



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

GUILHERME GOMES DOS SANTOS

**Proteção Diferencial baseada nas Correntes de Sequência Zero  
e de Neutro para Reatores *Shunt* com Núcleo de ar tipo seco**

GOIÂNIA  
2021



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

#### **2. Nome completo do autor**

Guilherme Gomes dos Santos

#### **3. Título do trabalho**

PROTEÇÃO DIFERENCIAL BASEADA NAS CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO E DE NEUTRO PARA REATORES SHUNT COM NÚCLEO DE AR TIPO SECO

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

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

**[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 11/08/2021, às 20:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **GUILHERME GOMES DOS SANTOS, Discente**, em 12/08/2021, às 09:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



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](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2273769** e o código CRC **FE2F2DA2**.

---

GUILHERME GOMES DOS SANTOS

## Proteção Diferencial baseada nas Correntes de Sequência Zero e de Neutro para Reatores *Shunt* com Núcleo de ar tipo seco

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de concentração: Engenharia Elétrica.

Linha de pesquisa: Sistemas Eletroeletrônicos.

Orientadora: Professora Doutora Maria Leonor Silva de Almeida

GOIÂNIA

2021

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

Santos, Guilherme Gomes dos  
PROTEÇÃO DIFERENCIAL BASEADA NAS CORRENTES DE  
SEQUÊNCIA ZERO E DE NEUTRO PARA REATORES SHUNT COM  
NÚCLEO DE AR TIPO SECO [manuscrito] / Guilherme Gomes dos  
Santos. - 2021.  
90 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. 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,  
2021.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Reator Shunt. 2. Corrente de sequência zero. 3. Corrente de  
neutro. 4. Proteção diferencial. 5. faltas entre espira e espira terra. I.  
Almeida, Maria Leonor Silva de, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **05/2021** da sessão de Defesa de Dissertação de **Guilherme Gomes dos Santos**, que confere o título de Mestre em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica**.

Aos **trinta dias do mês de junho de dois mil e vinte e um**, a partir das **14h00min.**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Avaliação da Proteção Diferencial de Sequência Zero e Neutro para Reatores Shunt com Núcleo de ar do Tipo Seco**”. 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 **Lina Paola Garcés Negrete (EMC/UFG)**, membro titular interno; Professor Doutor **Kleber Melo e Silva (Ene/FT/UnB)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **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 **trinta dias do mês de junho de dois mil e vinte e um**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

PROTEÇÃO DIFERENCIAL BASEADA NAS CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO E DE NEUTRO PARA REATORES SHUNT COM NÚCLEO DE AR TIPO SECO



Documento assinado eletronicamente por **Maria Leonor Silva De Almeida, Professora do Magistério Superior**, em 30/06/2021, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lina Paola Garcés Negrete, Professora do Magistério Superior**, em 30/06/2021, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Melo e Silva, Usuário Externo**, em 30/06/2021, às 16:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **GUILHERME GOMES DOS SANTOS, Discente**, em 30/06/2021, às 17:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



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](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2166293** e o código CRC **204E5DDC**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.032719/2021-14

SEI nº 2166293

*Este trabalho é dedicado a todos da minha família,  
que sempre estimularam os meus sonhos.*



# Agradecimentos

Inicialmente agradeço a Deus por sempre ter me dado forças para continuar, mesmo quando as condições não eram favoráveis. Sou grato pela caminhada de fé e aprendizado que Ele me fez passar, me ensinando a cada dia ser mais humano.

Agradeço a minha família, o qual sempre me deu apoio e me fez acreditar que a educação é a principal arma que temos para alcançar os nossos sonhos. Agradeço a minha mãe, que mesmo com a perda do meu pai, conseguiu criar eu e minha irmã com o melhor que ela poderia nos oferecer. Dedico também a minha namorada que me apoiou no momento mais difícil dessa dissertação, e conseguiu compreender o que se passava.

Agradeço em especial a minha orientadora, Maria Leonor, por toda a dedicação e amizade. Além de grande educadora, conseguia dar os melhores conselhos e me fazer acreditar em mim.

Não poderia me esquecer dos meus amigos de caminhada (optarei por não citá-los por medo de esquecer algum) saibam que nada disso seria possível sem o apoio e a cumplicidade que cada um de vocês tiveram comigo.

À Universidade Federal de Goiás (UFG) a minha mais sincera gratidão por tudo que nos é proporcionado. Acredito que sem o trabalho dessa Universidade grandes avanços em nosso Estado não seriam possíveis e espero que isso seja notado pela nossa sociedade.

“*Definir é limitar.*”  
(*Oscar Wilde, 1890*)

# Resumo

O crescente aumento no número de linhas de transmissão longas, com níveis de tensão elevados, torna necessária a conexão em paralelo de reatores *shunt* nas linhas, como forma de contornar as consequências da sobretensão, decorrentes do efeito capacitivo das linhas. O emprego de reatores *shunt* viabiliza a regulação de tensão, por meio da absorção do excesso de reativos capacitivos na linha. Diante da importância dos reatores *shunt* para uma correta operação das linhas de transmissão longas, é essencial garantir lógicas de proteção que possibilitem a rápida identificação de curtos-circuitos internos a esse equipamento. Assim, a presente dissertação apresenta um algoritmo de proteção diferencial baseado nas análises das correntes de sequência zero e de neutro, o qual identifica condições anormais de operação no reator *shunt* e, com isso, permite uma operação segura e seletiva da proteção para curtos-circuitos do tipo espira terra e entre espiras. Essa lógica é fundamentada na comparação da corrente de sequência zero, calculada com base nas correntes de fase, medidas próximas à bucha, com a corrente medida no enrolamento do neutro. Os fasores de corrente de sequência zero e o de neutro do reator são reconstruídos no tempo e, por fim, são comparados, possibilitando a identificação do curto-circuito interno ao reator. Além disso, o algoritmo incorpora uma função que detecta a ocorrência de distúrbios de natureza interna ou externa ao reator. As simulações foram realizadas por meio do *software Alternative Transient Program* (ATP), no qual modelou-se uma linha de transmissão de 230 kV, 380 km com 50% de compensação *shunt*, tal que, no reator foram aplicados diferentes curtos-circuitos internos, dos tipos espira-terra e entre espiras. Além disso, a fim de realizar uma avaliação comparativa, o algoritmo proposto foi analisado juntamente com a proteção diferencial tradicional restrita à terra *Restricted Earth Fault* (REF), que utiliza os mesmos sinais de entrada. Dos resultados obtidos, verificou-se que a proteção tradicional não operou para os curtos-circuitos espiras terra com resistência de falta elevada, além de não ter sido capaz de identificar nenhuma das faltas analisadas do tipo entre espiras. Contrariamente, constatou-se que o algoritmo proposto opera corretamente para todas as faltas espira terra e entre espiras testadas, independentemente das variações do valor do fator de dispersão, da quantidade de espiras envolvidas e do valor da resistência de falta. Destaca-se ainda a rapidez na atuação da proteção do algoritmo proposto, o qual identificou todas as faltas analisadas com tempo aproximado de atuação de 1 ms após a sua ocorrência. Ressalta-se que, para garantir a correta atuação da proteção proposta para todos os curtos-circuitos externos, é necessário a utilização de uma lógica adicional para garantir a não atuação para faltas externas.

**Palavras-chave:** Reator *shunt*; corrente de sequência zero; corrente de neutro; proteção diferencial; faltas entre espiras e falta espira terra.

# Abstract

The growing increase in the number of long transmission lines, with high voltage levels, makes necessary the connection of parallel *shunt* reactors in the lines, as a way to circumvent the consequences of overvoltage, due to the capacitive effect of the lines. The use of shunt reactors enables voltage regulation, by absorbing the excess of capacitive reactive in the line. Considering the important role of shunt reactors for the correct operation of long transmission lines, it is essential to guarantee protection logics that allow the quick identification of short circuits inside this equipment. Therefore, this work presents a differential protection algorithm based on the analysis of zero and neutral sequence currents, which identifies abnormal operating conditions in the shunt reactor and, consequently, allows a safe and selective operation of the protection for turn-to-ground and turn-to-turn faults. This logic is based on the comparison of the zero sequence current, calculated on the basis of the phase currents, measured near the bushing, with the current measured in the neutral winding. The zero sequence and neutral current phases of the reactor are reconstructed in time and, finally, are compared, allowing the identification of the short circuit within the reactor. In addition, the algorithm incorporates a function that detects the occurrence of disturbances of an internal or external nature to the reactor. Simulations were performed using the *software Alternative Transient Program (ATP)*, in which a 230 kV, 380 km transmission line with 50 % of compensation was modeled, such that, in the reactor, different internal short circuits were applied, of the turn-to-ground and turn-to-turn faults. Furthermore, in order to perform a comparative evaluation, the proposed algorithm was analyzed together with the traditional differential protection *Restricted Earth Fault-(REF)*, which uses the same input signals. From the results obtained, it was found that the traditional protection did not operate for turn-to-ground with high fault resistance, and was also not able to identify any of the analyzed turn-to-turn faults. On the contrary, it was verified that the proposed algorithm operates correctly for all the turn-to-ground and turn-to-turn faults tested, independently of the variations in the value of the dispersion factor, the number of turns involved and the value of the fault resistance. Furthermore, it is worth to mention the fast speed operation of the proposed protection. Also noteworthy was the speed in which the proposed algorithm, which identified all the faults analyzed with an approximate operation time order of 1 ms after their occurrence. It should be noted that in order to guarantee the correct performance of the proposed protection for all external short circuits, it is necessary to use additional logic to guarantee non-reaction for external faults.

**Keywords:** Reactor Shunt; zero sequence; neutral current; differential protection; turn-to-turn faults and ground-turn faults.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa de Transmissão do SIN - Horizonte 2024 . . . . .	24
Figura 2.1 – Modelo Linha de Transmissão. . . . .	31
Figura 2.2 – Tipos de Conexão . . . . .	32
2.2a Lado da bucha. . . . .	32
2.2b Lado do neutro. . . . .	32
Figura 2.3 – Aplicação de Reatores <i>Shunt</i> ao SEP. . . . .	33
Figura 2.4 – Reator <i>Shunt</i> tipo seco de 765 kV. . . . .	35
Figura 2.5 – Reator <i>Shunt</i> imerso a óleo de 765 kV. . . . .	36
Figura 2.6 – Modelo de Reator <i>Shunt</i> monofásico. . . . .	37
Figura 2.7 – Circuito equivalente Reator <i>Shunt</i> . . . . .	37
Figura 2.8 – Característica de magnetização dos reatores <i>shunt</i> com núcleo de ferro e a ar. . . . .	38
Figura 2.9 – Energização de Reator <i>Shunt</i> . . . . .	40
Figura 2.10 – Tipos de faltas em um reator <i>shunt</i> . . . . .	41
Figura 2.11 – Proteção Diferencial - Falta Externa . . . . .	45
Figura 2.12 – Proteção Diferencial - Falta Interna . . . . .	45
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do algoritmo usado. . . . .	56
Figura 4.2 – Reconstrução no tempo das correntes de sequência zero e neutro. . . . .	58
4.2a Lado da bucha. . . . .	58
4.2b Lado do neutro. . . . .	58
Figura 4.3 – Correntes de sequência zero reconstruídas para: . . . . .	59
4.3a falta interna. . . . .	59
4.3b falta externa. . . . .	59
Figura 4.4 – Reconstrução no tempo das componentes harmônicas de segunda e quinta ordens. . . . .	62
Figura 4.5 – Comportamento das correntes de operação e restrição calculadas para: . . . . .	63
4.5a falta interna; . . . . .	63
4.5b falta externa. . . . .	63
Figura 4.6 – Correntes de restrição, compensada e restrição harmônica ( $R_h$ ). . . . .	64
Figura 4.7 – Comportamento da corrente em: . . . . .	65
4.7a condições nominais . . . . .	65
4.7b falta externa. . . . .	65
Figura 4.8 – Comportamento da corrente em: . . . . .	66
4.8a falta entre-espiras. . . . .	66
4.8b falta espira-terra. . . . .	66
Figura 4.9 – Avaliação da lógica de <i>trip</i> . . . . .	67

Figura 5.1 – Modelo simplificado do sistema elétrico analisado. . . . .	70
Figura 5.2 – Modelo simplificado do Reator <i>Shunt</i> analisado. . . . .	70
Figura 5.3 – Tipos de Curto-Circuito . . . . .	71
5.3a Espira-terra. . . . .	71
5.3b Entre-espiras. . . . .	71
Figura 5.4 – Desempenho falta espira-terra para o caso 1 . . . . .	73
5.4a 87R0 para Caso 1; . . . . .	73
5.4b REF para Caso 1; . . . . .	73
Figura 5.5 – Desempenho falta espira-terra para o caso 2: . . . . .	73
5.5a 87R0 para Caso 2; . . . . .	73
5.5b REF para Caso 2. . . . .	73
Figura 5.6 – Desempenho falta espira-terra para o caso 3: . . . . .	74
5.6a 87R0; . . . . .	74
5.6b REF. . . . .	74
Figura 5.7 – Desempenho falta espira-terra para o caso 4: . . . . .	75
5.7a 87R0; . . . . .	75
5.7b REF. . . . .	75
Figura 5.8 – Desempenho falta espira-terra para o caso 5: . . . . .	75
5.8a 87R0; . . . . .	75
5.8b REF. . . . .	75
Figura 5.9 – Desempenho falta espira-terra para o caso 6: . . . . .	76
5.9a 87R0; . . . . .	76
5.9b REF. . . . .	76
Figura 5.10–Desempenho falta espira-terra para o caso 7: . . . . .	77
5.10a 87R0; . . . . .	77
5.10b REF. . . . .	77
Figura 5.11–Desempenho falta espira-terra para o caso 8: . . . . .	77
5.11a 87R0; . . . . .	77
5.11b REF. . . . .	77
Figura 5.12–Desempenho falta entre-espiras para o caso 9: . . . . .	78
5.12a 87R0; . . . . .	78
5.12b REF. . . . .	78
Figura 5.13–Desempenho falta entre-espiras para o caso 10: . . . . .	78
5.13a 87R0; . . . . .	78
5.13b REF. . . . .	78
Figura 5.14–Desempenho falta entre-espiras para o caso 11: . . . . .	79
5.14a 87R0; . . . . .	79
5.14b REF. . . . .	79
Figura 5.15–Desempenho falta entre-espiras para o caso 12: . . . . .	79

5.15a	87R0;	79
5.15b	REF.	79
Figura 5.16	Desempenho falta entre-espiras para o caso 13:	80
5.16a	87R0;	80
5.16b	REF.	80
Figura 5.17	Desempenho falta entre-espiras para o caso 14:	80
5.17a	87R0;	80
5.17b	REF.	80
Figura 5.18	Desempenho falta entre-espiras para o caso 15:	81
5.18a	87R0;	81
5.18b	REF.	81
Figura 5.19	Desempenho falta entre-espiras para o caso 16:	82
5.19a	87R0;	82
5.19b	REF.	82
Figura 5.20	Desempenho para curtos-circuitos externos:	83
5.20a	Trifásico;	83
5.20b	Monofásico;	83
5.20c	TC Saturado;	83

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Limites de Tensão segundo ONS . . . . .	30
Tabela 2.2 – Proteções tradicionais para reatores <i>shunt</i> . . . . .	43
Tabela 5.1 – Curtos-circuitos espira-terra e suas características. . . . .	72
Tabela 5.2 – Curtos-circuitos entre espiras e suas características. . . . .	72
Tabela 5.3 – Relação de eficiência da proteção ao tipo de falta. . . . .	84

# Lista de abreviaturas e siglas

SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
ATPDraw	Interface gráfica do ATP
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
SBSE	Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>
SE	Subestação
EPE	Empresa de Pesquisa de Energética
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
LT	Linha de Transmissão
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
RTC	Relação de transformação do transformador de corrente
REF	<i>Restricted Earth Fault</i>
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>

CCAT	Corrente contínua de alta tensão
SVC	Var estático compensação
MCSR	Microprocessamento em reator <i>shunt</i> controlado magneticamente
CHESF	Companhia Elétrica do São Francisco
ATM	Análise Transitória de Manobras
ATC	Análise Transitória de Curto-circuito
ASP	Análise de Sensibilidade Paramétrica
RZS	Força das fontes

# Lista de símbolos

$a$	Operador complexo $1\angle 120^\circ$
$FDD$	<i>Flag</i> que indica a detecção de um distúrbio.
$FDE$	<i>Flag</i> que indica a detecção de distúrbio externo.
$h$	$h$ -ésima ordem harmônica do sinal.
$V_s$	Tensão medida pelo TP
$I_s$	Corrente medida pelo TC
$Z_{linha}$	Impedância de ajuste do relé de distância
$Z_{AB}$	Unidade de impedância fases A e B
$Z_{BC}$	Unidade de impedância fases B e C
$Z_{CA}$	Unidade de impedância fases C e A
$\hat{V}_a$	Tensão da fase A
$\hat{V}_b$	Tensão da fase B
$\hat{V}_c$	Tensão da fase C
$\hat{I}_a$	Corrente da fase A
$\hat{I}_b$	Corrente da fase B
$\hat{I}_c$	Corrente da fase C
$\hat{I}_0$	Corrente de sequência zero

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	Motivação	26
1.2	Objetivos	26
1.3	Organização do texto	27
1.4	Publicações	27
<b>2</b>	<b>REATOR <i>SHUNT</i></b>	<b>29</b>
2.1	Aplicação de Reatores <i>Shunt</i> para Controle de Tensão	30
2.2	Características dos Reatores <i>Shunt</i>	32
2.2.1	Conexão de Reatores <i>Shunt</i>	32
2.2.2	Características Construtivas	34
2.2.3	Características e Condições Adversas de Operação	37
2.3	Proteções aplicadas aos reatores <i>shunt</i>	42
2.3.1	Proteção diferencial em reatores <i>shunt</i>	44
2.3.2	Proteção de falta restrita à terra em reatores <i>shunt</i>	46
<b>3</b>	<b>REVISÃO DO ESTADO DA ARTE</b>	<b>47</b>
3.1	Estado da Arte sobre Proteção de Reatores <i>Shunt</i>	47
3.2	Síntese da Revisão Bibliográfica	54
<b>4</b>	<b>ALGORITMO ADAPTADO</b>	<b>55</b>
4.1	Normalização dos Sinais	55
4.2	Estimação de Fasores	55
4.3	Cálculo da Corrente de Sequência Zero e Análise da Corrente de Neutro	57
4.4	Reconstrução dos sinais de corrente	57
4.5	Detecção de Distúrbio	60
4.6	Restrição Harmônica	61
4.7	Correntes de Operação, Restrição e Compensada	62
4.8	Razão Integrada	64
4.9	Lógica de <i>TRIP</i>	65
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>69</b>
5.1	Sistema Analisado	69
5.2	Análise dos resultados	71
5.2.1	Curtos-circuitos Espira-Terra	72

5.2.2	Curtos-circuitos Entre-Espiras . . . . .	76
5.2.3	Curtos-circuitos Externos . . . . .	81
<b>5.3</b>	<b>Discussão dos resultados</b> . . . . .	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>87</b>



# 1 Introdução

O desenvolvimento tecnológico associado ao crescimento demográfico mundial propiciaram o aumento nas atividades setoriais da indústria, do comércio e dos serviços. Essa expansão dos centros consumidores de energia elétrica causou uma elevação da demanda energética. A fim de prover a demanda elétrica que os novos setores necessitavam, fez-se necessária a construção de linhas de transmissão com dimensões cada vez maiores.

No Brasil o uso de Linhas de Transmissão (LT) aéreas longas tornou-se estratégico para o Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual possibilitou a transmissão de energia dos geradores de energia elétrica para as unidades consumidoras, localizadas distantes fisicamente. Entretanto, as linhas longas, usualmente de alta e extra-alta tensão, possuem um acoplamento capacitivo elevado entre as fases e entre fases e solo, ocasionando um significativo aumento de tensão nas linhas em duas situações cruciais: quando acontece rejeição de carga (chaveamento) e quando o carregamento do sistema é leve - correspondente à baixa demanda pelos consumidores.

Com interesse de evitar situações de sobretensão nas LT longas, acima de 250 km, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) definiu uma faixa que limita a tensão para cada nível de operação. Por exemplo, para uma LT de 230 kV, não poderá ser excedida a tensão de 242 kV (1,05 p.u.). Para enquadrar em tais limites operativos e diminuir os efeitos de sobretensão, usam-se bancos de reatores para efetuar a regulação. A utilização de bancos de reatores em série ou em paralelo (*shunt*) surge então como forma de minimizar os inconvenientes associados ao uso de LTs cada vez mais longas. Os bancos de reatores, quando instalados em paralelo, irão regular a tensão da linha por meio da absorção do excesso de reativos. No entanto, quando os reatores são instalados em série na linha, eles contribuem para a limitação da corrente de curto-circuito na mesma, visto que a impedância série equivalente dessa combinação é maior (NASHAWATI et al., 2013).

Geralmente, em sistemas com tensão superior ou igual a 230 kV utilizam-se reatores com núcleo de ferro e imersos em óleo. Os reatores do tipo seco com núcleo de ar são tradicionalmente instalados em tensões de até 69 kV e, majoritariamente, em tensões típicas de distribuição (limitada até 34,5 kV). Ressalta-se que o avanço tecnológico de materiais propiciou a elaboração de reatores com núcleo de ar que podem ser instalados em tensões de até 345 kV. O fato de não apresentar óleo nem núcleo de ferro, faz com que a operação do reator do tipo seco com núcleo de ar resulte em menores perdas, maior facilidade de instalação e menor necessidade de manutenção.

Atualmente, existem no SIN, cerca de 41 reatores *shunt* em operação. Todavia, com base no horizonte previsto para 2024, verifica-se um aumento no número de LTs, conforme a

Figura 1 e, conseqüentemente, a necessidade de instalação de reatores *shunt* para contornar os problemas de sobretensão nas LTs. Estima-se a instalação de, aproximadamente, 297 reatores até 2024 (ONS, 2020). Com o uso significativo de reatores *shunt* no SIN, é de suma importância a aplicação de sistemas de proteção sofisticados para permitir a pronta identificação de condições anormais de operação desses equipamentos ou mesmo evitar operações indevidas da proteção. Também, torna-se essencial garantir adequação dos ajustes de proteção do reator para possibilitar à rápida identificação de curtos-circuitos internos no reator.

Figura 1 – Mapa de Transmissão do SIN - Horizonte 2024



Fonte: (ONS, 2020).

Dentre as faltas internas ao reator, existem aquelas do tipo entre espiras, que resultam em pequenas alterações nas magnitudes de corrente, tal que, a depender da quantidade de espiras envolvidas, essas faltas não sensibilizam os relés tradicionais de

proteção. Contudo, para faltas internas, a proteção do reator *shunt* deve ser capaz de realizar a identificação das condições anormais de operação, mesmo que estejam associadas a pequenas alterações no funcionamento. A identificação de condições anormais é importante, pois em um intervalo maior de tempo, o prolongamento do curto-circuito interno pode resultar em um superaquecimento e, conseqüentemente, perdas consideráveis para integridade física do equipamento. Ademais, os curtos-circuitos internos ao reator podem evoluir e causar prejuízos ainda maiores ao sistema, (Li Yongli et al., 2004).

Comumente se adota uma filosofia para proteção de reatores *shunt* composta de funções diferenciais, sobrecorrente de fase, residuais e de neutro, sub/sobretensão direcional de sequência zero (GAJIC et al., 2003). Além disso, a proteção é complementada por dispositivos mecânicos, tais como relé de pressão de gás (i.e. Buchholz), relé de alívio de pressão e alta temperatura dos enrolamentos e do óleo (IEEE, 2007).

