69 kV, principalmente em aplicações de distribuição geralmente limitadas em até 34,5 kV. No entanto, avanços tecnológicos em materiais permitiram o desenvolvimento de reatores de núcleo a ar para operar em tensões superiores as mencionadas. Devido à ausência de óleo e do núcleo de ferro, esses reatores apresentam menores perdas, são mais fáceis de instalar e requerem menos manutenção (RIBEIRO, 2020).

Dada a vital importância dos reatores *shunt* para garantir a operação adequada do sistema de transmissão, especialmente na regulação de tensão por meio do controle de situações com excesso de reativo capacitivo, é de extrema importância implementar sistemas de proteção avançados para esses equipamentos. Essas estratégias de proteção devem ser projetadas com o objetivo de detectar prontamente quaisquer anomalias na operação dos

reatores *shunt*, assegurando sua integridade e prevenindo atuações inadequadas.

Sobre as estratégias de proteção, destaca-se a importância de manter as proteções ajustadas adequadamente para assegurar a rápida identificação de curtos-circuitos internos e evitar a operação incorreta para faltas externas. Visando atingir essa meta, e garantir a plena operação do sistema, é fundamental estudar o comportamento dos reatores *shunt* em situações normais e críticas de operação, como durante curtos-circuitos internos, curtos-circuitos externos e durante a energização.

Dentre os diversos tipos de curtos-circuitos, existem aqueles que quase não alteram os valores das correntes medidas pelos transformadores de corrente (TCs) do reator, por exemplo, faltas entre espiras ou faltas espira-terra envolvendo poucas espiras. Essas condições, resultam em baixas correntes de falta que são difíceis de serem identificadas pelos algoritmos de proteção. A detecção de condições anormais de operação, como esses curtos-circuitos com baixa corrente de falta, é importante, pois a continuidade de uma falta por um período prolongado pode levar a um superaquecimento, resultando em perdas consideráveis para a integridade física do equipamento. Assim, objetivando-se a identificação dessas faltas críticas, geralmente são empregadas funções de proteção envolvendo elementos diferenciais, sobrecorrente, direcional de sequência e elemento de falta restrita a terra (IEEE, 2007). No mais, a proteção utilizando a função de distância também pode ser aplicada (DOBRYŃSKI et al., 2017; Gajić; HILLSTRÓM; KOCKOTT, 2014).

Considerando esse cenário, nota-se no SIN um número significativo de desligamentos de reatores *shunt* devido a atuações incorretas de suas proteções. A título de exemplificação, em novembro de 2009, devido a uma perturbação trifásica e a atuação indevida da proteção de sobrecorrente instantânea residual do reator *shunt* da LT, a transmissão entre as subestações (SEs) Itaberá e Ivaiporã foi totalmente desconectada (ONS, 2009).

Outro caso, em fevereiro de 2011, os Estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe sofreram com o desligamento do fornecimento de energia elétrica, afetando cerca de 13,5 milhões de clientes. Conforme informado pela Itaipu Binacional, empresa responsável pela produção de energia na usina de Itaipu, verificou-se um defeito no reator da linha de transmissão que liga Foz do Iguaçu a Ivaiporã. Como resultado, houve uma falta que resultou no desligamento automático da linha de transmissão conectada ao reator, bem como de todas as linhas conectadas entre a usina de Itaipu e a subestação de Foz do Iguaçu (ANEEL, 2016). Nessa situação, a linha de transmissão conectada ao reator foi desligada devido à operação correta da proteção diferencial. Entretanto, por causa do sobrealcance transitório, a proteção de distância empregada nas demais linhas atuou incorretamente, ocasionando o desligamento (MME, 2011).

Posteriormente, em 2012, a linha de transmissão de Porto Velho a Abuna enfrentou

uma sequência de distúrbios causados por uma inadequação no dimensionamento da proteção diferencial de fase do reator *shunt* associado à linha de transmissão. Essa falha levou a uma operação inadequada da proteção em casos de curtos-circuitos monofásicos externos ao equipamento. Já em 2015, a linha de transmissão de Corumbá foi desconectada por causa da operação indevida da proteção diferencial do reator (ANEEL, 2016).

Considerando a importância do reator *shunt* para o correto funcionamento do SIN e o controle dos níveis de tensão realizado pelo ONS, torna-se importante a utilização de proteções eficientes nesses equipamentos. A escolha e ajuste adequados das proteções para reatores dependem de estudos das diversas condições operacionais desse equipamento, justificando a necessidade de modelos apropriados para representá-los. Além disso, para garantir uma proteção eficaz, é essencial que os esquemas sejam capazes de identificar não apenas curtos-circuitos internos e externos, mas também diferenciá-los quanto a natureza do comportamento do equipamento durante momentos de energização. Nesse sentido esta pesquisa explora a aplicação nos reatores *shunt* das funções *Restricted Earth Fault* (REF), direcional de sequência negativa, diferencial e distância.

1.2 Motivação

Diferentes trabalhos fornecem estudos e resultados sobre funções de proteção aplicadas em reatores *shunt*. Em (CIGRE, 2012), são analisados os esquemas de proteção de acordo com as características desses equipamentos, seja referente ao tipo de reator ou a sua aplicação no sistema. O trabalho apresentado em (BASHA; THOMPSON, 2013) expõem práticas de proteção em reatores *shunt* aplicados em linhas de transmissão, incluindo reatores *shunt* do tipo seco com núcleo a ar. Neste trabalho são apresentadas algumas funções de proteção, entre elas a função diferencial e a função de falta restrita a terra. Ademais, (CHOWDHURY et al., 2023a) analisa uma melhoria na função REF, a qual é implementada com elementos de bloqueio. Além disso, (KASZTENNY; FISCHER; ALTUVE, 2014) esclarece os princípios da função direcional de sequência negativa aplicados em reatores *shunt*, geradores e banco de capacitores. No mais, apesar de geralmente empregada como função de retaguarda e não comumente utilizada em trabalhos relacionados à proteção de reatores, como os mencionados anteriormente, a função de distância demonstra resultados promissores quando aplicada no esquema de proteção desses equipamentos, conforme descrito por (SILVA, 2020).

Estes trabalhos apresentam a relevância dos reatores nos sistemas de transmissão e a fundamental importância das investigações sobre as proteções empregadas nesses equipamentos. Apesar das funções citadas serem tradicionalmente empregadas, algumas dessas lógicas não atuam corretamente para alguns casos de curto-circuito. Por exemplo, a proteção diferencial enfrenta limitações de sensibilidade para detectar faltas entre espiras

e faltas próximas ao terminal neutro e que envolvam o terra. Quanto à REF, ela oferece proteção sensível para faltas próximas ao terminal neutro e que envolvam o terra, no entanto, essa função só é eficaz na detecção de curtos-circuitos relacionados ao terra (KASZTENNY; THOMPSON; FISCHER, 2010). Independente das limitações dessas funções, é essencial que elas sejam incluídas nas investigações, com objetivo de desenvolver novos métodos que aprimorem seu desempenho ou identificar um conjunto de funções complementares, fortalecendo a segurança do esquema de proteção.

1.3 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o desempenho das funções *Restricted Earth Fault* (REF), direcional de sequência negativa, diferencial e distância para proteção de reatores *shunt* conectados em linhas de transmissão de alta tensão, quando expostos a diferentes situações de curtos-circuitos. Dessa forma, analisar o comportamento desses elementos, identificando os ajustes otimizados que permitam determinar qual é o mais eficaz para a proteção, completam o propósito final deste trabalho. Para essa finalidade, empregou-se o modelo de reator *shunt* sugerido por (RIBEIRO, 2020), com o intuito de expor o comportamento desse equipamento em situações atípicas ao sistema, como curtos-circuitos, e em situações típicas, como casos de energização. Ressalta-se que o uso de um modelo apropriado para o reator viabiliza uma análise precisa de seu funcionamento, possibilitando ajustar e implementar adequadamente a proteção.

Visando avaliar o desempenho das funções de proteção comumente usadas no reatores *shunt*, foram realizadas análises e implementações computacionais, como forma de validar os resultados obtidos. Portanto, para melhor exposição, a seguir são estabelecidos alguns objetivos específicos:

- Detalhar fundamentos teóricos acerca das principais características operacionais dos reatores *shunt*;
- Descrever as lógicas das proteções analisadas: *Restricted Earth Fault* (REF), direcional de sequência negativa, diferencial e distância;
- Modelar reatores *shunt* por meio do *software* ATP (*Alternative Transients Program*);
- Implementar as lógicas das funções de proteção;
- Analisar o comportamento dos elementos de proteção sugeridos considerando a influência do tipo de falta, do número de espiras curto-circuitadas, do fator de dispersão, da localização da falta na bobina e do desempenho durante a energização;
- Analisar a operação e a sensibilidade das proteções estudadas diante de diversas configurações de falta no sistema elétrico;

- Comparar, dentre as implementações analisadas, o desempenho nos quesitos atuação, sensibilidade e rapidez;
- Expor as conclusões acerca dos resultados provenientes das simulações computacionais realizadas.

1.4 Organização do texto

A estrutura desta pesquisa é apresentada da seguinte maneira:

- No Capítulo 2, são abordados os aspectos construtivos fundamentais dos reatores *shunt*, detalhando suas características operacionais.
- No Capítulo 3, são detalhadas as principais filosofias das funções de proteção utilizadas nos reatores *shunt*, explorando a aplicação de distintos métodos e analisando suas características.
- No Capítulo 4, são expostos os modelos utilizados para o modelo do sistema elétrico considerado e do reator *shunt*. No mais, nesse capítulo é explicado a metodologia empregada para implementação das funções de proteção.
- No Capítulo 5, são discriminadas as particularidades do sistema analisado e os ajustes das proteções avaliadas. Além disso, são apresentados os casos simulados de curto-circuito e os resultados obtidos por meio das análises transitórias e das análises da sensibilidade paramétrica. Em seguida, é realizada uma análise comparativa entre as funções analisadas.
- No Capítulo 6, são expostas as conclusões sobre os resultados colhidos e as propostas para trabalhos futuros.

1.5 Publicações

Sobre a divulgação dos estudos elaborados durante o desenvolvimento desta dissertação, as seguintes publicações foram realizadas:

- Ferreira, D. G., Almeida, M. L. Aumento da Continuidade no Fornecimento em Linhas de Circuito Duplo Por Meio do Emprego da Proteção Diferencial Transversal. XV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2023.
- Ferreira, D. G., Almeida, M. L., Negrete, L. P. G. Uma Avaliação Comparativa Entre as Funções Direcional de Sequência Negativa e de Distância Aplicadas em Reatores *Shunt*. XXV Congresso Brasileiro de Automática CBA, 2024.

2 Reator *Shunt*

No decorrer da operação normal de um sistema de energia elétrica, é importante manter as tensões de transmissão dentro de uma margem pré-estabelecida. Esses limites de operação visam prevenir sobretensões no sistema que possam causar curtos-circuitos ou danificar equipamentos, além de preservar a continuidade na transmissão de energia elétrica. Nesse cenário, os reatores *shunt* se destacam como soluções eficazes para reduzir o efeito capacitivo nas extensas linhas de transmissão, contribuindo para a regulação da tensão.

Os reatores *shunt* têm a capacidade de absorver potência reativa, assim como a maioria das cargas do sistema, que são indutivas. Por outro lado os capacitores *shunt* geram potência reativa para o sistema. Assim, o controle dos níveis de tensão é efetuado por meio do gerenciamento da geração e absorção de potência reativa pelo sistema (SANTOS, 2021).

Dentre as diversas aplicações, o reator pode ser utilizado frente a transientes resultantes de curtos-circuitos, reduzindo as correntes de falta. Nesse caso, o equipamento atua como limitador da corrente de falta, inibindo o rápido aumento dessa grandeza. Essa abordagem é vantajosa, pois, mesmo diante de um aumento no nível de curto-circuito, não será necessário realizar ajustes adicionais nas proteções dos equipamentos sujeitos a esse novo patamar de curto-circuito. Nesse contexto, o reator pode ser conectado em série com as linhas de transmissão ou por meio do seccionamento de um barramento, o que resulta na minimização dos efeitos eletromecânicos e térmicos nos enrolamentos dos equipamentos. Portanto, ao diminuir os estresses mecânicos, os reatores limitadores de corrente prolongam a vida útil de dispositivos como transformadores (MONTEIRO, 2005).

A presença frequente de curtos-circuitos monofásicos em sistemas de transmissão impulsiona outra utilização dos reatores, sendo neste caso voltados para supressão de arcos elétricos. Em resposta à ocorrência das faltas, os disjuntores da fase afetada são abertos, dando origem às correntes de arco primário entre essa fase e o solo. Neste cenário, com a abertura monopolar da fase defeituosa, acontecerá um acoplamento eletrostático e eletromagnético entre as fases intactas e a fase aberta, gerando indução de tensão e corrente na fase afetada. Se essa tensão induzida não for dissipada e a área afetada permanecer ionizada, há a possibilidade de reacendimento do arco entre a fase e o solo, originando a corrente de arco secundário (ALCAHUAMAN, 2007). Para reduzir essa corrente de arco secundário, originada pelas aberturas monopolares e pela interação entre as fases, reatores de neutro são empregados.

A instalação do reator de neutro é realizada no neutro dos reatores *shunt* com a

Tabela 2.1 – Limites de Tensão segundo ONS.

Tensão Operativa (kV)	Condição Normal (kV) (pu)		Condição de Emergência (kV) (pu)	
≤ 138	-	0,95 a 1,05	-	0,90 a 1,05
230	218 a 242	0,95 a 1,05	207 a 242	0,90 a 1,05
345	328 a 362	0,95 a 1,05	311 a 362	0,90 a 1,05
440	418 a 460	0,95 a 1,046	396 a 460	0,90 a 1,046
500	500 a 550	1,00 a 1,10	475 a 550	0,95 a 1,10
525	500 a 550	0,95 a 1,05	475 a 550	0,90 a 1,05
765	690 a 800	0,95 a 1,046	690 a 800	0,90 a 1,046

Fonte: (ONS, 2011)

intenção de aumentar a reatância de sequência zero equivalente da linha de transmissão, à qual o reator está conectado (ALVES, 2011). Com uma impedância de sequência zero elevada, as correntes de curto-circuito monofásico têm magnitude reduzida (CIGRE, 2012). Além do mais, os reatores são empregados para regular os níveis de tensão harmônica e para restringir as correntes de falta, em sistemas de corrente contínua. (CARLSON, 2002).

Por fim, considerando a aplicação em sistemas de corrente alternada, na qual os reatores têm um papel essencial no controle de tensão ao serem conectados em paralelo com as linhas de transmissão, o objetivo principal desta pesquisa é investigar o desempenho das funções de proteção durante essa aplicação.

2.1 Aplicação no Controle de Tensão

Os níveis de tensões operativas de transmissão devem respeitar uma faixa limite de operação, segundo o nível de tensão da instalação (ONS, 2009). Na tabela 2.1, presente no submódulo 23.3 do ONS, é possível observar os níveis de tensão determinados para condição normal e para condição operativa de emergência. A título de exemplo, considerando a tensão de 500kV adotada neste trabalho, o nível de tensão deve permanecer entre 1,00 e 1,10 pu durante a operação normal do sistema elétrico. A aplicação dos reatores *shunt* pode ser realizada justamente no controle desse limite superior.

Devido às suas características de construção, uma linha de transmissão possui capacitâncias distribuídas ao longo de toda sua extensão. Essas capacitâncias drenam a chamada corrente capacitiva da linha, que é responsável pelo efeito *Ferranti* e por interferências que podem prejudicar o desempenho do sistema de proteção (ALMEIDA, 2016). Visando esclarecer esse efeito, ilustra-se na figura 2.1, uma linha de transmissão representada pelo modelo π , cujas extremidades, transmissor e receptor, são indicados

pelas barras i e j , respectivamente.

A rejeição de carga ou a baixa demanda de energia dos consumidores, correspondentes a condição de carga leve, proporciona uma situação em que a corrente de carga se torna inferior à corrente capacitiva drenada pelas susceptâncias, demonstradas pelas admitâncias $Y/2$ na figura 2.1 (RIBEIRO, 2020). Nessas ocasiões, em que a corrente que flui por intermédio da susceptância distribuída da própria linha é maior do que aquela associada à carga na extremidade receptora da linha, o campo elétrico absorverá a energia excedente. Isso resultará em um aumento da potência reativa capacitiva e, por conseguinte, em uma elevação da tensão na linha. As características desse acontecimento definem o Efeito *Ferranti* (FUCHS, 1979).

Este efeito acarreta consequências adversas, como a exigência de condutores com secções maiores, a necessidade do aumento do nível de isolamento das linhas, a autoexcitação de máquinas síncronas e o agravamento do Efeito Corona (FUCHS, 1979). Devido a isso, os reatores *shunt* são aplicados visando reduzir as sobretensões indesejadas na linha e, conseqüentemente, diminuir as implicações negativas da utilização de linhas de transmissão longas e de alto efeito capacitivo.

Visando regular a tensão da linha de transmissão, a compensação em derivação com bancos de reatores indutivos opera absorvendo o excesso de energia reativa capacitiva. Essa compensação é possível porque a tensão guarda uma relação direta com a potência reativa Q , conforme exposto na equação 2.1 (STEVENSON, 1975).

$$|\widehat{V}_j| = \frac{(|\widehat{V}_i|)^2 - Q \cdot X_L}{|\widehat{V}_i| \cdot \cos(\theta_\phi)} \quad (2.1)$$

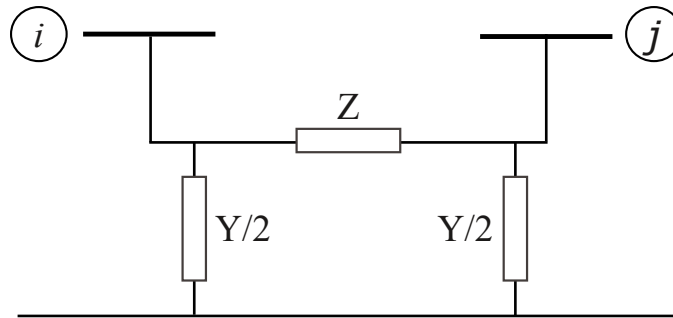
sendo \widehat{V}_j a tensão na barra j , \widehat{V}_i a tensão na barra i , X_L a reatância indutiva da linha de transmissão e θ_ϕ a diferença angular entre as tensões \widehat{V}_j e \widehat{V}_i .

Ao analisar a equação 2.1, mantendo \widehat{V}_i , θ_ϕ e X_L contantes, observa-se que o excesso de potência reativa indutiva, com sinal positivo, resulta na redução do módulo de \widehat{V}_j . Por outro lado, o excesso de potência reativa capacitiva, com sinal negativo, contribui para o aumento do módulo de \widehat{V}_j . Portanto, reduzindo a potência reativa capacitiva da linha de transmissão, a tensão na barra j diminui. Sendo assim, o reator *shunt* segue o princípio da absorção de energia reativa capacitiva sobressalente, gerando a regulação do nível de tensão (STEVENSON, 1975).

2.2 Tipos de Conexões

Os reatores podem ser conectados de diferentes formas ao sistema elétrico de potência, conforme ilustra a figura 2.2. No local 1, os reatores são conectados no barramento

Figura 2.1 – Modelo Linha de Transmissão



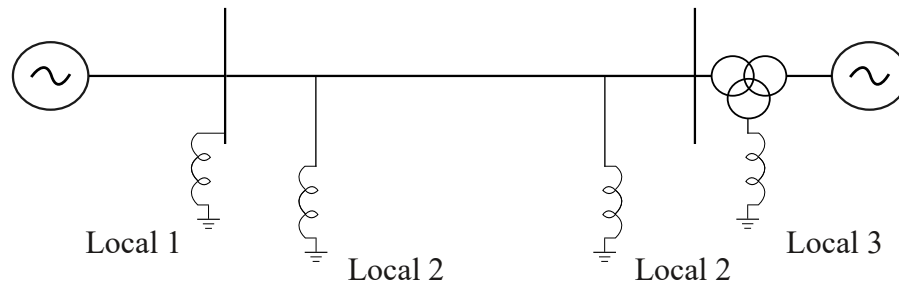
Fonte: (RIBEIRO, 2020), Adaptado.

da subestação, no local 2, eles são conectados nos terminais da linha de transmissão e no local 3, os reatores são conectados no terciário do transformador. Observa-se que, para determinação da posição do reator, é fundamental realizar o estudo de fluxo de potência e analisar as diversas configurações possíveis do sistema.

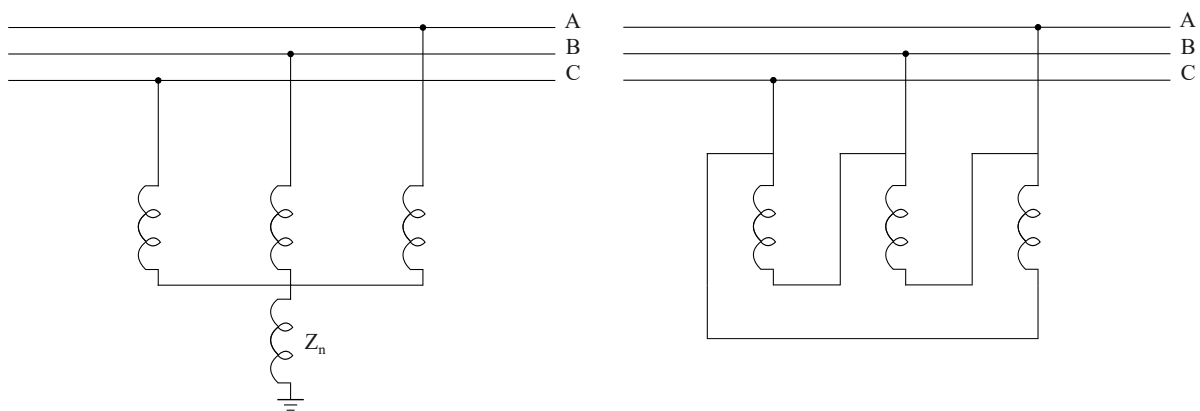
Conectados no Local 1 e no Local 2, os reatores têm a função de realizar o controle de tensão (CIGRE, 2012). Em alguns casos, quando conectados no Local 2, dependendo das fontes conectadas ao sistema, os reatores conectados às extremidades das linhas de transmissão podem possuir a mesma potência. No entanto, para o caso de fontes de forças divergentes, as potências dos reatores também são diferentes, conforme análises feitas por meio do estudo de fluxo de potência. Assim, a compensação reativa total é alcançada ao designar, conforme determinado pelo estudo de fluxo de potência, a parte da potência que corresponde à compensação necessária para os reatores específicos.