Para os ajustes da proteção, é indispensável uma avaliação das condições operativas normais e anormais do reator *shunt*, principalmente, porque algumas manobras com reatores são feitas diversas vezes durante o dia para o controle de tensão do sistema. Embora o emprego da proteção diferencial em reatores tenha resultado em efeitos positivos para o sistema, os relés diferenciais de mercado são concebidos tendo como foco principal a aplicação em transformadores e/ou máquinas síncronas, os quais apresentam anomalias diferentes dos apresentados pelos reatores, (ALVES, 2011).

Nesse contexto, observa-se no SIN um número elevado de desligamento de reatores *shunt* por atuações incorretas de suas proteções. Exemplo disso, ocorrido em novembro de 2009, foi a atuação da proteção diferencial de sobrecorrente residual de reator *shunt* da LT 765 kV Itaberá - Ivaporã C3, em Ivaporã, resultado de três curtos-circuitos monofásicos sequenciais, com uma interrupção de 24.436 MW (ONS, 2009).

Em 2017, a LT que interliga Campo Grande 2 e Chapadão, apresentou um desligamento automático, devido um curto-circuito bifásico a terra na linha decorrente de uma descarga atmosférica. A falta foi eliminada em 68 ms, porém houve a atuação incorreta da proteção diferencial de terra do reator *shunt* conectado à LT, que resultou no bloqueio do esquema de religamento tripolar da linha (ANEEL, 2018).

Diante da relevância do reator *shunt* para o controle dos níveis de tensão pelo ONS, verifica-se a necessidade de esquemas de proteção eficientes, e que sejam capazes identificar não somente curtos-circuitos internos, mas também diferenciar quando o curto-circuito é de natureza externa ao equipamento. Por isso, neste trabalho, é apresentado uma proposta de proteção diferencial baseada na corrente de sequência zero e na corrente de neutro para reatores *shunt*, o qual identifica condições anormais de operação no reator e, com isso, permite uma operação segura e seletiva da proteção para curtos-circuitos do tipo espira terra e entre espiras.

## 1.1 Motivação

Atualmente a função diferencial tem sido empregada majoritariamente na proteção primária para transformadores com potência acima 10 MVA (PAITHANKAR; BHIDE, ). A função diferencial possibilita a análise segregada das correntes nas três fases do sistema, tal que permite uma operação segura e seletiva para curtos-circuitos dentro da região protegida. Dentre as proteções tradicionalmente empregadas nos reatores *shunt*, citam-se as proteções diferenciais de fase (87P) e a função diferencial restrita à terra (*Restricted Earth Fault-REF*), além da proteção da sobrecorrente (50/51). Contudo, essas proteções apresentam desempenho ineficiente na identificação de curtos-circuitos próximos ao neutro do reator ou para detectar faltas entre espiras (Kasztenny et al., 2010).

Ademais para a aplicação da proteção diferencial de fase, faz-se necessário a instalação de um Transformador de Corrente (TC) instalado por fase no lado do neutro, o que encarece a instalação. Como as proteções existentes não atuam para todos os casos de curtos-circuitos, e com isso, não oferecem total segurança em sua operação para reatores *shunt*, verificou-se a necessidade de investigação de novas soluções, as quais possibilitem a garantia da proteção do reator *shunt*, inclusive em situações de curtos-circuitos, nos quais a proteção tradicional não é capaz de identificar, como em faltas entre espiras.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é verificar a atuação da proteção diferencial proposta, baseada em correntes de sequência zero e de neutro, frente ao método tradicionalmente empregado, REF, o qual se baseia nessas mesmas correntes. A proteção proposta utiliza, de forma adaptada, a lógica da proteção diferencial proposta por Peres (2019), tal que são comparadas a corrente de sequência zero, calculada com base nas correntes de fase, medidas próximo à bucha, com a corrente medida no enrolamento do neutro. Para isso, foi usado o modelo de reator *shunt* proposto por Ribeiro (2020), a fim de verificar o comportamento desse equipamento em condições normais de operação e também para variados tipos de curtos-circuitos internos e externos. Essa nova proposta é inovadora, pois além de reduzir o número de TCs no equipamento, promove uma análise das correntes no tempo diminuindo ainda mais o tempo de atuação do disjuntor.

Nesse contexto, são definidos como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre as principais características operativas dos reatores *shunt* e sobre os fundamentos das principais proteções utilizadas nesses equipamentos;
- Implementar uma adaptação do algoritmo proposto por Peres (2019) e verificar seu desempenho para proteção de um reator do tipo seco com núcleo de ar conectado a

uma linha de 230 kV com 50% de compensação *shunt*. Ressalta-se que esse sistema de transmissão foi modelado no *software* ATP;

- Verificar e comparar a atuação da proteção diferencial tradicional e a proteção proposta para casos de curtos-circuitos internos e externos; e
- Apresentar as conclusões a respeito dos resultados obtidos com as simulações computacionais.

### 1.3 Organização do texto

Esta dissertação de mestrado está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, são descritos os principais aspectos construtivos dos reatores *shunt*, além de suas características operativas. Também são apresentados, no Capítulo 2, os conceitos relacionados às principais proteções tradicionalmente empregadas nos reatores, sejam elas proteções elétricas ou proteções intrínsecas.
- No Capítulo 3, descreve-se o estado da arte sobre as principais filosofias de proteção empregadas nos reatores *shunt*, investigando a aplicação de métodos baseados em elementos de sequência.
- No Capítulo 4, é apresentado o algoritmo proposto para a proteção do reator *shunt* seco com núcleo de ar. Para tanto, nesse capítulo, são detalhadas as adaptações necessárias para a utilização da lógica descrita por [Peres \(2019\)](#) nos reatores *shunt*.
- No Capítulo 5, são descritas as características do sistema analisado. Apresentam-se os ajustes das proteções tradicionalmente empregadas e da proteção proposta, os casos de curtos-circuitos simulados e os resultados obtidos e suas análises. Realiza-se também uma avaliação comparativa entre a proteção diferencial proposta e a REF normalmente empregada no reator *shunt*.
- Por fim, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e enumeram-se as propostas para trabalhos futuros.

### 1.4 Publicações

No que concerne à divulgação dos resultados obtidos nessa dissertação foram realizadas às seguintes publicações:

- Ribeiro, J. A. R., Almeida, M. L., Santos, G. G. Uma Modelagem Alternativa de Reatores Shunt para Aplicação de Faltas Internas, VIII SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2020

- Almeida, M. L., Peres, L. M., Santos, G. G. *Air-core Dry-type Shunt Reactor Protection Based on an Alternative Current Alpha-Plane*, IET *Generation, Transmission & Distribution*, 2020.

## 2 Reator *Shunt*

As tensões operativas de transmissão devem ser mantidas em uma faixa de limite de operação estabelecida pelo ONS, não devendo oscilar fora desses limites. Esses limites operativos tem como objetivo evitar sobretensões no sistema suficientes para provocar curtos-circuitos ou danificar equipamentos, quanto para manter a qualidade de transmissão de energia elétrica. Os reatores *shunt* são utilizados para mitigar o efeito capacitivo das longas linhas de transmissão e, assim, regular a tensão nas barras do sistema e melhorar a qualidade da energia elétrica transmitida (ONS, 2011).

O controle dos níveis de tensão em um sistema elétrico é realizado por meio do controle da geração e da absorção do fluxo de potência reativa. Assim, os reatores *shunt* tem como função absorver potência reativa do sistema, enquanto que capacitores *shunt* e os cabos condutores das linhas de transmissão geram potência reativa. Também é possível controlar os níveis de tensão do sistema ajustando a excitação das unidades geradoras e dos compensadores síncronos, ou comutando os *tapes* dos transformadores (ALVES, 2011).

Uma situação frequente que ocorre durante a energização da linha de transmissão é o efeito *Ferranti*. Esse efeito é caracterizado pelo aumento da tensão na extremidade aberta da LT em relação à tensão na extremidade conectada ao sistema. O fluxo de corrente capacitiva favorece a ocorrência desse efeito, e uma forma de corrigi-lo é conectando reatores *shunt* ao barramento da subestação, diretamente à linha de transmissão ou ao enrolamento terciário de um transformador de potência (CIGRE, 2012).

Outra aplicação para reatores é a "*shunt*", o qual são conectados em série na linha de transmissão. Nesse caso, eles funcionam como limitadores de corrente de falta, pois diminuem ou até mesmo inibem imediatamente o crescimento da corrente de curto-circuito. Essa estratégia é vantajosa por não ser necessário ajustar novamente as proteções dos equipamentos, quando eles são expostos a um novo nível de curto-circuito. Na situação elucidada, o reator pode ser ligado em série com as linhas de transmissão ou através do seccionamento de um barramento, tal que, durante os transitórios oriundos de curtos-circuitos, o reator reduz as correntes de falta, e com isso, diminui os efeitos eletromecânicos e os efeitos térmicos nos enrolamentos e na LT. Com a redução de estresses mecânicos, os reatores limitadores de corrente proporcionam um aumento da vida útil de equipamentos conectados no sistema (MONTEIRO, 2005).

Os reatores também são usados para extinguir arcos elétricos. Por exemplo, nos sistemas de transmissão são recorrentes curtos-circuitos monofásicos, em que antes da abertura dos disjuntores de fase defeituosa, ocorrem correntes de arco-primário – entre a fase defeituosa e o solo – que correspondem à corrente de falta. Normalmente, adiciona-se

um reator de neutro entre o neutro do reator *shunt* e o terra, com o propósito de minimizar ou anular os efeitos da admitância capacitiva entre as fases. Além disso, esse reator de neutro auxilia no deslocamento de eventuais ressonâncias (DIAS, 2018).

Segundo Alves (2011), o reator de neutro, também chamado de impedância de aterramento, é instalado no neutro de reatores *shunt*, de modo a aumentar a reatância de sequência zero equivalente da LT, na qual o reator está conectado. Com a impedância de sequência zero maior, a magnitude das correntes de curto-circuito monofásico são menores (CIGRE, 2012). Os reatores também são usados para o controle dos níveis de tensão harmônica em sistemas de corrente contínua, além de limitar as correntes de falta. Para esse tipo de aplicação os reatores são tidos como reatores de alisamento (CARLSON, 2002).

Neste Capítulo, são apresentados os conceitos gerais sobre os reatores *shunt* e a proteção diferencial aplicada à reatores.

## 2.1 Aplicação de Reatores *Shunt* para Controle de Tensão

Conforme descrito na Tabela 2.1, as tensões operativas de transmissão devem respeitar uma faixa limite de operação, que depende do nível de tensão da instalação (ONS, 2009). Nessa Tabela 2.1, disposta no submódulo 23.3 do ONS, são descritos os níveis de tensão para condição normal e para condição operativa de emergência. Por exemplo, para tensão de 230 kV, em período de operação normal do sistema, a tensão deve permanecer entre 0,95 pu e 1,05 pu do seu valor nominal. Uma das formas utilizadas para controle do limite superior da tensão é o emprego de reatores *shunt*.

Tabela 2.1 – Limites de Tensão segundo ONS

Tensão Operativa	Condição Operativa Normal		Condição Operativa de Emergência	
	(kV)	(pu)	(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	0,90 a 1,046	690 a 800	0,90 a 1,046

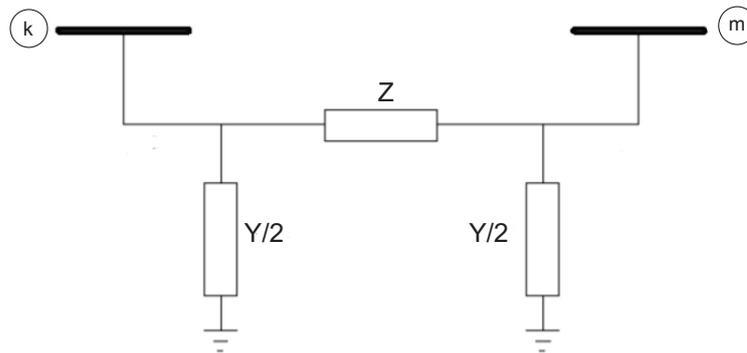
Fonte: (ONS, 2011).

Em função de suas características construtivas, uma linha de transmissão possui capacitâncias distribuídas ao longo de sua extensão, que drenam a chamada corrente capacitiva da linha, responsável pelo efeito *Ferranti* e por interferências prejudiciais ao

desempenho do seu esquema de proteção (ALMEIDA, 2016). Para melhor compreensão desse fenômeno, ilustra-se na Figura 2.1 o modelo  $\pi$  de uma LT. Nesse modelo, transmissor e receptor estão nas extremidades da linha, indicados pelas barras  $k$  e  $m$ , respectivamente.

Em situações como rejeições de carga (chaveamento) ou quando há uma baixa demanda por parte dos consumidores (condições de carga leve), a corrente de carga é inferior à corrente capacitiva drenada pelas susceptâncias (RIBEIRO, 2020). Nesses casos, em que a corrente circula pela susceptância distribuída da própria linha, representadas pela admitância  $Y/2$  na Figura 2.1, é maior do que a corrente associada à carga na extremidade receptora da linha (barra  $m$ ), o campo elétrico receberá a energia excedente e, conseqüentemente, haverá um aumento na potência reativa capacitiva e uma elevação de tensão na linha. Esse fenômeno é denominado de Efeito *Ferranti* (FUCHS, 1979).

Figura 2.1 – Modelo Linha de Transmissão.



Fonte: (STEVENSON, 1975).

O Efeito *Ferranti* é inoportuno devido à necessidade de condutores com secções maiores; à necessidade do aumento do nível de isolamento das linhas; à autoexcitação causada em máquinas síncronas e ao aumento do Efeito Corona (FUCHS, 1979). Assim, para evitar as implicações negativas da utilização de linhas de transmissão longas e de alto efeito capacitivo, utiliza-se reatores *shunt*, os quais reduzem o excesso de potência reativa nos terminais de uma LT de corrente alternada.

Visando controlar a tensão da LT, a compensação em derivação com bancos de reatores indutivos tem como princípio a absorção de energia reativa capacitiva excedente. De acordo com Stevenson (1975), e desprezando a resistência associada a impedância  $Z$  da linha de transmissão, a tensão nos terminais relaciona-se a potência reativa  $Q$ , conforme é apresentado na Equação (2.1):

$$|\hat{V}_m| = \frac{(|\hat{V}_k|)^2 - Q \cdot X_L}{\hat{V}_k \cdot \cos \theta}, \quad (2.1)$$

sendo  $\hat{V}_k$  e  $\hat{V}_m$ , os fasores das tensões nas barras  $k$  e  $m$ , respectivamente,  $X_L$  reatância indutiva e  $\theta$  é a abertura angular da linha entre  $\hat{V}_k$  e  $\hat{V}_m$ .

A Equação (2.1) explicita a dependência da potência transferida da LT quando considerado  $\hat{V}_k$ ,  $\theta$  e  $X_L$  constantes e, a partir disso, avalia-se a relação entre tensão  $\hat{V}_m$  e potência reativa  $Q$ . Da Equação (2.1), verifica-se que o excesso de potência reativa indutiva, que é positiva, contribuirá para a redução no módulo  $\hat{V}_m$ . Contrário a isso, o excesso de potência reativa capacitiva, que é negativa, contribuirá para o aumento no módulo de  $\hat{V}_m$ . Logo, o reator *shunt* absorve a energia reativa capacitiva excedente, contribuindo para o controle do nível de tensão. (STEVENSON, 1975)

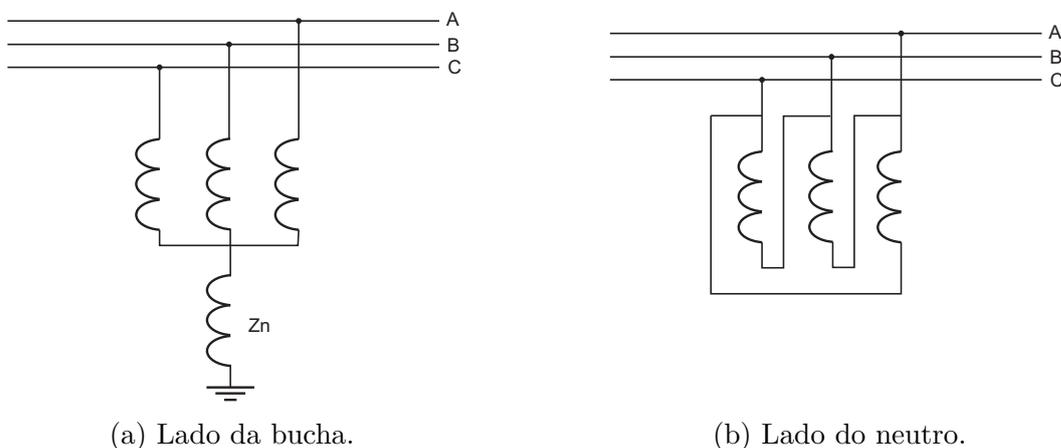
Apesar dos reatores serem mais acessíveis para controle dos níveis de tensão, esse controle também pode ser feito por meio de compensadores síncronos e pela comutação de *tapes* dos transformadores (IEEE, 2018).

## 2.2 Características dos Reatores *Shunt*

### 2.2.1 Conexão de Reatores *Shunt*

Os reatores podem ser conectados em delta ou em estrela. A ligação em estrela é mais comum, pois possibilita que os enrolamentos fiquem submetidos às tensões de fase, requerendo menor isolamento e, conseqüentemente, menor custo. Nas conexões internas dos reatores, os enrolamentos de cada fase podem ser construídos separadamente, em unidades monofásicas, as quais são conectadas em um arranjo trifásico estrela ou delta, conforme ilustrado nas Figuras 2.2a e 2.2b, respectivamente. As unidades monofásicas, construídas para conexão trifásica, reduzem a possibilidade de ocorrências de faltas entre as fases. Assim, esse tipo de configuração é menos onerosa, além de apresentar vantagens físicas durante a instalação (CIGRE, 2012).

Figura 2.2 – Tipos de Conexão



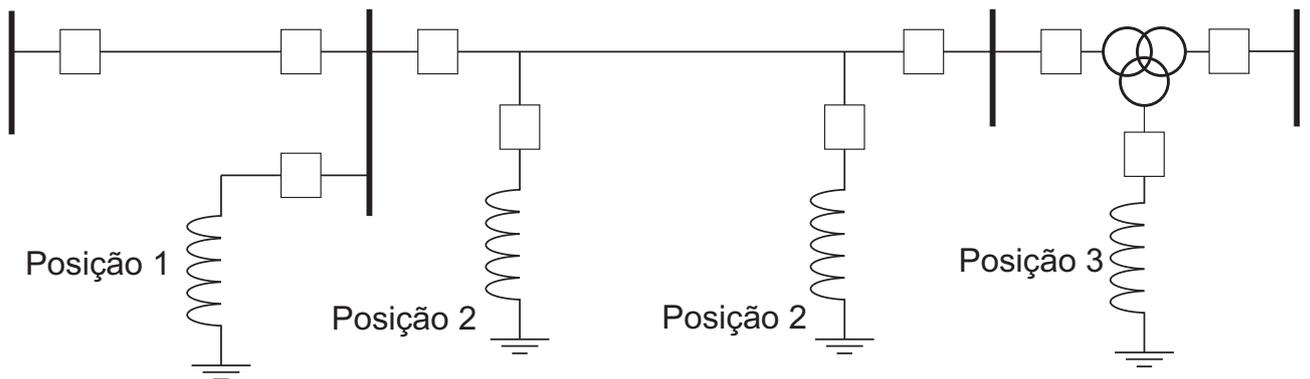
Fonte: (RIBEIRO, 2020).

Os reatores, quando ligados em estrela, podem ser solidamente aterrados ou aterrados por uma impedância de aterramento, representada por  $Z_n$  na Figura 2.2a. Essa impedância conectada  $Z_n$  é usada para reduzir a corrente de arco secundário. Este trabalho utiliza o modelo de reatores *shunt* proposta por Ribeiro (2020), no qual três unidades monofásicas de reatores são conectados em estrela, aterrado solidamente (com  $Z_n=0$ ).

Referente à aplicação dos reatores *shunt* ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), ilustram-se, na Figura 2.3, as formas de conexão de reatores: no barramento da subestação (Posição 1); nos terminais da linha de transmissão (Posição 2); e/ou no terciário do transformador (Posição 3).

Dependendo da força das fontes, conectadas às extremidades da linha, cada um dos bancos de reatores conectados na Posição 2 podem ter a mesma potência. Em fontes de forças diferentes, as potências dos reatores serão diferentes e dependerão de uma análise do fluxo de potência do sistema (ALVES, 2011).

Figura 2.3 – Aplicação de Reatores *Shunt* ao SEP.



Fonte: (ALVES, 2011).

Os reatores *shunt* podem ser conectados ao terciário do transformador (Posição 3), sendo reatores do tipo a seco com núcleo de ar ou trifásico imersos em óleo ou monofásicos imersos em óleo. Essa conexão é utilizada devido a sobretensões causadas pela interação da capacitância da linha com qualquer porção saturável da reatância indutiva do sistema, causando ferorrressonância. A ferorrressonância ocorre devido a interação entre a indutância e a capacitância da linha, o qual pode gerar harmônicos e, conseqüentemente, sobretensões indesejadas. A aplicação de um reator *shunt* no terciário do transformador mitigará esse tipo de sobretensão, reduzindo a tensão para valores abaixo daqueles que geram a saturação do núcleo do transformador.

Reatores conectados no terciário do transformador possuem algumas diferenças operacionais quando comparadas com reatores diretamente conectados à linha:

- Requerem um esquema de proteção simples;

- Os dispositivos de manobras são economicamente viáveis
- Os reatores *shunt* podem ser instalados em bancos de forma independente dividindo-se a potência requerida em um número maior de bancos. Assim, a operação torna-se flexível e também não impõe uma queda de tensão significativa na comutação.

A [IEEE \(2007\)](#) estabelece alguns equipamentos típicos aplicados na proteção de reatores *shunt* conectados ao terciário do transformador. Contudo, para ser viável economicamente é necessário seletividade e coordenação por parte da proteção diferencial de sequência, juntamente com a proteção de sobretensão de sequência, evitando a operação durante condições de faltas externas. ([Yarong et al., 2020](#)).

Os reatores podem ainda ser usados conectados ao neutro de reatores *shunt*, denominados nesse caso de reator de neutro. Assim, os reatores são empregados a fim de aumentar a reatância de sequência zero total da linha de transmissão, reduzindo as correntes para faltas monofásicas. Essa utilização do reator de neutro também minimiza a corrente de arco secundário quando existe a necessidade de um religamento monopolar. O reator de neutro auxilia também no deslocamento de eventuais ressonâncias devido o elevado nível de compensação de linhas. ([DIAS, 2018](#))

## 2.2.2 Características Construtivas

A escolha do tipo de reator a ser utilizado depende de suas características construtivas, podendo ele ser do tipo seco ou do tipo a óleo. Além disso, os reatores são classificados conforme o tipo de núcleo, o qual pode ser de ferro ou a ar. Nos sistemas de transmissão de alta tensão, podem ser utilizado os seguintes:

- 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.

Para tensões superiores a 34,5 kV é comum a utilização de reatores imersos em óleo, os quais são conectados diretamente ao barramento da subestação (SE) ou nos terminais da linha. Porém, os reatores do tipo seco, como ilustrado na Figura 2.4, se comparada aos imersos em óleo, possuem custos operacionais baixos, menor tamanho, menores perdas, ausência de óleo isolante e manutenção mais simples ([IEEE, 2018](#)). Os reatores tipo seco com núcleo de ar são construídos em unidades monofásicas, as quais são conectadas em estrela em um arranjo trifásico. As fases são instaladas em estruturas isoladas, a fim de proporcionar uma distância, a qual preserva o campo magnético entre elas e evita a interferência entre as unidades constituintes ([BASHA; THOMPSON, 2013](#)).

Figura 2.4 – Reator *Shunt* tipo seco de 765 kV.

Fonte: (ALVES, 2011).

Anteriormente, o reator do tipo seco não era recomendado para tensões superiores a 34,5 kV. Isso ocorria devido à constituição física do equipamento não suportar a alta intensidade de campo elétrico existente nos sistemas com alta tensão. Entretanto, com os avanços tecnológicos e materiais, tem-se desenvolvido reatores a ar que suportam tensões de até 345 kV (PAPP et al., 2014). Com base nas vantagens associadas ao reator seco com núcleo a ar, ele será empregado nos estudos desta pesquisa.

Durante a energização, o reator produz uma corrente transitória de energização. E a depender do tipo de núcleo do reator, poderá ocorrer a saturação. Em reatores a seco com núcleo de ar, não ocorre a saturação. Assim, a corrente transitória de energização é menor que as correntes de energização de reatores com núcleo de ferro, nos quais pode ocorrer a saturação (CIGRE, 2012).

Os reatores imersos em óleo com núcleo a ar, semelhante aos reatores tipo seco, possuem uma indutância constante, a qual resulta em uma característica linear entre corrente e tensão. Apesar da ausência do núcleo de ferro, durante a energização de reatores imersos em óleo e com núcleo a ar, ocorre um transitório, com acréscimo do fluxo magnético produzido, o qual a depender da intensidade pode causar sobretemperatura e efeitos eletrodinâmicos no reator. Portanto, nesse tipo de reator, cria-se um “escudo magnético” que exerce a função de blindar e armazenar o fluxo gerado na energização (HARLOW, 2003). Devido à presença do óleo isolante, exige-se uma manutenção complexa e uma retirada periódica de amostras de óleo e análise de vazamentos, o que ocasiona uma desvantagem no seu uso, mesmo ele podendo ser utilizado em sistemas com nível de tensão

de 34,5 kV ([IEEE, 2018](#)).

Os reatores imersos em óleo e com núcleo de ferro são construídos com ranhuras no entreferro para evitar a saturação do núcleo e manter a característica linear entre corrente e tensão. Essas ranhuras aumentam a região linear de operação e propiciam ao reator suportar uma maior densidade de energia, viabilizando sua aplicação em sistemas de extra-alta tensão. Essas ranhuras permitem também a eliminação do fluxo remanescente, amenizando assim a corrente de *inrush*, dificultando a ocorrência da saturação do núcleo. Ilustra-se, na Figura 2.5, um reator imerso à óleo.

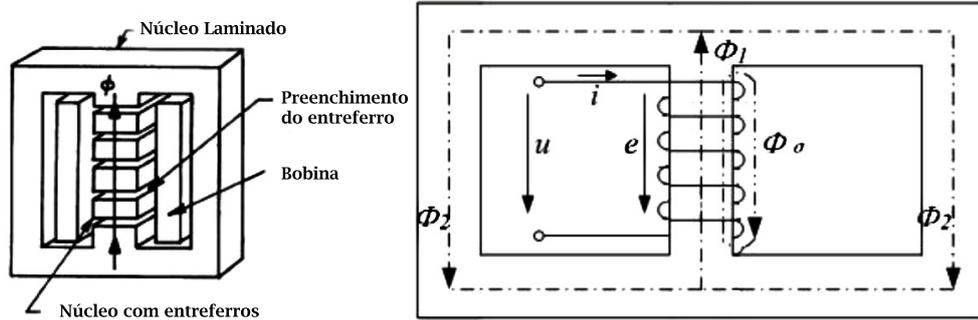
Figura 2.5 – Reator *Shunt* imerso a óleo de 765 kV.



Fonte: [Rodrigues e Silva \(2014\)](#)

Os reatores imersos em óleo e com núcleo de ferro têm sua construção semelhante a de um transformador, entretanto, apresentam ranhuras menores, causando um ponto de saturação de 1,35 pu de tensão nominal, que poderá ser observado melhor na Figura 2.8. Quando o equipamento é ausente de ranhuras, o ponto de saturação se torna 1,25 pu de tensão ([NASHAWATI et al., 2013](#)).

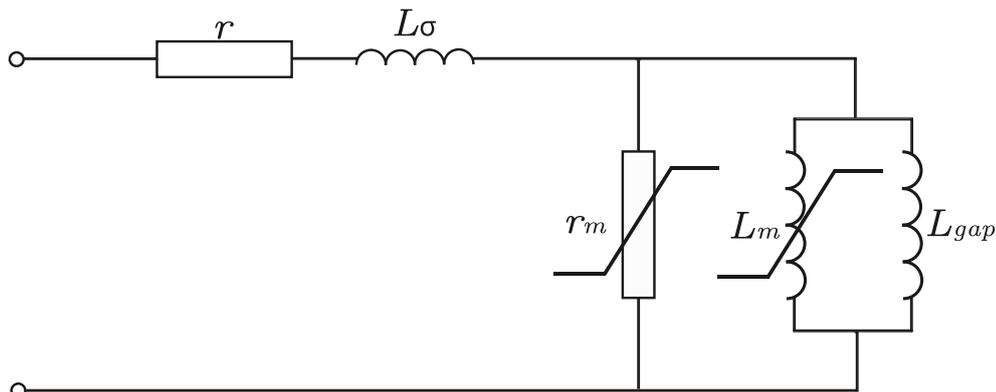
Os reatores com núcleo de ferro são constituídas por fases separadas em três pernas ou cinco pernas, sendo tais pernas elementos de sustentação para as bobinas das fases do reator. As pernas que constam como livres nos reatores são projetadas para minimizar o fluxo de sequência zero nos enrolamentos das fases. Com isso, nas energizações simétricas, mesmo com transitório, não ocorrem desequilíbrios entre as fases do reator e assim não surgem correntes de sequência zero. Porém, em energização assimétrica, acontecerá um desbalanceamento entre as fases, propiciando o surgimento de corrente de sequência zero ([BASHA; THOMPSON, 2013](#)) e ([GAJIC et al., 2003](#)).

Figura 2.6 – Modelo de Reator *Shunt* monofásico.

Fonte: Yue et al. (2009)

### 2.2.3 Características e Condições Adversas de Operação

O circuito equivalente de um reator *shunt* é apresentado na Figura 2.7, na qual  $r$  é a resistência que representa as perdas nos enrolamentos e  $L_\sigma$  é a indutância de dispersão dos enrolamentos (não-linear). Na Figura 2.7, ainda é apresentado o núcleo do reator modelado, o qual representa as perdas por histerese no núcleo. Além disso, em paralelo a  $r_m$ , que é a resistência de magnetização, há as reatâncias  $L_m$  e  $L_{gap}$  que simbolizam as reatâncias de excitação do núcleo e das ranhuras, respectivamente (YUE et al., 2009).

Figura 2.7 – Circuito equivalente Reator *Shunt*.

Fonte: (YUE et al., 2009)

Além das perdas nos enrolamentos, ocorrem as perdas magnéticas no núcleo do reator. Assim, de 60 a 70% das perdas no reator correspondem as perdas Joules (nas resistências dos enrolamentos); e de 20 a 30% correspondem as perdas no ferro (referente  $Z_m = r_m + j\omega(L_m + L_{gap})$ ); e finalmente, de 5 a 15% correspondem às perdas devido às correntes parasitas nos enrolamentos. Todas essas perdas correspondem a 0,2% da potência

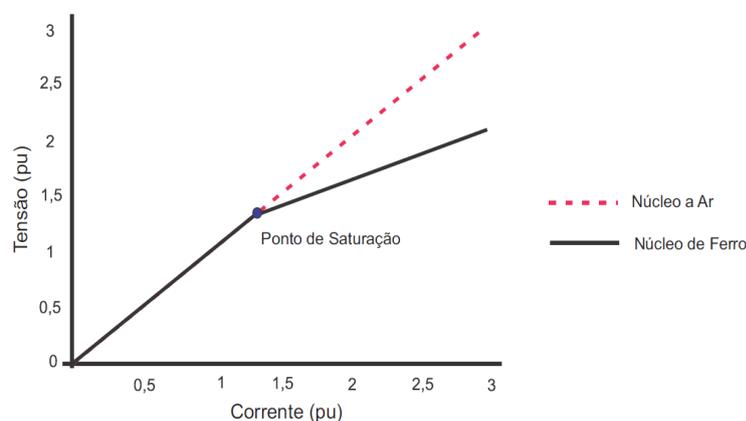
total fornecida ao reator. Logo, considerando 0,2% o total de perdas, afirma-se que o reator *shunt* é um equipamento com alto rendimento (YUE et al., 2009).

A operação dos reatores shunt apresenta algumas particularidades, as quais devem ser consideradas quando da definição e da execução dos cálculos dos ajustes do sistema de proteção desses equipamentos. Esses aspectos operacionais são descritos a seguir.

Os reatores *shunt* costumam ser energizados e desenergizados, e em sua desenergização, o núcleo não é totalmente desmagnetizado, o que gera um fluxo residual. Todavia, esse fluxo é desprezível, tanto quanto a histerese gerada nas ranhuras do núcleo. O circuito equivalente da Figura 2.7 representa uma das fases do reator. Como o reator é conectado em um sistema trifásico, pode surgir assimetria entre as fases. O desequilíbrio entre as fases do reator ocorre devido a aspectos construtivos, decorrentes da diferença entre as bobinas que compõem o reator ou da diferença entre as unidades monofásicas que formam um banco trifásico. A assimetria entre os enrolamentos e as fases está associada ao surgimento de uma corrente de sequência zero, que circula no neutro (GAJIC et al., 2003). Com isso, umas das formas para contornar a existência desses desequilíbrios construtivos, é ajustando o *pickup* das proteções de sobrecorrente de fase e de neutro considerando a presença dessa corrente de sequência zero, mesmo em condições normais de operação.

Durante a operação normal de um reator, é possível constatar a existência de uma relação linear entre a tensão aplicada e a corrente por esse equipamento. Logo, o aumento da corrente resulta em um aumento proporcional na tensão do núcleo, conforme ilustrado na Figura 2.8. Ademais, o fluxo e a densidade de fluxo magnético no núcleo são proporcionais à tensão aplicada ao núcleo (ALVES, 2011). Ressalta-se que em reatores com núcleo magnético de ferro, o fluxo magnético irá saturar a partir de uma determinada densidade de fluxo, denominada ponto de saturação, conforme indicada na Figura 2.8 (UMANS, 2014).

Figura 2.8 – Característica de magnetização dos reatores *shunt* com núcleo de ferro e a ar.



Fonte: (YUE et al., 2009).

Segundo [Alves \(2011\)](#), antes do ponto de saturação, indicado na Figura 2.8, a corrente necessária para magnetização do núcleo é pequena. Assim, um pequeno aumento de corrente é suficiente para alcançar um aumento marginal na densidade de fluxo. Acima do ponto de saturação, para um aumento densidade de fluxo, é necessário uma corrente extra considerável.

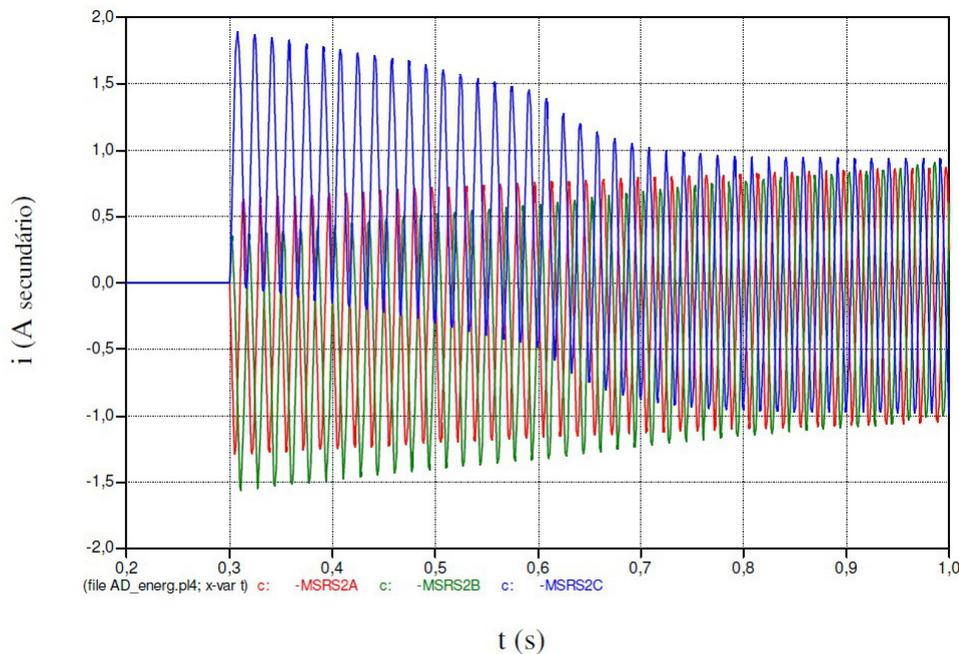
A presença de harmônicos residuais no reator podem ser justificadas pela tolerância de assimetria entre as fases de um reator trifásico, ou mesmo pelas unidades formadoras de um banco trifásico. Nesse sentido, os ajustes das proteções de sobrecorrentes residuais e de neutro devem ser maiores do que uma possível corrente de desequilíbrio existente, em função da presença de harmônicas ([ALVES, 2011](#)).

Sobre a presença de harmônicos durante a operação dos reatores, afirma-se que eles surgem devido à saturação parcial do circuito magnético do núcleo e em função da assimetria entre os enrolamentos do reator. Em condições normais de operação, podem existir predominantemente harmônicos de terceira ordem, cuja corrente é obtida no neutro como um residual de corrente de sequência zero ([CIGRE, 2012](#)). Nas condições normais de operação, mesmo havendo o surgimento de conteúdos harmônicos, os mesmos são desprezíveis para a proteção. No mais, é verificado o surgimento de conteúdo harmônico de segunda e quinta ordem no instante de energização do reator, devido à corrente de *inrush*. Comparada à corrente *inrush* do transformador, o reator apresenta níveis inferiores de segunda harmônica durante sua energização ([RIBEIRO, 2020](#)).

Como anteriormente explanado, durante a energização de um reator *shunt*, há o surgimento de correntes transitórias. As correntes de fase de um reator, durante sua energização, são apresentadas na Figura 2.9. Verifica-se do comportamento das correntes, que elas tem um aumento no momento da energização. Essa corrente adicional é chamada de corrente de *inrush*.

Durante a energização do reator com núcleo de ferro, as três fases não recebem correntes simétricas na excitação. Ou seja, as fases terão diferentes componentes de decaimento exponencial (DC), com distintos amortecimentos exponenciais. Esse fenômeno da corrente de *inrush* é similar à corrente de energização de um transformador. No entanto, em reatores o amortecimento é mais lento, devido às baixas perdas inerentes a um reator *shunt*, dependendo também da relação  $X/R$  do sistema. Assim, em reatores, o período de amortecimento é da ordem de segundos, enquanto para transformadores é feita em milissegundos. ([BEDI; PATNE, 2016](#))

A corrente de *inrush* é rica em conteúdo de segunda harmônica, a qual é influenciada pela porcentagem de componente DC na corrente *inrush*. Na corrente é identificado segunda harmônica em porcentagens de componentes DC em que 40%, 70% e 100%. A porcentagem da componente DC depende do momento da energização. Se o reator for energizado no instante da passagem pelo zero da tensão, a componente DC será a máxima possível, o que

Figura 2.9 – Energização de Reator *Shunt*.

Fonte: (ALVES, 2011).

resultará em uma maior porcentagem de segunda harmônica. Porém, caso a energização ocorra em outros instantes, os níveis DC serão menores e, conseqüentemente, com menor porcentagem de segunda harmônica. Então, as estratégias de bloqueio da proteção durante a energização, baseadas na presença de segunda harmônica, dependerão do nível DC, logo, do momento da energização. (KÜSEL, 2014)

Em manobras de desconexão dos reatores, podem surgir *currents chopping*, as quais os disjuntivos modernos são capazes de drenar em suas câmaras de extinção. *Current chopping* ocorre quando, após a abertura dos disjuntores do reator, a corrente é forçadamente interrompida antes de atingir o seu zero naturalmente. Mesmo com o abrupto interrompimento da corrente, há estoque de energia magnética no núcleo do TC conectado ao reator. Com o corte da corrente, essa energia armazenada se dissipa no secundário do TC causando um transiente com decaimento exponencial DC, sem efeitos no primário. Essa corrente transitória no secundário corresponde à corrente à *Current chopping* (RIBEIRO, 2020).

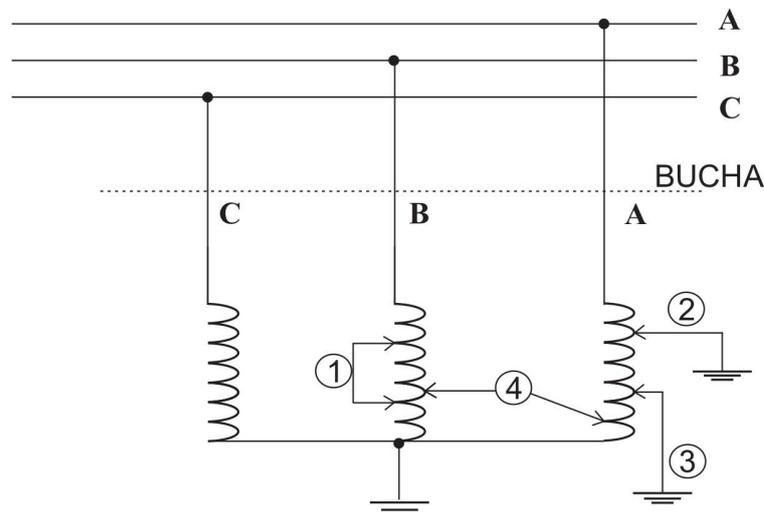
Por serem constituídos por um núcleo de ferro, reatores e transformadores estão propícios a sofrerem sobre-excitação. A sobre-excitação no núcleo de ferro é inversamente proporcional à frequência e diretamente proporcional à tensão aplicada. Assim, na ocorrência de alterações abruptas de aumento de tensão ou de baixa de frequência, o núcleo poderá ser saturado, fazendo com que o reator não opere na região linear e gerando um

aumento de harmônicas ímpares na corrente de excitação.

A eliminação de curtos-circuitos externos nas proximidades do reator poderá gerar uma corrente de magnetização equivalente da componente DC de energização, porém, em menor escala. Com a alteração da tensão sobre o equipamento, ora em falta ora em pós-falta, cria-se uma variação no fluxo magnético no núcleo do reator, fazendo com que o mesmo responda com a produção de um pico na corrente de magnetização. No entanto, caso o reator permaneça operando em carga, o efeito do pico de corrente será amenizado.

Além das condições operativas descritas anteriormente, os reatores também podem ser submetidos à faltas internas, as quais correspondem a condições adversas de operação. Os diferentes tipos de falta que podem ocorrer em um reator, conectado em estrela, são indicadas no reator apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Tipos de faltas em um reator *shunt*.



Fonte: (BASHA; THOMPSON, 2013)

A falta 1 refere-se ao curto-circuito entre espiras de uma mesma fase. Esse tipo de falta pode variar a depender da porcentagem de espiras curto-circuitadas. Assim, quanto maior o número de espiras envolvidas na falta, menor a impedância do enrolamento e, por conseguinte, menor a impedância imposta à corrente de falta. Nessa falta, a posição das espiras curto-circuitadas também pode variar, estando mais próximas da bucha ou do neutro.

As faltas 2 e 3 correspondem aos curtos-circuitos espira-terra, decorrentes da conexão acidental entre o enrolamento de uma fase à terra. Para a falta 2, que ocorre mais próxima à bucha, uma maior quantidade de espiras é curto-circuitada. Dessa forma, a bobina da fase defeituosa terá impedância menor do que as impedâncias das outras bobinas, resultando em uma maior assimetria entre as fases (CIGRE, 2012). Faltas do tipo 3, que ocorrem mais próximo ao neutro, envolvem uma menor quantidade de espiras, resultando

em menores diferenças entre as impedâncias das fases e, portanto, menores desequilíbrios. Destaca-se que as faltas 2 e 3 devem ser identificadas rapidamente, pois podem evoluir para curtos-circuitos mais severos, além de causar aquecimento e má operação no reator (GAJIC et al., 2003).

A falta 4 decorre da conexão acidental entre enrolamentos de fases distintas. Nos reatores shunt do tipo seco, que são fabricados em unidades monofásicas e depois ligadas, o próprio ar funciona como material isolante. Portanto, há um seguro espaçamento entre as fases, resultando em uma melhor isolação entre elas, tal que a falta 4 é pouco recorrente (BASHA; THOMPSON, 2013).

## 2.3 Proteções aplicadas aos reatores *shunt*

Segundo estabelecido nos Procedimentos de Rede do ONS, a proteção do reator *shunt* deve ser executada por meio de três sistemas diferentes e independentes, a fim de se detectar e atuar em condições de sobreaquecimento, falhas entre-espiras, falhas internas envolvendo a terra, falhas internas entre fases do reator e falhas na bucha. Tais sistemas podem ser a proteção unitária ou restrita; proteção irrestrita ou gradativa e proteção intrínseca, as quais devem ser ajustadas conforme as recomendações do fabricante (ONS, 2021).

A zona de atuação do sistema de proteção restrito ou unitário, localizada entre os TCs do lado da bucha e do reator do TC do neutro, deve detectar e eliminar seletivamente, e sem retardo de tempo, as falhas internas ao reator. Observa-se que as proteções unitárias ou restritas são usualmente aplicadas ao reator como proteções diferenciais de fase e falta à terra restrita (*restricted earth fault* – REF).

O sistema de proteção gradativa ou irrestrita deve detectar e eliminar falhas que acontecem no reator e pode complementar a proteção dos componentes adjacentes. Em uma aplicação como proteção de retaguarda, a atuação da proteção do reator deverá ser coordenada com a atuação das proteções dos equipamentos adjacentes, mediante o retardo de tempo intencional. No reator, essas proteções são a de sobrecorrente de fase, residual e neutro (ALVES, 2011).

Segundo o item 5.5.4 do submódulo 2.5 do ONS, as proteções unitárias dos reatores *shunt* devem ser proteções de sobrecorrente diferencial percentual (87R). A proteção de retaguarda deve ser a função de sobrecorrente instantânea e temporizada de fase e de neutro (50/51 e 50N/51N), mas com índices de confiabilidade extremamente elevados, pois atuará quando houver falha da proteção principal. Deverá, também, ser implementada no aterramento do neutro do reator, funções instantânea e temporizada de terra (50G/51G). Associado às proteções de retaguarda e unitárias, o reator deverá ter proteção intrínseca, sendo essa caracterizada por relés de pressão súbita de óleo ou gás (válvula de segurança

ou similar, 63), relés de detecção de gás (tipo Buchholz), e relés de sobretemperatura do óleo (26) e dos enrolamentos (49). As proteções intrínsecas devem ser instaladas durante a fabricação do equipamento, e seus ajustes devem seguir as orientações do fabricante. Na Tabela 2.2 isso é melhor exemplificado.