Os reatores podem ainda ser conectados no terciário do transformador, conforme indicado pelo Local 3 da figura 2.2. Nessa configuração, a conexão é empregada para evitar as sobretensões derivadas da interação da capacitância da linha com alguma parte saturável da reatância indutiva do sistema, gerando ferorrressonância. Em consequência da ferorrressonância, originam-se harmônicos e sobretensões indesejadas no sistema. Logo, com a utilização de um reator *shunt* no terciário do transformador, tornará menos intensa esse tipo de sobretensão, diminuindo a tensão para patamares inferiores aos que induzem a saturação do núcleo do transformador (SANTOS, 2021).

No mais, nas conexões internas os enrolamentos de cada fase do reator podem ser construídos individualmente, em unidades monofásicas, podendo ser posteriormente conectadas em uma configuração trifásica estrela ou delta, conforme exemplifica as figuras 2.3a e 2.3b. A adoção de unidades monofásicas em conexões de sistemas trifásicos contribui para a redução da incidência de episódios de faltas entre fases. Consequentemente, essa configuração é mais econômica e possui vantagens físicas significativas durante o processo de instalação (CIGRE, 2012).

Figura 2.2 – Conexão de Reatores *Shunt* ao Sistema Elétrico de Potência

Fonte: Autor



(a) Reator conectado em estrela.

(b) Reator conectado em delta.

Figura 2.3 – Conexões de Reatores.

Fonte: (RIBEIRO, 2020)

2.3 Aspectos Construtivos

Os reatores empregados em linhas de transmissão são classificados pelas suas características construtivas, podendo ser tanto do tipo seco quanto a óleo. Esses equipamentos também são classificados segundo o tipo de núcleo, que pode ser de ferro ou a ar. Comumente os tipos de reatores utilizados em sistema de transmissão são:

- Reator seco com núcleo a ar;
- Reator imerso em óleo e com núcleo a ar; e
- Reator imerso em óleo e com núcleo de ferro.

Apesar da comum utilização de reatores imersos em óleo para tensões superiores a 34,5 kV, os reatores do tipo seco, como exposto na figura 2.4, apresentam vantagens, quando comparados com os imersos a óleo, como baixo custo operacional, tamanho reduzido, perdas menores, manutenção mais simples e ausência de óleo isolante (IEEE, 2018). Os reatores

Figura 2.4 – Reator *Shunt* de núcleo de ar do tipo seco.

Fonte: (CHOWDHURY et al., 2023b).

do tipo seco com núcleo a ar, são montados como unidades monofásicas que, em seguida, são conectadas em um arranjo trifásico em configuração estrela. Dessa forma, preserva-se o campo magnético e evita-se a interferência entre suas unidades. Assim, destaca-se a importância de especificar adequadamente a disposição, distância entre as fases e espiras, assim como a sua isolação (BASHA; THOMPSON, 2013).

Antigamente, esse modelo de reator tinha suas aplicações limitadas devido à sua construção física não ser capaz de suportar a intensidade elevada do campo elétrico presente em sistemas de alta tensão, sendo recomendado para sistemas de até 34,5 kV e instalado no lado terciário do transformador da subestação (CARLSON, 2002). No entanto, graças aos avanços tecnológicos e materiais, foram desenvolvidos reatores a ar capazes de suportar tensões mais elevadas.

Ressalta-se que durante o processo de energização, o reator, por ser composto por um conjunto de indutâncias, gera uma corrente transitória. No caso do reator seco com núcleo a ar, que não possui ferro no seu núcleo, não ocorre saturação. Por isso, a corrente transitória de energização é relativamente baixa em comparação com os reatores que possuem núcleo de ferro (CIGRE, 2012).

Os reatores que utilizam imersão em óleo com núcleo a ar, assemelhando-se aos reatores do tipo seco, demonstram uma indutância constante, resultando em uma relação linear entre corrente e tensão. Mesmo sem o núcleo de ferro, durante a energização dos reatores imersos em óleo e com núcleo a ar, ocorre um fenômeno transitório. Isso leva a um aumento no fluxo magnético gerado, que, dependendo da intensidade, pode causar

Figura 2.5 – Reator *Shunt* com núcleo de ferro imerso em óleo.

Fonte: (CHOWDHURY et al., 2023b).

sobretensão e efeitos eletrodinâmicos no reator. Conseqüentemente, nesse modelo de reator, é desenvolvido um escudo magnético, o qual tem a finalidade de proteger e conter o fluxo gerado durante a energização (HARLOW, 2003). A principal limitação desse tipo de reator está relacionada ao óleo isolante, que demanda uma manutenção complexa, incluindo a necessidade de retiradas regulares de amostras para análise e detecção de vazamentos (RIBEIRO, 2020).

Visando evitar a saturação do núcleo e manter a característica linear entre corrente e tensão, os reatores imersos em óleo e com núcleo de ferro, ilustrados na figura 2.5, são projetados com ranhuras no entreferro. Essas ranhuras permitem que o reator suporte uma densidade de energia mais elevada, tornando-o adequado para ser utilizado em sistemas de extra-alta tensão. Ademais, as ranhuras possibilitam a eliminação do fluxo remanescente, contribuindo para reduzir a corrente de *inrush*.

Com sua construção similar a de um transformador, os reatores imersos em óleo e com núcleo de ferro apresentam ranhuras menores, resultando em um ponto de saturação de 1,35 vezes a tensão nominal. No entanto, quando verifica-se a ausência de ranhuras nesse equipamento, o ponto de saturação ajusta-se em 1,25 pu de tensão (NASHAWATI et al., 2011).

A respeito da construção do reator com núcleo de ferro, sua estrutura consiste em fases separadas em três pernas ou cinco pernas, com duas pernas livres. As pernas designadas como livres nos reatores são utilizadas para reduzir o fluxo de sequência zero nos enrolamentos das fases. Com essa configuração, durante energizações simétricas, mesmo com um transitório, não há desequilíbrio entre as fases do reator, evitando a

ocorrência de correntes de sequência zero. Contudo, em energizações assimétricas, ocorrerá um desequilíbrio entre as fases, possibilitando o surgimento de corrente de sequência zero (BASHA; THOMPSON, 2013; Gajić; HILLSTRÖM; KOCKOTT, 2014).

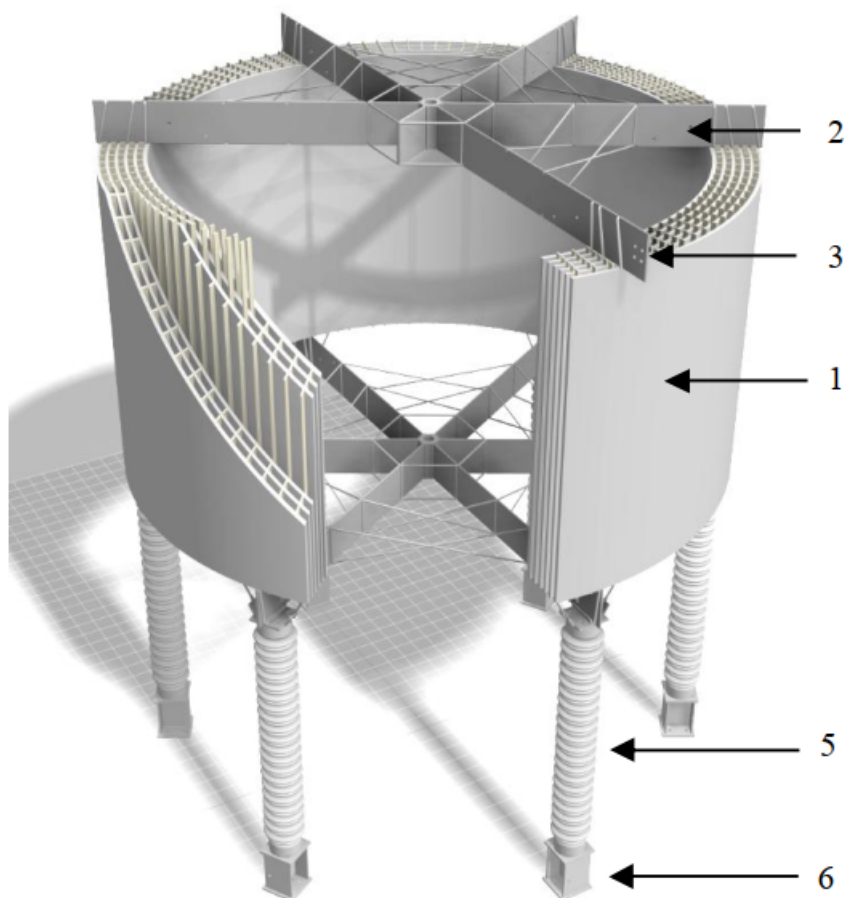
A presente pesquisa tem como foco análises em reatores *shunt* do tipo seco com núcleo a ar. Portanto, a seguir será apresentado maiores detalhes construtivos sobre esse equipamento.

2.3.1 Detalhamento Construtivo: Reator *Shunt* do tipo seco com núcleo a ar

O reator de núcleo de ar do tipo seco é composto por um enrolamento cilíndrico, formado por uma ou mais camadas concêntricas de condutores de alumínio isolados com filme ou fita de vidro. Normalmente, é preferido o alumínio ao cobre devido ao seu menor peso específico e pelo custo de investimento mais baixo do enrolamento, mantendo um nível comparável de perdas (PAPP; SHARP; PEEL, 2014). Nas figuras 2.6 e 2.7 são expostos maiores detalhes sobre as partes do reator, sendo que as indicações seguem a seguinte definição: indicação 1 o enrolamento, indicação 2 a aranha, indicação 3 os terminais, indicação 4 o bastão de duto de fibra de vidro, indicação 5 o isolante e indicação 6 o suporte de montagem.

As camadas dos reatores são eletricamente conectadas em paralelo por meio de conexões soldadas a braços transversais de alumínio, frequentemente chamados de aranhas, localizados na parte superior e inferior da bobina. Cada aranha possui um terminal para a ligação elétrica do reator. Os enrolamentos cilíndricos concêntricos são radialmente separados por dutos de resina de poliéster reforçada com fibra de vidro, que formam os canais de ar necessários para o resfriamento do enrolamento. Assim, o resfriamento é feito pela convecção natural do ar ambiente, que entra pela extremidade inferior do enrolamento e sai pela extremidade superior. Além disso, uma tinta ou revestimento protetor é aplicado à superfície do enrolamento encapsulado em epóxi de fibra de vidro, para proteger o epóxi da radiação ultravioleta e melhorar a resistência às intempéries. No caso em que os locais de instalação apresentam condições adversas de poluição, os reatores podem ser equipados com um teto protetor, conhecido como cartola. Ademais, o reator é montado sobre vários isoladores de base e suportes de montagem, cuja classificação depende dos requisitos específicos do sistema no local de instalação (CAVERLY et al., 2017).

Os reatores *shunt* do tipo seco são tipicamente projetados como monofásicos, com três unidades conectadas em estrela instaladas lado a lado. Assim, forma-se um banco de reatores *shunt* trifásico, com o neutro podendo ser aterrado ou não, conforme as necessidades do sistema. Além disso, esses equipamentos não são enclausurados em tanques de aço aterrado, logo todas as suas partes devem ser consideradas energizadas. Portanto, esses reatores devem ser instalados de forma a impedir o contato acidental pelo pessoal da estação. Para isso, podem ser usados dois métodos: cercar o reator ou elevá-lo a uma

Figura 2.6 – Detalhes: Reator *Shunt* do tipo seco com núcleo a ar.

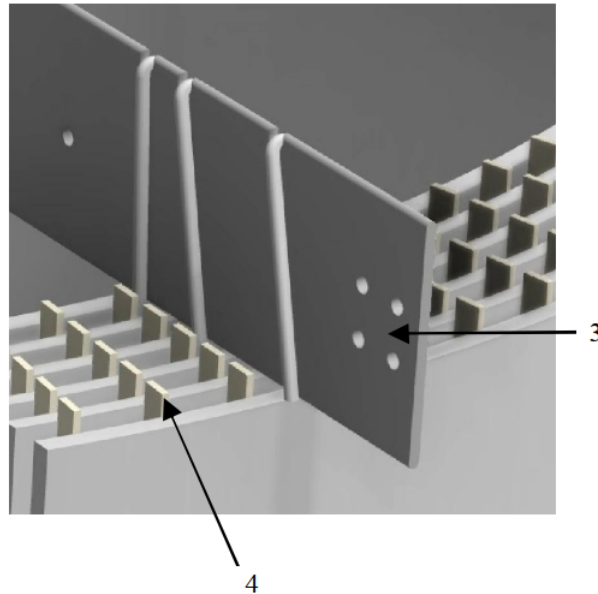
Fonte: (CAVERLY et al., 2017)

distância segura do chão, escolhendo o comprimento adequado dos suportes de montagem (PAPP; SHARP; PEELO, 2014).

Reatores com núcleo a ar eram tradicionalmente utilizados em sistemas de média tensão, limitados a 34,5 kV. Contudo, o avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de novos reatores desse tipo, voltados para aplicações em sistemas de extra-alta tensão. Com essas inovações, tornou-se viável o uso em série para tensões de até 800 kV e 600 MVAR. Além disso, verificou-se melhorias em aplicações de reatores *shunt*, sendo possível o emprego em até 550 kV e 200 MVAR (LIMA, 2024). Um exemplo da utilização deste equipamento pode ser visto na SE Silvânia, onde foram instalados, em 2023, quatro reatores de 500 kV: dois na barra e dois na linha (GRILLO; TEIXEIRA, 2024).

Por fim, destaca-se que os reatores *shunt* podem apresentar aspectos construtivos modulares sendo projetados em duas ou mais bobinas conectadas em série por fase e podendo ser divididas em duas colunas. Normalmente utilizada em sistemas entre 420 kV e 550 kV (ROSA, 2021), essa configuração dispõe de significativas vantagens, por

Figura 2.7 – Detalhes: Terminais e bastão de duto de fibra de vidro.



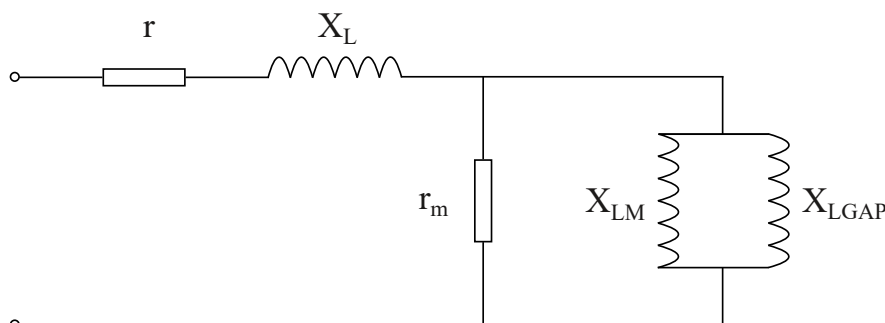
Fonte: (CAVERLY et al., 2017)

exemplo em caso de falhas típicas no reator apenas uma coluna ou um único enrolamento é danificado (DOPPLMAIR; VENEDIGER; POINTNER, 2022). Assim, em caso de uma fase completa ser mantida como reserva, ainda seria possível substituir uma coluna e permanecer com um coluna sobressalente. Portanto, a construção modular de reatores *shunt* facilita a operação do reator, diminuindo o custo total das reservas de equipamentos e mitigando a indisponibilidade de uma reserva após uma falha até que um novo reator seja entregue.

2.4 Características Operacionais Normais e Críticas

Os aspectos do reator *shunt* podem ser explicados com base em seu circuito equivalente exposto na figura 2.8. Nesse circuito, são apresentadas a resistência, r , que representa as perdas nos enrolamentos e a reatância, X_L , ocasionada pela indutância de dispersão. Do circuito, ainda se verifica o núcleo do reator modelado por r_m , que indica as perdas por histerese no núcleo. No mais, em paralelo, tem-se as reatâncias de excitação do núcleo e das ranhuras, representadas por X_{LM} e X_{LGAP} , respectivamente.

Juntamente com as perdas nos enrolamentos, também surgem perdas magnéticas no núcleo do reator. As perdas nas resistências dos enrolamentos, perdas Joules, correspondem de 60% a 70% das perdas no reator. Além disso, as perdas no ferro equivalem de 20% a 30% das perdas. Por fim, as perdas por causa das correntes parasitas nos enrolamentos correspondem de 5% a 15% das perdas. A junção dessas perdas é considerada baixa

Figura 2.8 – Circuito Equivalente Reator *Shunt*.

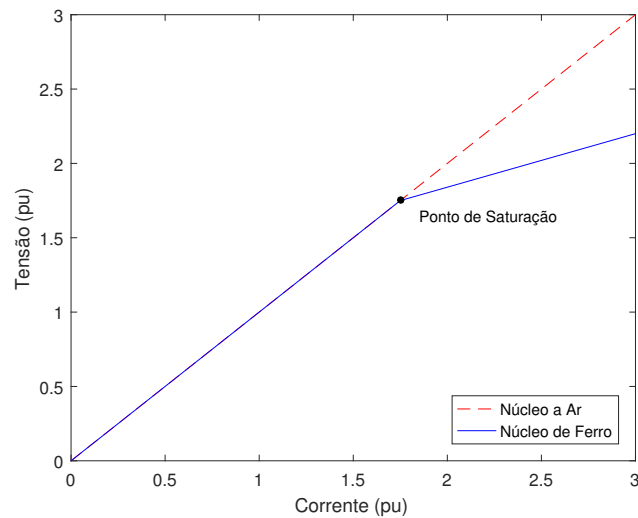
Fonte: (YUE H.AND XU et al., 2009)

e equivale a 0,2% da potência ativa. Assim, ao considerar as perdas em 0,2% o total de perdas, conclui-se que o reator *shunt* é um equipamento de alto rendimento (YUE H.AND XU et al., 2009).

Apesar do alto rendimento, para que sejam definidas as funções de proteção e seus ajustes para esse equipamento, devem ser consideradas algumas peculiaridades. Por exemplo, o fluxo residual que surge frequentemente nos reatores, após ligá-los e desligá-los, fazendo com que seu núcleo não seja completamente desmagnetizado, resultando em um fluxo residual. No entanto, esse fluxo residual é visto como insignificante, da mesma forma que a histerese gerada nas ranhuras do núcleo (CIGRE, 2012). Além do mais, o reator é conectado a um sistema trifásico, por isso pode ocorrer assimetria entre fases. Esse desequilíbrio surge devido às características construtivas, resultantes das disparidades entre as bobinas que constituem o reator ou das diferenças entre as unidades monofásicas que compõem um banco trifásico. O desequilíbrio entre os enrolamentos e as fases pode ser identificado pela presença de uma corrente de sequência zero fluindo pelo neutro (GAJIC; HILLSTROM; MEKIC, 2003). Visando lidar com essas disparidades construtivas, uma solução possível é realizar o ajuste do *pickup* das proteções de sobrecorrente de fase e de neutro, considerando a existência dessa corrente de sequência zero.

Quando em operação normal, é possível verificar a linearidade entre a corrente e a tensão do reator. Assim, o aumento na corrente ocasiona um aumento proporcional na tensão do núcleo. Além de tudo, o fluxo e a densidade do fluxo magnético no núcleo variam proporcionalmente a tensão aplicada no núcleo (ALVES, 2011).

Em reatores com núcleo magnético de ferro, o fluxo magnético atinge a saturação a partir de uma densidade específica de fluxo, conhecida como ponto de saturação, conforme ilustrado na figura 2.9. A corrente para magnetização do núcleo antes do ponto de saturação é pequena (ALVES, 2011). Dessa forma, um leve incremento na corrente é o bastante para resultar em um aumento na densidade do fluxo magnético. Por outro lado, acima do ponto

Figura 2.9 – Característica de magnetização dos reatores *shunt* com núcleo de ferro e a ar.

Fonte: (RIBEIRO, 2020)

de saturação, é necessário uma considerável corrente adicional para um aumento de densidade de fluxo. Assim, em comparação com o ponto pré-saturação, não existe mais uma relação proporcional entre a tensão e a corrente. Em contrapartida, em um reator de núcleo de ar do tipo seco, a saturação do núcleo não ocorre devido à ausência de um núcleo de ferro (BASHA; THOMPSON, 2013). Isso resulta em um aumento linear da corrente conforme a tensão aumenta.

Outro aspecto na operação de reatores é a presença de harmônicas, as quais se originam devido à saturação parcial do circuito magnético do núcleo e à assimetria entre os enrolamentos do reator. Durante a operação normal, é comum a predominância de harmônicos de terceira ordem, cuja corrente é identificada no neutro como um resíduo da corrente de sequência zero (CIGRE, 2012). Ademais, durante a energização verifica-se a existência de harmônicas de segunda e quinta ordem, em virtude da corrente de *inrush*. No entanto, durante a energização, o reator exibe níveis de segunda harmônica menores em comparação com a corrente de *inrush* do transformador.

Por ser uma manobra no equipamento e gerar correntes transitórias, durante a energização do reator tem-se condições de operação consideradas críticas. Nesse momento, para reatores com núcleo de ferro, as três fases não recebem correntes simétricas no decorrer da excitação. Com isso, os componentes de decaimento exponencial (DC) serão distintos e terão amortecimentos exponenciais diferentes. Devido a essa característica não linear do equipamento, ocorre o surgimento da corrente *inrush*, sendo similar à corrente de energização de um transformador. Entretanto, em consequência das perdas baixas referentes ao reator *shunt* e dependendo da relação X/R do sistema, o amortecimento dos reatores é mais lento. Logo, tempo de amortecimento é na ordem de segundos, para

reatores, e na ordem de milissegundos, para transformadores (BEDI; PATNE, 2016).

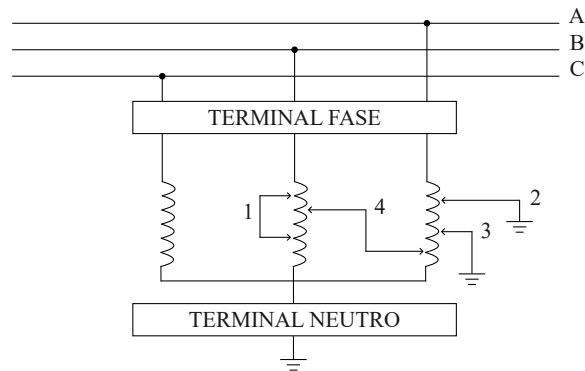
Afetada pela porcentagem de componente DC, a corrente *inrush* contém excesso em conteúdo de segunda harmônica. Dependendo do momento da energização, a porcentagem de componente DC pode variar, sendo que no instante de tensão zero tem-se a maior porcentagem de componente DC e de segunda harmônica. No entanto, em outros instantes de energização os níveis DC podem ser menores, assim como a porcentagem de segunda harmônica. Ressalta-se que são identificados a presença de segunda harmônica em distintas porcentagens de componente DC. Logo, a aplicação de proteções baseadas na segunda harmônica, dependem do nível DC e consequentemente do instante de energização (RIBEIRO, 2020).

Outra operação adversa envolvendo reatores são as desconexões. Nesse caso, após a abertura do reator, existe a possibilidade do surgimento de *currents chopping*, situação em que a corrente é interrompida antes de atingir o seu zero naturalmente. No entanto, apesar do súbito interrompimento da corrente, ainda há estoque de energia magnética no núcleo do TC conectado ao reator. Com o corte da corrente, verifica-se um transiente com decaimento exponencial DC, sem efeitos no primário, devido a energia armazenada ser dissipada no secundário do TC. Como se trata de um transiente apenas no secundário, não havendo corrente medida no primário do TC, a *currents chopping* é crítica, podendo provocar atuações indevidas da proteção (RIBEIRO, 2020).

Em virtude de aspectos relacionados ao seu núcleo de ferro, equipamentos como reatores e transformadores estão sujeitos a sofrerem sobre-excitação. Essa situação ocorre devido fluxo magnético no núcleo ser inversamente proporcional à frequência e diretamente proporcional à tensão aplicada. Logo, quando surgem alterações súbitas aumentando a tensão ou reduzindo a frequência, o núcleo pode ser saturado. Como consequência, reator não opera na região linear e gera um aumento de harmônicas ímpares na corrente de excitação (ALVES, 2011).

As faltas externas ao equipamento protegido também se caracterizam como situações críticas, uma vez que podem gerar corrente de magnetização equivalente da componente DC de energização, no entanto, com menor escala. Por causa da alteração da tensão, em pré-falta e pós-falta, gera-se uma variação no fluxo magnético do núcleo do reator. Com essa flutuação de tensão, o núcleo produz um pico na corrente magnetização. No entanto, o efeito desse pico será minimizado caso o reator permaneça operando em carga.

A presença de curtos-circuitos internos ao reator também resulta em cenários desafiadores na operação desses equipamentos. Em (CIGRE, 2012), os tipos de faltas nesses equipamentos são determinadas conforme o tipo de reator e como são conectados no sistema. (CIGRE, 2012) analisa as seguintes aplicações: reator *shunt* imerso em óleo conectado na barra e conectado diretamente na linha de transmissão; e reator reator *shunt* seco com núcleo a ar conectado no terciário do transformador. Segundo essa análise, o

Figura 2.10 – Faltas em reatores *shunt*.

Fonte: Autor.

reator *shunt* imerso em óleo pode apresentar faltas fase-fase, fase-terra, faltas entre espiras e falhas diversas, como perda de resfriamento ou nível baixo de óleo. Para os reatores a seco, três tipos de faltas podem ocorrer em reatores do tipo seco, considerando a aplicação no terciário do transformador: faltas fase-fase no barramento terciário, faltas fase-terra no barramento terciário e faltas entre espiras no enrolamento do reator.

Em (BASHA; THOMPSON, 2013), são estudadas aplicações em linhas de transmissão. Neste estudo são apresentados três tipos de reatores: reator seco com núcleo a ar, reator imerso em óleo e com núcleo a ar e reator imerso em óleo e com núcleo de ferro. Neste caso, considerando a aplicação do reator e seu tipo, são expostos os seguintes tipos de falta: falta fase-fase, falta fase-terra e falta espira-espira.

Devido ao isolamento com o solo em um reator seco com núcleo a ar, a probabilidade de uma falta espira-terra é muito baixa, a menos que a isolação de terra seja comprometida por um meio condutor. Por outro lado, em reatores imersos em óleo, faltas espira-terra podem ocorrer devido à proximidade com o núcleo e o tanque. Apesar de baixa probabilidade, caso ocorra uma falha no isolamento, uma falta espira-espira, se não for detectada e interrompida rapidamente, pode evoluir para uma falta fase-fase ou uma falta espira-terra (BASHA; THOMPSON, 2013).

Visando aplicações em linhas de transmissão, na figura 2.10 são expostas as diferentes faltas internas que podem ocorrer quando o reator está conectado em estrela aterrado. A falta entre espiras de uma mesma fase, indicada por 1, pode variar em conformidade com a porcentagem de espiras envolvidas no curto-circuito. Logo, existe uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de espiras curto-circuitadas e a impedância do enrolamento. Assim, quanto maior o número de espiras em curto-circuito, menor será a impedância do enrolamento. Ademais, a localização das espiras em falta também pode variar, encontrando-se mais próximas dos terminais das fases ou do neutro.

Os curtos-circuitos referenciados em 2 e 3 correspondem a faltas espira-terra, resultantes da conexão entre o enrolamento da fase e o terra. Semelhante ao curto-circuito na mesma fase, nesse caso também é possível verificar a variação nas espiras envolvidas na falta. No entanto, observa-se que quanto mais próximo do terminal de fase, maior é a quantidade de espiras curto-circuitadas. Por consequência, a bobina da fase com defeito apresentará uma impedância inferior em comparação com as impedâncias das outras bobinas, resultando em um maior desequilíbrio entre as fases (CIGRE, 2012). Por outro lado, quando a falta está mais próxima do terminal de neutro, verifica-se que a quantidade de espiras envolvidas no curto-circuito é menor e, conseqüentemente, a diferença entre as impedância das fases são menores, o que gera desequilíbrios menores. No mais, as faltas 2 e 3 necessitam de identificação rápida, uma vez que podem progredir para curtos-circuitos mais graves, além de provocar aquecimento e comprometer a operação adequada do reator (Gajić; HILLSTRÖM; KOCKOTT, 2014).

Por fim, o curto-circuito 4 corresponde a conexão entre espiras de fases diferentes. Essa situação é possível em reatores *shunt* do tipo seco, os quais são produzidos em unidades monofásicas e posteriormente interligados, utilizam o ar circundante como material isolante. Entretanto, existe um espaçamento seguro entre as fases, proporcionando um melhor isolamento entre elas, de modo que a ocorrência do curto-circuito 4 é rara (BASHA; THOMPSON, 2013).

2.5 Proteções Empregadas em Reatores *Shunt*

Segundo (ONS, 2024), todo componente deve ser protegido localmente por dois sistemas de proteção redundantes e independentes, denominados proteção principal e proteção alternada. Esses sistemas devem ser independentes tanto em termos de hardware (situados em dispositivos físicos diferentes) quanto em termos de *software* (executados em CPUs distintas).

O item 4.5, do submódulo 2.11 presente em (ONS, 2024), define critérios para a proteção de reatores em derivação (reatores *shunt*). De acordo com esse item, cada reator deve possuir um sistema de proteção principal e proteção alternada, composto pelas seguintes funções: função diferencial (87), com bloqueio ou restrição de atuação por corrente de inrush e sobreexcitação; função diferencial de terra restrita (87 R); funções de sobrecorrente instantânea e temporizada de fase (50/51) e residual (50/51 R), associadas ao lado da linha de transmissão (LT) ou do barramento onde o reator está conectado; e funções de sobrecorrente instantânea e temporizada residual (50/51 R), associadas ao lado do neutro do reator, ou funções de sobrecorrente instantânea e temporizada de neutro (50/51 N). Além disso, o sistema de proteção deve incluir proteções intrínsecas, compostas pelas seguintes funções: função para detecção de faltas internas que ocasionem formação

de gás (63) ou aumento da pressão interna (20); função de sobretemperatura do óleo (26) com dois níveis de atuação (advertência e urgência); e função de sobretemperatura do enrolamento (49) com dois níveis de atuação (advertência e urgência).

Em relação à proteção intrínseca, para evitar curtos-circuitos entre espiras, é necessário que a isolação entre elas não se danifique. Logo, são utilizados relés de temperatura nos enrolamentos do reator shunt, visando prevenir a deterioração do isolante. O princípio de funcionamento desses relés baseia-se na medição da temperatura do enrolamento, utilizando imagens térmicas geradas por meio de um cálculo de corrente elétrica. Esse tipo de proteção, assim como a proteção de óleo, possui dois níveis de ação pré-programados: o primeiro nível aciona um alarme e o segundo nível emite um comando de desligamento (RIBEIRO, 2020).

Faltas internas no reator *shunt* podem causar, além do aumento da temperatura do óleo, a formação de gases. A movimentação desses gases pode resultar em risco de explosão e perda total do equipamento. Para mitigar esse risco, são instalados relés de gás do tipo Buchholz, imersos no óleo. Esses relés também detectam perdas de óleo causadas por vazamentos, bem como defeitos como condutores quebrados e conexões desgastadas. A operação do relé de gás ocorre em dois níveis de ação: o primeiro nível aciona um alarme devido à lenta produção de gases, possivelmente causada por falha de isolamento. De igual modo ao relé 26, o segundo nível consiste no desligamento, que é acionado em caso de grande formação de gás devido a curtos-circuitos internos (RIBEIRO, 2020).

A utilização de redundância na proteção de sistemas de alta e extra-alta tensão é estratégica para a operação do sistema elétrico. Dessa forma, caso ocorra uma falha, haverá outra proteção para detectar a anomalia operacional. Além disso, a redundância de proteção nos sistemas permite a detecção de diversos tipos de falhas em reatores *shunt* (SANTOS, 2021). Conforme descrito em (CIGRE, 2012), a proteção do reator depende do tipo de reator e de sua conexão ao sistema de energia. Assim, esta pesquisa tem como objetivo analisar as proteções aplicadas em reatores *shunt* de núcleo de ar conectados em estrela aterrado na linha de transmissão.

O submódulo 2.11 do ONS especifica que todo reator deve conter a função diferencial (87), a qual é incluída na análise desta pesquisa. Além dessa função, as funções REF e direcional de sequência negativa, descritas em (CHOWDHURY et al., 2023b), apresentam resultados promissores. Por fim, a função de distância, analisada em (ALMEIDA; SILVA, 2023), destaca-se como uma potencial proteção principal para reatores *shunt*. Portanto, essas funções são objeto de análise nesta pesquisa.

3 Algoritmos e Funções de Proteção

Projetados para disponibilizar energia elétrica aos consumidores, os sistemas elétricos de potência precisam estar em plena operação constantemente. No entanto, a continuidade no seu funcionamento pode ser prejudicada devido à exposição a diversos danos tais como falhas de operação, mau funcionamento de equipamentos ou descargas atmosféricas. Logo, se faz necessário um esquema de proteção capaz de garantir a correta operação do sistema elétrico, identificando rapidamente condições anormais de operação, como os curtos-circuitos e, conseqüentemente, melhorando o fornecimento de energia elétrica.

A função da proteção do sistema elétrico de potência inclui assegurar a integridade e o funcionamento, somente em condições normais de operação, dos equipamentos que fazem parte do sistema, dentre eles o reator *shunt*. Desse modo, as funções de proteção visam garantir o pleno funcionamento dos equipamentos elétricos, evitando o surgimento de defeitos por meio da identificação de faltas internas ao elemento protegido, isolando de forma rápida e seletiva as partes defeituosas. Assim, para a operação adequada da proteção, os requisitos básicos de um sistema de proteção devem ser respeitados, sendo estes ([ANDERSON, 1999](#)):

- Sensibilidade: competência de identificar curtos-circuitos para as quais ele foi projetado;
- Confiabilidade: aptidão para atuar corretamente quando necessário ou de evitar operações desnecessárias;
- Seletividade: capacidade de desempenhar a máxima continuidade de serviço com um mínimo de desconexões para isolar uma falta no sistema;
- Coordenação: capacidade de determinar os ajustes propícios do sistema de proteção, a fim de se obter seletividade em sua operação;
- Velocidade: capacidade de reduzir o tempo de duração da falta, minimizando danos no sistema protegido;
- Economia: maior qualidade na proteção visando ter máxima proteção ao menor custo, considerando custo versus benefício;
- Simplicidade: capacidade de utilização mínima de equipamentos e circuitos na execução da proteção; e

- **Mantenabilidade:** característica de possibilitar manutenção ágil e precisa, diminuindo os custos de manutenção e o tempo de inatividade do sistema.

Visando atender os requisitos exigidos para o esquema de proteção sistema elétrico de potência, a função *Restricted Earth Fault - REF*, a função direcional de sequência negativa e a função diferencial são empregadas na proteção de reatores *shunt*, as quais são as funções de proteção normalmente empregadas pelos fabricantes (QI et al., 2019; URIONDO et al., 2019; DAS et al., 2017; BASHA; THOMPSON, 2013; MOHAMMAD et al., 2018; ALMEIDA; PERES; SANTOS, 2021; ALMEIDA; PERES; SILVA, 2022). A função de distância também é citada como proteção de retaguarda para reatores. No entanto, a função distância como principal proteção do reator foi investigada em (ALMEIDA; SILVA, 2023), e os resultados apresentados indicaram que a função distância é capaz de identificar casos críticos de falta espira-terra e entre espiras. Assim, objetivando-se adicionar alternativas para a proteção do equipamento estudado, a lógica função de distância será estudada, conforme implementação apresentada em (ALMEIDA; SILVA, 2023). Portanto, neste trabalho, serão analisadas as funções mencionadas.

A comparação das lógicas das funções mencionadas será realizada por meio de uma análise comparativa. Nesse sentido, serão expostas as lógicas e os ajustes utilizados na implementação de cada função examinada. Assim, para o desenvolvimento dos algoritmos, foram coletadas os valores das correntes, utilizando transformadores de corrente apresentados na figura 4.2, sendo TC_A , TC_B e TC_C os TCs empregados para medição das correntes no lado do terminal de fase e TC_{NA} , TC_{NB} e TC_{NC} os TCs utilizados para medição das correntes no lado do terminal de neutro. Uma vez coletadas as informações e considerando que as relações de transformação de corrente (RTC) dos TCs podem variar, torna-se necessário aplicar a estratégia da Normalização de Sinais para normalizar as correntes medidas.

Na Normalização de Sinais a corrente de base é igual a corrente nominal do reator. Dessa forma, as correntes medidas pelos transformadores de corrente instalados nas fases e no neutro são divididas por TAP , constante que é definida na equação 3.1, resultando no correspondente por unidade das respectivas correntes.

$$TAP_{\phi} = \frac{S_R}{\sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot RTC_{\phi}} \quad (3.1)$$

em que S_R indica a potência aparente trifásica do reator; V_{LL} é a tensão nominal de linha a linha do reator; ϕ indica para qual das fases ou do neutro está sendo calculado o TAP_{ϕ} e RTC_{ϕ} a relação de transformação do transformador de corrente envolvido no cálculo.

Ressalta-se que o modelo utilizado nesta pesquisa foi proposto por (RIBEIRO, 2020), portanto, assim como descrito nesse trabalho, todos os transformadores de corrente

utilizados são do tipo C400. Além disso, a relação de transformação dos transformadores de corrente nas fases foi definida em 1200/5, enquanto para o do neutro foi definida em 200/5. Dado que as RTCs dos transformadores são distintas, é essencial realizar a normalização das correntes medidas.

Em seguida a normalização dos sinais, é importante realizar a estimativa dos fasores associados a esses sinais. Nesse processo, o algoritmo de estimação de fasores implementado contribui com sua capacidade de remover componentes DC durante a decomposição, como descrito por (SILVA; KÜSEL, 2012). Assim, as correntes no domínio do tempo são empregadas para calcular as correntes no domínio da frequência. Esse cálculo é realizado a partir dos sinais de entrada, que são amostrados a uma taxa de N amostras por ciclo (com deslocamento amostra a amostra). Nesta pesquisa, foi empregado o algoritmo Filtro Cosseno Modificado, do qual a resposta extingue apropriadamente a componente de decaimento exponencial (HART; NOVOSEL; SMITH, 2000).

Por fim, completando o tratamento dos dados de entradas para análise das funções de proteção estudadas, os sinais de correntes medidos são estimados e seus fasores correspondentes são empregados no cálculo das correntes de sequência. Assim, por meio do Teorema de *Fortescue* é possível calcular as correntes de sequência positiva, negativa e zero, conforme exposto na equação 3.2.

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

sendo \hat{I}_A , \hat{I}_B e \hat{I}_C os fasores das correntes medidas nas fases A, B e C, respectivamente; \hat{I}_1 a corrente de sequência positiva; \hat{I}_2 a corrente de sequência negativa; \hat{I}_0 a corrente de sequência zero e $a = \angle 120^\circ$.

Com o desenvolvimento da equação 3.2, observa-se as definições das correntes de sequência, como apresentado nas equações 3.3, 3.4 e 3.5, em que k representa o instante de amostragem.

$$\hat{I}_1(k) = \frac{\hat{I}_A(k) + a\hat{I}_B(k) + a^2\hat{I}_C(k)}{3} \quad (3.3)$$

$$\hat{I}_2(k) = \frac{\hat{I}_A(k) + a^2\hat{I}_B(k) + a\hat{I}_C(k)}{3} \quad (3.4)$$

$$\hat{I}_0(k) = \frac{\hat{I}_A(k) + \hat{I}_B(k) + \hat{I}_C(k)}{3} \quad (3.5)$$

Ressalta-se que a corrente de sequência negativa é usada no desenvolvimento da função *Restricted Earth Fault - REF*. Adicionalmente, as correntes de sequência positiva e negativa são usadas na função direcional de sequência negativa. Além disso, as funções diferencial e de distância utilizam métodos que são explicados nas suas respectivas seções, a seguir.

3.1 Função Falta Restrita a terra

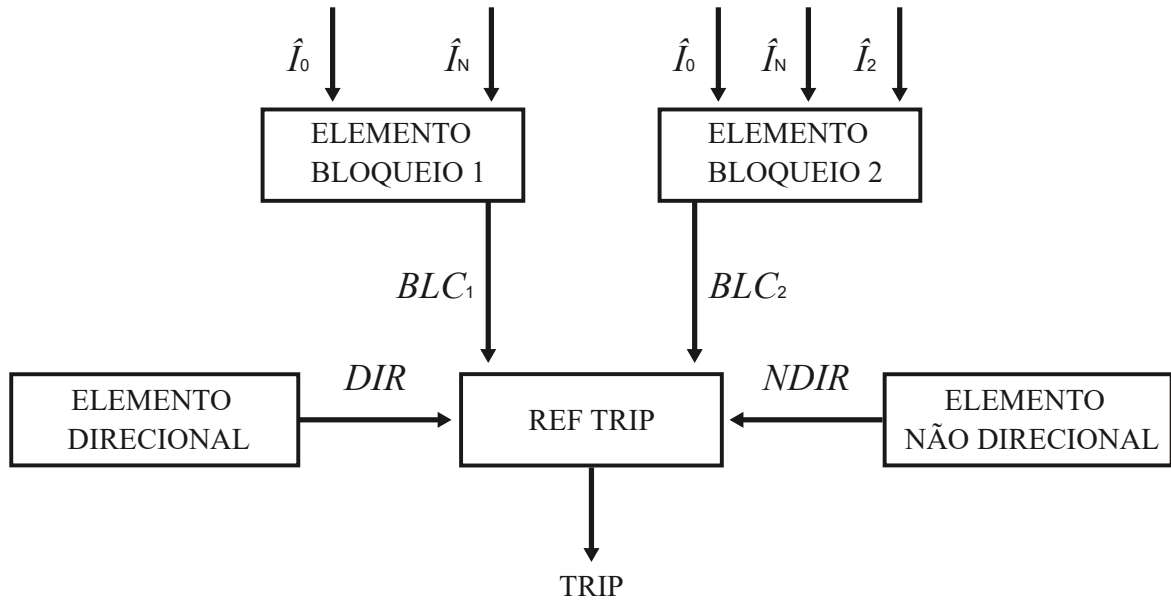
O princípio da Proteção de Falta Restrita a terra (*REF - Restricted Earth Fault - REF*) é fundamentado na comparação da corrente de sequência zero \hat{I}_0 , obtida por meio do cálculo com base nas correntes medidas pelos TCs de fase instalados nos terminais de fase (\hat{I}_A , \hat{I}_B e \hat{I}_C), com a corrente de neutro \hat{I}_N , medida pelo TC de neutro. Além disso, a lógica analisada nessa pesquisa implementa elementos de bloqueio, destinados a bloquear a função para os casos que podem gerar operações incorretas durante diferentes tipos de faltas, como casos semelhantes aos apresentados em (CHOWDHURY et al., 2023a).

A lógica da função *REF* é exposta no diagrama de blocos indicado na figura 3.1, sendo composta por elemento bloqueio 1, elemento bloqueio 2, elemento direcional, elemento não direcional e bloco *REF TRIP*. A saída do elemento direcional, representado por *DIR* no diagrama de blocos, é responsável pela indicação de uma falta interna. A saída do elemento não direcional, apresentado como *NDIR* no diagrama de blocos, indica que a função *REF* operou para faltas internas, em situações nas quais o elemento direcional não atuaria. Essas situações correspondem à faltas internas em que as condições do elemento direcional não são suficientes para resultar na detecção do curto-circuito (CHOWDHURY et al., 2023b). Uma vez que *DIR* ou *NDIR* forem ativados, será sinalizada a ocorrência da falta interna e o elemento *TRIP* indicará a ativação da proteção. Além disso, os bloqueios 1 e 2 são incorporados para aumentar a confiabilidade da função de proteção, realizando verificações nos componentes envolvidos no curto-circuito.

Inicialmente, o elemento bloqueio 1, representado por BLC_1 na figura 3.1, é usado para garantir que, se houver uma falta externa que afete o terra, o elemento direcional não será ativado acidentalmente, evitando a detecção equivocada de uma falta interna (CHOWDHURY et al., 2023a). Para tanto, nesse cenário são avaliadas a corrente de sequência zero e a corrente de neutro, sendo definidas, respectivamente, como as entradas \hat{I}_0 e \hat{I}_N , e seus respectivos ângulos θ_0 e θ_N . As condições de atuação desse elemento são apresentadas nas equações 3.6 e 3.7 (CHOWDHURY et al., 2023b):

$$|\theta_0 - \theta_N| > 105^\circ \quad (3.6)$$

$$|\hat{I}_N| > k_{REF}, \quad |3\hat{I}_0| > 0,8 \cdot k_{REF} \quad (3.7)$$

Figura 3.1 – Diagrama de blocos - *REF*.

Fonte: Autor

sendo a equação 3.6 a diferença entre o ângulo da corrente de sequência zero, θ_0 , e o ângulo da corrente de neutro, θ_N .

Em situações de faltas externas envolvendo o terra, a diferença angular entre $3\hat{I}_0$ e \hat{I}_N é idealmente de 180° . Contudo, a saturação do TC pode resultar em um erro angular geralmente inferior a 75° ; isso implica em um ângulo entre $3\hat{I}_0$ e \hat{I}_N superior a 105° , situando-se na área restrita do elemento direcional *REF* (CHOWDHURY et al., 2023a). Assim, para satisfazer a condição expressa na equação 3.6, a diferença entre os ângulos deve ser superior a 105° , caracterizando, portanto, uma falta externa, tal que o elemento bloqueio 1 atua.