Tabela 2.2 – Proteções tradicionais para reatores *shunt*

<b>Reatores do tipo seco</b>	
50/51, 87, 46	Entre fases
59 (delta aberto)	Fase-terra
Desbalanço de tensão com compensação	Entre espiras
<b>Reatores imersos em óleo</b>	
50/51, 87 e 21	Faltas de grande magnitude
50/51N	Falta à terra
50N, 67N, 67Q	Entre espiras
Pressão de óleo, gás/21	Faltas internas e ruptura no tanque

Fonte: (IEEE, 2007).

Tanto a proteção intrínseca do reator por válvulas de alívio de pressão quanto a de óleo apresentam dois níveis de ação programados previamente: um comanda o desligamento e o outro envia um alarme. Nos reatores a óleo de extra-alta tensão, há a preocupação com a perda das propriedades isolantes, com a deterioração do óleo e com possíveis falhas e risco de incêndio. Utiliza-se, portanto, a proteção de temperatura por meio de dois sensores na parte superior do reator, em que o intervalo, entre o alarme e o desligamento do reator não ultrapasse 20 minutos.

As faltas dentro do reator shunt, causam o aquecimento da temperatura do óleo e a formação de gases. Tais gases requerem uma atenção maior, pois eles podem gerar risco de explosão e perda total do equipamento. Com isso, utilizam-se relés de gás, do tipo Buchholz, que além de detectar gases, podem verificar as perdas no volume de óleo causados por merejamento, ou por defeitos de conexões desgastadas e condutores quebrados. O relé de gás possui dois níveis de ação, primeiramente, ele irá atuar o alarme de aviso decorrente da lenta produção de gases, e só após, o desligamento. Normalmente é utilizado a chave 86 no qual efetua o bloqueio e não permite a reenergização.

O uso de redundância na proteção em sistemas de alta e extra-alta tensão é estratégico na operação do sistema elétrico. Assim, caso ocorra uma falha, haverá outra proteção para detectar a situação anormal da operação. Além disso a redundância de proteção nos sistemas também possibilita verificar variados tipos de falhas em reatores *shunt*. Outros sistemas que contribuem para a redundância são os disjuntores com dois circuitos de disparo independentes que recebem informações de TCs com núcleos independentes, e sistemas de dupla proteção com sistemas de bateria dual. As variadas funções que podem

ser processadas nos réles numéricos podem ser classificadas segundo o tipo de proteção mais adequado, tanto para reatores imersos em óleo, quanto para reatores tipo seco, além de depender também do tipo de falta específica.

### 2.3.1 Proteção diferencial em reatores *shunt*

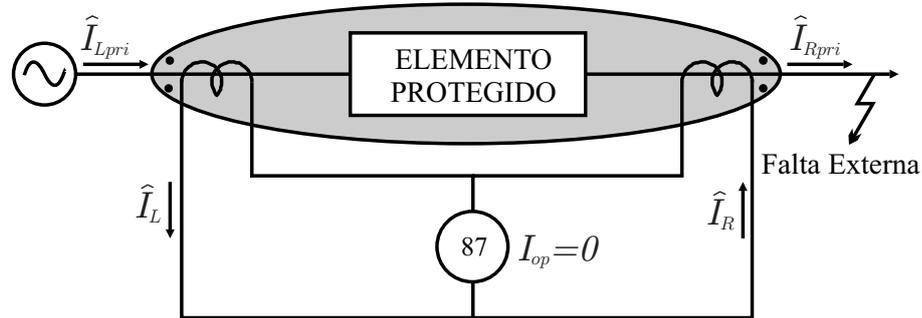
Baseada na 2ª Lei de Kirchhoff (ou lei dos nós) - código ANSI 87 - a proteção diferencial de corrente emprega a função diferencial, na qual, em condições normais de operação, a somatória algébrica das correntes de um nó deve ser zero. Nesse sentido, as correntes que saem do nó devem ser equivalentes a soma das correntes que entram nele. Sendo assim, a proteção diferencial tem como fundamento a comparação das correntes que entram com as que saem do equipamento protegido. A proteção diferencial pode ser usada também na proteção de transformadores de potência (87T), barramento (87B) e linha de transmissão (87L) (ALMEIDA, 2016).

A área protegida de um equipamento qualquer por um relé diferencial é delimitada por TCs. Observa-se a conexão dos TCs na Figura 2.11, o qual define uma zona de proteção, assim a corrente  $\hat{I}_{Lpri}$  do terminal próximo a bucha, transformada em  $\hat{I}_L$  no secundário do TC, entra no elemento protegido e a corrente no terminal próximo ao neutro  $\hat{I}_{Rpri}$  sai dele, equivalente  $\hat{I}_R$  no secundário do TC. Considerando a polaridade os TCs indicadas nas Figuras 2.11 e 2.12, e realizando a comparação entre correntes que entram e saem do elemento protegido, de acordo com o princípio da proteção diferencial, as seguintes situações operativas são escritas:

- Faltas externas: Quando ocorre falta externa, conforme ilustrado na Figura 2.11, não circula corrente de operação ( $I_{op}$ ), enquanto a corrente de restrição ( $I_{res}$ ) é o dobro de  $\hat{I}_L$ , assim é caracterizado que não existe problema no equipamento protegido, ou seja  $I_{op} < I_{res}$ , permanecendo o relé sem atuação. Essa condição de falta externa é semelhante à condição nominal de operação (sem curtos-circuitos).
- Faltas internas: dada a Figura 2.12, as correntes  $\hat{I}_L$  e  $\hat{I}_R$  possuem mesmo módulo e sentido. Ambas fluem no sentido do equipamento protegido, logo, a corrente de operação ( $I_{op}$ ) será o dobro de  $|\hat{I}_L|$ , enquanto que a corrente de restrição ( $I_{res}$ ) é nula. Nesse sentido, quando  $I_{op}$  atingir um valor considerável, ultrapassado um valor predefinido, denominado corrente de *pickup* ( $I_{pk}$ ), o relé opera desconectando o equipamento do sistema. Comumente, em falhas internas,  $I_{op}$  é igual a corrente de curto-circuito total, vista do secundário dos TCs que compõem a malha diferencial. (ALVES, 2011)

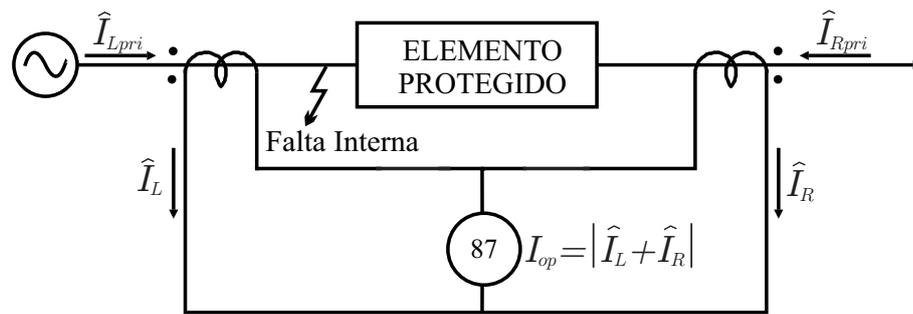
Com o objetivo de aumentar a sensibilidade do relé, é adicionado o fator *slop* ( $SLP$ )

Figura 2.11 – Proteção Diferencial - Falta Externa



Fonte: Almeida (2016).

Figura 2.12 – Proteção Diferencial - Falta Interna



Fonte: Almeida (2016).

a  $I_{res}$ , conforme descrito na Equação 2.2:

$$I_{op} > SLP \cdot I_{res} \text{ e } I_{op} > I_{pk}. \quad (2.2)$$

O fator  $Slop$  e a corrente de *pick-up* fazem com que o relé seja tolerante à pequenas variações da corrente diferencial minimizando alguns problemas como incompatibilização nas relações de transformação dos TCs; desequilíbrios naturais; e erros intrínsecos dos TCs. Além das tolerâncias, podem ser utilizadas lógicas de bloqueio. A fim de evitar uma atuação indevida da proteção em momentos de sobreexcitação e de *inrush*, podem ser usados filtros de harmônicas os quais identificam essas situações. Em situações de energização, que ocorre o aparecimento de correntes de segunda harmônica e componentes DCs indicam corrente de *inrush*, e quinta harmônica a sobreexcitação, assim, os relés usam essas características para bloquear a atuação da proteção.

### 2.3.2 Proteção de falta restrita à terra em reatores *shunt*

Baseada no cálculo da corrente diferencial de neutro e com princípio de comparação entre as correntes no neutro com a componente de sequência zero calculada no lados das fases, se tem a proteção de falta terra restrita (*REF*). Assim, para o cálculo pela *REF* é preciso medir  $i_N$ , correspondente a corrente medida pelo TC de neutro em direção à terra, e  $i_0$ , igual a corrente de sequência zero, obtida por meio da matriz de *Fortescue* e com base nas correntes de fase medidas pelos TCs do lado da bucha.

A fim de comparar o desempenho do algoritmo proposto, foram realizadas comparações com a lógica *REF*, a qual é descrita a partir da formulação matemática para detecção de faltas, conforme apresentado nas Equações 2.3 e 2.4.

$$I_{op}(k) = |\hat{I}_N(k)| \quad (2.3)$$

$$I_{res}(k) = k_R(|\hat{I}_N(k) - 3\hat{I}_0(k)| - |\hat{I}_N(k) + 3\hat{I}_0(k)|) \quad (2.4)$$

A sensibilidade máxima da proteção é definida através do ajuste da corrente de operação, Equação (2.3), e pela a restrição, mostrada na Equação (2.4). É necessário estabelecer tal limite de restrição ( $I_{res}$ ), pois ela depende da corrente de sequência zero, a qual existe apenas em momentos de falha ou desequilíbrio. O valor mínimo aceitável para a sensibilidade deve ser maior que o de desequilíbrio natural de  $3i_0$  ocasionado por condições de carga.

$$\begin{cases} I_{op}(k) > I_{res}(k) \\ I_{op}(k) > I_{pk}(k) \end{cases} \quad (2.5)$$

De acordo com essa lógica, as situações de curto-circuito só serão identificadas se  $I_{op}$  atender às condições definidas na Equação 2.5, assim será enviado sinal de trip. Neste trabalho foi considerado um valor mínimo de operação corrente ( $I_{pk}$ ) igual a 0,6. No que  $I_{pk}$  é a corrente mínima para acionamento do relé ou corrente de pick-up.

## 3 Revisão do Estado da Arte

Neste capítulo, a fim de contextualizar esta dissertação acerca dos trabalhos que discorrem sobre proteção de reatores *shunt*, é descrita uma apresentação concisa dos estudos relacionados aos principais algoritmos empregados na proteção de reatores. Primeiramente, são apresentadas as principais pesquisas que discorrem sobre as proteções diferenciais tradicionais empregadas nos reatores *shunt*. Posteriormente, são expostos estudos relacionados às proteções diferenciais, as quais empregam análise de elementos de sequência, sendo o elemento de sequência zero o foco desta dissertação. Neste contexto, são abordados as maiores contribuições e as possíveis lacunas de cada uma das publicações mencionadas.

### 3.1 Estado da Arte sobre Proteção de Reatores *Shunt*

[Bastard et al. \(1994\)](#) apresentam considerações e experiências práticas que um engenheiro de proteção se defronta na implementação de um esquema de proteção de um reator *shunt* com núcleo de ar. Inicialmente, os autores fazem uma breve apresentação dos principais usos dos reatores *shunt* e as vantagens do reator com núcleo de ar. É empregado o ATP/EMTP para avaliação das correntes fase e de neutro durante condições de faltas internas e externas. Para implementação do esquema de proteção, uma das primeiras dificuldades encontradas foi a preocupação com o desempenho dos TC durante transitórios, os quais podem causar saturação. Isso acontece devido ao alto valor de  $X/R$  dos reatores *shunt*. No artigo apresentado não foi possível analisar com precisão transitórios durante manobras com reatores conectados.

Em [Hillström \(2003\)](#) apresenta-se uma comparação do comportamento do reator *shunt*, imerso em óleo, a um transformador de potência. O mesmo tem por objetivo explicar as propriedades dos reatores *shunt* a partir de simulações de perturbações ocorridas em campo ou simuladas pelo ATP. São avaliadas detalhadamente as características construtivas do reatores *shunt*, suas proteções e esquemas de controle. Além disso, é apresentado possíveis esquemas de proteção com relés numéricos, o qual, também, possibilita o controle de um reator *shunt*. No trabalho, são apresentadas simulações de operações incorretas da proteção em situações de saturação de TCs, que sugerem a necessidade de meios adicionais para restringir a baixa impedância. Um método proposto, e muito eficaz, foi verificar a quantidade do segundo harmônico na corrente de neutro do reator *shunt* e prevenir adaptativamente a operação da proteção se o limite for excedido. É analisado o comportamento do reator *shunt* durante faltas internas, que normalmente é facilmente detectada e eliminada pela proteção diferencial, e faltas externas.

Li Yongli et al. (2004) propõe uma nova proteção direcional de sequência negativa. A tensão e a corrente de sequência negativa são obtidas a partir do terminal primário do reator *shunt*. Os autores apresentam um novo relé direcional de sequência negativa para o esquema de proteção primária, o qual utiliza relé direcional de sequência negativa na análise de curto circuito. É utilizado o ângulo da impedância de sequência negativa na identificação se a falta é interna ou externa. Foi observado que a proteção proposta possui uma precisão suficientemente alta comparada com as proteções tradicionais obtendo uma resposta confiável frente a faltas internas e externas.

Zhentao et al. (2004) propõe uma nova teoria de proteção de faltas entre espiras baseadas em indutância equivalente e configura um modelo de proteção baseada na função de perda de energia, o qual é objetivada através de simulações, feitas pelo EMTP/ATP, de faltas entre espiras, falta externa, falta de operação sem carga, entre outros. Os resultados simulados comprovam que o algoritmo de proteção proposto é eficaz, porém até o presente momento a teoria não foi validada em situações reais, a fim de verificar a confiabilidade e viabilidade da proteção.

O trabalho proposto por Carvalho et al. (2004) discorre sobre aplicação de relés numéricos como modo de proteção de reatores shunt AT. Aspectos gerais sobre o reator são apresentados, seguido de informe sobre fenômenos de irrupção, além de destacar os esquemas típicos de proteção de reator e as capacidades modernas de IEDs (*Intelligent Electronic Devices*). Foram destacadas algumas aplicações dos reatores *shunt*, bem como a influência do mesmo sobre os esquemas de proteção. Nesse trabalho também foram registradas gravações de campo de energizações não sincronizadas que são comentadas para posterior conclusão. Embora seja utilizado a energização sincronizada, a proteção deverá ter estabilidade frente o fenômeno ocorrente oriunda de uma eventual falha no equipamento de sincronização.

IEEE (2007) é um guia que tem como objetivo apresentar os principais métodos e configurações para a proteção de reatores *shunt*, os quais são utilizados tipicamente para compensar a reatância capacitiva de LT. Foi realizado, em 1979, pelo Grupo de Trabalho de Proteção de Reatores Shunt do IEEE Power System Relaying Committee, um levantamento da proteção de reatores *shunt* como referência para determinar configurações de circuitos comuns e esquemas de retransmissão de proteção para este guia. Esta revisão inclui arranjos de equipamento adicionais e fornece maiores detalhes para esquemas de proteção selecionados. Também são apresentados outros arranjos ou aplicações especiais de reatores, tais como bancos de filtros harmônicos, var estático compensação (SVC), corrente contínua de alta tensão (CCAT), ou reatores limitadores de corrente, mas não são especificamente abordados; contudo, os métodos de proteção descritos neste guia são normalmente aplicáveis aos reatores.

Uriondo et al. (2008) apresenta algumas adversidades observadas na proteção dos

reatores *shunt*, os quais em situações de energização ocorre o aparecimento da corrente de *inrush*. Esta corrente se assemelha com a que aparece no transformador, com duas diferenças: baixa intensidade do campo magnético no núcleo e o lento amortecimento da componente DC. Na pior condição, para faltas externas, pode haver um ou mais TCs saturados, e com isso a proteção diferencial entende como uma falta interna ao reator. A nova lógica da proteção REF, proposta por [Uriondo et al. \(2008\)](#), possui uma nova unidade IED, que além de possuir elementos comuns à REF tradicional - como elemento diferencial e elementos direcionais de terra, os quais são calculados a partir do ângulo entre a corrente de neutro e a corrente de sequência zero - executa, também, a polarização do sinal, detector de corrente de *inrush*, elemento direcional de sequência negativa. Foram simuladas duas faltas no reator *shunt*, uma falta externa e outra falta interna, sendo as faltas internas aplicadas em diferentes pontos do reator. Nesse sentido, foi verificado o comportamento da proteção em condições de estabilidade durante o funcionamento do reator, estabilidade em condições de faltas entre espiras e para sensibilidade da proteção para faltas internas em regime estacionário. Foi constatada maior confiabilidade e segurança da proteção, em relação à REF tradicional, apesar da complexidade na concepção dessa nova unidade REF.

[Mao et al. \(2010\)](#) propõe uma proteção para faltas entre espiras baseadas na variação das indutâncias de fase do reator *shunt*. Esse método é estabelecido com base no modelo de parâmetros no domínio do tempo e utiliza as quantidades elétricas em dois terminais do reator para o cálculo dos parâmetros elétricos de cada fase, por meio do algoritmo dos mínimos quadrados. Primeiramente, é feito o cálculo da média das reatâncias e dos fatores de normalização de cada fase, devido aos erros que possam existir. Assim, se os valores dos parâmetros corresponderem às condições de falta, serão calculadas as indutâncias e o ângulo máximo e mínimo de desequilíbrio. Por fim, é verificado se há ocorrência da falta ou não. O método proposto, além de ser simples e de alta sensibilidade, pode evitar com que o impacto das oscilações de potência e da compensação da frequência influencie no desempenho da proteção.

[Basha e Thompson \(2013\)](#) explicitam características dos reatores *shunt* com núcleo de ar tipo seco, e do tipo imersos à óleo, conectados em linhas de transmissão de alta tensão. A partir disso, os autores evidenciam as vantagens do reator *shunt* com núcleo de ar tipo seco em relação aos imersos à óleo, como, a característica de magnetização linear do reator do tipo seco. Também, é proposto um esquema de proteção, o qual utiliza a proteção diferencial e direcional aplicadas simultaneamente, e o emprego de TC ao terra, eliminando a necessidade do uso de TCs de neutro. Ademais, a proteção implementada baseia-se no cálculo das impedâncias de sequência zero, sendo o elemento direcional utilizado para identificação de faltas internas ou externas. São utilizadas também proteções mecânicas, como forma de assegurar uma alta sensibilidade para baixas magnitudes de corrente de falta, favorecendo a atuação durante sobrecargas térmicas do reator *shunt*. O esquema avaliou o TC adequado para assegurar a sensibilidade para faltas nos mais variados graus e

verificou a alta sensibilidade do método de sequência zero para distinção de faltas internas e externas.

Zheng e Zhao (2014) propõem um esquema de proteção baseado em um microprocessador em reator *shunt* controlado magneticamente (MCSR). No artigo, discutem sobre esquemas gerais de proteção, mas com enfoque maior em proteção do enrolamento, controle de proteção do enrolamento, compensação e proteção reserva, parte essencial da proteção do MCSR. Salienta-se algumas questões para a proteção do MCSR, as quais merecem atenção tais como o relé diferencial convencional, utilizado para transformadores, e que não são adequados para microprocessador controlado magneticamente. Além disso, a proteção de sobrecorrente direcional não é suficientemente sensível para detectar faltas entre-espiras, por isso é utilizado um relé de sobrecorrente direcional de sequência zero para solucionar o problema. Nesse sentido, é implementado uma combinação de proteção de sobrecorrente com a componente de tensão, em vez de uma proteção de sobrecorrente normalmente utilizada para compensação de senoides no que diz respeito à presença de harmônicas.

Eskandari e Jafarian (2016) fazem um estudo abrangente sobre sobretensões que aparecem em fases isoladas devido ao fenômeno de ressonância em série. São desenvolvidas expressões analíticas em forma geral considerando o acoplamento magnético do reator *shunt*. Essas equações tornam possível avaliar a eficácia de um reator de neutro existente e determinar se as sobretensões em fase aberta danificam ou não a LT. Foram apresentadas, também, equações gerais no intuito de otimizar o tamanho do reator de neutro para prevenir sobretensões em fase aberta. Esse tamanho é definido a partir da limitação da tensão com relação a tensão aceitável e eliminar as tensões em fase aberta induzidas por acoplamento capacitivo entre as fases. Verifica-se que o conceito, com relação as tensões induzidas, é consistente e normalmente utilizado para otimização da reatância de neutro, com vista a reduzir a reatância secundária para o tempo de extinção do arco. Todas essas análises se baseiam em dados de campo registrados de uma linha de transmissão real de 400 kV e simulações transitórias, incluindo a não linearidade da LT.

Das et al. (2017) propõe um novo algoritmo para detectar faltas entre espiras em reatores *shunt* conectados em estrela. O algoritmo proposto funciona com base na diferença entre a tensão terminal de sequência negativa normalizada, a corrente de fase normalizada e a corrente de sequência negativa do reator, sendo assim denominado "diferencial híbrido". Através da aplicação do algoritmo constata-se o funcionamento do aterramento sólido quando da impedância aterrada sem ser necessário o uso de TC neutro. É demonstrado então que, o algoritmo proposto possui excelente funcionamento para desequilíbrios do sistema, faltas externas e cenários de energização do reator. O algoritmo proposto é suficientemente sensível para detectar faltas entre espiras, que tem um baixo nível de corrente, apresentando uma melhoria significativa em relação as técnicas existentes baseadas

nas sequências negativa e zero.

Mohammad et al. (2018) investigam uma filosofia de detecção de faltas com maior sensibilidade para reatores *shunt* com núcleo de ar tipo seco. São apresentados dois métodos para identificação de faltas entre espiras. Um método é aplicado para casos em que dois reatores são conectados ao barramento e o outro para casos em que é utilizado um único reator conectado ao barramento. Para a primeira condição, foi avaliado que durante faltas entre espiras ocorre um desequilíbrio no sistema devido a alteração da indutância, e consequentemente é observado corrente de sequência zero fluindo através do neutro do reator. No entanto, os reatores não experimentam o mesmo desequilíbrio. Assim, a corrente de pickup deve ser definida em um limiar, o qual identifica o defeito e com isso protege os dois reatores quando a condição da proteção diferencial é satisfeita. Na condição de um único reator *shunt* em operação no barramento, verificou-se que o elemento de sequência zero é o mais significativo para definição de curto-circuito entre espiras. Porém, é possível surgir corrente de sequência zero durante faltas externas, comprometendo a confiabilidade da proteção do reator *shunt*. Para contornar tal problema, foi utilizado a leitura de tensão de um TP conectado a barra, o qual confirmará se a falta é de origem externa ou interna. Ou seja, se além de corrente de sequência zero no neutro do reator, houver tensão de sequência zero no barramento é constatado que esta alteração é causada pelo sistema e por isso, a proteção do reator não será sensibilizada. Após todas as simulações foi observado que a proteção requer dispositivos e métodos de detecção mais sensíveis e com isso, um melhor refinamento da taxa de amostragem oferecida pelo medidor. Além disso, os métodos de proteção atendem apenas as condições propostas.

Peres (2019) implementa um algoritmo inovador de proteção diferencial de transformadores de potência baseado na corrente de sequência negativa, o qual foi reconstruída no tempo a partir do fasor correspondente em ambos os enrolamentos do transformador. Este algoritmo ainda incorpora uma função que detecta a ocorrência de distúrbios, e uma nova estratégia de restrição harmônica também é implementada, como forma de melhorar a segurança da proteção para faltas externas que levem à saturação do transformador de corrente (TC). Assim, Peres (2019) tem como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo que não apresente deficiências de outras proteções diferenciais atuais quando é utilizado essa componente, tais como atraso intencional no tempo de atuação, lógica de bloqueio em situações de curto-circuito externo, os quais levem à saturação dos transformadores de corrente. Além disso, busca complementar às funções diferenciais de fase, no que concerne às operações mais rápidas e sensíveis para faltas internas entre espiras e espira-terra, até mesmo as que envolvem uma porcentagem mínima do enrolamento do transformador de potência. Foram simulados dois sistemas elétricos no *software* ATP: um sistema simplificado e uma parte do sistema elétrico da Companhia Elétrica do São Francisco (CHESF). Primeiramente, foram apresentadas as simulações realizadas no sistema elétrico simplificado. Três tipos de análises foram realizados para

avaliar o desempenho do algoritmo proposto frente a diversos curtos-circuitos internos e externos, a saber: Análise Transitória de Curto-circuito (ATC), Análise de sensibilidade paramétrica (ASP) e, por fim, uma avaliação comparativa entre o algoritmo proposto e os elementos diferenciais tradicionais (87T e 87TQ), fundamentada também nas ASPs. Nessas análises realizadas, uma ampla variedade de curtos-circuitos foram investigados a partir da variação da porcentagem de espiras curto-circuitadas; força das fontes (RZS) e condições de carregamento do sistema. Esse mesmo processo foi repetido para o sistema elétrico da CHESF. Com o intuito de avaliar o desempenho do algoritmo proposto, dois casos da ATC foram reavaliados e outro tipo de teste é realizado, denominado de Análise Transitória de Manobra (ATM). Além desse estudo realizado a partir dos resultados obtidos das simulações computacionais, a lógica do algoritmo proposto foi implementada em um relé de proteção comercial, e com isso verificar experimentalmente o funcionamento do método desenvolvido. Após às simulações, [Peres \(2019\)](#) verificou que a técnica proposta é capaz de distinguir faltas internas de externas, além de detectar faltas internas entre espiras e espira-terra, mesmo para 1% de espiras curto-circuitadas. Sendo assim, o algoritmo desenvolvido é mais rápido e sensível durante faltas internas envolvendo poucas espiras, do que os elementos diferenciais tradicionais utilizados pelos fabricantes em aplicações práticas de proteção, sendo, portanto, um complemento às funções diferenciais de fase. Apesar da proteção implementada por [Peres \(2019\)](#) ser avaliada para transformadores de potência, o mesmo abre a possibilidade da aplicação desta lógica para outros equipamentos, sendo um deles o reator *shunt*.

[Yarong et al. \(2020\)](#) propõe uma proteção com base na relação fixa entre a corrente de sequência zero do enrolamento do reator *shunt* e a corrente de sequência zero do enrolamento auxiliar, para faltas fora da zona protegida. Esta proteção tem como objetivo restringir a análise apenas à corrente de sequência zero e a necessidade do uso de transformadores de potencial, TP, para o bloqueio em faltas externas. As proteções tradicionais utilizam dos parâmetros de proteção de sobrecorrente de sequência zero para identificar a falta e a proteção de tensão de sequência zero para o bloqueio da atuação da proteção diferencial, em faltas externas. Nesse sentido, a partir da análise matemática do comportamento da corrente de sequência zero para curtos circuitos entre espiras do reator e para faltas externas, [Yarong et al. \(2020\)](#) define uma relação entre a corrente de sequência zero do reator *shunt* com a corrente de sequência zero do enrolamento. Assim, caso esse critério não seja satisfeito a proteção não atuará. Além disso, elimina a necessidade do uso do TP para avaliar curtos-circuitos que não são internos ao reator. A proteção mostrou alta sensibilidade na atuação de curtos-circuitos externos, e excluiu a necessidade de cálculos manuais. Os autores concluem, após simulações de faltas entre espiras no reator *shunt*, faltas entre espiras com 3% do enrolamento auxiliar e faltas externas, que o princípio de proteção de corrente de sequência zero solucionou efetivamente a operação incorreta durante faltas externas.

Ribeiro (2020) propõe um modelo de reator *shunt* do tipo seco com núcleo de ar, utilizando o software ATP. Além disso, verifica o desempenho da modelagem proposta frente as proteções aplicáveis ao equipamento. Em vista disso, o modelo proposto permite representar fielmente o comportamento do equipamento, tanto em condições nominais de operação quanto para situações extremas de curto-circuitos internos e externos. Ribeiro (2020) também propõe uma proteção diferencial alternativa, o qual compara a corrente de sequência zero das fases, medidas próximas à bucha, com a corrente no enrolamento do terra. Esses sinais de corrente são interpretados em um plano alfa adaptado para o reator *shunt*. Para isso, foi modelado um sistema elétrico composto por uma LT de 230 kV, 380 km, com 50% de compensação *shunt*, realizada por um reator com núcleo de ar, de potência nominal de 10,25 Mvar. Nesse sistema, foram aplicados diferentes curtos-circuitos internos ao reator, obtidos variando-se o tipo de falta (espira terra ou entre espiras), a quantidade de espiras envolvidas, o valor do fator de dispersão e o valor da resistência de falta no tipo espira terra. As análises basearam-se em casos extremos e no comportamento da corrente nas fases A, B, C e no neutro, medidas pelos TCs nas fases e o TC de neutro. Inicialmente, avaliou-se a situação de energização até a condição nominal de operação. Nota-se que, logo após a energização, os módulos das correntes reduziram seus valores nominais até 0,85 pu nas fases e aproximadamente zero para a corrente no neutro. Para avaliação das condições críticas de operação, simularam-se 120 curtos-circuitos distintos, sendo 60 do tipo espira terra e 60 entre espiras. Essas diferentes faltas foram obtidas variando-se o fator de dispersão, a quantidade de espiras envolvidas e a resistência de falta. Verificou-se que a proteção 87G opera corretamente para todas as faltas espira terra e faltas entre espiras testadas, independentemente da quantidade de voltas envolvidas e do valor do fator de dispersão, mesmo diante de fatores de dispersão mais elevados que culminam em correntes de faltas mais baixas. Além disso, o algoritmo proposto teve um bom desempenho, atuando adequadamente para curtos-circuitos aplicados próximos ao neutro, o que também resulta em correntes de falta mais baixas. Para faltas espira terra, a proteção atuou corretamente, considerando também a existência de altas resistências de faltas.

Almeida et al. (2021) propõe uma proteção alternativa de correntes no plano alfa para reatores *shunt*, que é capaz de identificar faltas internas, incluindo faltas entre-espiras. O algoritmo proposto baseia-se apenas na sequência zero e correntes de neutro, eliminando a necessidade de medições de tensão. Além disso, o algoritmo proposto utiliza o plano alfa de corrente alternativa, onde a característica de contenção é definida simplesmente como o seu semi-plano esquerdo, de tal forma que são necessárias configurações mínimas. A fim de avaliar o desempenho do algoritmo proposto, com o ATP, são simuladas diferentes faltas internas no reator *shunt* do tipo seco com núcleo de ar ligado a uma LT de 230 kV/60 Hz. O desempenho do algoritmo proposto é comparado com a função de falta restrita à terra. A partir dos resultados obtidos, demonstrou-se que a proteção proposta

funciona corretamente em falhas espira terra e entre-espiras com tempos de funcionamento inferiores a um ciclo de potência, mesmo para 1% das voltas em curto-circuito. Por outro lado, a função de falta terra restrita não funcionou em alguns destes casos. O algoritmo proposto garantiu a integridade dos reatores *shunt* com núcleo de ar do tipo seco em todos os cenários avaliados, restringindo corretamente em todas as falhas externas simuladas (incluindo casos com saturação do transformador de corrente). Assim, o algoritmo proposto é considerado uma alternativa fiável e promissora para proteção de reatores *shunt*.

## 3.2 Síntese da Revisão Bibliográfica

Sobre os trabalhos relativos à proteção diferencial de corrente, ressalta-se que suas contribuições são significativas, pois esclarecem aspectos importantes relacionados a esse tipo de proteção, no que diz respeito às características e peculiaridades da comunicação entre relés diferenciais. Embora a lógica descrita nos artigos funcionem bem, a sua implementação depende de valores de tensão medidos nos terminais do reator. Tal requisito limita a sua utilização apenas em reatores *shunt*, que tenha TP ou medição no ponto de ligação do reator.

Em [Mohammad et al. \(2018\)](#), os benefícios associados aos reatores *shunt* do tipo seco e núcleo de ar são descritos adiante. Uma vez que não tem óleo ou núcleo de ferro, possui design modular, barato e simplicidade em construção e instalação. Além disso, como estes reatores possuem propriedades elétricas lineares e nenhuma questão relativa a corrente de *inrush*, sua implementação é mais simples que equipamentos imersos à óleo ([BASHA; THOMPSON, 2013](#)). Além disso, devido ao desenvolvimento tecnológico dos materiais e técnicas de construção, foram utilizados reatores do tipo seco com núcleo de ar em sistemas de transmissão até 345 kV, inclusive em [Papp et al. \(2014\)](#) e [Bastard et al. \(2016\)](#).

Com base no contexto explanado na seção anterior e nas vantagens decorrentes da utilização de reatores do tipo seco com núcleo de ar, este trabalho apresenta uma proteção diferencial inovadora, que foi adaptada a partir do algoritmo de [Peres \(2019\)](#). A solução proposta baseia-se apenas na corrente de sequência zero (calculada através das correntes medidas na bucha do reator) e na corrente obtida no neutro, eliminando assim a necessidade de TPs. Além disso, o algoritmo proposto ainda incorpora uma função, que detecta a ocorrência de distúrbios de natureza interna ou externa ao reator.

## 4 Algoritmo Adaptado

Neste trabalho, o algoritmo de proteção diferencial proposto por [Peres \(2019\)](#) é adaptado para ser empregado na proteção de reatores *shunt*. Ressalta-se que uma das sugestões de trabalhos futuros descritas ao final de [Peres \(2019\)](#) foi justamente avaliar o emprego do algoritmo proposto em outros equipamentos elétricos. Essa sugestão foi investigada e são descritas, neste capítulo, as adaptações necessárias para aplicação da proteção em reatores *shunt*. Diferentemente do algoritmo original, que compara as correntes de sequência negativa do lado de baixa e de alta do transformador, no presente trabalho, para a utilização em reatores, a função diferencial compara as correntes de sequência zero no lado da bucha com a corrente de neutro, sendo o neutro solidamente aterrado nesse equipamento. O algoritmo proposto ainda incorpora uma função, que detecta a ocorrência de distúrbios de natureza interna ou externa ao reator. O presente algoritmo foi dividido em blocos, como exibido no fluxograma da Figura 4.1, no qual o subscrito  $\phi$  representa as fases A, B ou C; o subscrito  $N$  representa o neutro. Os blocos apresentados no fluxograma e suas funcionalidades são descritas nas próximas seções.

### 4.1 Normalização dos Sinais

Devido às diferenças nas relações de transformação (RTC) dos TCs, os sinais de corrente medidos devem ser normalizados para p.u. da corrente nominal do reator *shunt*. Para isso, no bloco *Normalização dos Sinais*, as correntes de entrada, aferidas pelos TCs das fases no reator e no TC de neutro são normalizados pela corrente nominal do reator. Desse modo, as referências de entrada  $i_{F\phi_u}$  e  $i_{N_u}$  devem ser divididas por  $TAP_e$  para determinação das grandezas normalizadas,  $i_{F\phi}$  e  $i_N$ , conforme definido na Equação (4.1).

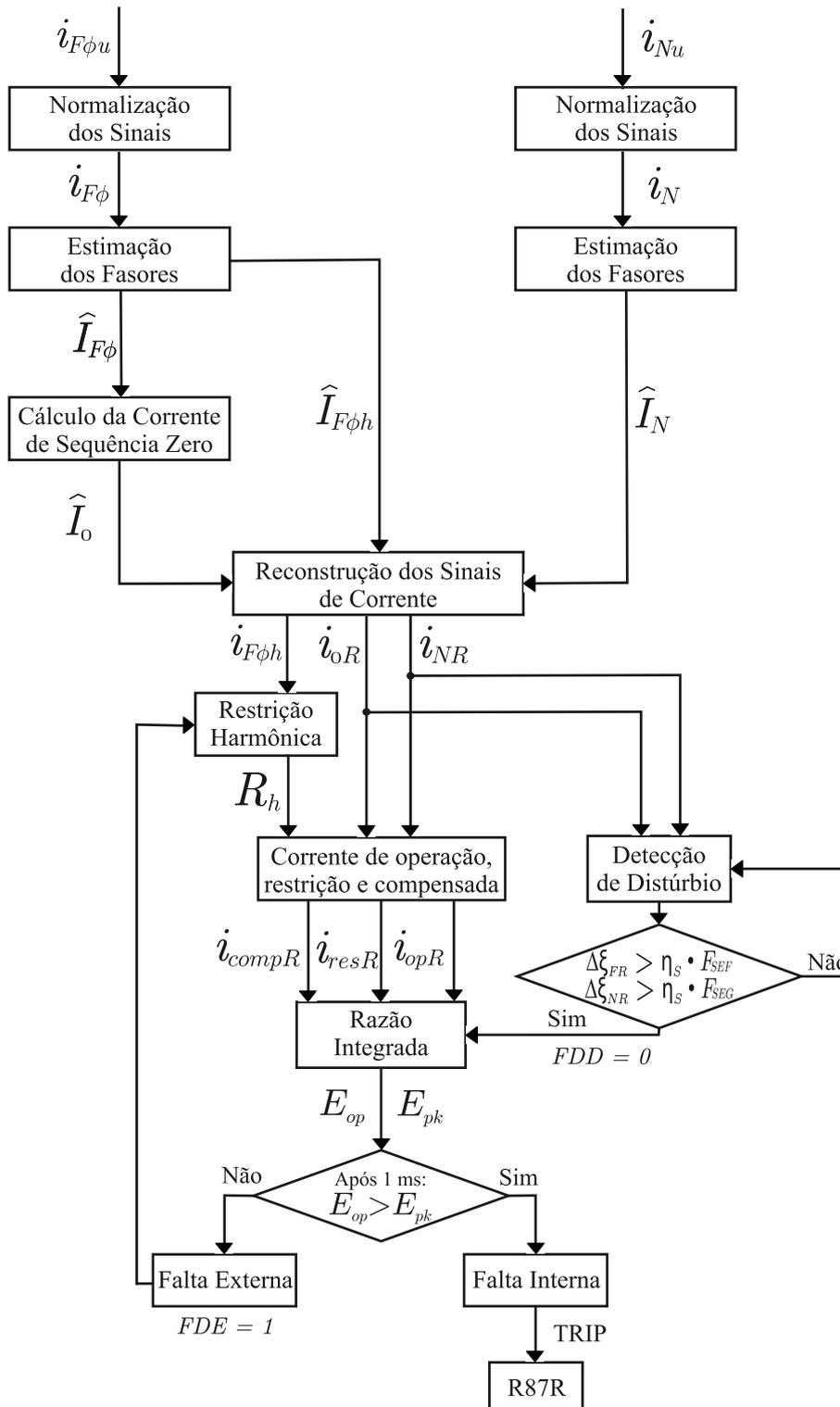
$$TAP_e = \frac{1000 \cdot S_b}{\sqrt{3} \cdot V_\phi \cdot RTC_e}, \quad (4.1)$$

sendo  $S_b$  a potência aparente trifásica do reator;  $V_\phi$  a tensão nominal de linha do reator;  $e$  o índice que indica o enrolamento para qual o  $TAP_e$  está sendo calculado (fase A, B, C ou neutro); e  $RTC_e$  a relação de transformação do TC conectado a  $e$ .

### 4.2 Estimação de Fasores

No bloco *Estimação de Fasores*, é utilizado o Filtro Cosseno Modificado, devido a sua capacidade de remoção de componentes DC de decaimento exponencial ([KÜSEL, 2014](#)). Esse algoritmo é baseado na ortogonalidade da saída do filtro cosseno Fourier de

Figura 4.1 – Diagrama de blocos do algoritmo usado.



Fonte: Autor

um ciclo para as janelas de dados atual e um quarto de ciclo atrasada, o qual permite a estimação de fasores, sendo necessário para isso aplicar um fator de correção (HART et al., 2000). Assim, as correntes domínio do tempo  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  e  $i_N$  são utilizadas para calcular as correntes no domínio da frequência fundamental  $\hat{I}_A$ ,  $\hat{I}_B$ ,  $\hat{I}_C$  e  $\hat{I}_N$ .

Contudo, pelo reator *shunt* assemelhar algumas características ao transformador, será necessário a medição da segunda e quinta harmônica para evitar atuações indevidas durante situações de energização e sobreexcitação. Logo estima-se os fasores  $\hat{I}_{Ah}$ ,  $\hat{I}_{Bh}$ ,  $\hat{I}_{Ch}$  e  $\hat{I}_{Nh}$ , os quais posteriormente serão utilizados para restrição de harmônicos (KÜSEL, 2014).

### 4.3 Cálculo da Corrente de Sequência Zero e Análise da Corrente de Neutro

No bloco *Cálculo da Corrente de Sequência Zero*, as correntes do lado da bucha no reator  $\hat{I}_\phi$  são utilizadas para o cálculo do fasor  $\hat{I}_0$ . Portanto, o cálculo das componentes simétricas é realizada a partir da transformação de *Fortescue*, conforme a Equação 4.2.

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & (1\angle 120^\circ)^2 & 1\angle 120^\circ \\ 1 & 1\angle 120^\circ & (1\angle 120^\circ)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Com base na equação (4.2), é possível calcular a corrente de sequência zero correspondente a  $\hat{I}_0$  (lado da bucha), como é apresentado na Equação (4.3),

$$\hat{I}_0(k) = \frac{\hat{I}_A(k) + \hat{I}_B(k) + \hat{I}_C(k)}{3}, \quad (4.3)$$

em que  $k$  representa o instante de amostragem.

Sobre a corrente de neutro, ressalta-se que para aplicação da lógica proposta seja correta para todos os casos de faltas espira-terra, entre-espiras e de faltas externas, a corrente de neutro deverá ser analisada. Nessa avaliação, caso a corrente de neutro possua ângulo positivo, a mesma deverá ser multiplicada por  $-1$ . Maiores explicações serão expostos na seção 4.9.

### 4.4 Reconstrução dos sinais de corrente

Na intenção de tornar a operação mais veloz e segura, nesse bloco *Reconstrução dos sinais de corrente*, foi reconstruída a corrente de sequência zero ( $\hat{I}_0$ ), próximo da bucha, e a corrente de neutro ( $\hat{I}_N$ ), a fim de verificar o comportamento dos sinais com uma técnica de integração baseada no domínio do tempo. Ressalta-se que, nas funções no

domínio do tempo, os sinais analisados são integrados para que a proteção possa atuar de forma confiável e segura (PERES, 2019). Assim, o fasor corrente de sequência zero  $\hat{I}_0$  é reconstruído no tempo, conforme descrito na Equação (4.4), resultando no sinal de corrente  $i_{0R}$ , o mesmo é feito para o fasor corrente de neutro, em (4.5):

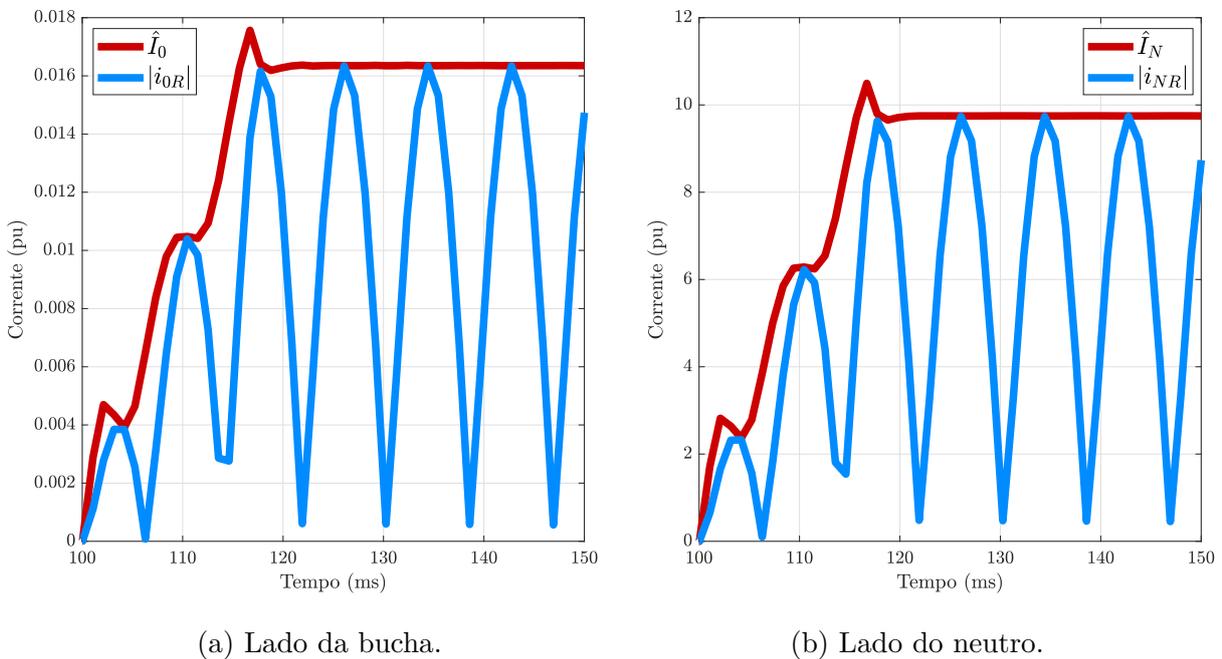
$$i_{0R}(k) = \hat{I}_0(k) \cdot \cos[\omega t_k + \alpha_\phi(k)], \quad (4.4)$$

$$i_N(k) = \hat{I}_N(k) \cdot \cos[\omega t_k + \alpha_\phi(k)], \quad (4.5)$$

em que  $\omega$  é a frequência angular;  $t_k = k\Delta t$ , sendo  $\Delta t$  o intervalo de amostragem, calculado como  $\Delta t = \frac{1}{Nf}$ ,  $f$  é a frequência fundamental e  $N$  é o número de amostras por ciclo.

Para ilustrar o procedimento de reconstrução, o módulo da corrente de sequência zero reconstruída e o módulo da corrente de neutro reconstruída,  $|i_{0R}|$  e  $|i_{NR}|$ , e os módulos dos fasores correspondentes  $\hat{I}_0$  e  $\hat{I}_N$ , são exibidos na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Reconstrução no tempo das correntes de sequência zero e neutro.



Fonte: Autor.