Na equação 3.7 são comparadas as correntes \hat{I}_0 e \hat{I}_N com a constante k_{REF} , empregada como elemento *pickup* da função *REF* e definida conforme exposta na equação 3.8, na qual I_{N-TC} e I_{N-TCN} referem-se, respectivamente, a corrente do primário do TC utilizado no terminal da fase e do neutro. Adicionalmente, o elemento *RTC* representa a relação de transformação do TC de fase e *RTCN* a relação de transformação do TC de neutro. Por fim, o elemento *pickup* usa um multiplicador de coordenação de 0,8, quando comparado com a corrente de sequência zero, para garantir que erros de medição próximos ao *pickup* não induzam a função a atuar incorretamente.

$$k_{REF} = 0,05 \cdot \frac{I_{N-TC}}{I_{N-TCN}} \cdot \frac{RTC}{RTCN} \quad (3.8)$$

Em situações adicionais, que podem incluir uma falta externa fase-fase evoluindo

para o terra, a saturação do TC pode ocorrer antes do contato com o terra. Assim, após a saturação do TC, quando o terra estiver envolvido e houver corrente de neutro suficiente o elemento *REF* pode perder a segurança. Além disso, faltas externas trifásicas-terra também podem gerar alguma corrente de sequência zero devido a assimetrias do sistema que excedem a configuração da constante k_{REF} . Para evitar problemas de segurança relacionados a faltas externas bifásicas ou trifásicas, o elemento de bloqueio 2, representado por BLC_2 na figura 3.1, foi projetado para garantir a segurança em situações de faltas externas envolvendo mais de uma fase (CHOWDHURY et al., 2023a). Nesse sentido, esse elemento analisa a corrente de sequência zero, a corrente de neutro e a corrente de sequência negativa. Uma vez que faltas bifásicas produzem corrente de sequência negativa e que no início de uma falta trifásica, durante o transitório, é produzida corrente de sequência negativa, pois cada corrente de fase em falta se desenvolve de maneira diferente, o elemento BLC_2 verifica se o maior valor entre as correntes \hat{I}_0 e \hat{I}_N é consideravelmente menor que o valor de \hat{I}_2 . Além disso, $3\hat{I}_2$ é comparado com o ajuste da função *REF*, a constante k_{REF} . Ambas as condições são expostas nas equações apresentadas em 3.9 (CHOWDHURY et al., 2023a):

$$\max(|\hat{I}_n, \hat{I}_0|) < 0,1 \cdot |3\hat{I}_2|, \quad |3\hat{I}_2| > k_{REF} \quad (3.9)$$

Assim, quando as condições acima são respeitadas paralelamente, elemento de bloqueio 2 atua e impede a atuação incorreta da função *REF* para faltas externas.

O elemento direcional (*DIR*) é responsável pela detecção direta de faltas internas ao elemento (CHOWDHURY et al., 2023b). Conforme indicado no diagrama de blocos da figura 3.1, as entradas desse elemento são as correntes \hat{I}_0 e \hat{I}_N . O elemento em questão atua quando as condições expostas nas equações 3.10 e 3.11 são respeitadas.

$$|\theta_0 - \theta_N| < 105^\circ \quad (3.10)$$

$$|\hat{I}_N| > k_{REF}, \quad |3\hat{I}_0| > 0,8 \cdot k_{REF} \quad (3.11)$$

sendo a equação 3.10 a diferença entre θ_0 e θ_N . De semelhante modo ao elemento bloqueio 1, essa condição considera o erro resultante da saturação do TC, assim a função *REF* encontra-se na região de operação nos casos em que a diferença entre θ_0 e θ_N for inferior ao ângulo de 105° . Não obstante, as equações apresentadas em 3.11 comparam as correntes $3\hat{I}_0$ e \hat{I}_N com a constante k_{REF} . Nessa configuração, a corrente \hat{I}_N deve ser maior que a constante k_{REF} . Além disso, $3\hat{I}_0$ deve ser maior que 80% de k_{REF} . Esse fator de multiplicação é o mesmo utilizado no elemento bloqueio 1, visando que erros de medição próximos ao *pickup* não interfiram na atuação da proteção.

O elemento não direcional pode atuar quando $3\hat{I}_0$ não for suficiente para indicar a falta interna (CHOWDHURY et al., 2023b). Essa situação pode surgir da ocorrência de

uma falta interna em que a contribuição de $3\hat{I}_0$ do lado do terminal de fase do reator é insignificante. Outro exemplo dessa circunstância pode ocorrer em casos em que a falta está próxima ao terminal de neutro, resultando em uma contribuição maior da corrente de neutro do que da corrente de sequência zero (CHOWDHURY et al., 2023a). Assim, o elemento *NDIR* é acionado quando as condições apresentadas em 3.12 são atendidas.

$$|\hat{I}_n| > k_{REF}, \quad |3\hat{I}_0| < 0,8 \cdot k_{REF} \quad (3.12)$$

Por fim, na situação em que os elementos de bloqueio não entrem em atuação e que o elemento direcional ou o elemento não direcional entre em operação, o bloco *REF TRIP* envia um *trip* indicando a operação da função para faltas envolvendo o terra.

3.2 Função Direcional de Sequência Negativa

O emprego da função direcional de sequência negativa (*32Q*) destina-se a detecção de faltas externas e internas, por meio da análise da impedância de sequência negativa, em diversos elementos do sistema elétrico, como reator *shunt* ou banco capacitor *shunt*. No caso de curtos-circuitos externos ou em condições de fase aberta, origina-se um fluxo de corrente que circula por intermédio da impedância do elemento protegido, gerando distorções na tensão de sequência negativa calculada pelo relé. Adicionalmente, durante condições de curtos-circuitos internos, o fluxo de corrente circula pelo sistema, produzindo queda na tensão de sequência negativa medida pelo relé (KASZTENNY; FISCHER; ALTUVE, 2014). É importante destacar que a nomenclatura *32*, de acordo com a tabela ANSI, é indicada para o relé direcional de potência, sendo que *32Q* refere-se ao direcional de potência reativa de fase. No entanto, em (CHOWDHURY et al., 2023b), a nomenclatura *32Q* é utilizada para indicar o elemento direcional de sequência negativa e essa será adotada na presente pesquisa.

Para operação da função *32Q*, calcula-se a corrente \hat{I}_2 , conforme descrito na equação 3.4. A tensão \hat{V}_2 é calculada fundamentada em \hat{V}_A , \hat{V}_B e \hat{V}_C . Logo, Z_2 é definida como a razão entre \hat{V}_2 e \hat{I}_2 . No mais, essa função aplica a corrente de sequência positiva \hat{I}_1 , conforme descrito na equação 3.3.

Além da definição das componentes, para operação da função *32Q* é necessário a determinação de cinco ajustes responsáveis pela limitação da atuação da proteção. Esses ajustes compreendem os valores de restrição para impedância de sequência negativa no caso de faltas à frente (k_{ZF}) e reversa (k_{ZR}), um valor limite de corrente de sequência negativa para faltas à frente (k_{CF}) e reversa (k_{CR}) e uma constante de restrição de corrente de sequência positiva (k_a).

Os ajustes k_{ZF} e k_{ZR} são parâmetros primordiais para a função direcional. A

determinação desses ajustes é baseada no comportamento da tensão de sequência negativa e da corrente de sequência negativa envolvida no curto-circuito. A tensão de sequência negativa é sempre positiva para uma falta à frente ou reversa (FLEMING, 1998). Porém, a corrente pode ser positiva ou negativa a depender do local da falta. No cenário de uma falta à frente a corrente é considerada positiva e para o caso de uma falta reversa a corrente é considerada negativa. Dessa forma, observa-se que uma falta reversa possui uma impedância de sequência negativa que é positiva, enquanto uma falta à frente tem uma impedância de sequência negativa que é negativa. Logo, k_{ZR} pode ser configurado mais positivo do que k_{ZF} , sendo que k_{ZF} é usualmente ajustado em 50% da impedância do elemento protegido (CHOWDHURY et al., 2023b).

Os valores das constantes k_{CF} e k_{CR} funcionam como detectores de curto-circuito para faltas à frente e reversa, respectivamente. Esses elementos operam para uma falta conforme a comparação com os valores de $3\hat{I}_2$. Dessa forma, no caso de falta à frente o valor de $3\hat{I}_2$ deve superar o valor da constante k_{CF} . De semelhante modo, no caso de falta reversa o valor de $3\hat{I}_2$ deve ser maior que o valor da constante k_{CR} .

A constante k_a atua como um requisito de supervisão para o elemento direcional de sequência negativa, bloqueando a atuação para faltas equilibradas (FLEMING, 1998). Esse elemento bloqueia a operação da função $32Q$ em casos que o valor da corrente de sequência negativa não supere em algumas vezes o valor da corrente de sequência positiva.

Com base nos parâmetros supramencionados, a proteção direcional de sequência negativa pode ser decomposta em dois elementos: elemento direcional *foward* ($32Q_F$) e elemento direcional *reverse* ($32Q_R$). O elemento $32Q_F$, para faltas internas ao elemento protegido, opera quando as condições descritas em 3.13 são satisfeitas, sendo k_{ZF} , definido pela equação 3.14, o limite da impedância em casos de curtos-circuitos internos, k_{CF} o ajuste da corrente para faltas internas e k_a o ajuste que avalia se a razão entre \hat{I}_2 e \hat{I}_1 é maior que o desequilíbrio natural do elemento protegido. Uma vez que o módulo de $3\hat{I}_2$ supere a constante k_{CF} , tem-se a indicação da presença de um curto-circuito. Ademais, a confirmação de uma falta à frente é validada com o valor do módulo da impedância de sequência negativa sendo menor que o valor da constante k_{ZF} . Por fim, completando os requisitos anteriores e confirmando a ocorrência de uma falta à frente, o valor da razão entre a corrente de sequência negativa e positiva deve ser maior que a constante k_a .

$$|Z_2| < k_{ZF}, \quad |3\hat{I}_2| > k_{CF}, \quad \left| \frac{\hat{I}_2}{\hat{I}_1} \right| > k_a \quad (3.13)$$

$$k_{ZF} = \frac{|Z_R|}{2} \quad (3.14)$$

Completando a função $32Q$, o elemento $32Q_R$, aplicado a faltas externas ao elemento protegido, opera quando as condições descritas em 3.15 são satisfeitas, sendo k_{ZR} , definido

pela equação 3.16, o limite da impedância em casos de curtos-circuitos externos e k_{CR} o ajuste da corrente para faltas externas. De semelhante modo ao elemento $32Q_F$, quando os limites impostos a corrente de sequência negativa e a razão entre corrente de sequência negativa e positiva são superados, haverá a indicação da falta. No entanto, a diferença entre os elementos $32Q_R$ e $32Q_F$ está na comparação da impedância de sequência negativa, que para o caso em questão será maior que o valor da constante k_{ZR} .

$$|Z_2| > k_{ZR}, \quad |3\hat{I}_2| > k_{CR}, \quad \left| \frac{\hat{I}_2}{\hat{I}_1} \right| > k_a \quad (3.15)$$

$$k_{ZR} = k_{ZF} + 0,1 \quad (3.16)$$

Visando evitar a operação em casos de faltas externas ou durante energização, a atuação do elemento de sequência negativa pode ser atrasada, de modo que o *trip* só será confirmado se ele ainda estiver ativo alguns milissegundos após sua emissão inicial (KASZTENNY; FISCHER; ALTUVE, 2014). Normalmente, o atraso considerado é de 1,5 ciclos na operação do elemento $32Q_F$ (CHOWDHURY et al., 2023b).

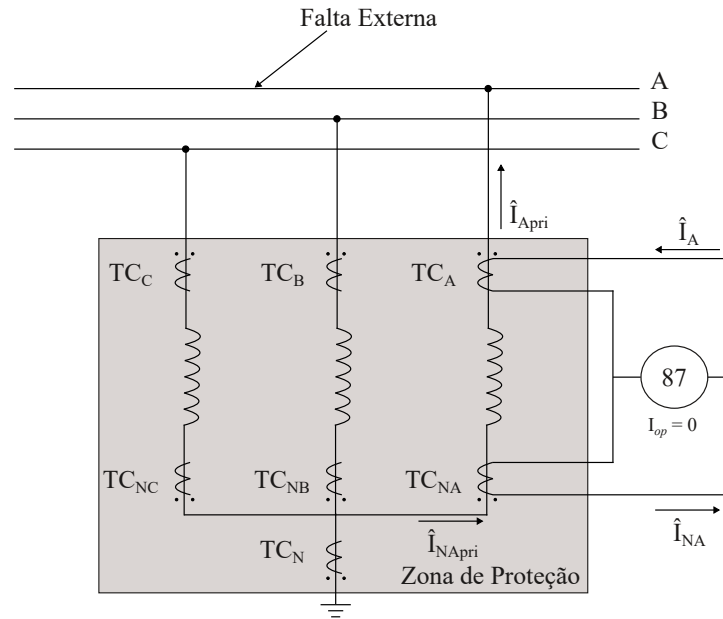
3.3 Função Diferencial

Baseada na Lei de *Kirchhoff* das Correntes, a qual afirma que em condições normais de operação a soma algébrica das correntes em um nó é igual a zero, a proteção diferencial, conhecida como função 87, realiza a comparação das amplitudes das correntes medidas nos terminais do equipamento que se deseja proteger. Nessa perspectiva, quando aplicada na proteção de reatores, a função tem sua zona de proteção definida pelos transformadores de corrente instalados em seus terminais fase e de neutro.

A delimitação da zona protegida pela função diferencial é apresentada na figura 3.2, na qual se observam as conexões dos TCs. Dessa configuração, constata-se que os transformadores de corrente TC_A , TC_B e TC_C estão posicionados no terminal adjacente à bucha e são usados para medição das correntes relacionadas a esse terminal, denominado nessa pesquisa de terminal de fase. Ainda dessa figura, verifica-se que os transformadores de corrente TC_{NA} , TC_{NB} e TC_{NC} estão localizados no terminal próximo ao neutro, denominado de terminal de neutro. Portanto, desse arranjo são obtidas as correntes do secundário \hat{I}_ϕ e $\hat{I}_{N\phi}$, respectivamente, no terminal de fase e no terminal de neutro e ϕ remete a fase envolvida no caso analisado. No mais, na figura 3.2 as correntes do primário são representadas por $\hat{I}_{\phi pri}$ e $\hat{I}_{N\phi pri}$ no terminal de fase e no terminal de neutro, respectivamente.

Com base no princípio da comparação das correntes, a proteção diferencial é modelada por meio da corrente de operação, $I_{op\phi}$, e pela corrente de restrição, $I_{res\phi}$, apresentadas na equação 3.17.

Figura 3.2 – Delimitação da área protegida para falta externa.



Fonte: Autor.

$$I_{op\phi} = |\hat{I}_\phi + \hat{I}_{N\phi}|, \quad I_{res\phi} = |\hat{I}_\phi - \hat{I}_{N\phi}| \quad (3.17)$$

Em condições normais de operação, ou em situações de curtos-circuitos externos, expostas na figura 3.2, $I_{op\phi}$ é nula pois \hat{I}_ϕ e $\hat{I}_{N\phi}$ dispõem do mesmo módulo, porém com sentidos opostos. Por outro lado, $I_{res\phi}$ é o dobro de \hat{I}_ϕ . Por consequência, a proteção não atua devido a $I_{op\phi} < I_{res\phi}$.

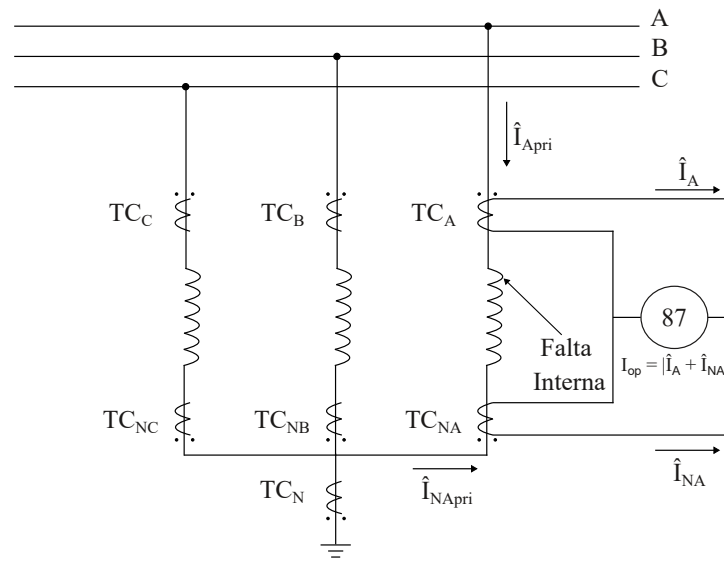
Entretanto, durante um curto-circuito interno, segundo a figura 3.3, $I_{op\phi}$ é o dobro de \hat{I}_ϕ , pois \hat{I}_ϕ e $\hat{I}_{N\phi}$ possuem mesmo módulo e sentido, no entanto, $I_{res\phi}$ é nulo. Juntamente a essa situação, quando $I_{op\phi}$ extrapolar o limite ajustado para o valor de *pick-up*, uma falta interna é identificada. As condições mencionadas são expostas na equação 3.18, na qual se inclui o fator conhecido como *slop* (*SLP*) para aumentar a sensibilidade do relé (PAITHANKAR; Bhide, 2011).

$$I_{op\phi} > Pickup_{87}, \quad I_{op\phi} > SLP \cdot I_{res\phi} \quad (3.18)$$

O valor de *pick-up* e o fator *slop* funcionam como ajustes tornando o dispositivo de proteção capaz de se adequar a uma variação na corrente diferencial, reduzindo problemas relacionados a erros intrínsecos dos TCs, desequilíbrios naturais e incompatibilização nas relações de transformação dos TCs.

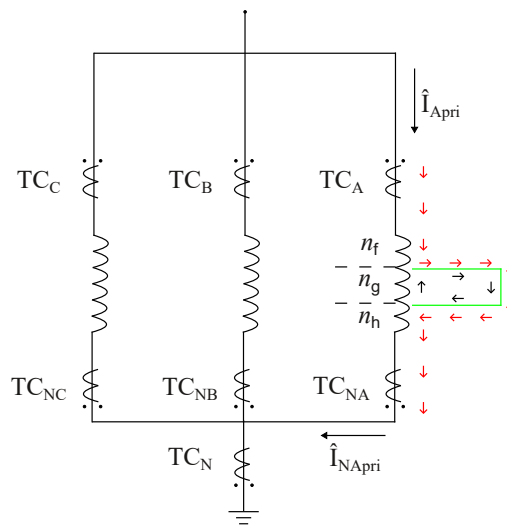
Ressalta-se que essas análises não incluem o caso de falta entre espiras. O compor-

Figura 3.3 – Delimitação da área protegida para falta interna.



Fonte: Autor.

Figura 3.4 – Comportamento das correntes em casos de falta entre espiras.



Fonte: Autor.

tamento das correntes no caso de curto-circuito entre espiras é apresentado na figura 3.4, na qual as setas vermelhas indicam o sentido da corrente. Nesse caso, observa-se que a corrente do terminal de neutro inverte o sentido, fazendo com que a proteção não entre em operação devido a $I_{op\phi} < I_{res\phi}$. Sendo assim, a função 87 não deve atuar para essa situação.

3.4 Função de Distância

Fundamentada na estimativa da distância em que se localiza o curto-circuito, definida por meio do cálculo da impedância, admitância ou reatância, a função de distância, também chamada de função 21, apura se a impedância medida situa-se dentro dos limites impostos pela zona de proteção (SILVA, 2020). O cálculo da impedância de falta, do ponto em que o relé está instalado até o ponto de falta, é baseado nos valores de corrente e tensão, medidos por meio de transformadores de corrente e transformadores de potencial.

As impedâncias, utilizadas na implementação da função 21, podem ser expostas como comparadores de fase e magnitude. Operando com base em dois sinais, os comparadores avaliam a defasagem entre fases ou a relação entre suas magnitudes. Assim, é possível diferir situações normais de operação do sistema de cenários de curtos-circuitos. Além do mais, é possível acrescentar a característica MHO. Por causa do seu alcance, direcionalidade, simplicidade, boa acomodação da resistência de falta e menor sensibilidade às flutuações de energia, essa característica é abundantemente empregada em relés de distância (ALMEIDA; SILVA, 2023).

Apesar das vantagens supracitadas, se a característica MHO utilizada for do tipo autopolarizada, ela pode operar incorretamente, devido a perda de referencial de tensão, em curtos-circuitos que resultam na tensão medida próxima de zero, por exemplo faltas próximas ao transformador de potencial. Nesses casos, a dependência de referências confiáveis de tensão, tanto em magnitude quanto em fase, pode comprometer a operação correta das funções de proteção que dependem da correta medição de tensão. Isso se aplica à proteção de distância, que depende de valores confiáveis de tensão, obtidos por meio de transformadores de potencial, para funcionar adequadamente. Nesse contexto, a característica autopolarizada, que utiliza a própria tensão de entrada do relé como referência de polarização, pode falhar quando valores de tensão próximos de zero são medidos. Para contornar esse problema, é empregada a característica MHO polarizada, na qual a tensão polarizada é calculada em vez de depender exclusivamente dos valores medidos diretamente pelo transformador de potencial (SILVA, 2020).

Aplicada na característica de MHO polarizada, a polarização por memória de tensão de sequência positiva é amplamente empregada, pois permite a utilização das tensões pré-falta em vez das tensões nas fases defeituosas. Sendo assim, o algoritmo implementado no presente trabalho emprega o filtro de memória de tensão de sequência positiva, descrito em (SILVA; ALMEIDA, 2015). Esse filtro tem como objetivo preservar a memória de tensão por alguns ciclos após a ocorrência de uma falta, utilizando uma memória adaptativa com esse propósito. A adaptação da memória no controle do filtro é um ponto a ser observado, pois assegura o comportamento adequado da função de proteção em diversas condições operacionais. Por exemplo, o filtro pode ser configurado para ter uma memória prolongada em casos de curtos-circuitos que resultam em tensões quase nulas nas fases defeituosas.

Além disso, a memória adaptativa mantém o ângulo de tensão praticamente constante após a ocorrência de curtos-circuitos, o que é essencial para garantir o funcionamento eficaz dos elementos de proteção que utilizam a tensão como referência para verificar a direcionalidade das correntes de curto-circuito (SILVA; ALMEIDA, 2016).

Fundamentada nas informações contidas no filtro de memória de tensão de sequência positiva, a tensão de operação ($\widehat{V}_{op\phi}$) e a tensão de polarização ($\widehat{V}_{pol\phi}$) são definidas de acordo com as Equações 3.19 e 3.20.

$$\widehat{V}_{op\phi}(k) = -\widehat{V}_{\phi}(k) + \frac{hZ_R}{\cos(\theta_{Z_R} - \beta)} \widehat{I}_{\phi}(k) \quad (3.19)$$

$$\widehat{V}_{pol\phi}(k) = \widehat{V}_{m\phi}(k) \quad (3.20)$$

em que \widehat{V}_{ϕ} é o fasor de tensão na fase ϕ ; \widehat{I}_{ϕ} é o fasor de corrente medido no terminal da fase ϕ ; h é a porcentagem a ser protegida da impedância total do reator *shunt*; Z_R é a impedância do reator; ϕ_{Z_R} é o ângulo de Z_R ; β é o ângulo de projeto da característica mho, ou ângulo de torque máximo do relé e $\widehat{V}_{m\phi}$ é a tensão memorizada na fase na fase ϕ , calculada a partir da tensão de sequência determinada pelo filtro de memória de tensão de sequência positiva.