Os fasores  $I_{0h}$  e  $I_{Nh}$  de comportamento harmônico também são reconstruídos no tempo, mas de forma diferente do fasor de corrente de sequência zero e corrente de neutro. Os sinais restabelecidos não apresentarão lóbulos desiguais (um maior e outro menor), os sinais  $i_{0\phi h}$  e  $i_{N\phi h}$  são obtidos considerando o módulo das componentes harmônicas  $I_{0h}$  e

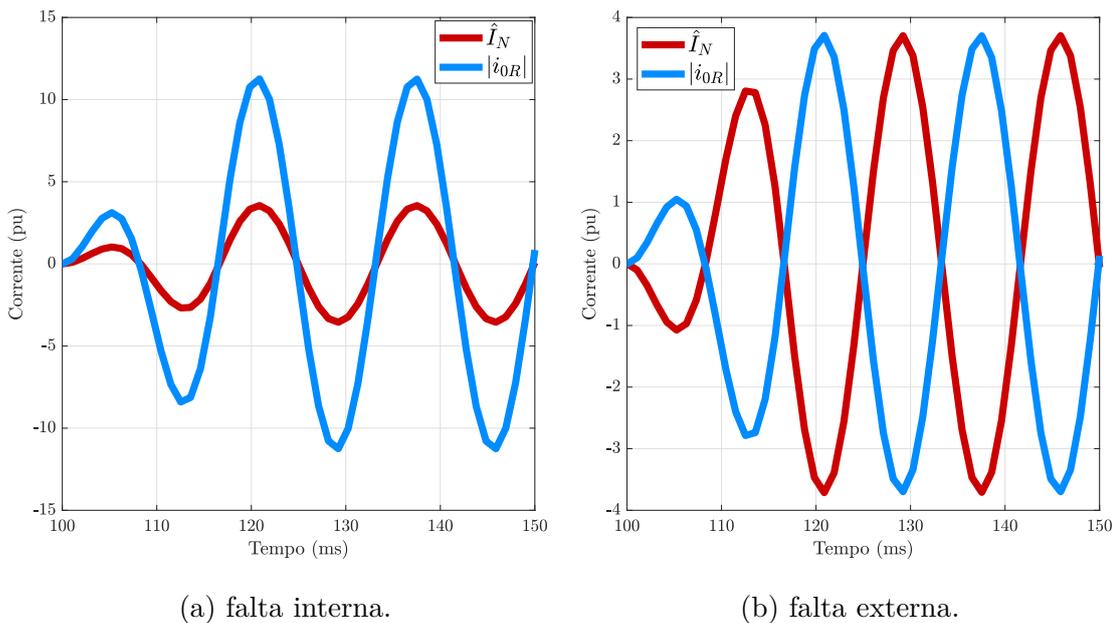
$I_{Nh}$ , mas usando a frequência e a fase fundamental, respectivamente.

$$i_{0\phi h}(k) = I_{0h}(k) \cdot \cos[\omega t_k + \alpha_{0\phi 1}(k)] \quad (4.6)$$

$$i_{N\phi h}(k) = I_{Nh}(k) \cdot \cos[\omega t_k + \alpha_{\phi N1}(k)] \quad (4.7)$$

Para exemplificar o comportamento dos sinais  $|i_{0R}|$  e  $|i_N|$  para faltas internas e externas é apresentado a Figura 4.3a e 4.3b, respectivamente. Para uma falta interna ao reator foi aplicado, após um tempo de 100 ms, um curto-circuito espira-terra em uma única fase do reator. Para a falta externa foi aplicado um curto-circuito monofásico, após 100 ms próximo a bucha do reator *shunt*. Nota-se que as correntes estão em fase e, para uma falta externa, conforme na Figura 4.3b, as correntes estão em contra fase. Essa característica é justificada devido à homogeneidade do sistema de sequência zero, apesar dessa homogeneidade ser menor em relação ao elemento de sequência negativa (KASZTENNY et al., 2019). Assim, segundo Benmouyal e Lee (2004), para faltas externas tem-se o surgimento de harmônicas de segunda ordem - caracterizando assim os TCs saturados. Nesse sentido, pode-se verificar a rotação do fasor de sequência em até 180° de modo que a corrente de sequência zero reconstruída  $i_{0R}$  fica em contra fase com a corrente de neutro reconstruída  $i_{NR}$ , como é visto na Figura 4.3b.

Figura 4.3 – Correntes de sequência zero reconstruídas para:



Fonte: Autor.

## 4.5 Detecção de Distúrbio

No algoritmo adaptado, o bloco *Detecção de Distúrbio* é implementado por meio da adaptação do algoritmo de detecção de transitórios de [Lopes et al. \(2013\)](#), modificando a análise original feita pelas energias dos coeficientes de transformação de Park pelas correntes de sequência zero e neutro. O algoritmo para detecção de distúrbio de [Lopes et al. \(2013\)](#) foi escolhido, pois permite uma detecção no domínio do tempo, segura e sofisticada, com base na identificação de transitórios. Com isso, são calculadas as energias dos sinais de corrente de sequência zero de neutro para os enrolamentos da bucha (0R) e de neutro (NR) do reator. Esse cálculo utiliza uma janela de dados móvel no tempo que deslizará sobre os sinais de corrente em que a cada iteração se atualizará novas amostras. As energias dos sinais de corrente de sequência zero no enrolamento da bucha ( $\xi_{0R}$ ) e de corrente de neutro ( $\xi_{NR}$ ) do reator são calculadas conforme descrito nas Equações(4.8) e (4.9).

$$\xi_{0R}(k) = \sum_{n=k-\Delta k_{\xi}-1}^k [i_{0R}(n)^2] \quad (4.8)$$

$$\xi_{NR}(k) = \sum_{n=k-\Delta k_{\xi}-1}^k [i_{NR}(n)^2] \quad (4.9)$$

no qual  $\Delta k_{\xi}$  é o tamanho da janela, igual a N amostras.

De acordo com a lógica de detecção de distúrbio, será caracterizada a ocorrência de transitórios, caso ocorram variações abruptas nas energias  $\xi_{0R}$  e  $\xi_{NR}$ . Nesse sentido, duas janelas, uma longa  $\Delta_{LONG}$  e uma curta  $\Delta_{CURT}$ , percorrem as energias com o objetivo de verificar a existência de variações significativas. Ademais, é definido um limiar para detecção dos crescimentos abruptos das energias calculadas. Esse limiar é tal que seus valores são atualizados a cada iteração, a partir dos dados de regime permanente ([LOPES et al., 2013](#)). O limiar utilizado, denominado de Fator de Sensibilidade, é definido para os enrolamentos da bucha  $F_{SE_{0R}}$  e de neutro  $F_{SE_{NR}}$ , conforme descrito nas Equações (4.10) e (4.11).

$$F_{SE_{0R}}(k) = \frac{\max[\xi_{0R}(k - \Delta_{LONG} - \Delta_{CURT} + 1), \dots, \xi_{0R}(k - \Delta_{CURT})]}{\min[\xi_{0R}(k - \Delta_{LONG} - \Delta_{CURT} + 1), \dots, \xi_{0R}(k - \Delta_{CURT})]} \quad (4.10)$$

$$F_{SE_{NR}}(k) = \frac{\max[\xi_{NR}(k - \Delta_{LONG} - \Delta_{CURT} + 1), \dots, \xi_{NR}(k - \Delta_{CURT})]}{\min[\xi_{NR}(k - \Delta_{LONG} - \Delta_{CURT} + 1), \dots, \xi_{NR}(k - \Delta_{CURT})]} \quad (4.11)$$

sendo  $\Delta_{LONG}$  igual a N amostras;  $\Delta_{CURT}$  igual a N/4 amostras; *max* e *min* são funções que retornam os valores máximos e mínimos das energias  $\xi_{0R}$  e  $\xi_{NR}$ , respectivamente,

no intervalo descrito. A janela curta se dá adjacente a janela longa, para possibilitar a detecção das variações abruptas de  $\xi_{0R}$  e  $\xi_{NR}$ . Desse modo, as razões entre a amostra inicial e a final armazenadas na janela curta, denominadas  $\Delta\xi_{0R}$  e  $\Delta\xi_{NR}$ , são descritos nas Equações (4.12) e (4.13).

$$\Delta\xi_{0R}(k) = \frac{\xi_{0R}(k)}{\xi_{0R}(k - \Delta_{CURT} + 1)} \quad (4.12)$$

$$\Delta\xi_{NR}(k) = \frac{\xi_{NR}(k)}{\xi_{NR}(k - \Delta_{CURT} + 1)} \quad (4.13)$$

Em regime permanente  $\xi_{0R}$  e  $\xi_{NR}$  serão considerados, aproximadamente iguais a zero, obtendo um distúrbio caracterizado por crescimentos abruptos dos valores calculados das energias de sequência zero e de neutro. Em seguida, os valores das energias  $F_{SE_{0R}}$  e  $F_{SE_{NR}}$  são comparados aos valores de  $\Delta\xi_{0R}$  e  $\Delta\xi_{NR}$ , respectivamente. Além disso, os valores de  $F_{SE_{0R}}$  e  $F_{SE_{NR}}$  serão ainda multiplicados por uma margem de segurança ( $\eta_S$ ), o qual proporcionará a detecção com mais ou menos sensibilidade. Conseqüentemente, o distúrbio é detectado atendendo ao menos uma das condições descritas nas equações (4.14) ou (4.15). As análises serão implementadas de modo semelhante ao feito por Peres (2019) em que na ocorrência de uma perturbação no reator *shunt* ou próximo do mesmo haverá a atuação da detecção do distúrbio. Assim, quando a perturbação é detectada, a variável Detecção de Distúrbio ( $FDD$ ) será igual a 1. Ressalta-se que após um ciclo da ativação de  $FDD$ , essa variável deve retornar ao valor de 0, a fim de resguardar a identificação de distúrbios consecutivos e o correto cálculo da razão integrada de operação. No caso de uma falta externa, a variável *flag* de distúrbio externo ( $FDE$ ) assume o estado lógico 1.

$$\Delta\xi_{0R}(k) > \eta_S F_{SE_{0R}} \quad (4.14)$$

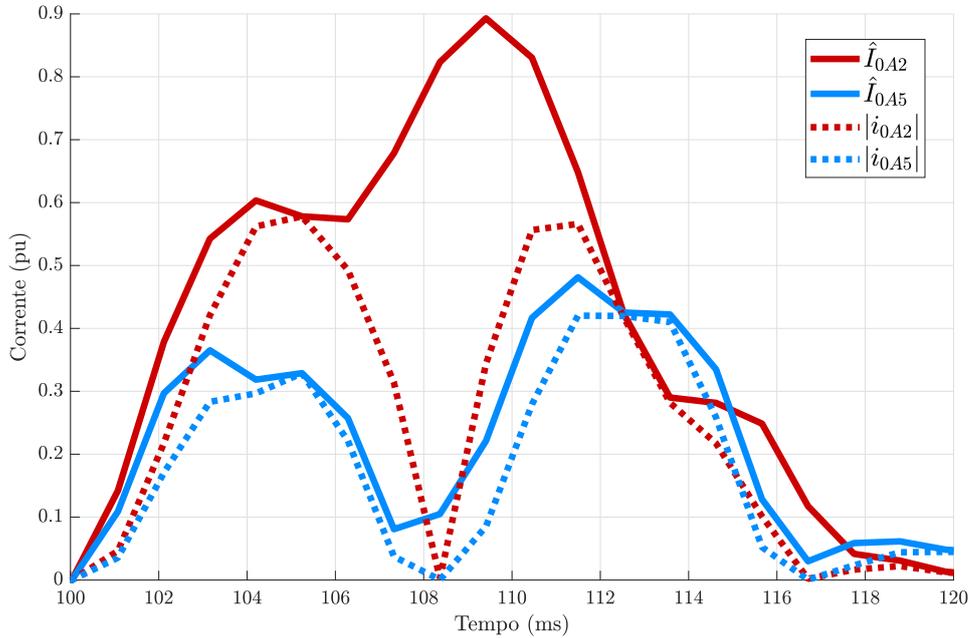
$$\Delta\xi_{NR}(k) > \eta_S F_{SE_{NR}} \quad (4.15)$$

sendo  $\eta_S$  igual a 1,1. Esse valor foi determinado empiricamente para o sistema analisado, e sua definição parte do nível de sensibilidade desejada para o sistema.

## 4.6 Restrição Harmônica

A aplicação do bloco Restrição Harmônica propõe melhorar a segurança na atuação do esquema de diferencial de sequência zero, pois durante faltas externas é possível que ocorra a saturação do TC, com isso atuações indevidas da proteção. Conforme Peres (2019), este trabalho utiliza um sinal de restrição harmônica ( $R_h$ ) para complementar a

Figura 4.4 – Reconstrução no tempo das componentes harmônicas de segunda e quinta ordens.



Fonte: Autor

corrente de restrição, sendo feito pela soma das componentes harmônicas reconstruídas de segunda e quinta ordem, conforme descrito na equação 4.16

$$R_h(k) = \sum_{\phi=1}^3 [(100/k_2)(|i_{0\phi 2}(k)| + |i_{NR\phi 2}(k)|) + (100/k_5)(|i_{0\phi 5}(k)| + |i_{NR\phi 5}(k)|)] \quad (4.16)$$

Para o entendimento do processo de reconstrução dos sinais harmônicos de segunda e quinta ordens utilizados na restrição de harmônica, são ilustrados na Figura 4.4 os módulos dos sinais e dos fasores. Após essa reconstrução dos sinais de sequência zero e de neutro, em que são alinhados a uma mesma frequência e fase fundamental, a soma dessas componentes permite a obtenção de sinais com lóbulos comportados. Foi considerado apenas os sinais de corrente da fase A do enrolamento da bucha.

## 4.7 Correntes de Operação, Restrição e Compensada

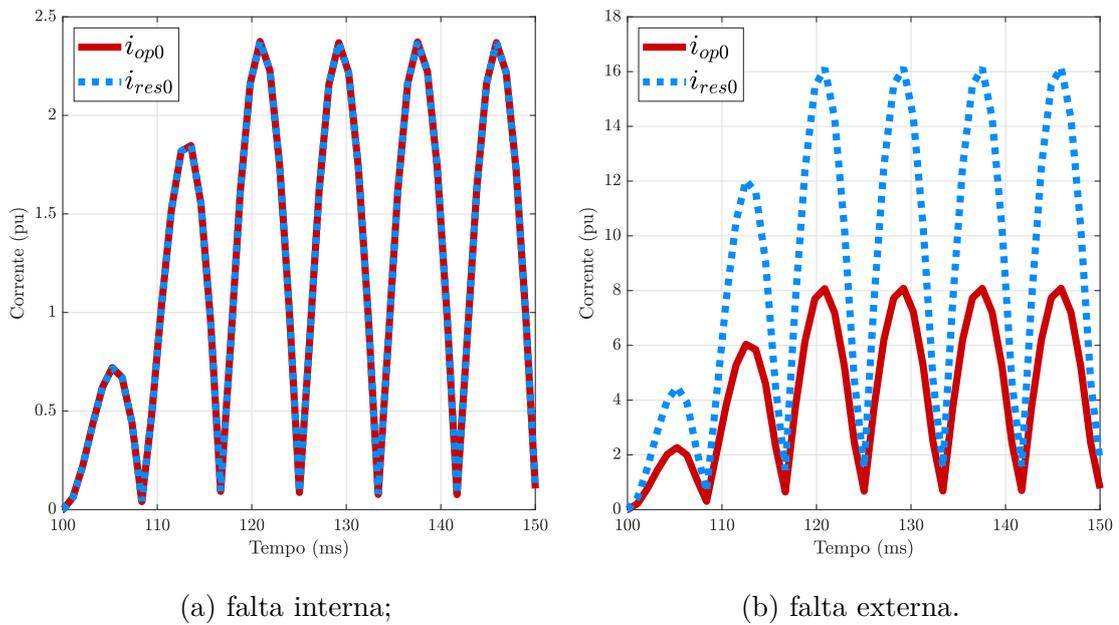
No seguinte bloco,  $i_{0R}$  e  $i_{NR}$  são usados para calcular os sinais de corrente de operação e de restrição  $i_{opR}$  e  $i_{resR}$  conforme indicado nas Equações 4.17 e 4.18, respectivamente.

$$i_{opR}(k) = |i_{0R}(k) + i_{NR}(k)| \quad (4.17)$$

$$i_{resR}(k) = |i_{0R}(k)| + |i_{NR}(k)| \quad (4.18)$$

O comportamento das correntes  $i_{opR}$  e  $i_{resR}$  foi avaliado para ocorrência de curtos-circuitos interno e externo e esses resultados são apresentados nas Figuras 4.5a e 4.5b, nessa ordem. Nota-se que os sinais de corrente são sobrepostos para as faltas internas, sendo a corrente  $i_{opR}$  menor que a corrente  $i_{resR}$  para faltas externas. Essa característica ocorre em função da homogeneidade do sistema de sequência zero, apesar de menor em relação ao elemento de sequência negativa (KASZTENNY et al., 2019).

Figura 4.5 – Comportamento das correntes de operação e restrição calculadas para:



Fonte: Autor.

A corrente  $i_{resR}$  somada ao sinal restrição  $R_h$  (calculado conforme apresentado na seção 4.6) é denominada como corrente de sequência zero compensada ( $i_{compR}$ ). Essa corrente é empregada na lógica do algoritmo durante a detecção de perturbações externas, habilitando assim a estratégia de restrição harmônica. Para tanto a variável *Flag de Distúrbio Externo* (FDE) deve ser igual a 1. Sendo assim, o algoritmo proposto utilizará a corrente  $i_{compR}$  ao invés de  $i_{resR}$ .

$$i_{compR}(k) = i_{resR}(k) + FDE \cdot R_h(k) \quad (4.19)$$

## 4.8 Razão Integrada

O algoritmo proposto utiliza as correntes  $i_{opR}$  e  $i_{compR}$  para calcular a razão integrada de operação ( $E_{op}$ ). A razão é definida pela divisão entre as correntes  $i_{opR}$  e  $i_{compR}$ , obtendo um resultado integrado, conforme descrito na Equação 4.20. Nota-se que  $E_{op}$  só passa a ser calculada quando uma perturbação é detectada, ou seja, quando  $FDD=1$ .

$$E_{op}(k) = FDD \cdot [E_{op}(k-1) + \frac{i_{opR}(k)}{i_{compR}(k)}] \quad (4.20)$$

A Figura 4.6 ilustra que a razão integrada entre as correntes  $i_{opR}$  e  $i_{compR}$  é aproximadamente igual a 1, e que  $E_{op}$  cresce ao longo do tempo. Quando verificada esta razão para uma falta externa, verifica-se que o resultado da divisão entre as correntes é muito pequeno, menor do que 0,01 e, que  $E_{op}$  também cresce ao longo do tempo, porém com valores bem menores do que para curtos internos.

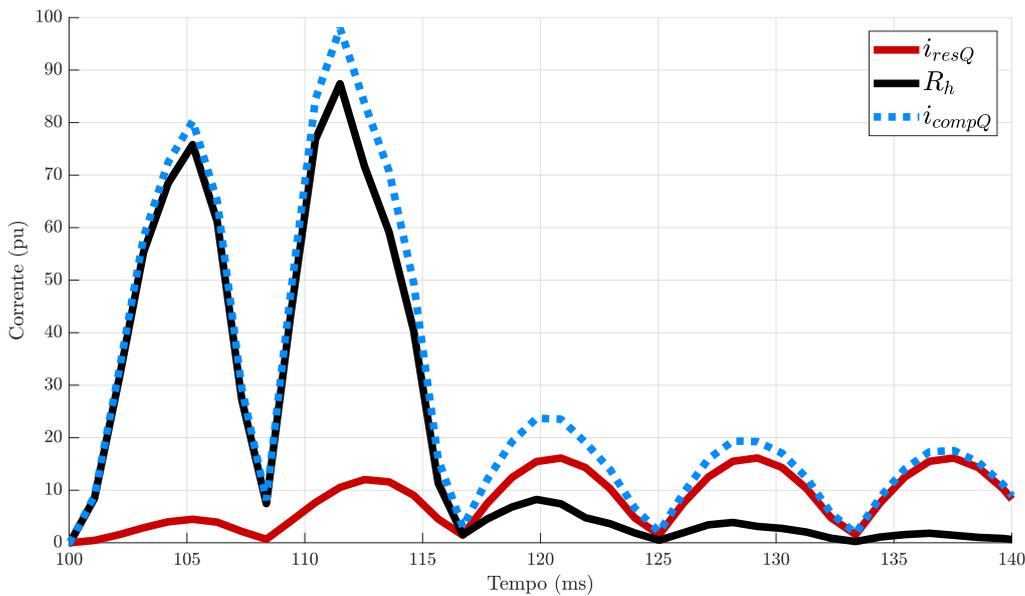


Figura 4.6 – Correntes de restrição, compensada e restrição harmônica ( $R_h$ ).

Na pretensão de verificar o comportamento de  $E_{op}$ , foram simulados curtos-circuitos interno e externo. Para determinar a sensibilidade do algoritmo implementado, é considerado um limiar mínimo de atuação, o qual tem como valor 0,6. Visando adequar-se melhor ao comportamento de  $E_{op}$ , esse valor é acumulado ao longo do tempo, sendo denominado de  $E_{pk}$ , o qual só começa a ser calculado quando um distúrbio é detectado,  $FDD=1$ .

$$E_{pk}(k) = FDD \cdot [E_{pk}(k-1) + 0,6], \quad (4.21)$$

sendo que, o valor de 0,6 foi definido em função do estudo do comportamento de  $E_{op}$  para faltas internas e externas.

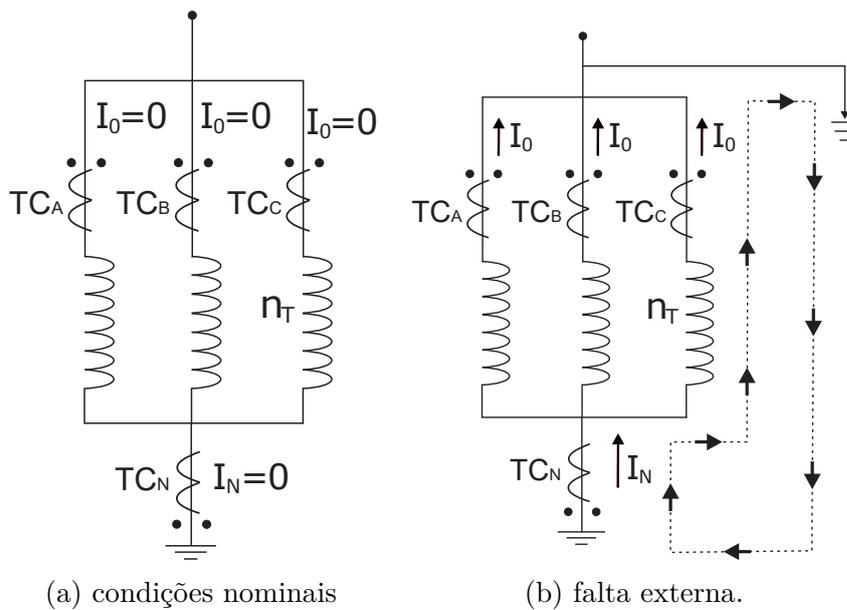
Caso nenhuma perturbação seja detectada ( $FDD = 0$ ),  $E_{op}$  e  $E_{pk}$  permanecem iguais a 0 (zero). Contudo, se for constatado uma perturbação ( $FDD = 1$ ),  $E_{op}$  e  $E_{pk}$  são calculados usando as Equações 4.20 e 4.21, respectivamente. Após 1 ciclo da detecção do distúrbio,  $FDD$  é resetada (isto é,  $FDD = 0$ ), a fim de assegurar a identificação de distúrbios consecutivos e o correto cálculo da razão integrada de operação.

## 4.9 Lógica de TRIP

No bloco *Lógica de trip* implementa-se a lógica principal, pois é nele que as razões integradas são comparadas, resultando na atuação ou não da proteção diferencial empregada. Assim, as entradas  $E_{op}$  e  $E_{pk}$  são utilizadas para determinar a sua saída, a qual poderá acarretar ou não no comando de abertura dos disjuntores equivalente ao trip e denominado de 87R0. Ressalta-se que em condições normais de operação a variável 87R0 é definida igual a 0.

A seguir, são apresentados os comportamentos das correntes de curto-circuito interno e externo, no intuito de melhor esclarecer o funcionamento da lógica de Peres (2019) adaptada para análise de correntes de sequência zero e neutro em reatores shunt de núcleo de ar tipo seco.

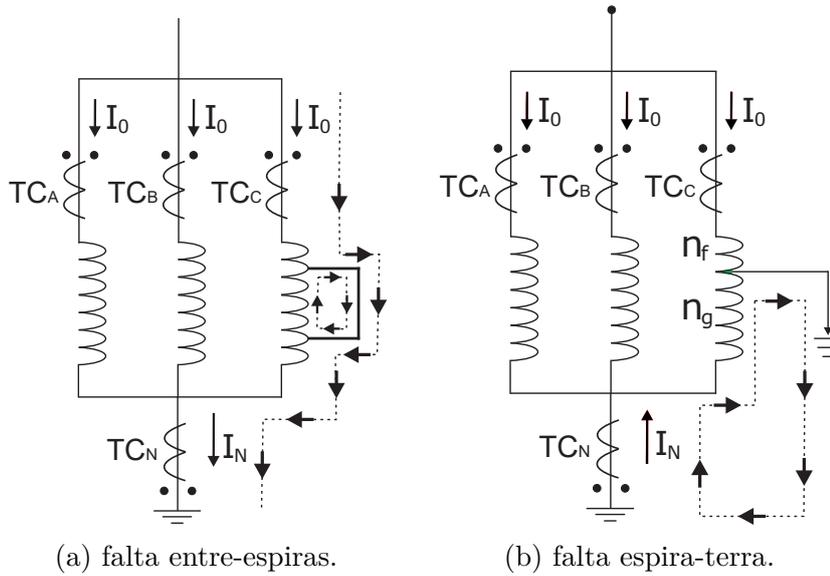
Figura 4.7 – Comportamento da corrente em:



Fonte: Ribeiro et al. (2020).

Em condições normais de operação, conforme a Figura 4.7a, as correntes de sequência zero e neutra são aproximadamente iguais a zero (dado um sistema equilibrado). Para

Figura 4.8 – Comportamento da corrente em:



Fonte: [Ribeiro et al. \(2020\)](#).

um falta externa, como apresentado na Figura 4.7b, a corrente de sequência zero flui para fora dos terminais de fase, enquanto a corrente de neutro flui para dentro terminal do neutro. Nesse sentido, a partir do cálculo dos sinais, de  $E_{op}$  e  $E_{pk}$ , conforme a (4.20) e (4.21), verifica-se que a condição (4.22) não é satisfeita, logo não há envio do *trip*.

Em condição de falta entre espiras, a corrente de sequência zero flui para dentro dos terminais de fase e a corrente de neutro flui para fora do terminal do neutro, como exibido na Figura 4.8a. Nesta condição, se  $i_{resR}$  for maior que  $i_{opR}$ , a (4.22) poderá ter um valor menor, levando a necessidade de uma análise minuciosa para definição do limiar mínimo de atuação. Assim, a (4.22) será atendida.

Em faltas espira-terra, a corrente de sequência zero flui para dentro dos terminais de fase e a corrente de neutro flui para dentro do terminal de neutro, conforme ilustrado na Figura 4.8b. Para essa condição, a razão entre as correntes de  $i_{opR}$  e  $i_{resR}$  serão integradas e resultará um valor  $E_{op}$  superior ao  $E_{pk}$ . Assim, a condição (4.20) será atendida, havendo a atuação da proteção.

Diante dessas situações operacionais conclui-se que a corrente de neutro, em faltas entre-espiras,  $I_N$  apenas flui para fora do terminal neutro. Assim, para identificar este tipo de falta, o ângulo da corrente de neutro deverá ser a única variável considerada. Dessa forma, conforme exposto na seção 4.3, quando o ângulo de corrente de neutro for positivo, isso corresponde a uma falta entre-espiras, nesse caso a corrente de neutro deverá ser multiplicada  $-1$ .

Para validar a conclusão, foi realizado, a partir do ATP, diferentes tipos de faltas espira-terra e entre-espiras. Em todas as simulações, o ângulo da corrente de neutro foi

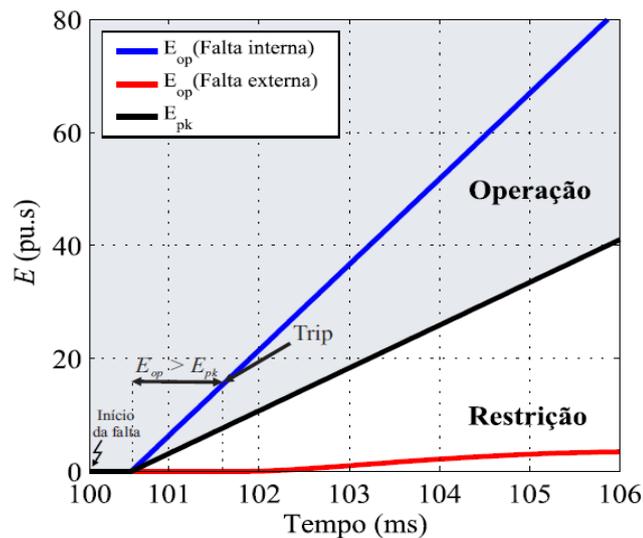
avaliado e verificou, empiricamente, que, apenas para faltas entre-espiras,  $\theta_N$  era maior que zero.

$$E_{op}(k) > E_{pk}(k) \quad (4.22)$$

Resumidamente o esquema utilizado funciona da seguinte forma: se pelo menos uma das condições das Equações 4.14 e 4.15 é satisfeita, um distúrbio é detectado e o valor de  $FDD$  enviado é igual a 1 (um). Inicia-se assim o cálculo de  $E_{op}$  e  $E_{pk}$  a partir das Equações 4.20 e 4.21. É utilizado um contador de incremento para registrar o tempo decorrido após a detecção de distúrbio. Então, se o tempo de 1 ms for atingido e a condição 4.22 for satisfeita, uma falta interna no reator é declarada, caso contrário, um distúrbio externo (faltas, manobras de chaveamento) é declarado. Como  $E_{pk}$  é calculado ao longo do tempo, é formada uma região de operação, localizada acima de  $E_{pk}$ , e outra região de restrição, abaixo de  $E_{pk}$ . Nota-se que com a ocorrência de uma falta interna, um curto-circuito entre espiras e espira-terra,  $E_{op}$  se deslocará em direção a região de operação. Quando uma falta interna é detectada, um comando de trip é enviado para a abertura dos disjuntores, ou seja, o estado da variável 87R0 altera de 0 (zero) para 1 (um).

Na Figura 4.9, é observado que duas regiões são formadas entre  $E_{pk}$ , região de operação e de restrição. Para uma falta interna, por exemplo,  $E_{op}$  se deslocará em direção à região de operação, ou seja, o estado da variável de R870R altera-se de 0 (zero) para 1 (um). Todavia, para uma falta externa  $E_{op}$  deslocará em direção à região de restrição, a depender do valor empírico de segurança definido.

Figura 4.9 – Avaliação da lógica de *trip*.



Fonte: (PERES, 2019).



## 5 Análise dos Resultados

A fim de analisar o desempenho do algoritmo proposto, foi avaliado o comportamento da proteção diferencial proposta para um sistema elétrico, no qual um reator *shunt* opera em diversas situações de curtos-circuitos internos, do tipo espira-terra e do tipo entre-espiras, ou externos. Para essas análises, foi modelado e simulado no *software* ATP um sistema elétrico contendo reatores *shunt* com núcleo a ar do tipo seco. Os sinais de entrada avaliados, para implementação do algoritmo proposto, são obtidos a partir das correntes no secundário dos TCs que, posteriormente, são filtrados por meio de um filtro passa-baixas do tipo *Butterworth* de terceira ordem com frequência de corte em 180 Hz, no intuito de se evitar o efeito de sobreposição de espectro. Desta forma, os sinais obtidos do ATP são reamostrados a uma taxa de 1600 amostras por ciclo e utilizados no algoritmo proposto. É importante ressaltar que foram realizadas adaptações do algoritmo de [Peres \(2019\)](#) para as simulações e a plotagem de gráficos para análise.

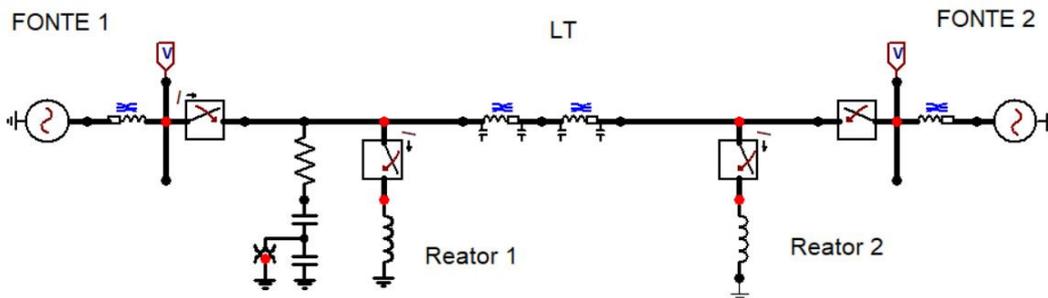
### 5.1 Sistema Analisado

O desempenho do algoritmo proposto, denominado função 87R0, é avaliado por meio da análise de diferentes tipos de curtos-circuitos, os quais foram aplicados ao reator *shunt* modelado no *software* ATP. Foi modelado um sistema elétrico composto por uma linha de 230 kV, 60 Hz e 380 km de comprimento, com 50% de compensação *shunt*. Esses reatores são instalados nos terminais da linha, conforme apresentado na Figura 5.1, e possuem juntos potência nominal igual a 10,25 Mvar. Diferentes casos de faltas internas são aplicadas ao reator, dos tipos entre-terra e entre-espira, os quais são obtidos variando-se os valores de dispersão e também a quantidade de espiras envolvidas. Os sinais de entrada utilizados são as correntes de fase medidas nos terminais do reator (próximo à bucha) e no terminal neutro, medidas por meio dos TCs C400. Além disso, A relação de transformação (RTC) dos TCs de fase e de neutro são 1200/5 e 200/5, respectivamente ([RIBEIRO et al., 2020](#)).

Apresenta-se na Figura 5.2 o modelo empregado para aplicação de faltas espira-terra e entre-espiras. Os TCs são conectados a fim de medir as correntes que entram e saem no reator. Além disso, foi utilizado um modelo de reator desenvolvido por [Ribeiro \(2020\)](#), no qual se implementa a análise matemática descrita em [Bastard et al. \(1994\)](#), por meio do elemento *RL Coupled* trifásico do *software* ATP. Conforme ilustrado na Figura 5.2, para a implementação do elemento *RL Coupled*, realiza-se a conexão em série dos três subenrolamentos, ligando S1 em E2 e S2 em E3. Por fim, esse conjunto é conectado em série ao restante do reator por meio da entrada E1 e da saída S3. Posteriormente, são

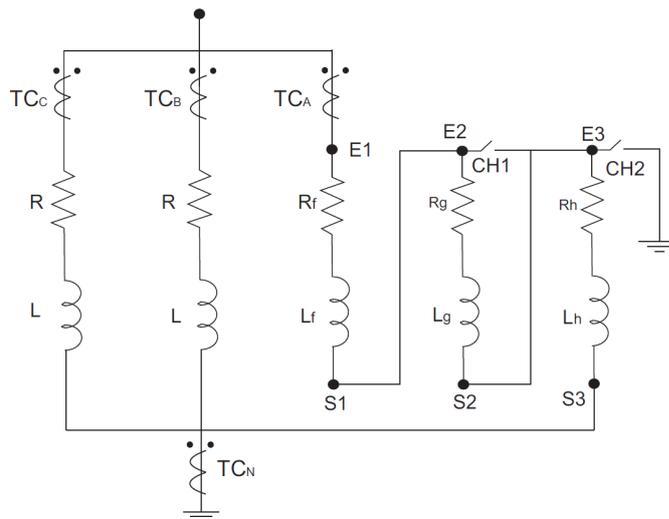
adicionados as chaves CH1 e CH2, as quais possibilitam simular curtos-circuitos espira-terra e entre-espiras, respectivamente. (RIBEIRO et al., 2020)

Figura 5.1 – Modelo simplificado do sistema elétrico analisado.



Fonte: (RIBEIRO, 2020)

Figura 5.2 – Modelo simplificado do Reator *Shunt* analisado.



Fonte: (RIBEIRO, 2020)

De acordo com Bastard et al. (1994), para a aplicação do curto-circuito espira-terra, a bobina intrínseca do reator é dividida em dois subenrolamentos, sendo que entre eles há uma chave para a conexão com a terra, como indicado na Figura 5.3a. Todavia, o modelo proposto por Ribeiro (2020), indicado na Figura 5.3b, divide a bobina do reator em três fases. Assim para que seja possível aplicar faltas do tipo espira-terra no modelo utilizado, nesses casos o subenrolamento central (com  $n_g$  espiras) é definido com uma impedância desprezível. No mais, para calcular a porcentagem de espiras envolvidas na falta espira-terra, a porcentagem total de espiras da bobina ( $n_T$ ) é dividida em um subenrolamento com  $f\%$  de espiras, a partir da bucha, denominado de  $n_f$ , e outro subenrolamento com  $h\%$  de espiras, intitulado  $n_h$ , tal que  $n_h = n_T - n_f$ . Assim, o subenrolamento  $n_f$  está

Figura 5.3 – Tipos de Curto-Circuito



Fonte: (RIBEIRO, 2020)

diretamente envolvido no curto-circuito, enquanto o subenrolamento  $n_h$  interfere devido à indutância mútua, mesmo que por ele não passe corrente.

Ainda de acordo com Bastard et al. (1994), para a aplicação de curto-circuito entre espiras, a bobina do reator é dividida em três partes, como ilustrado na Figura 5.3b. Assim, quando ocorre uma falta entre espiras, há passagem de corrente pelo subenrolamento  $n_f$  e também pelo subenrolamento com h% de espiras, denominado de  $n_h$ . Então fica curto-circuitado o subenrolamento central  $n_g$ , calculado como  $n_g = n_T - n_f - n_h$ .

## 5.2 Análise dos resultados

O algoritmo utilizado foi simulado em condições operacionais anormais, correspondentes a curto-circuitos espira-terra e entre-espiras. As situações de falta foram aplicadas apenas em uma fase e sempre em 100 ms, assim o comportamento da proteção diferencial foi observado entre 90 e 105 ms. Utilizaram-se neste trabalho diferentes casos de faltas internas a partir da variação do fator de dispersão e da quantidade de espiras envolvidas.

O fator de dispersão ( $\alpha$ ) é uma constante e pode assumir valores de 0 (zero) a 1 (um). Ele representa o quanto da corrente de curto-circuito se dispersa durante a falta. Quanto menor o valor do fator de dispersão (próximo a zero), menor será o fluxo de dispersão e, conseqüentemente, maiores as correntes de falta. Por outro lado, quanto maior o valor (próximo a um), maior será o fluxo de dispersão e, conseqüentemente, menores serão as correntes de falta. O fator de dispersão depende dos aspectos construtivos do reator e a porcentagem de espiras envolvidas. Desta forma, em faltas espira-terra, ele é definido como  $\alpha_{fg}$ ; por sua vez, em faltas entre-espira, são definidos como  $\alpha_{gh}$ ,  $\alpha_{fg}$  e  $\alpha_{fh}$  (BASTARD et al., 1994).

Além disso, para as faltas espira-terra, é avaliado a resistência de falta ( $R_f$ ) a qual ocorre entre o enrolamento e a parte aterrada do reator. Os parâmetros dos curtos-circuitos espira-terra e entre-espiras considerados estão descritos nas Tabelas 5.1 e 5.2,

respectivamente.

Tabela 5.1 – Curtos-circuitos espira-terra e suas características.

Caso	$\alpha_{fg}$	$n_f$	$n_h$	$R_f$
1	0,25	1%	99%	0
2	1,00	1%	99%	0
3	0,25	50%	50%	0
4	1,00	50%	50%	0
5	0,25	99%	1%	0
6	1,00	99%	1%	0
7	1,00	1%	99%	100
8	0,75	99%	1%	100

Fonte: Autor.

Tabela 5.2 – Curtos-circuitos entre espiras e suas características.

Caso	$\alpha_{fg}$	$\alpha_{gh}$	$\alpha_{fh}$	$f\%$	$g\%$	$h\%$
9	0,25	0,25	0,25	1%	1%	98%
10	0,80	0,80	0,80	1%	1%	98%
11	0,25	0,25	0,25	98%	1%	1%
12	0,80	0,80	0,80	98%	1%	1%
13	0,25	0,25	0,25	1%	98%	1%
14	1	1	1	1%	98%	1%
15	0,25	0,25	0,25	1%	25%	74%
16	0,25	0,50	0,75	49%	50%	1%

Fonte: Autor.

Com base na Tabela 5.1, os casos 1 e 2 correspondem a faltas espira-terra aplicadas próximas ao lado da bucha, com 99% de espiras curto-circuitadas ( $n_h = 99\%$ ). Esses casos são diferentes apenas pelo valor do fator de dispersão: no caso 1,  $\alpha_{fg} = 0,25$ , enquanto no caso 2,  $\alpha_{fg} = 1,00$ . Vale ressaltar que esses valores do fator de dispersão foram escolhidos para avaliar condições extremas desse índice, que resultam nas maiores e menores correntes de falta.

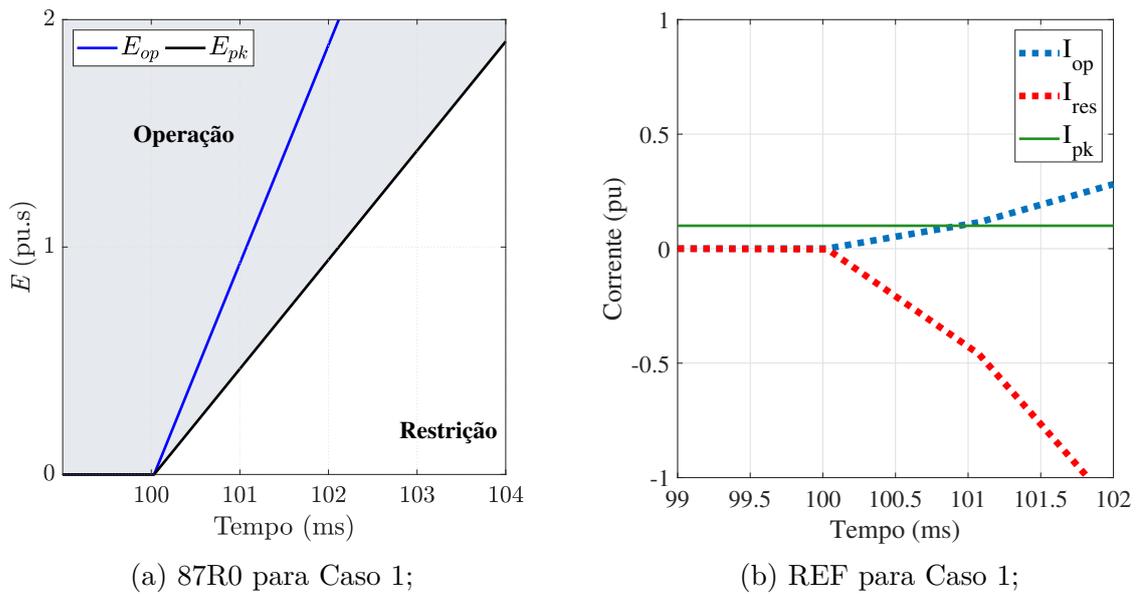
### 5.2.1 Curtos-circuitos Espira-Terra

Os resultados para os casos 1 e 2 são exibidos nas Figuras 5.4 e 5.5, respectivamente. Para os casos 1 e 2, referentes às Figuras 5.4a e 5.5a, verifica-se que o algoritmo proposto é capaz de detectar esse distúrbio imediatamente após o início da falta e, então, um comando de trip é enviado. Das Figuras 5.4b e 5.5b, observa-se que após a aplicação da falta,  $I_{op}$  supera  $I_{res}$  e  $I_{pk}$ , resultando em trip e atuação entre 1 a 1,21 ms para os casos 1 e 2, respectivamente. Assim, o algoritmo proposto e o *REF* atuam corretamente, independentemente do valor de dispersão, para essa falta espira-terra com 99% de espiras

curto-circuitadas. No mais, nota-se, portanto, que o algoritmo proposto teve uma atuação mais rápida do que a proteção tradicional *REF*.

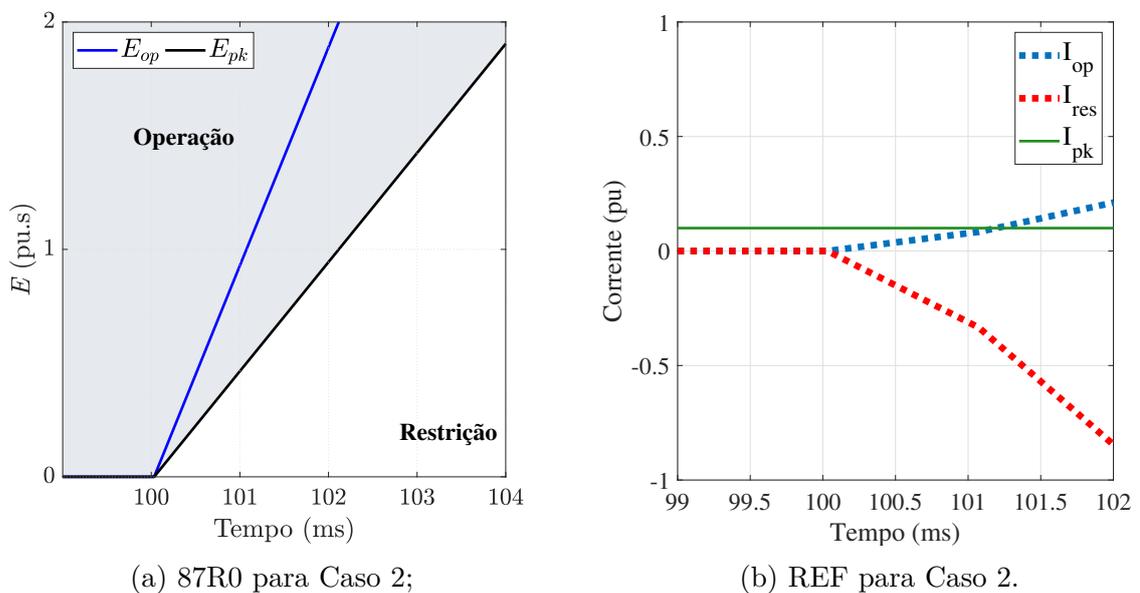
Ressalta-se que essa falta é difícil de ser detectada pelo elemento diferencial de fase tradicional, porque durante este distúrbio, as correntes de fase possuem valores baixos, enquanto a corrente de neutro possui o valor elevado (referência) (RIBEIRO, 2020).

Figura 5.4 – Desempenho falta espira-terra para o caso 1



Fonte: Autor.