Com o objetivo de implementar a função 21, evitando os desafios gerados pela característica MHO autopolarizada, nesta pesquisa é desenvolvida a avaliação comparadores de fase de utilizando a característica MHO polarizada com o emprego do filtro de tensão positiva. Essa avaliação do comparador de fase é definida com base no ângulo θ_{ϕ} , calculado conforme Equação 3.21, sendo $\theta_{op\phi}$ o ângulo de $\widehat{V}_{op\phi}$ e $\theta_{pol\phi}$ o ângulo de $\widehat{V}_{pol\phi}$. Portanto, para que a função 21 detecte uma falta, o ângulo θ_{ϕ} deve ser inferior a 90° ; caso contrário, a função 21 não atua (ALMEIDA; SILVA, 2023).

$$\theta_{\phi} = |\theta_{op\phi} - \theta_{pol\phi}| \quad (3.21)$$

Ressalta-se a importância da definição das zonas de atuação que têm como função cobrir determinada seção do enrolamento. Essa definição é realizada a depender da instalação dos transformadores de potencial e de corrente. De acordo com sua aplicação, o relé de distância possui três ou mais zonas de atuação. Ademais, cada zona têm diferentes alcances distintos, conforme a porcentagem do enrolamento que deseja proteger (SILVA, 2020).

Destaca-se três zonas típicas de proteção de distância, normalmente ajustadas com os seguintes critérios (GONÇALVES, 2007):

- Primeira zona: A impedância de alcance da primeira zona de proteção abrange de 80% a 85% da impedância total do elemento protegido. Essa zona opera sem atraso

intencional, ou seja, o tempo de atuação é determinado apenas pelo tempo necessário para a detecção da falta.

- Segunda zona: Protege 100% do elemento coberto pela primeira zona, com uma margem adicional de aproximadamente 50% do menor elemento adjacente no terminal remoto. O tempo de atraso dessa zona varia entre 250 e 400 ms. Assim, o tempo de atuação inclui o tempo de detecção da falta somado ao atraso de 250 a 400 ms.
- Terceira zona: Cobre 100% do menor elemento adjacente ao terminal remoto da elemento protegida, com um acréscimo de 20% do menor elemento a jusante. O tempo de atraso intencional dessa zona é de aproximadamente 800 ms. Sua função principal é atuar como proteção de retaguarda.

Por fim, nesta pesquisa utilizou-se a primeira zona de proteção, considerando 80% do enrolamento do reator *shunt* protegido.

4 Modelos Empregados

4.1 Modelo do Sistema Elétrico

O sistema elétrico de potência pode ser representado por elementos como fontes, chaves e linhas de transmissão. Nesta pesquisa, utilizou-se o *software* ATP para implementação da linha de transmissão de 500 kV no modelo π , com frequência de 60 Hz. Para tanto, inicialmente modelou-se um sistema com dois equivalentes do *Thévenin* conectados às barras 1 e 2. Posteriormente, foi adicionado em cada extremidade da linha um reator para compensação de reativos. O sistema descrito é apresentado na figura 4.1.

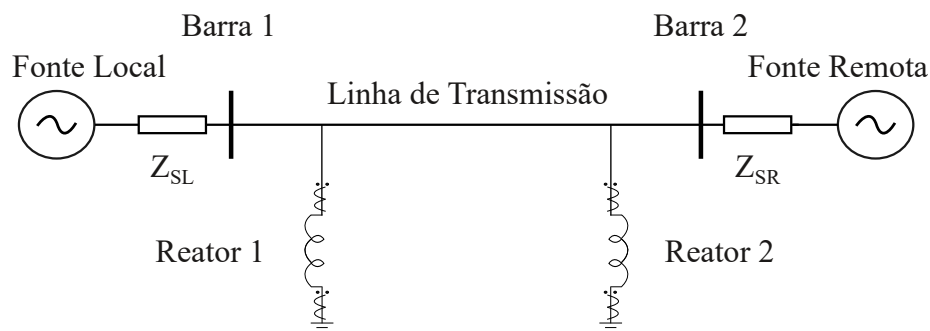
O dimensionamento do reator *shunt* foi realizado por meio do método da impedância. Para tanto, foram considerados os parâmetros da linha de transmissão descritos na tabela 4.1. A princípio, calculou-se a admitância da capacitância *shunt* da linha de transmissão, conforme descrito na equação 4.1 (NASHAWATI et al., 2011).

$$Y_c = j\omega C, \quad Y_{c,LT} = Y_c \cdot L \quad (4.1)$$

sendo Y_c admitância da capacitância *shunt* da linha de transmissão por unidade de comprimento, L o comprimento da LT, $Y_{c,LT}$ admitância da capacitância *shunt* total da LT, C a capacitância *shunt* da linha de transmissão por unidade de comprimento e ω é a frequência angular considerada.

Fundamentado nos valores característicos da linha de transmissão e por meio da equação expressa em 4.2 é possível definir a impedância do reator.

Figura 4.1 – Modelo do Sistema de Potência Analisado.



Fonte: Autor.

Tabela 4.1 – Parâmetros linha de transmissão.

Comprimento (km)	400
$Z_1(\Omega/km)$	$0,0186 + j0,267$
$Z_0(\Omega/km)$	$0,4936 + j1,339$
$\omega C_1(\mu S/km)$	$j6,124$
$\omega C_0(\mu S/km)$	$j2,89$

$$Z_{reator} = \frac{-2}{p \cdot (Y_{c,LT})} \quad (4.2)$$

Considerando a metodologia descrita, utilizando os dados característicos da linha, com fator de compensação igual a 60%, conclui-se que a impedância do reator é igual 1360,76 Ω .

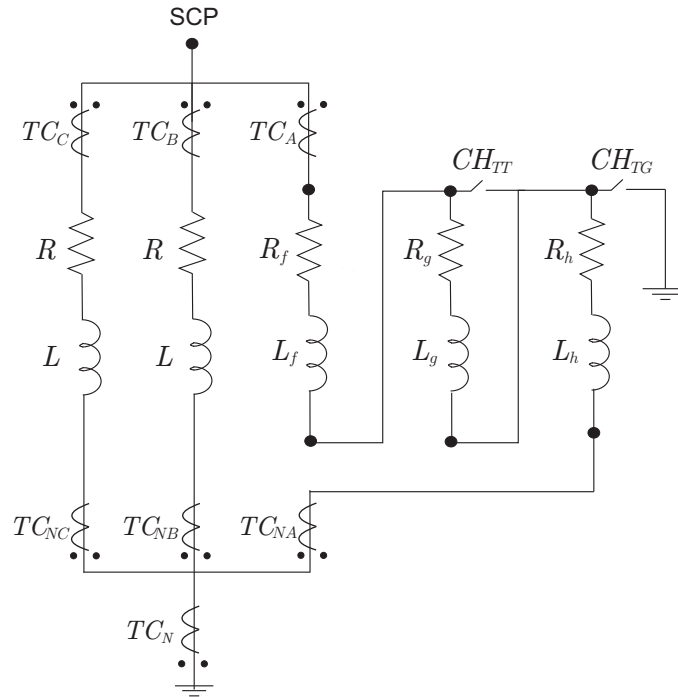
Adicionalmente, a modelagem da resistência intrínseca do ramo foi fundamentada no modelo do reator utilizado em (ALVES, 2011). Assim, a resistência intrínseca do ramo, foi calculada considerando as características de impedância e indutância, conforme exposto na equação 4.3.

$$R_{reator} = \sqrt{Z_{reator}^2 - (\omega \cdot L_{reator})^2} \quad (4.3)$$

4.2 Modelo Empregado para Reator *Shunt*

Os reatores *shunt* são compreendidos como bobinas, sendo possível representá-los por meio de resistores em série com indutores. O presente trabalho de pesquisa baseia-se no modelo proposto por (RIBEIRO, 2020), sendo esse desenvolvido por meio do *software* ATP, respeitando regras de consistência, fator de dispersão e proporcionalidade aplicados às seções do enrolamento em falta. Assim, a modelagem tem por objetivo simular faltas espira-terra, entre espiras e entre fases.

No estudo de reatores podem-se utilizar diferentes modelos, como os descritos por (CHIMKLAI; MARTI, 1995) e (DEGENEFF; GUTIERREZ, 1991). Nesses modelos, apesar da possibilidade de aplicação de faltas entre espiras e faltas espira-terra, a implementação dessas modelagens exige medidas geométricas precisas do equipamento. Outros modelos, como os desenvolvidos por (ABD-ELAZIZ; BADRAN; EL-SHMOTY, 2013) e (KEZUNOVIC; GUO, 2000) apresentam uma complexidade maior devido ao uso do elemento BCTRAN, o que torna sua reprodução ainda mais difícil.

Figura 4.2 – Modelo de Reator com o elemento *RL Acoplado*.

Fonte: Autor.

Devido aos desafios presentes nos modelos existentes, (RIBEIRO, 2020) propõe um modelo de reator no qual se implementa a análise matemática descrita em (BASTARD; BERTRAND; MEUNIER, 1994), baseada no elemento *RL Coupled*. Neste modelo representa-se um reator trifásico com núcleo a ar, sendo que na fase em que é aplicada a falta interna utiliza-se o elemento *RL Coupled*, e as demais fases do reator são compostas por uma indutância em série com um resistor, conforme mostrado na figura 4.2, na qual SCP é o ponto de conexão do sistema, TC_A , TC_B e TC_C são os TCs das fases A, B e C, respectivamente, instalados no lado do terminal de fase. No mais, TC_{NA} , TC_{NB} e TC_{NC} são os TCs das fases A, B e C, respectivamente, instalado no lado do terminal neutro e, por fim, TC_N é o TC neutro, instalado no neutro do reator.

A formulação matemática desenvolvida por (BASTARD; BERTRAND; MEUNIER, 1994) permite a aplicação de faltas espira-terra ou entre espiras em uma das fases do reator, sem envolver as outras duas fases. Por meio do equacionamento proposto, no caso de falta espira-terra divide-se a bobina da fase defeituosa do reator em dois subenrolamentos, com uma chave de conexão com a terra entre eles, conforme indicado na Figura 4.3a. Para representar a porcentagem de espiras envolvidas em uma falta espira-terra, o número total de espiras da bobina (n_T) é dividido em dois subenrolamentos: um com $f\%$ de espiras, denominado n_f , a partir da bucha, e outro com $g\%$ de espiras, denominado n_g , onde $n_g = n_T - n_f$. Dessa forma, o subenrolamento n_f está diretamente envolvido no



Figura 4.3 – Curtos-circuitos para o modelo de reator empregado.

Fonte: (RIBEIRO, 2020)

curto-circuito, e o subenrolamento n_g interfere devido à indutância mútua, apesar de não haver corrente passando por ele.

Na aplicação do curto-circuito entre espiras, a bobina do reator é dividida em três partes, como indicado na 4.3b (BASTARD; BERTRAND; MEUNIER, 1994). Nesse cenário, ocorre a passagem de corrente pelo subenrolamento n_f e também pelo subenrolamento com $h\%$ de espiras, denominado n_h . Logo, o subenrolamento central, indicado por n_g , está em curto-circuito, de modo que o número de espiras afetadas é definido como $n_g = n_T - n_f - n_h$.

O modelo utilizado nesta pesquisa permite considerar não apenas as indutâncias próprias, mas também as indutâncias mútuas decorrentes da interação entre os fluxos magnéticos de dispersão das três fases do elemento. Essas características são possíveis devido à utilização do elemento *RL Coupled*. No entanto, por meio desse elemento não é possível reproduzir características ferromagnéticas, como a curva de magnetização. Portanto, o modelo empregado deve ser utilizado apenas em análises para reatores com núcleo a ar.

A modelagem foi realizada usando o *software* ATP, com o elemento *RL Coupled*. Nesse contexto, o ramo R-L mutuamente acoplado à fase A é descrito por duas matrizes: a primeira representa as resistências intrínsecas do ramo, como a resistência dos cabos, e a segunda matriz refere-se às indutâncias próprias de cada ramo criado pela subdivisão da bobina principal, incluindo a indutância mútua entre esses ramos. Assim, no caso de falta espira-terra, as matrizes R e L são apresentadas na equação 4.4 (KEZUNOVIC; GUO, 2000). Para faltas entre espiras, a bobina é dividida em três subenrolamentos, e as matrizes R e L são apresentadas na equação 4.5.

$$R_{Espira-terra} = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_b \end{bmatrix}, \quad L_{Espira-terra} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} \\ M_{ab} & L_b \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$R_{EntreEspiras} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}, \quad L_{EntreEspiras} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Conforme o modelo matemático descrito por (BASTARD; BERTRAND; MEUNIER, 1994), tanto para curtos-circuitos do tipo espira-terra quanto entre espiras, a fase defeituosa deve ser representada como uma sequência de três subenrolamentos acoplados mutuamente em série. Portanto, para análises de curtos-circuitos espira-terra, que requerem apenas dois subenrolamentos, dois métodos podem ser utilizados: o subenrolamento central (formado por L_g e R_g em série) pode ser implementado com valores mínimos, conforme descrito em (RIBEIRO, 2020), ou a chave CH_{TT} pode ser fechada, curto-circuitando o subenrolamento central. Em ambos os métodos, a impedância é distribuída pelas duas partes restantes. Além disso, para aplicar a falta espira-terra, a chave CH_{TG} , exposta na figura 4.2, também deve estar fechada.

No modelo considerado, a corrente de curto-circuito é impactada pelo fator de dispersão. Esse fator é representado por uma constante, a qual varia entre zero e um, responsável por medir a dispersão da corrente de falta durante um curto-circuito. A relação estabelecida entre o fator de dispersão e a corrente de falta é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o fator de dispersão, menor será a corrente de falta e, portanto, a operação da função de proteção torna-se mais desafiadora. A definição do valor desse fator é feita com base em aspectos construtivos do reator e da porcentagem de espiras envolvidas nas situações críticas. Assim, para o curto-circuito entre espiras, define-se o fator de dispersão: α_{fg} , que mensura o acoplamento entre os subenrolamentos f e g; α_{gh} , que mensura o acoplamento entre os subenrolamentos g e h; e α_{fh} , que mensura o acoplamento entre os subenrolamentos h e f. Os cálculos dos fatores de dispersão α_{fg} , α_{gh} e α_{fh} , são calculados conforme descrito nas equações 4.6 e 4.7, sendo M_{fg} , M_{gh} e M_{hf} as impedâncias mútuas.

$$\alpha_{fg} = 1 - C_{fg}, \quad \alpha_{gh} = 1 - C_{gh}, \quad \alpha_{fh} = 1 - C_{fh} \quad (4.6)$$

$$C_{fg} = \frac{(M_{fg})^2}{L_f \cdot L_g}, \quad C_{gh} = \frac{(M_{gh})^2}{L_g \cdot L_h}, \quad C_{fh} = \frac{(M_{fh})^2}{L_f \cdot L_h} \quad (4.7)$$

No contexto de faltas entre espiras, as indutâncias próprias e mútuas são calculadas pelas equações 4.8 e 4.9. Destaca-se que no presente trabalho foi utilizado o método de *Newton-Raphson* para resolução das equações citadas. Por intermédio desse método, foi realizado uma aproximação inicial e, por meio de sucessivas iterações, as aproximações foram refinadas até que uma condição de convergência fosse satisfeita. Neste

desenvolvimento, foi utilizada a função *fsolve* do *software* MATLAB. Sendo uma função própria desse recurso, a *fsolve* é usada para determinar soluções de sistemas de equações não-lineares e para encontrar raízes de funções, utilizando métodos numéricos como o método de *Newton-Raphson*. Nesta pesquisa, utilizou-se essa função para encontrar as indutâncias e acoplamentos mútuos que satisfazem um conjunto de equações que modelam o comportamento de um reator com curto-circuito entre espiras. Para tanto, inicialmente foram definidos como dados de entrada os valores de porcentagem de espiras envolvidas na falta e os fatores de dispersão considerados. Posteriormente, foram definidas estimativas iniciais das indutâncias e acoplamentos mútuos, sendo o valor de 1 para todas indutâncias e de 10 para todos acoplamentos mútuos. As iterações de *fsolve* continuam até que uma das condições de parada seja atendida, nesta pesquisa foi mantida as configurações padrões do *software* MATLAB. Por padrão, os seguintes critérios são incluídos: a norma da função sendo menor que 10^{-6} , a norma do passo sendo menor que 10^{-6} , atingindo o número máximo de 400 iterações, ou atingindo o número máximo de avaliações da função, que é 100 vezes o número de variáveis. Esses critérios garantem que o algoritmo converge para uma solução dentro de um nível aceitável de precisão.

$$L = L_f + L_g + L_h + 2.(M_{fg} + M_{gh} + M_{fh}) \quad (4.8)$$

$$\frac{L_f}{L_g} = \left(\frac{n_f}{n_g}\right)^2, \quad \frac{L_g}{L_h} = \left(\frac{n_g}{n_h}\right)^2, \quad \frac{L_f}{L_h} = \left(\frac{n_f}{n_h}\right)^2 \quad (4.9)$$

A representação da falta espira-terra pode ser realizada dividindo o enrolamento do reator em duas partes (BASTARD; BERTRAND; MEUNIER, 1994). No entanto, o modelo almeja apresentar tanto casos de curtos-circuitos espira-terra quanto casos de curtos-circuitos espira-espira. Para isso a parte central do enrolamento (composta por L_g e R_g em série) é curto-circuitada fechando a chave CH_{TT} , assim, na fase defeituosa, a impedância é distribuída pelas duas partes restantes. Além disso, para aplicar a falta espira-terra, a chave CH_{TG} , exposta na figura 4.2, também deve estar fechada. Logo, no cenário citado, a corrente de falta flui pelo primeiro subenrolamento e não consegue fluir pelos demais subenrolamentos. Nesse caso, a relação entre as partes do enrolamento é definida como $n_g = n_T - n_f$.

Em situações de falta espira-terra, quando a impedância da parte central do enrolamento é insignificante, somente o fator de dispersão α_{fh} é empregado, o qual mensura o acoplamento entre o primeiro e terceiro sub enrolamento. Os cálculos das indutâncias própria e mútua para a ocorrência de falta espira-terra são determinados pelas equações 4.10, 4.11 e 4.12, em que k representa a razão entre n_f e n_h . Para solucionar tais equações, os dados de entrada correspondem à porcentagem de espiras envolvidas e o valor do fator de dispersão.

$$L_f = \frac{L}{\left(\frac{1}{k^2}\right) + 2 \cdot \left(\frac{\sqrt{1-\alpha_{fh}}}{k}\right) + 1} \quad (4.10)$$

$$L_g = \frac{L}{k^2 + 2 \cdot k \sqrt{1-\alpha_{fh}} + 1} \quad (4.11)$$

$$M_{fg} = \frac{L \cdot \sqrt{1-\alpha_{fg}}}{\left(k + \frac{1}{k}\right) + 2 \cdot \sqrt{1-\alpha_{fh}}} \quad (4.12)$$

É importante salientar que, durante a operação normal, as chaves CH_{TT} e CH_{TG} permanecem abertas, resultando na disposição em série das três partes e na soma de suas indutâncias próprias e mútuas, conforme definido pela equação 4.8, equivalente à indutância total L de uma fase. Adicionalmente, na modelagem descrita, os acoplamentos mútuos entre as fases não defeituosas e a fase com falta são negligenciáveis quando comparados aos acoplamentos magnéticos entre os componentes da fase afetada.

A determinação da resistência do subenrolamento com n_f espiras em curto-circuito é realizada conforme a descrição na equação 4.13. Vale ressaltar que as resistências R_g e R_h são calculadas de maneira análoga, porém dependem das porcentagens n_g e n_h .

$$R_f = R \cdot n_f, \quad R_g = R \cdot n_g, \quad R_h = R \cdot n_h \quad (4.13)$$

4.3 Implementação Computacional das Funções de Proteção

As funções de proteção estudadas foram implementadas por meio de diferentes lógicas, conforme exposto no capítulo 3. As variáveis necessárias para cada implementação foram extraídas das diversas situações simuladas no *software* ATP. Essas simulações possibilitaram o registro dos valores de corrente e tensão durante os casos de curto-circuito, sendo esses valores as principais grandezas para a análise das funções.

Inicialmente, nas simulações do ATP, considerou-se um passo de integração correspondente a uma taxa de amostragem de 1600 amostras por ciclo. Dessas simulações foram gerados arquivos de texto com os resultados das grandezas, corrente e tensão, de modo que foi possível importar esses arquivos no *software* MATLAB, sendo esse o recurso utilizado para implementação das funções.

Previamente, no MATLAB, definiram-se as informações do sistema elétrico considerado, sendo esse composto pela linha de transmissão e pelo reator *shunt*. Além disso, foram definidas as relações de transformação dos equipamentos de proteção utilizados, transformadores de corrente e transformadores de potencial. Posteriormente, foram importados dois arquivos de texto, sendo um com os dados de corrente e o outro com os dados de tensão. Com esses dados, iniciou-se então o primeiro passo de Normalização de Sinais,

conforme descrito no capítulo 3. Posteriormente, o próximo passo foi realizar a estimação dos fasores, processo que usou o algoritmo do Filtro Cosseno Modificado.

O Filtro Cosseno Modificado é um algoritmo não-recursivo que exige um processo completo de multiplicação e soma dos coeficientes a cada nova amostra. O resultado desse filtro implica em que o fasor estimado para um sinal senoidal em regime permanente terá uma magnitude constante e rotacionará no sentido anti-horário com um deslocamento angular com taxa de amostragem igual a $\theta = \frac{2\pi h}{N}$, à medida que a janela de dados avança a cada nova amostra. Sendo que nesse momento h é o índice que representa todas as ordens harmônicas presentes no sinal analisado. Nesse sentido, caso os fasores estimados por um algoritmo não-recursivo sejam aplicados diretamente em uma soma cujas parcelas são definidas em instantes diferentes, será gerado um resultado incorreto devido ao defasamento θ . Diante dessas informações e somado ao uso da memória de tensão de sequência positiva, que realiza a soma de fasores em instantes diferentes, conforme descrito no capítulo 3, é necessário corrigir a fase do fasor estimado antes de sua utilização. Essa correção foi feita aplicando a transformação linear de rotação descrita na equação 4.14 (ALMEIDA, 2016).

$$\begin{bmatrix} Y_{re}(k) \\ Y_{im}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k\theta) & \text{sen}(k\theta) \\ -\text{sen}(k\theta) & \cos(k\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{re}(k) \\ X_{im}(k) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

sendo as partes real e imaginária do fasor original representadas por X_{re} e X_{im} , respectivamente; Y_{re} e Y_{im} sendo as partes real e imaginária do fasor rotacionado, respectivamente.

Com os dados adequadamente preparados, seguiu-se para implementação de cada lógica analisada nesta pesquisa. Em todos os casos, considerou-se o momento de aplicação da falta em 100ms. Com essa informação foi possível calcular o tempo de atuação de cada função. Além disso, por meio do algoritmo desenvolvido foi possível calcular a quantidade de espiras curto-circuitadas necessárias para operação da proteção. Essas discussões e análises são detalhadas no capítulo 5. Por fim, com os recursos do MATLAB, gerou-se gráficos para apresentação dos resultados, evidenciando o tempo de operação e a quantidade de espiras em falta.

5 Análise dos Resultados

Com a intenção de realizar uma avaliação comparativa entre as funções de proteção descritas, foram simuladas distintas condições de operação no *software* ATP. Para tanto, foi utilizado o modelo do sistema de potência exibido na figura 4.1, o qual é composto por uma linha de transmissão de 500 kV/60 Hz com 400 km de extensão e 60% de compensação *shunt*. Essa compensação é executada por meio de dois reatores *shunt* do tipo seco, com núcleo de ar, cada um apresentando uma impedância de $40 + j1360,76 \Omega$, instalados em ambas as extremidades da linha. Além disso, esse reator fornece a potência reativa de 183,72 MVAR.

Nos resultados descritos neste trabalho, apresentam-se primeiramente as análises transitórias, nas quais as funções de proteção são avaliadas no tempo, permitindo a avaliação durante os transitórios. Assim, foram realizadas avaliações comparativas para identificar quais funções operam, e seu tempo de operação, em cada condição descrita. Posteriormente, foram realizadas análises de sensibilidade paramétrica, nas quais as funções de proteção foram avaliadas no regime permanente de pós-falta, permitindo a avaliação da influência da quantidade de espiras em curto-circuito, no desempenho das lógicas investigadas.

Nesse contexto, as avaliações foram realizadas para determinar se o sinal de *trip* é enviado na condição da falta analisada. Isso foi feito por meio de gráficos que representam o estado lógico das variáveis de atuação. No eixo "y" desses gráficos, as abreviações das funções implementadas são apresentadas, sendo 21 referente à função de distância, 87 à função diferencial, *REF* à função de falta restrita a terra, $32Q_F$ e $32Q_R$ aos elementos de *forward* e *reverse* da função direcional de sequência negativa, respectivamente. Por sua vez, o eixo "x" indica o tempo em milissegundos para as análises transitórias, enquanto nas análises de sensibilidade paramétrica, o eixo "x" representa a porcentagem de espiras envolvidas na falta.

No mais, para a implementação das lógicas de proteção descritas, os valores de ajuste foram definidos conforme as referências mencionadas para cada função. Os valores considerados foram os seguintes: $k_{REF} = 0,0013$ (equivalente a 0,06 multiplicado pela corrente nominal da fase e dividido pela corrente nominal do neutro e pela relação de transformação), $k_a = 0,02$, $Pickup_{87} = 0,3$, $SLP = 0,35$, $h = 0,8$ e τ é determinado como sendo igual ao ângulo de impedância do reator. Importante ressaltar que, para as simulações das faltas entre espiras, os três fatores de dispersão são considerados iguais e denominados como α_{tt} .

Tabela 5.1 – Propriedades das faltas consideradas para as análises transitórias.

Caso	Descrição
1	Energização em 100 ms
2	Energização com falta fase-terra AT
3	Falta fase-terra AT, considerando todo o enrolamento
4	Falta fase-fase AC, considerando todo o enrolamento
5	Falta fase-fase BC com 40% das fases defeituosas em curto-circuito
6	Falta fase-fase BC com 90% das fases defeituosas em curto-circuito
7	Falta espira-terra com 30% das espiras em curto-circuito e $\alpha_{fh} = 0,7$
8	Falta espira-terra com 70% das espiras em curto-circuito e $\alpha_{fh} = 0,3$
9	Falta espira-espira com 20% das espiras em curto-circuito e $\alpha_{tt} = 0,6$
10	Falta espira-espira com 80% das espiras em curto-circuito e $\alpha_{tt} = 0,8$
11	Falta externa bifásica AB
12	Energização de uma LT próxima
13	Religamento monopolar da LT após falta externa AT
14	Corrente induzida por LT paralela
15	Oscilação LC na LT

5.1 Análises Transitórias

Em todas as situações consideradas nas análises transitórias, as faltas foram aplicadas em 100 ms e suas características são detalhadas na tabela 5.1. Os tempos de operação das funções analisadas para cada caso estão apresentados na tabela 5.2, em que o símbolo ∞ indica que a função não foi acionada.

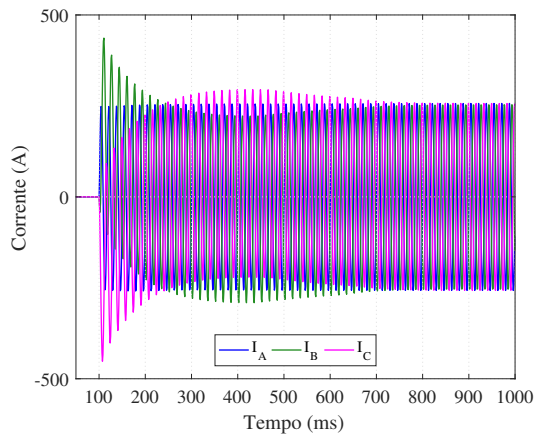
Tabela 5.2 – Tempo de Operação das Funções de Proteção em milissegundos

Caso	t_{21}	t_{87}	t_{REF}	t_{32QF}	t_{32QR}
1	∞	∞	16,704	∞	∞
2	1,074	0,032	1,074	25,032	∞
3	0,032	1,074	0,032	25,032	∞
4	0,032	1,074	∞	25,032	∞
5	6,284	6,284	∞	27,116	∞
6	2,116	3,158	∞	26,074	∞
7	1,074	1,074	1,074	26,074	∞
8	1,074	1,074	1,074	26,074	∞
9	1,074	∞	∞	26,074	∞
10	1,074	∞	∞	26,074	∞
11	∞	∞	∞	∞	4,200
12	∞	∞	∞	∞	∞
13	∞	∞	∞	∞	4,200
14	∞	∞	∞	∞	∞
15	19,830	∞	∞	∞	17,7460

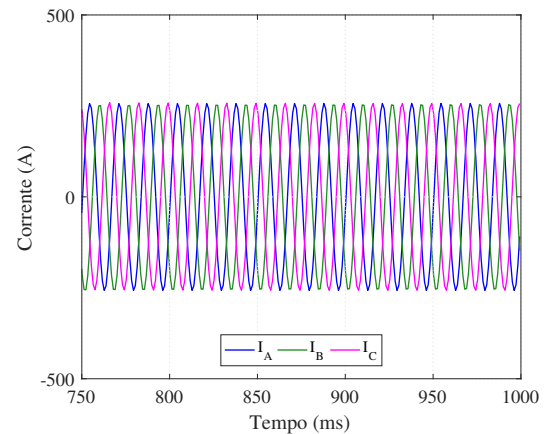
Para avaliar a operação das funções de proteção durante a manobra de energização, o Caso 1 é apresentado, no qual o reator é energizado em 100 ms. Para esse caso, os comportamentos das correntes medidas nos terminais da fase do reator são ilustrados na figura 5.1. Observa-se na figura 5.1a, que representa o comportamento das correntes entre 50 ms e 1000 ms, que os valores de corrente são nulos antes da energização. Após a energização, ocorrida aos 100 ms, as correntes apresentam valores distintos entre as fases, resultando em um desequilíbrio observável até aproximadamente 750 ms. Entretanto, após esse transitório inicial, as correntes se equilibram no regime de estado estacionário, como observado na figura 5.1b, correspondente ao intervalo de tempo entre 750 ms e 1000 ms, após a energização.

Como ilustrado na figura 5.2a, na qual são apresentadas as variáveis de estado das funções analisadas, no intervalo de 50 ms a 1000 ms, nota-se que o elemento *REF* foi ativado devido ao desequilíbrio causado durante a energização, fazendo com que a corrente de sequência zero tenha valor não nulo logo após a energização. No estado estacionário (após 750 ms), observa-se que nenhuma das funções foi ativada.

A energização do reator com falta fase-terra AT é analisada no Caso 2, com seus resultados exibidos na figura 5.2b. Observa-se que todas as funções entram em operação, exceto o elemento $32Q_R$, que opera somente para faltas externas. Conforme indicado na

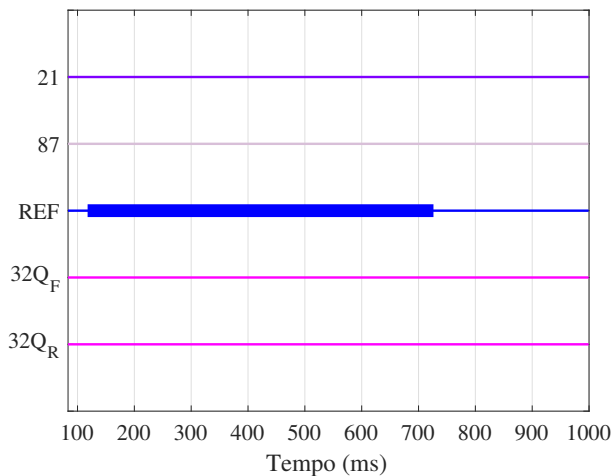


(a) Entre 0 ms e 1000 ms.

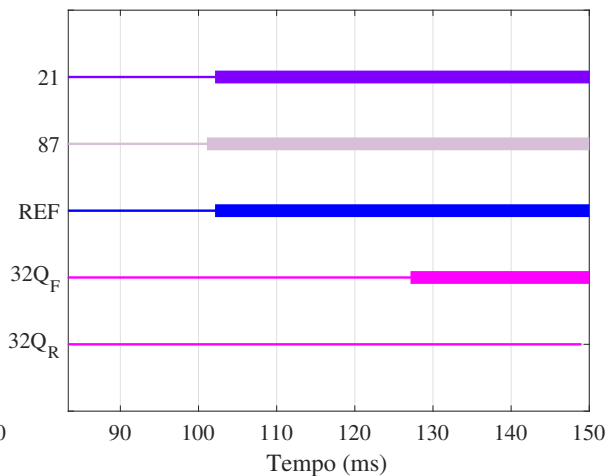


(b) Entre 750 ms e 1000 ms.

Figura 5.1 – Caso 1 - Comportamento da corrente durante a energização.



(a) Caso 1.



(b) Caso 2.

Figura 5.2 – Estado lógico das variáveis dos Casos 1 e 2.

tabela 5.2, a função 87 teve a operação mais rápida, ao passo que a função $32Q_F$ foi a mais lenta devido ao emprego de atraso intencional.

Seguindo a referência da tabela 5.1, o Caso 3 representa uma falta fase-terra AT que abrange todo o enrolamento da fase A. Os resultados correspondentes são exibidos na Figura 5.3a, na qual verifica-se que todas as funções são ativadas, exceto o elemento $32Q_R$. De fato, o elemento $32Q_R$ não deveria operar, uma vez que não há ocorrência de falta externa. Conforme indicado na tabela 5.2, as funções 21 e REF tiveram o menor tempo de operação, enquanto a função $32Q_F$ foi a que mais demorou para atuar, devido ao emprego de atraso intencional.

Fundamentado na tabela 5.1, o Caso 4 corresponde a uma falta fase-fase que afeta as fases A e C. Os resultados correspondentes são apresentados na figura 5.3b, na qual percebe-se que as funções REF e $32Q_R$ não operam. De fato, para o Caso 4, a função REF não deveria operar pois a falta não envolve o terra e a função $32Q_R$ não deveria

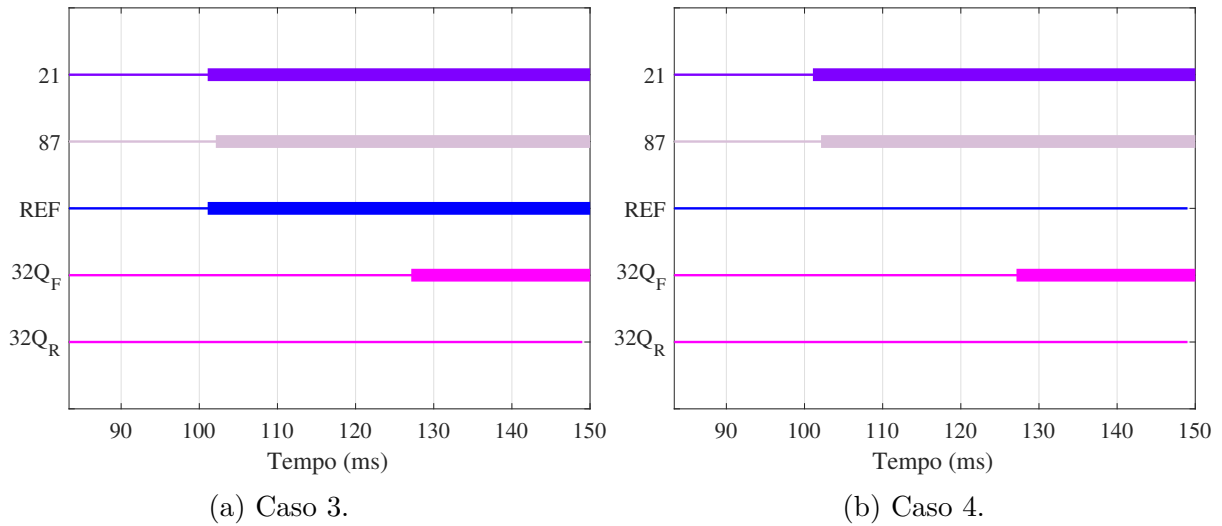


Figura 5.3 – Estado lógico das variáveis dos Casos 3 e 4.

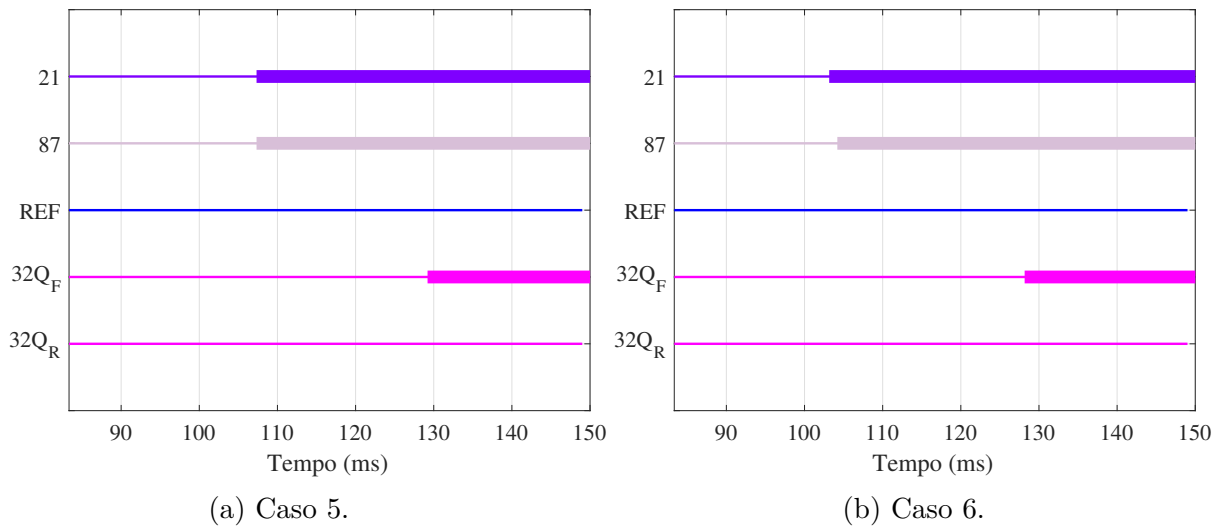


Figura 5.4 – Estado lógico das variáveis dos Casos 5 e 6.

operar por se tratar de uma falta interna. Conforme a tabela 5.2, a função 21 teve o menor tempo de operação, enquanto a função 32Q_F apresentou o maior tempo de operação, devido ao atraso implementado.

Os Casos 5 e 6 referem-se a faltas fase-fase com 40% e 90% das fases em curto-circuito, respectivamente. Para ambos os casos, apresentados nas figuras 5.4a e 5.4b, respectivamente, observa-se a operação das funções 21, 87 e 32Q_F. Conforme detalhado na tabela 5.2, em ambos os Casos 5 e 6, as funções 21 e 87 tiveram o menor tempo de operação, enquanto a função 32Q_F demorou mais para atuar. Ao comparar os casos 5 e 6 entre eles, nota-se que a operação no Caso 6 é mais rápida, devido a maior porcentagem de espiras em curto-circuito. Isso resulta em uma corrente de falta maior, sensibilizando a função de proteção mais rapidamente.

Os Casos 7 e 8 correspondem a faltas espira-terra. Para o Caso 7 são utilizadas 30% das espiras em curto-circuito com $\alpha_{fh} = 0,7$ e esses resultados são expostos na figura

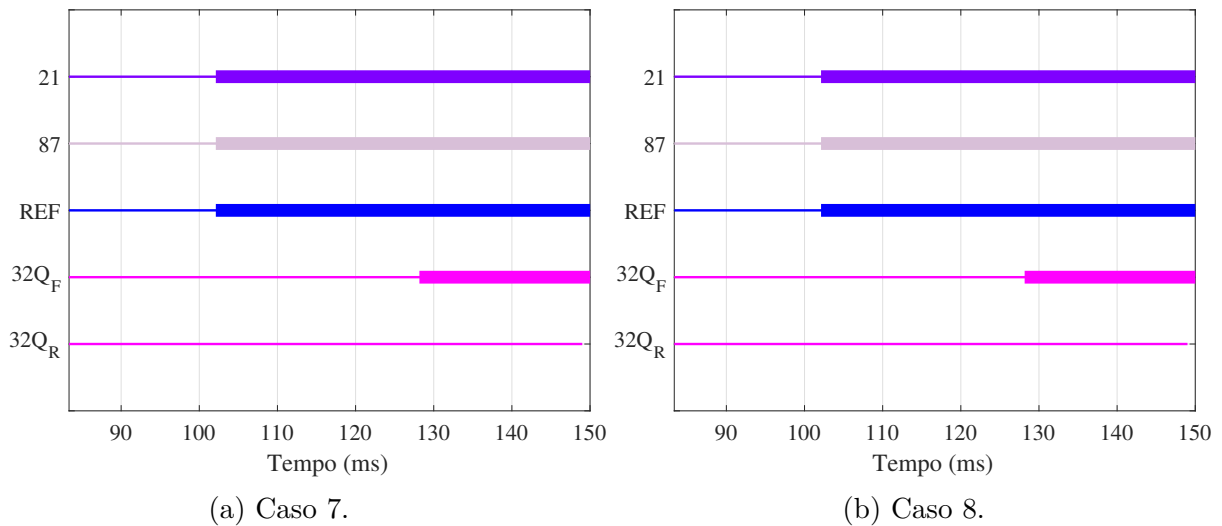


Figura 5.5 – Estado lógico das variáveis dos Casos 7 e 8.

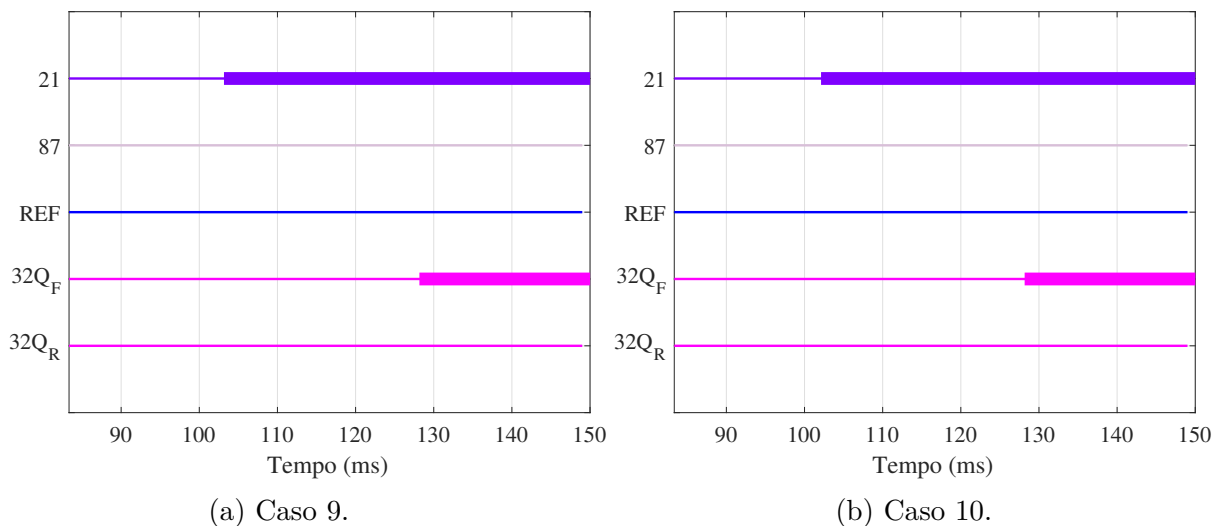
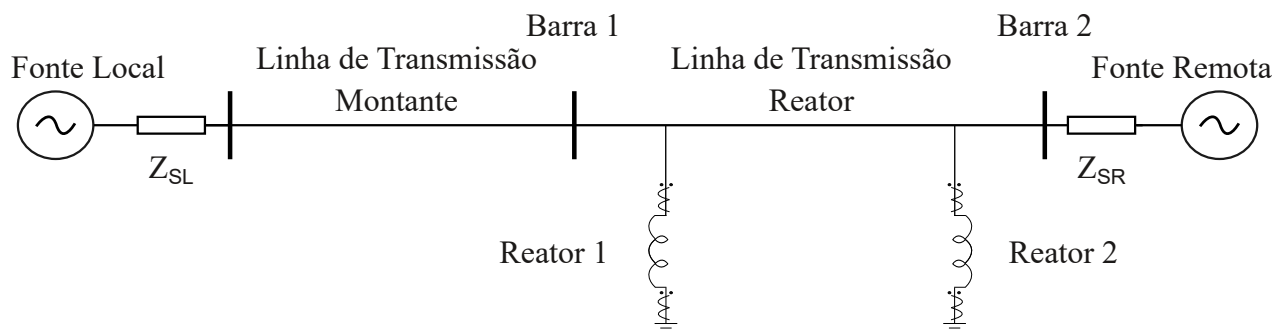


Figura 5.6 – Estado lógico das variáveis dos Casos 9 e 10.

5.5a. Para o Caso 8 são consideradas 70% das espiras em curto-circuito com $\alpha_{fh} = 0,3$ e esses resultados são apresentados na figura 5.5b. Em ambos os casos, observa-se a operação das funções 21, 87, *REF* e $32Q_F$. A não operação do elemento $32Q_R$ é justificada pela ausência de falta externa. Segundo a tabela 5.2, para os dois casos, as funções 21, 87 e *REF* tiveram os menores tempos de operação. No mais, a função $32Q_F$ apresentou o maior tempo de operação.

Os Casos 9 e 10 referem-se a faltas espira-espira, com 20% e 80% das espiras em curto-circuito, respectivamente. No Caso 9, com $\alpha_{tt} = 0,6$, os resultados são exibidos na figura 5.6a, enquanto no Caso 10, com $\alpha_{tt} = 0,8$, os resultados são exibidos na figura 5.6b. Com base nessas análises, observa-se que o comportamento das funções é semelhante para ambos os casos, com apenas as funções 21 e $32Q_F$ operando. Conforme detalhado na tabela 5.2, tanto para o Caso 9 quanto para o Caso 10, a função 21 registrou o menor tempo de operação, enquanto a função $32Q_F$ apresentou o maior tempo de operação.

Figura 5.7 – Modelo Modificado do Sistema de Potência Analisado.



Fonte: Autor.

Ademais, para avaliar a eficácia das funções de proteção em situações de faltas externas, foi simulado o Caso 11. Para tanto, o sistema elétrico apresentado na figura 4.1 foi modificado, tal que duas linhas de transmissão idênticas (cada uma com extensão de 230 km) foram conectadas a montante da barra local, como resultado gerou-se o sistema apresentado na figura 5.7. Em uma dessas linhas, a uma distância de 5 km da barra local, o curto-circuito externo foi aplicado, sendo o Caso 11 correspondente a uma falta bifásica. Embora essa falta externa tenha sido aplicada nas proximidades do reator, sua ocorrência não deve acionar a função de proteção do reator.

Para a falta externa bifásica AB, o resultado é exibido na figura 5.8a. Sendo esse o Caso 11, observa-se que a função $32Q_R$ opera, já que se trata de falta externa. Neste caso, durante as simulações, observou-se que considerando o ajuste de 80% ($h = 0,8$) a proteção de distância sensibiliza. Portanto, com o intuito de evitar operações inadequadas foi utilizado o ajuste de 50% ($h = 0,5$). Assim, não houve operação da função 21. Além disso, as demais funções não entraram em operação.

Aproveitando o arranjo modificado para o Caso 11, em 100 ms simulou-se a energização da LT próxima a linha em que o reator foi conectado. Essa configuração é apresentada pelo Caso 12 e seus resultados são expostos na figura 5.8b. Nesse caso, não houve operação das funções de proteção.

O Caso 13 descreve o religamento monopolar da linha de transmissão após uma falta monofásica na fase A. Neste cenário, uma falta foi aplicada em 100 ms e, em seguida, o disjuntor da fase afetada foi aberto após 20 ms. Posteriormente, em 140 ms, o disjuntor foi fechado novamente, simulando o religamento monopolar dos terminais da linha de transmissão após a eliminação de um curto-circuito. Os resultados deste caso são expostos na figura 5.9a, na qual observa-se que apenas a função $32Q_R$ entrou em operação. Inicialmente, essa função detecta a falta e permanece ativa mesmo com a abertura do disjuntor, devido ao desequilíbrio entre as fases. Por fim, nota-se que, mesmo após o

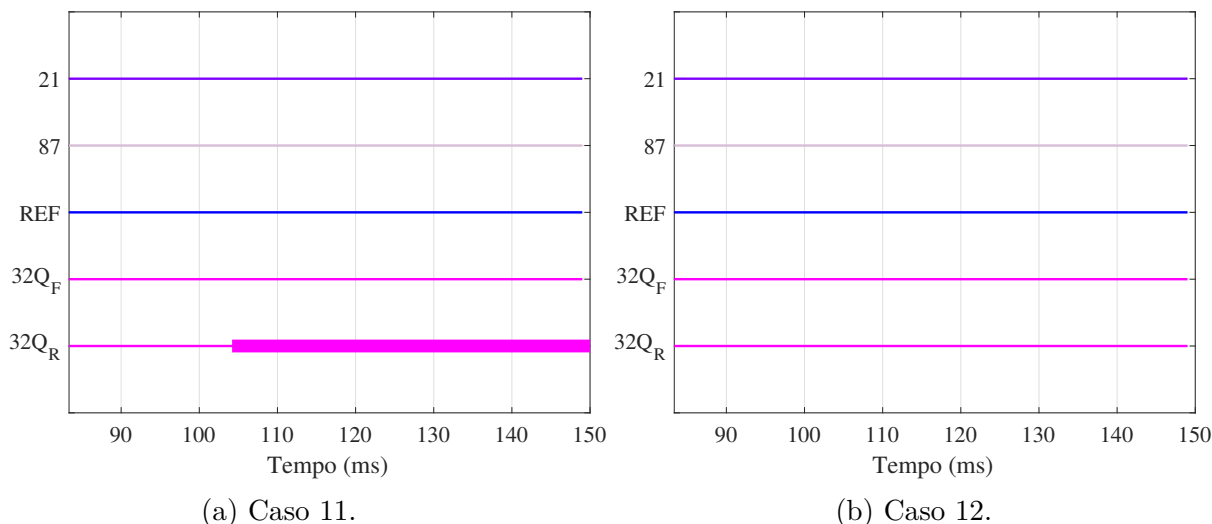


Figura 5.8 – Estado lógico das variáveis dos Casos 11 e 12.

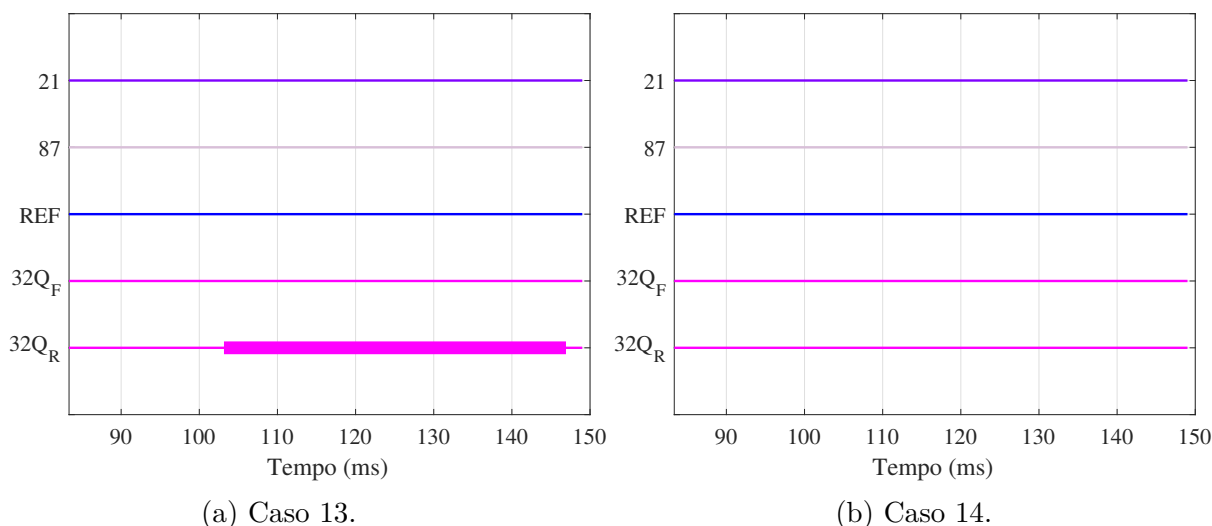


Figura 5.9 – Estado lógico das variáveis dos Casos 13 e 14.

fechamento do disjuntor, a função continua operando por alguns milissegundos, devido ao desequilíbrio momentâneo gerado ao realizar o religamento.

No Caso 14, exposto na figura 5.9b, foi conectada, em 100 ms, uma linha de transmissão em paralelo a linha em que o reator foi conectado com o intuito de verificar a corrente induzida por essa LT em paralelo. Dos resultados, verificou-se que não houve operação das funções de proteção.

O caso 15 representa uma situação de oscilação LC, entre a capacitância da linha de transmissão e a indutância do reator *shunt*. Essa oscilação é observada em reatores de linha devido à interação entre indutância e capacitância. A energização da linha provoca uma troca de energia entre o reator e a capacitância, o que continua até que um transitório aconteça. Esse transitório ocorre quando os terminais são abertos, resultando em oscilações entre a capacitância da linha de transmissão e a indutância do reator *shunt*. Visando simular este cenário, inicialmente considerou-se a LT sem curto-circuito e com apenas um

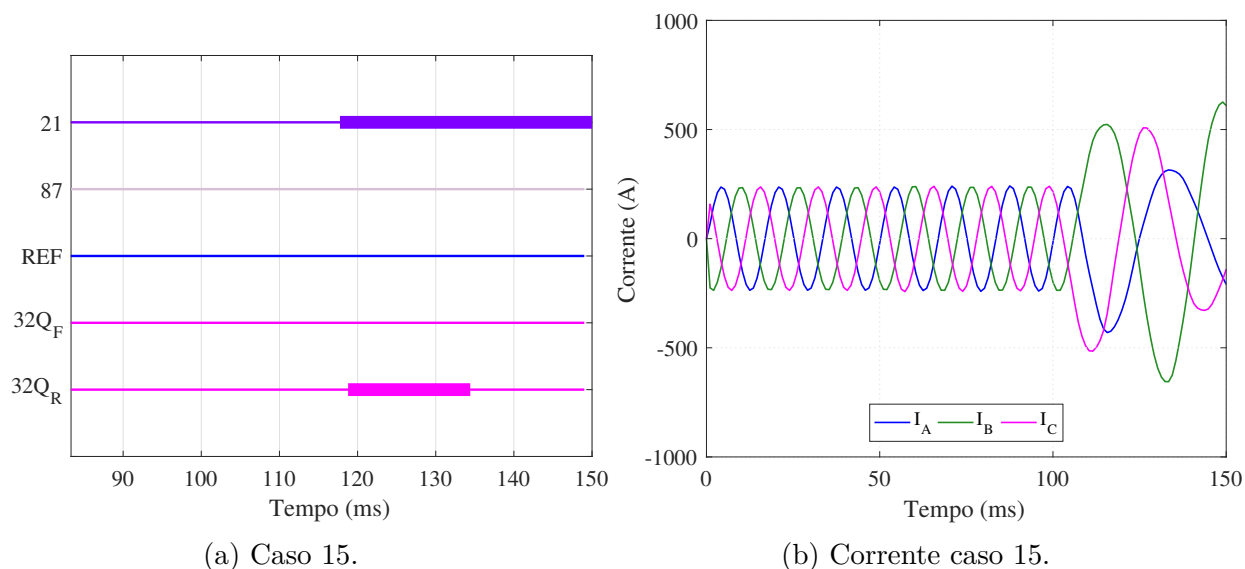


Figura 5.10 – Estado lógico das variáveis e corrente do Caso 15.

reator conectado no terminal local. Após 50 ms o terminal remoto, terminal sem o reator, foi aberto. Continuando a simulação, em 100 ms, o terminal local, onde estava o reator, foi aberto. Dos resultados expostos na figura 5.10a, observa-se que as funções 21 e $32Q_R$ entram em operação. Da figura 5.10b, verifica-se que as corrente nos terminais de fase do reator ficaram desequilibradas no momento em que foi aberto o terminal local da LT, o que justifica a atuação da proteção. Por fim, da tabela 5.2, percebe-se que a função $32Q_R$ atuou primeiro.

5.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica

A fim de avaliar o impacto do número de espiras em curto-circuito no desempenho das funções de proteção, são realizadas as análises de sensibilidade paramétricas. Por meio dessas análises, é possível variar a quantidade de espiras curto-circuitadas, permitindo uma avaliação mais abrangente. Seguindo essa lógica, para faltas do tipo espira-terra, a variação do número de espiras em curto-circuito é de 1 a 99%, enquanto para faltas do tipo espira-espira, o intervalo de espiras em curto-circuito varia de 1 a 98%. Como resultado, são simuladas 591 faltas no total. As características das faltas entre espiras e entre espiras simuladas são apresentadas na tabela 5.3 das análises de sensibilidade paramétrica. A quantidade mínima de espiras curto-circuitadas para que as funções analisadas entrem em operação estão apresentados na tabela 5.4, em que o símbolo ∞ indica que a função não foi acionada.

Com base no Caso 16, o qual representa as faltas espira-terra com fator de dispersão igual 0,01, e cujo resultado é ilustrado na figura 5.11a, verifica-se que as funções de proteção 21, 87, *REF* e $32Q_F$ operam independentemente do número de espiras curto-circuitadas e do valor do fator de dispersão. No mais, verifica-se que a função $32Q_R$ não opera por ser

Tabela 5.3 – Características das faltas avaliadas para Análise de Sensibilidade Paramétrica.

Caso	Tipo de Falta	Fator de Dispersão
16	Espira-Terra	$\alpha_{fh} = 0,01$
17	Espira-Terra	$\alpha_{fh} = 0,5$
18	Espira-Terra	$\alpha_{fh} = 1,0$
19	Entre Espiras	$\alpha_{tt} = 0,01$
20	Entre Espiras	$\alpha_{tt} = 0,5$
21	Entre Espiras	$\alpha_{tt} = 1,0$

Tabela 5.4 – Porcentagem de Espiras para Operação das Funções de Proteção

Caso	21	87	<i>REF</i>	$32Q_F$	$32Q_R$
16	1%	1%	1%	1%	∞
17	2%	1%	1%	1%	∞
18	1%	1%	1%	1%	∞
19	1%	∞	∞	1%	∞
20	2%	∞	∞	1%	∞
21	13%	∞	∞	2%	∞

um caso de falta interna. Por fim, destaca-se que a porcentagem mínima de espiras curto-circuitadas foi de 1% para que as funções entrassem em operação, conforme apresentado na tabela 5.4.

Os resultados do Caso 17, correspondente às faltas espira-terra com um fator de dispersão de 0,5, são apresentados na figura 5.11b, em que se verifica as funções de proteção 21, 87, *REF* e $32Q_F$ operam independentemente do número de espiras afetadas ou do valor do fator de dispersão. Além disso, observa-se que a função $32Q_R$ não opera pois esse caso corresponde a uma falta interna. Pela tabela 5.4, observou-se que houve mudança na quantidade de espiras para detectar o curto-circuito na função 21, sendo necessário o mínimo de 2% de espiras em falta.

No Caso 18, são apresentadas as faltas espira-terra com um fator de dispersão igual 1, e seus resultados são apresentados na figura 5.12a. Desse casos, verifica-se que as funções de proteção 21, 87, *REF* e $32Q_F$ operam independentemente do número de espiras curto-circuitadas ou do valor do fator de dispersão. No mais, verifica-se que a função $32Q_R$ não opera por ser um caso de falta interna. Por fim, conforme exposto na tabela 5.4, observou-se que a porcentagem mínima de espiras curto-circuitadas foi de 1% para que as funções entrassem em operação.

Do Caso 19, que corresponde às faltas entre espiras com fator de dispersão igual 0,01,

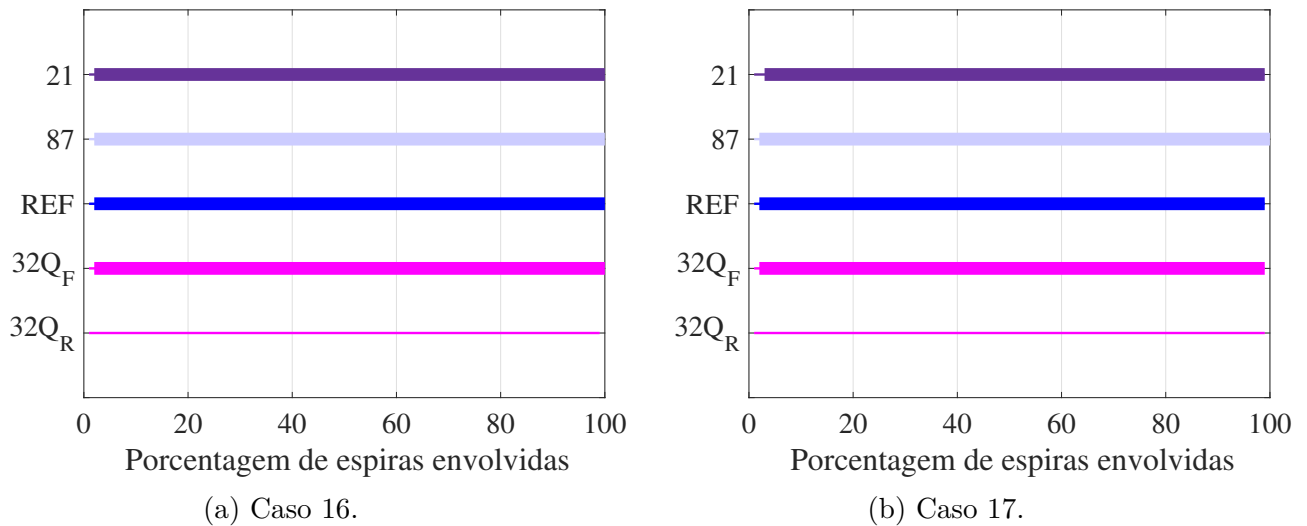


Figura 5.11 – Estado lógico das variáveis dos Casos 16 e 17.

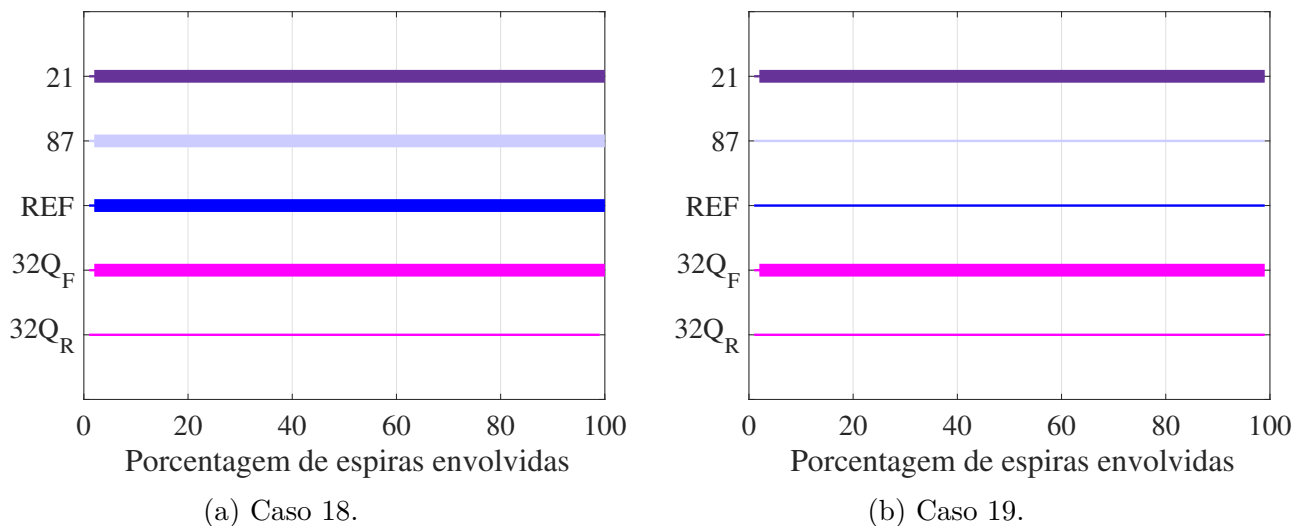


Figura 5.12 – Estado lógico das variáveis dos Casos 18 e 19.

e cujos resultados são apresentados na figura 5.12b, observa-se que as funções de proteção 21 e 32Q_F operam independentemente do número de espiras curto-circuitadas. Desse caso, verifica-se que a função *REF* não opera por não envolver o terra e a função 32Q_R não opera por ser uma falta interna. Além do mais, percebe-se que não houve operação da função 87 pois as correntes medidas nos terminais de fase e neutro são aproximadamente iguais. No mais, a função 21 e 32 entrou em operação com 1% das espiras em falta, segundo exposto na tabela 5.4.

No Caso 20, o qual corresponde às faltas entre espiras com fator de dispersão igual 0,5, e cujos resultados são ilustrados na figura 5.13a, nota-se que as funções de proteção 21 e 32Q_F operam independentemente do número de espiras afetadas. Desse caso, verifica-se que a função *REF* não opera por não envolver o terra e a função 32Q_R não opera por ser uma falta interna. No mais, verifica-se que a função 87 não entrou em operação devido aos valores aproximadamente iguais das correntes medidas no terminais de fase e neutro.

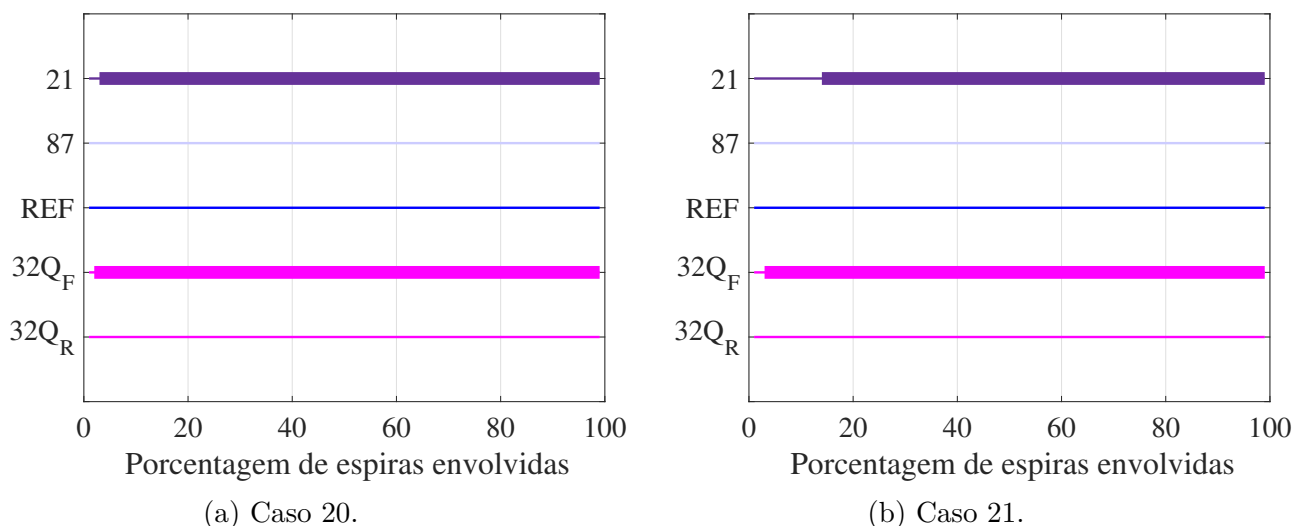


Figura 5.13 – Estado lógico das variáveis dos Casos 20 e 21.

Além disso, observou-se que a função 21 entrou em operação com 2% das espiras em falta e a função 32 com 1% das espiras em falta, conforme mostrado na tabela 5.4.

No Caso 21, que corresponde as faltas entre espiras e cujos resultados são apresentados na figura 5.13b, verifica-se que, como o fator de dispersão é igual a 1, as correntes de falta são ainda menores. Assim, em faltas com poucas espiras envolvidas, a função 21 tem seu desempenho comprometido, operando somente para faltas com mais de 14% das espiras em curto-circuito. Por outro lado, a função $32Q_F$ opera independentemente do número de espiras envolvidas. Nesse caso, observa-se que as funções REF e $32Q_R$ não operam. Além disso, nota-se que a função 87 não entrou em operação por causa dos valores aproximadamente iguais das correntes medidas no terminais de fase e neutro. No mais, conforme a segundo exposto na tabela 5.4, a 21 entrou em operação com 13% das espiras em falta e a função 32 com 2% das espiras em falta.

5.3 Discussão das Análises

Neste capítulo foi apresentada uma avaliação comparativa das funções de proteção investigadas. Para tanto, inicialmente foram expostas as características do sistema elétrico usado nas simulações, com ênfase nas especificidades do reator considerado, que é o principal equipamento em análise. Posteriormente, foram descritas as análises transitórias e as análises de sensibilidade paramétrica. Para ambas as análises, foram desenvolvidos diferentes casos, variando o tipo de falta, o fator de dispersão e o número de espiras em curto-circuito. Fundamentado nas análises transitórias, avaliou-se a atuação das funções e o seu tempo de operação. Por outro lado, nas análises de sensibilidade paramétrica, avaliou-se a influência da quantidade de espiras em curto-circuito.

Segundo os resultados da análise transitória, observa-se que para faltas entre

espiras a função 87 não opera, pois as correntes medidas nos terminais de fase e neutro são aproximadamente iguais e com sinais contrários. Adicionalmente, a função *REF* não entrou em operação em faltas fase-fase e faltas entre espiras, porque essas faltas não envolvem o terra. Portanto, a utilização das funções 87 e *REF* deve ser complementada por outras funções de proteção para assegurar cobertura contra faltas entre espiras. Destaca-se que as funções 21 e $32Q_F$ demonstraram o melhor desempenho, operando em todos os cenários de faltas internas analisados. A função 21 atuou incorretamente para o caso de falta externa bifásica, porém essa operação pode ser controlada reduzindo o alcance da zona de distância. Em geral, a função 21 apresentou o tempo de operação mais rápido (inferior a um ciclo), enquanto o elemento $32Q_F$ foi mais lento devido à introdução de um atraso intencional para prevenir operações incorretas durante transitórios. No mais, considerando todos os casos simulados, a função $32Q_R$ operou apenas em faltas externas. Por fim, em eventos externos como os casos de energização de uma LT próxima e corrente induzida por LT paralela, nota-se que as funções não entraram em operação como o esperado. No caso de religamento monopolar da LT após uma falta, observou-se que a função $32Q_R$ operou, devido a falta externa, e alguns milissegundos após o religamento a função deixou de operar pois não havia mais falta. O caso de oscilação LC foi o único evento externo que houve atuação das funções, sendo que apenas as funções 21 e $32Q_R$ operaram, devido ao desequilíbrio gerado durante a abertura dos terminais da LT.

Ao avaliar as faltas consideradas nas análises de Sensibilidade Paramétrica, observa-se que as funções 87 e *REF* operam apenas em caso de faltas espira-terra. Além disso, é notável que as funções 21 e $32Q_F$ exibem desempenhos bastante similares tanto para faltas espira-terra quanto para faltas entre espiras. Sendo que a função $32Q_F$ opera independentemente do número de espiras afetadas e do valor do fator de dispersão, assim como a função 21, que somente operou diferente da função $32Q_F$ para os casos de faltas com elevado valor de dispersão e poucas espiras envolvidas. No mais, a função $32Q_R$ não operou pois não foram simulados casos de faltas externas durante essa análise.

Em síntese, apresenta-se a tabela 5.5, na qual é exposto um quadro resumo com o comportamento dos critérios analisados conforme foram variadas as características do curto-circuito. Nessa tabela, a primeira coluna indica as funções analisadas. As características variadas são indicadas na segunda coluna, sendo elas: tipo de falta, quantidade de espiras curto-circuitadas e o fator de dispersão. Ademais, terceira e quarta coluna mostram, respectivamente, a operação e o tempo de operação para a análise transitória, representada pela sigla AT na tabela. Por outro lado, a operação para a análise de sensibilidade paramétrica, representada por ASP na tabela, é apresentada na quinta coluna. No mais, as siglas na tabela possuem os seguintes significados: NI indica que a característica variada não influenciou o critério avaliado, IC indica que a característica variada influenciou o critério avaliado, NA indica que o critério não foi avaliado naquela análise e o símbolo * indica que no caso da função direcional de sequência negativa, o comportamento dos

elementos foram conforme o proposto para falta externa e interna.

No mais, dos resultados expostos na tabela 5.5, verificou-se que a investigação sobre as funções estudadas contemplou todos os casos indicados nas tabelas 5.1 e 5.3, assim como resumiu os resultados expostos nos gráficos apresentados e nas tabelas 5.2 e 5.4.

Dos resultados apresentados na tabela 5.5, observa-se que a operação da função 21, durante a análise transitória, não foi impactada pelos critérios analisados. Por outro lado, o tempo de atuação dessa função foi afetada pela quantidade de espiras curto-circuitadas. Sobre a análise de sensibilidade paramétrica, verificou-se que a quantidade de espiras curto-circuitadas e o fator de dispersão impactou a operação da função.

Na análise transitória da função 87, observou-se que a operação foi afetada por todos os critérios considerados, sendo que o tempo de atuação foi influenciado tanto pelo tipo de falta quanto pela quantidade de espiras em curto-circuito. Em contraste, na análise de sensibilidade paramétrica, o desempenho da função foi impactado apenas pelo tipo de falta.

A função *REF* exibiu um comportamento similar em ambas as análises, sendo influenciada apenas pelo tipo de falta, tanto em relação ao tempo e à operação na análise transitória quanto na operação na análise de sensibilidade paramétrica.

Por fim, ambos os elementos da função $32Q$ atuaram conforme foram propostos. No elemento $32Q_F$, durante a análise transitória, teve o tempo de atuação afetado pelo tipo de falta. Por outro lado, na análise de sensibilidade paramétrica, a operação foi impactada apenas pela quantidade de espiras curto-circuitadas. O elemento $32Q_R$ atuou apenas nos casos de falta externa, não sendo impactado pelos critérios analisados.

Tabela 5.5 – Resumo do Comportamento da Operação das Funções Investigadas

Funções	Características do Curto-circuito	AT		ASP
		Operação	Tempo	Operação
21	Tipo de falta	NI	NI	NI
	Espiras curto-circuitadas	NI	IC	IC
	Fator de dispersão	NI	NI	IC
87	Tipo de falta	IC	IC	IC
	Espiras curto-circuitadas	IC	IC	NI
	Fator de dispersão	IC	NI	NI
REF	Tipo de falta	IC	IC	IC
	Espiras curto-circuitadas	NI	NI	NI
	Fator de dispersão	NI	NI	NI
32Q _F	Tipo de falta	NI*	IC	NI*
	Espiras curto-circuitadas	NI*	NI*	IC
	Fator de dispersão	NI*	NI*	NI*
32Q _R	Tipo de falta	NI*	NI*	NI*
	Espiras curto-circuitadas	NA	NA	NA
	Fator de dispersão	NA	NA	NA

Legenda:

AT: Análise transitória

ASP: Análise de sensibilidade paramétrica

NI: Não influencia no critério avaliado

IC: Influencia no critério avaliado

NA: Não avaliado

(*) Os elementos da função 32Q atuaram conforme foram propostos

6 Conclusão

Nesta trabalho de pesquisa, foram avaliadas funções de proteção para aplicação em reatores *shunt*. Para tanto, foi utilizado a modelagem de um reator *shunt* por meio do *software ATP*, do qual foram coletadas as informações necessárias para o emprego dos algoritmos de proteção. Assim, com base nos dados coletados de tensão e de corrente, realizou-se uma avaliação comparativa entre as funções 21, 87, *REF*, $32Q_F$ e $32Q_R$.

Visando compreender as características relevantes sobre os reatores *shunt*, no Capítulo 2, foram descritos os principais aspectos construtivos, os tipos de conexões e suas aplicações em linhas de transmissão. Além do mais, nesse capítulo, foram explanadas diversas situações de operação, sendo em condições normais ou críticas. Finalizando, foram expostas proteções normalmente empregadas nesses equipamentos. Essa breve introdução às características construtivas do reator e questões relacionadas a sua operação foi de suma importância para definição dos fundamentos do modelo e das análises realizadas nesta pesquisa.

Com o objetivo de esclarecer os princípios sobre esquemas de proteção e validar os requisito das funções de proteção aplicadas em reatores, no Capítulo 3, foram apresentados fundamentos teóricos sobre as funções 21, 87, *REF*, $32Q_F$ e $32Q_R$. Assim, nesse capítulo foram definidas as condições de operação e restrição para cada função.

O Capítulo 4 apresentou os modelos e ferramentas utilizadas para desenvolvimento deste trabalho. Iniciou-se com a exposição do modelo do sistema elétrico empregado e o *software ATP* responsável pela modelagem do sistema. Além disso, foi exposto o modelo do reator, também modelado no ATP, que foi usado nas simulações. Por último, apresentou-se o meio aplicado para implementação computacional das funções de proteção analisadas.

No Capítulo 5, foram simulados diversos tipos de curtos-circuitos, variando o tipo de falta, os valores do fator de dispersão no reator e a quantidade de espiras envolvidas no curto-circuito. Avaliou-se ainda a condição de energização do reator e situações de eventos externos. Os resultados obtidos foram expostos por meio de gráficos dos estados lógicos de cada proteção avaliada. Assim, verificaram-se comportamentos distintos para cada proteção avaliada. No mais, foi discutido e exposto de forma sintetizada os resultados das simulações.

Com base nas simulações realizadas, para uma avaliação apropriada dos esquemas de proteção dos reatores *shunt*, ficou claro que a análise do valor do fator de dispersão e do número de espiras em curto-circuito é relevante. Esses parâmetros exercem influência significativa no desempenho das funções de proteção. Portanto, nas simulações realizadas utilizando o *software ATP*, é essencial que a modelagem do reator inclua não apenas a

capacidade de aplicar faltas espira-terra e faltas entre espiras, mas também a consideração do valor do fator de dispersão e do número de espiras em curto-circuito.

Dos resultados da análise transitória, detalhados no Capítulo 5, as funções 87 e *REF* apresentaram desempenho insatisfatório em alguns casos e necessitam de complementação de outras funções de proteção, principalmente para assegurar cobertura contra faltas entre espiras. Por outro lado, as funções 21 e $32Q_F$ demonstraram o melhor desempenho, operando em todos os cenários de faltas internas analisados. Destaca-se que a função 21 apresentou o tempo de operação mais rápido (inferior a um ciclo), enquanto o elemento $32Q_F$ foi mais lento devido à introdução de um atraso intencional para prevenir operações incorretas durante transitórios. Além disso, a função $32Q_R$ operou apenas em faltas externas. Por fim, a análise de eventos externos ocorreu por meio dos casos de energização de uma LT próxima, religamento monopolar da LT após uma falta, corrente induzida por LT paralela e oscilação LC na LT. Nessa análise, não houve atuação da proteção nos casos de energização de uma LT próxima e corrente induzida por LT paralela. No religamento monopolar, a função $32Q_R$ atuou conforme o esperado durante a presença do curto-circuito. Finalizando, no caso de oscilação LC na LT as funções 21 e $32Q_F$ atuaram devido ao desequilíbrio após a abertura dos terminais da LT.

Nas análises de Sensibilidade Paramétrica, descritas no Capítulo 5, observa-se que novamente as funções 87 e *REF* apresentaram desempenho insatisfatório em alguns casos e necessitam de complementação de outras funções de proteção, pois operam apenas em caso de faltas espira-terra. Além disso, é notável que as funções 21 e $32Q_F$ exibem desempenhos bastante similares tanto para faltas espira-terra quanto para faltas entre espiras. Destaca-se que ambas funções operam independentemente do número de espiras afetadas e do valor do fator de dispersão.

Fundamentado em todas as análises simuladas no *software ATP* e na comparação de diferentes esquemas de proteção implementados, verifica-se que as funções 21 e $32Q_F$ destacaram-se, apresentando características semelhantes e desempenho superior em relação às demais funções avaliadas. De maneira geral, as funções 21 e $32Q_F$ operam eficazmente em todos os curtos-circuitos, incluindo espira-terra e entre espiras, independentemente do número de espiras envolvidas e do valor do fator de dispersão. Comparativamente, a função de distância mostrou-se mais ágil, com um tempo de operação inferior a um ciclo. Portanto, conclui-se que a função de distância também pode ser utilizada como proteção principal, complementando outras funções tradicionalmente empregadas, para aprimorar o desempenho do esquema de proteção do reator.

Por fim, como sugestão de trabalhos futuros:

- Analisar o comportamento das principais características das funções de proteção, sendo: o ângulo para função de distância, a impedância para função direcional de

sequência negativa, a corrente para função diferencial e para *REF*;

- Repetir as análises para outros reatores, variando tipo e aplicação;
- Testar outras características, além da MHO, aplicadas na função de distância com o intuito de validar e refinar seu uso como função de proteção principal aplicada em reatores *shunt*.

Referências

- ABD-ELAZIZ, M. A.; BADRAN, E. A.; EL-SHMOTY, M. M. I. A general approach for internal faults representation of three-phase threewinding transformers in emtp-atp. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, v. 2, p. 44–50, 2013. Citado na página 49.
- ALCAHUAMAN, M. E. Z. *Análise de Sensibilidade da Corrente de Arco Secundário para Diferentes Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2007. Citado na página 18.
- ALMEIDA, M. L. S.; PERES, L. M.; SANTOS, G. G. Air-core dry-type shunt reactor protection based on an alternative current alpha plane. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 15, n. 1, p. 34–44, 2021. Citado na página 35.
- ALMEIDA, M. L. S.; PERES, L. M.; SILVA, K. M. On applying an enhanced generalized alpha plane to shunt reactor protection. *Electric Power Systems Research*, v. 212, p. 108387, 2022. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622005399>>. Citado na página 35.
- ALMEIDA, M. L. S.; SILVA, K. M. An investigation of distance protection function applied for shunt reactors. *Electric Power Systems Research*, v. 223, p. 109579, 2023. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779623004686>>. Citado 4 vezes nas páginas 33, 35, 45 e 46.
- ALMEIDA, M. L. S. de. *Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão Baseada no Plano Alfa de Potências Complexas*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 55.
- ALVES, T. M. T. de S. *Desempenho da Proteção de Reatores de Linhas de Transmissão Frente a Manobras e Falhas Internas e Externas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 19, 28, 30 e 49.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA, 1999. Citado na página 34.
- ANEEL. *Relatório de Desligamentos Forçados 2016*. Brasília, Brasil: Agência Reguladora de Energia Elétrica, 2016. Acesso em: 10 dez 2023. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- BASHA, F. K.; THOMPSON, M. Practical ehv reactor protection. In: *66th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 7 vezes nas páginas 15, 23, 25, 29, 31, 32 e 35.
- BASTARD, P.; BERTRAND, P.; MEUNIER, M. A transformer model for winding fault studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 2, p. 690–699, 1994. Citado 4 vezes nas páginas 50, 51, 52 e 53.
- BEDI, A.; PATNE, N. R. Analysis of shunt reactor energization at ehv substation and its effects on et: A case study. In: *2016 IEEE 1st International Conference on Power*

Electronics, Intelligent Control and Energy System (ICPEICES). [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 30.

CARLSON, A. *Shunt reactor manual*. [S.l.], 2002. ABB Power Technology Products/Transformers, Ludvika-Sweden, p. 08–20, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.

CAVERLY, D. et al. Air core reactors: Magnetic clearances, electrical connection, and grounding of their supp. *Minnesota Power Systems Conference*, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.

CHIMKLAI, S.; MARTI, J. R. Simplified three-phase transformer model for electromagnetic transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 3, p. 1316–1325, 1995. Citado na página 49.

CHOWDHURY, R. et al. Restricted earth fault protection in low-impedance grounded systems with inverter-based resources. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 38, n. 1, p. 505–512, 2023. Citado 5 vezes nas páginas 15, 37, 38, 39 e 40.

CHOWDHURY, R. et al. A fresh look at practical shunt reactor protection. In: *76th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*. Atlanta, Georgia: [s.n.], 2023. Citado 8 vezes nas páginas 23, 24, 33, 37, 39, 40, 41 e 42.

CIGRE. *Protection, Monitoring and Control of Shunt Reactors*. [S.l.], 2012. Citado 10 vezes nas páginas 13, 15, 19, 21, 23, 28, 29, 30, 32 e 33.

DAS, S. et al. A novel method for turn to turn fault detection in shunt reactors. In: *2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. College Station, TX, USA: [s.n.], 2017. p. 1–9. Citado na página 35.

DEGENEFF, R. C.; GUTIERREZ, M. R. A method for constructing a reduced order transformer model for system studies from detailed lumped parameter models. *Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, p. 532–538, 1991. Citado na página 49.

DOBZYŃSKI, K. et al. Neutral earthing reactor protection. In: *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado na página 14.

DOPPLMAIR, P.; VENEDIGER, P.; POINTNER, K. Evaluation and implementation of hv dry-type shunt reactors into a 420kv transmission grid. 2022. Citado na página 27.

FLEMING, B. Negative-sequence impedance directional element. *10th Annual ProTest User Group Meeting*, 1998. Citado na página 41.

FUCHS, D. R. *Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. [S.l.], 1979. Citado na página 20.

GAJIC, Z.; HILLSTROM, B.; MEKIC, F. *HV Shunt Reactor Secrets for Protection Engineers*. [S.l.], 2003. Citado na página 28.

Gajić, Z.; HILLSTRÖM, B.; KOCKOTT, M. *Application of numerical relays for HV shunt reactor protection*. [S.l.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 14, 25 e 32.

- GONÇALVES, D. N. *Desempenho do Relé de Distância m Linhas de Transmissão Compensadas com TCSC*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Citado na página 46.
- GRILO, L. C. P.; TEIXEIRA, M. V. P. Proposição de ajustes de proteção para detecção de faltas entre espiras em reatores shunt de núcleo de ar. *Seminário técnico de proteção e controle*, 2024. Citado na página 26.
- HARLOW, J. H. *Electric Power Transformer Engineering*. [S.l.], 2003. Citado na página 24.
- HART, D. G.; NOVOSEL, D.; SMITH, R. A. Modified cosine filters. *ABB POWER TD COMPANY INC*, 2000. Citado na página 36.
- IEEE. *IEEE Guide for the Protection of Shunt Reactors - Redline*. [S.l.], 2007. IEEE Std C37.109-2006 (Revision of IEEE Std C37.109-1988) - Redline. Citado na página 14.
- IEEE. *IEEE Guide for the Application of Shunt Reactors Switching*. [S.l.], 2018. IEEE Std C37.015-2017 (Revision of IEEE Std C37.015-2009), p. 1–63. Citado na página 22.
- KASZTENNY, B.; FISCHER, N.; ALTUVE, H. J. *Negative-Sequence Differential Protection - Principles, Sensitivity, and Security*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 15, 40 e 42.
- KASZTENNY, B.; THOMPSON, M.; FISCHER, N. Fundamentals of short-circuit protection for transformers. *63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2010. Citado na página 16.
- KEZUNOVIC, M.; GUO, Y. Modeling and simulation of the power transformer faults and related protective relay behavior. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 1, p. 44–50, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 51.
- LIMA, P. S. Desafios e soluções para detecção de faltas entre espiras em reatores shunt. *Seminário técnico de proteção e controle*, 2024. Citado na página 26.
- MME. *Ata da 102ª Reunião (Extraordinária)*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2011. Acesso em: 20 abril 2024. Citado na página 14.
- MOHAMMAD, A. I. et al. Turn-to-turn fault protection for dry-type shunt reactors. In: *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. Denver, CO, USA: [s.n.], 2018. p. 1–5. Citado na página 35.
- MONTEIRO, A. M. *Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito com Ênfase no IPC (Interphase Power Controller)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Citado na página 18.
- NASHAWATI, E. et al. Impacts of shunt reactors on transmission line protection. In: *38th Annual Western Protective Relay Conference*. Schweitzer Engineering Laboratories: [s.n.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 48.
- ONS. *Relatório de Análise de Perturbações*. Rio de Janeiro, Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2009. Acesso em: 18 nov 2023. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 19.

ONS. *Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos*. Rio de Janeiro, Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2011. Acesso em: 18 nov 2023. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 19.

ONS. *Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção*. Rio de Janeiro, Brasil: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2024. Acesso em: 02 jul 2024. Citado na página 32.

PAITHANKAR, Y. G.; Bhide, S. *Fundamentals of power system protection*. [S.l.], 2011. Citado na página 43.

PAPP, K.; SHARP, M. R.; PEELLO, D. F. High voltage dry-type air-core shunt reactors. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

QI, L. et al. Interturn fault detection algorithm for shunt reactors based on leakage magnetic field. In: *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 2303–2307. Citado na página 35.

RIBEIRO, J. A. R. *Modelagem e Proteção de Reatores Shunt do Tipo Seco com Núcleo a Ar*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2020. Citado 14 vezes nas páginas 13, 16, 20, 21, 22, 24, 29, 30, 33, 35, 49, 50, 51 e 52.

ROSA, A. C. C. F. *HV SHUNT REACTORS: an overall comparative analysis between dry-type air core and oil-immersed iron core technologies*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2021. Citado na página 26.

SANTOS, G. G. dos. *Proteção Diferencial Baseada nas Correntes de Sequência Zero e de Neutro para Reatores Shunt com Núcleo de Ar Tipo Seco*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 18, 21 e 33.

SILVA, J. C. M. da. *Avaliação da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão de Circuito Duplo com Estudo de Caso*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 15, 45 e 46.

SILVA, K.; ALMEIDA, M. Positive sequence voltage memory filter for numerical digital relaying applications. *Electronics Letters*, v. 51, n. 21, p. 1697–1699, 2015. ISSN 0013-5194. Citado na página 45.

SILVA, K.; ALMEIDA, M. Filtro de memória de tensão de sequência positiva para uso em relés numéricos microprocessados. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2016. ISSN 2177-6164. Citado na página 46.

SILVA, K. M.; KÜSEL, B. F. On combining wavelet-based designed filters and an adaptive mimic filter for phasor estimation in digital relaying. *Electric Power Systems Research*, v. 92, p. 60–72, 2012. Citado na página 36.

STEVENSON, W. D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. 2. ed. Rio de Janeiro, Brasil: McGraw-Hill, 1975. Acesso em: 18 nov 2023. Citado na página 20.

URIONDO, F. et al. Improving HV shunt reactors ref relaying. In: *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 35.

YUE H.AND XU, Y. et al. Study of nonlinear model of shunt reactor in 1000kv ac transmission system. In: *2009 Internacional Conference on Energy and Environment Technology*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 28.