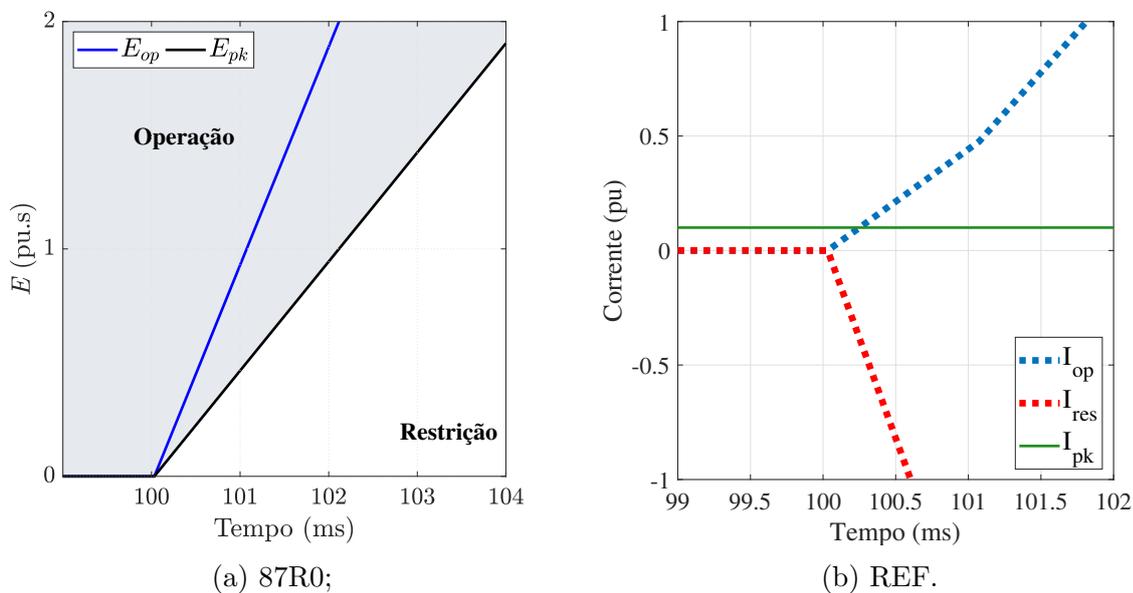
Figura 5.5 – Desempenho falta espira-terra para o caso 2:



Fonte: Autor.

Nos casos 3 e 4, os curtos-circuitos espira-terra foram simulados com 50% de espiras envolvidas. O fator de dispersão para o caso 3 é igual a 0,25, enquanto no caso 4 é igual a 1,00. Nas Figuras 5.6 e 5.7 apresentam-se os resultados para os casos 3 e 4, respectivamente. Verifica-se, nas Figuras 5.6a e 5.7a, que após a aplicação da falta o algoritmo proposto foi capaz de identificar a falta e enviar o comando de *trip* em 0,1 ms para o caso 3 e 1,1 ms para o caso 4, após início da falta. A partir das Figuras 5.6b e 5.7b, nota-se que com a aplicação da falta,  $I_{op}$  supera  $I_{res}$  e  $I_{pk}$ , resultando em um disparo de atuação das proteção em 0,25 ms e 2 ms para os casos 3 e 4, respectivamente. Nota-se, portanto, que para ambos os casos o algoritmo proposto teve uma atuação mais rápida do que a proteção tradicional *REF*.

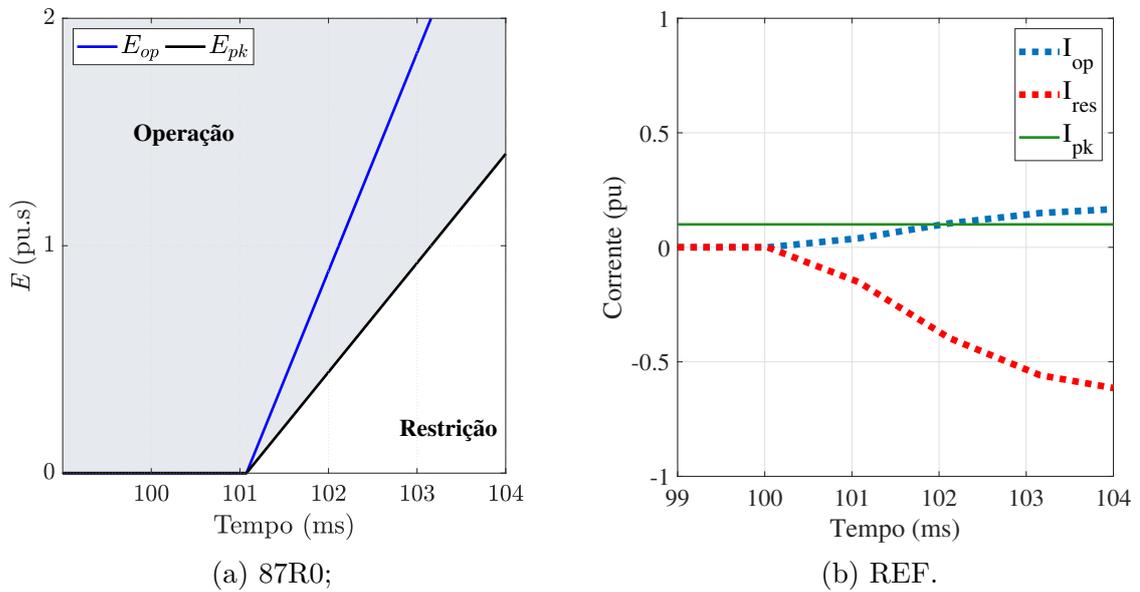
Figura 5.6 – Desempenho falta espira-terra para o caso 3:



Fonte: Autor.

No intuito de se verificar a eficiência da função 87R0 para curtos-circuitos espira-terra próximos ao neutro, simularam-se os casos 5 e 6 correspondentes a faltas com 1% de espiras envolvidas ( $n_g = 1\%$ ). Os casos 5 e 6 possuem fator de dispersão ( $\alpha_{fg}$ ) de 0,25 e 1,00, respectivamente. Tais curto-circuitos são aplicados muito próximos ao neutro resultando em correntes de curto mais baixas se comparadas com curtos próximos à bucha, dificultando a identificação pela proteção. Os resultados para os casos 5 e 6 são exibidos nas Figuras 5.8 e 5.9. Das Figuras 5.8a e 5.9a, verifica-se que  $E_{op}$  desloca para região de operação, o qual resulta no envio de *trip* com um tempo de operação imediatamente após a falta, para o caso 5, e um tempo duração de 1,1 ms para o caso 6. Nas Figuras 5.8b e 5.9b, observa-se que a função *REF* atua corretamente com tempo de operação de 0,1 ms e 2,0 ms para os casos 5 e 6, respectivamente. É importante saber que a falta simulada no caso 6 corresponde um caso crítico de operação, pois o valor de espiras envolvidas é

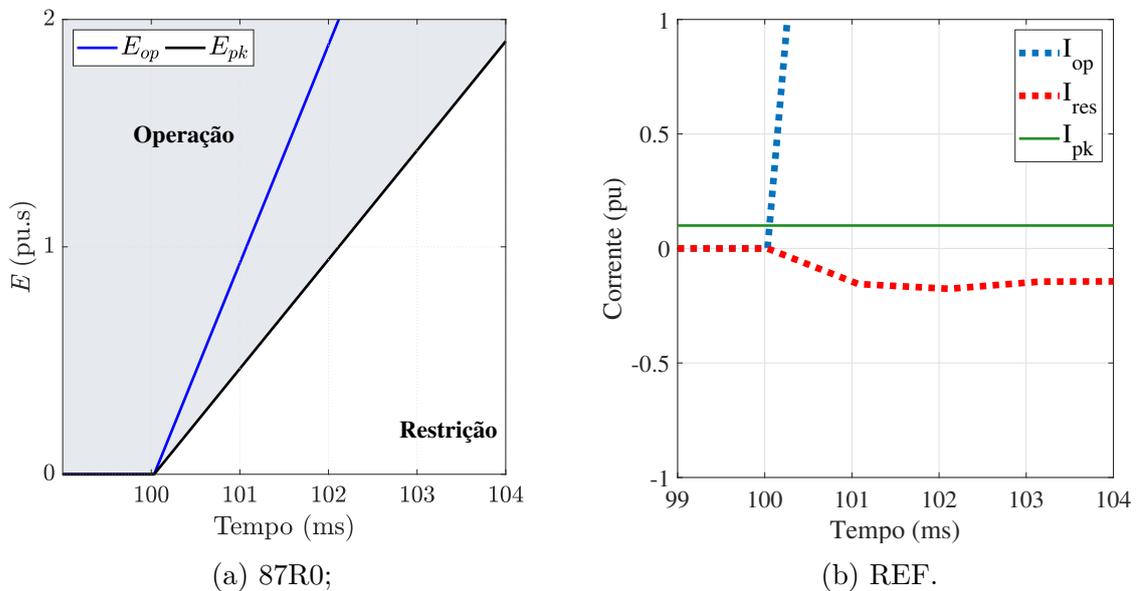
Figura 5.7 – Desempenho falta espira-terra para o caso 4:



Fonte: Autor.

mínimo ( $n_g = 1\%$ ) e o fator de dispersão alto.

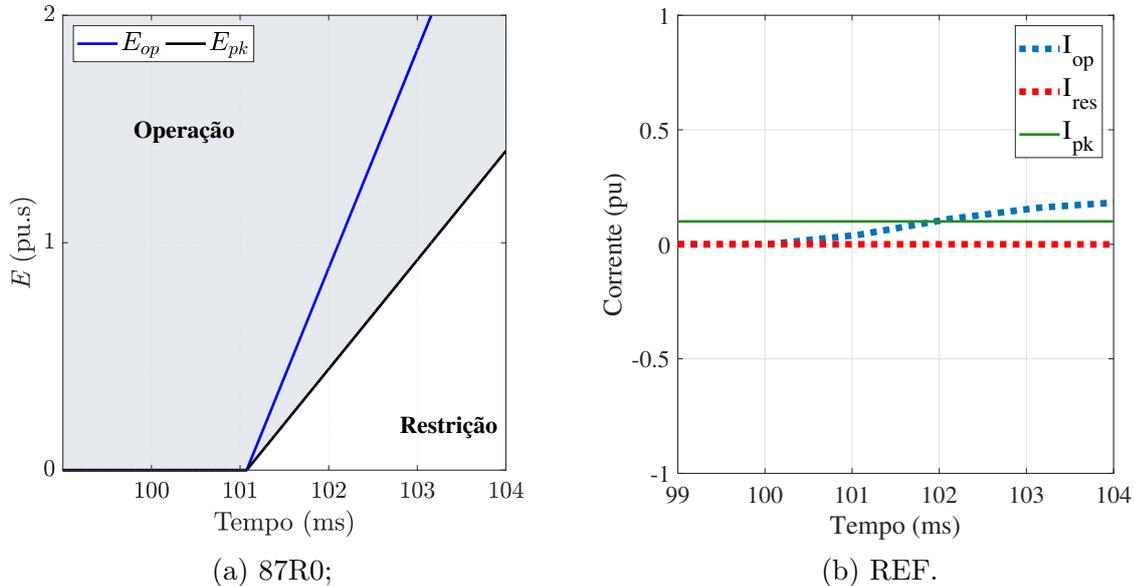
Figura 5.8 – Desempenho falta espira-terra para o caso 5:



Fonte: Autor.

Os casos 7 e 8 correspondem a curtos-circuitos espira-terra com elevada resistência de falta ( $R_f$ ). Foi simulado para o caso 7, 99% de espiras envolvidas, e para o caso 8, 1% de espiras envolvidas. O fator de dispersão ( $\alpha_{fg}$ ) para o caso 7 é igual a 1,00, enquanto no caso 8 é igual a 0,75. Ilustram-se nas Figuras 5.10 e 5.11 os resultados para os casos 7 e 8,

Figura 5.9 – Desempenho falta espira-terra para o caso 6:



Fonte: Autor.

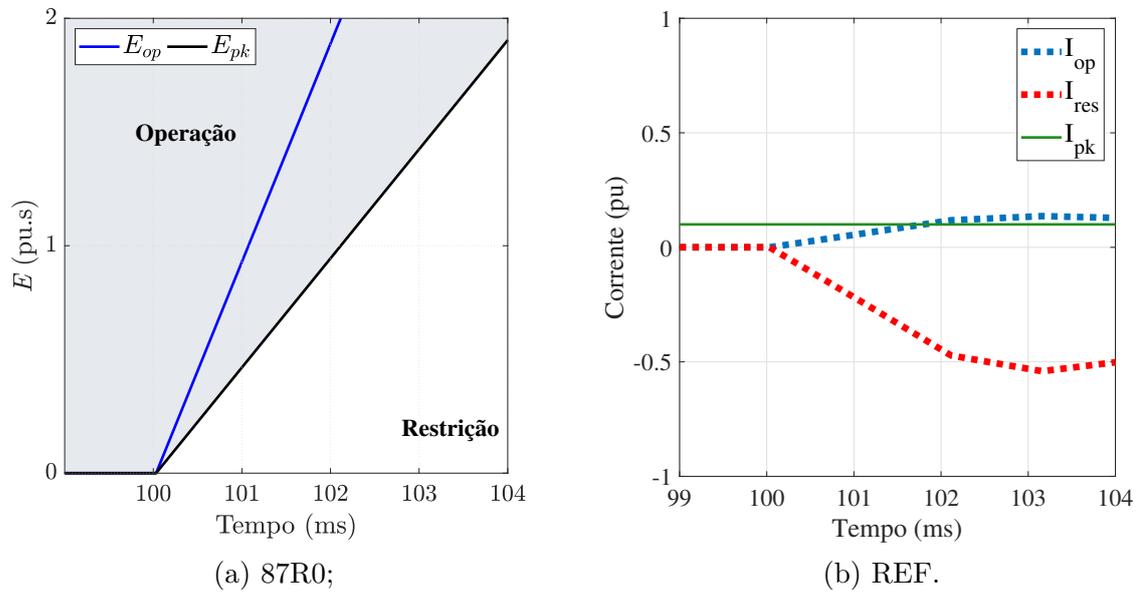
respectivamente. Observa-se nas Figuras 5.10a e 5.11a, que após a aplicação da falta, o algoritmo proposto foi capaz de identificar a falta e enviar o comando de trip em 0,1 ms, para o primeiro, e 1,1 ms, para o segundo, após início da falta. A partir das Figuras 5.10b e 5.11b, confirma-se que depois da aplicação da falta,  $I_{op}$  supera  $I_{res}$  e  $I_{pk}$  para o caso 7, com um tempo de duração de 2 ms. Contudo, para o caso 8, a corrente de operação não ultrapassa  $I_{pk}$ , resultando em uma não atuação da *REF*. Enfatiza-se que o Caso 8 é tão crítico quanto o Caso 6: a falta é aplicada perto do neutro, em que as espiras envolvidas são menores ( $n_h = 1\%$ ) e tem um alto fator de dispersão ( $\alpha_{fg} = 0,75$ ). Além disso, em curtos-circuitos com alta resistência de falta ( $R_f = 100$ ), ocorre a restrição de corrente de falta. Apesar dessas condições, a função 87R0 funciona corretamente. Por outro lado, a proteção REF não funciona corretamente para todos os casos.

## 5.2.2 Curtos-circuitos Entre-Espiras

De acordo com a Tabela 5.2, os casos 9 e 10 correspondem a faltas entre-espiras aplicadas próximas ao terminal de fase com 1% dos enrolamentos ( $\alpha_g = 1\%$ ). Esses casos se distinguem a depender dos valores dos fatores de dispersão: para o Caso 9, todos os fatores de dispersão são iguais a 0,25, enquanto para o Caso 10, são iguais a 0,80. Como mencionado anteriormente, esses valores de fator de dispersão foram escolhidos, a fim de avaliar condições extremas de correntes de falta.

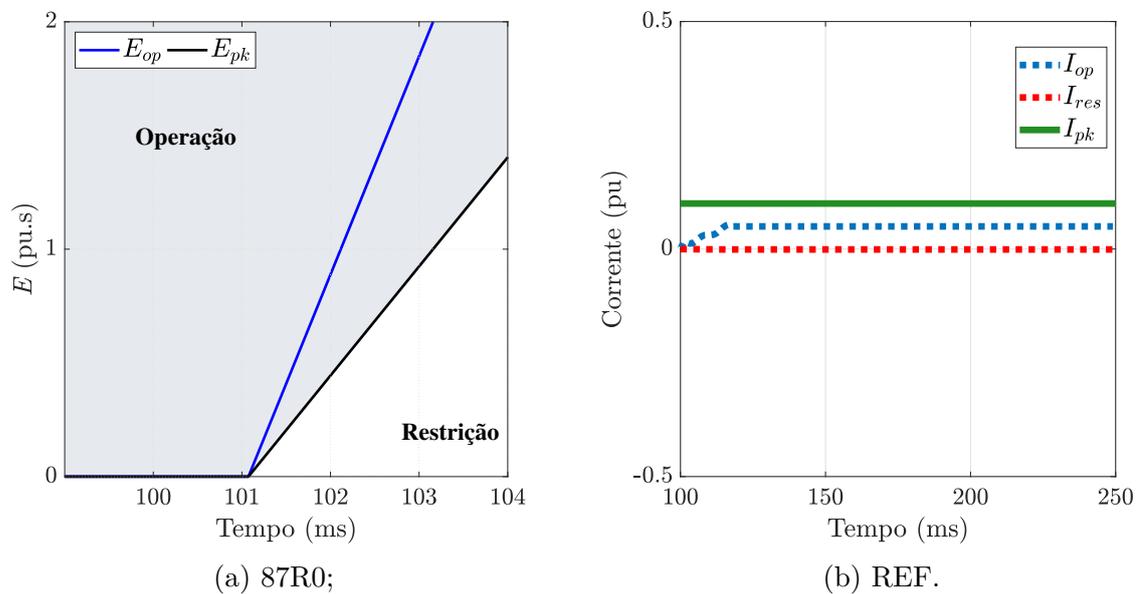
Os resultados para os casos 9 e 10 são exibidos nas Figuras 5.12 e 5.13. Das Figuras 5.12a e 5.13a, verifica-se que  $E_{op}$  se move para a região de operação, ultrapassando  $E_{pk}$  no

Figura 5.10 – Desempenho falta espira-terra para o caso 7:



Fonte: Autor.

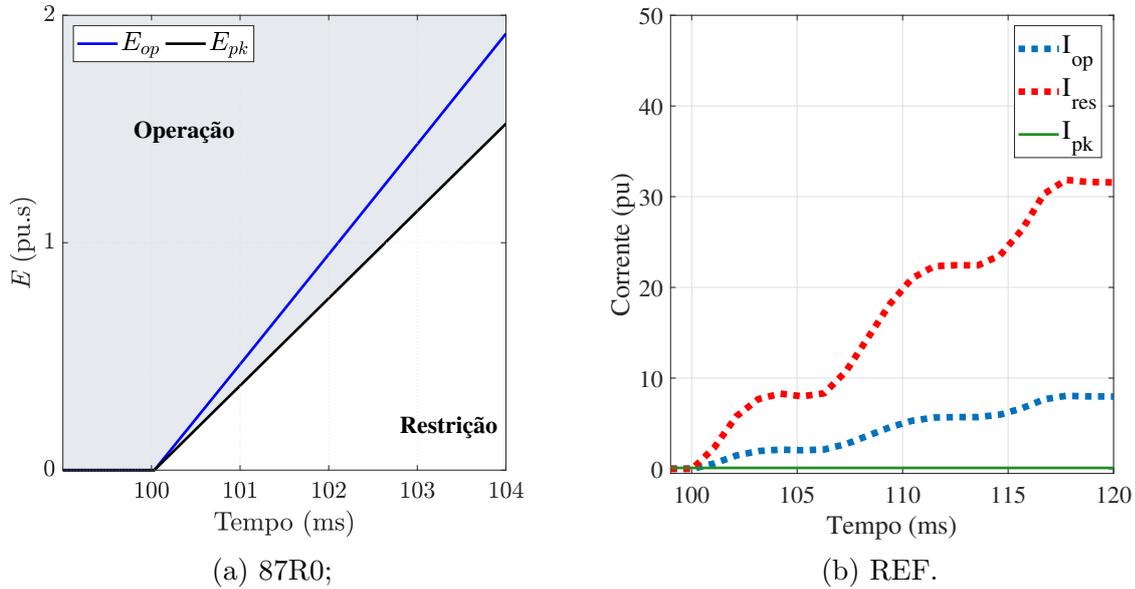
Figura 5.11 – Desempenho falta espira-terra para o caso 8:



Fonte: Autor.

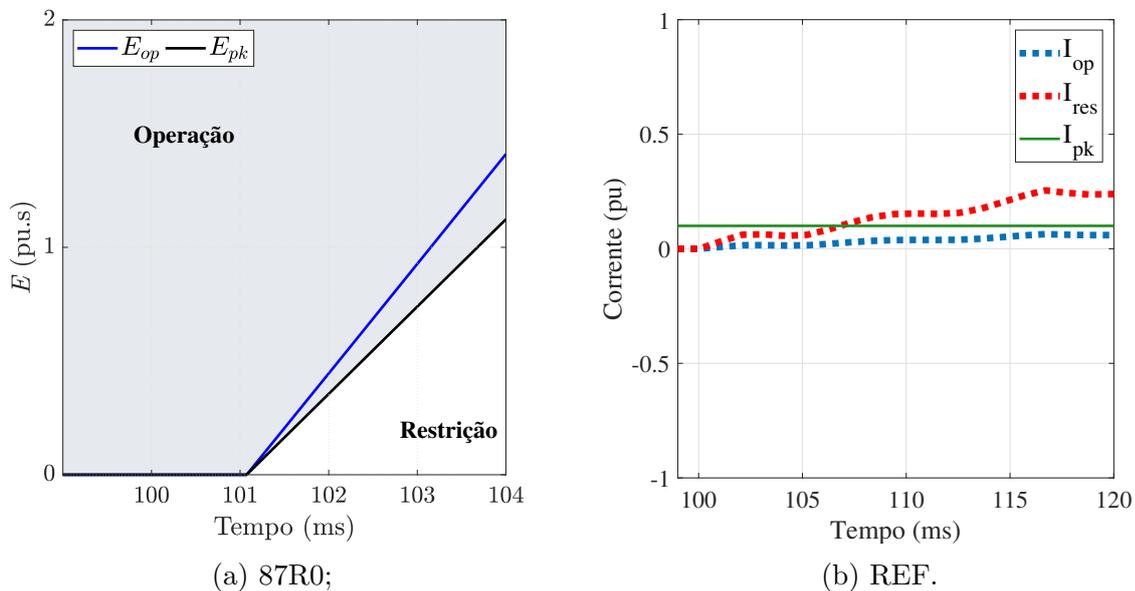
instante 0,1 ms, após a falta, para o caso 9. Enquanto isso, para o caso 10, o *trip* é enviado após 1,1 ms. Assim, afirma-se que a proteção atua corretamente também para faltas entre espiras aplicadas próximo do neutro do reator com 1% espiras envolvidas ( $n_g = 1\%$ ). Dos casos 9 e 10, verifica-se a não atuação da proteção *REF*, devido a  $I_{res}$  ser maior que  $I_{op}$ , conforme indicado nas Figuras 5.12b e 5.13b.

Figura 5.12 – Desempenho falta entre-espiras para o caso 9:



Fonte: Autor.

Figura 5.13 – Desempenho falta entre-espiras para o caso 10:

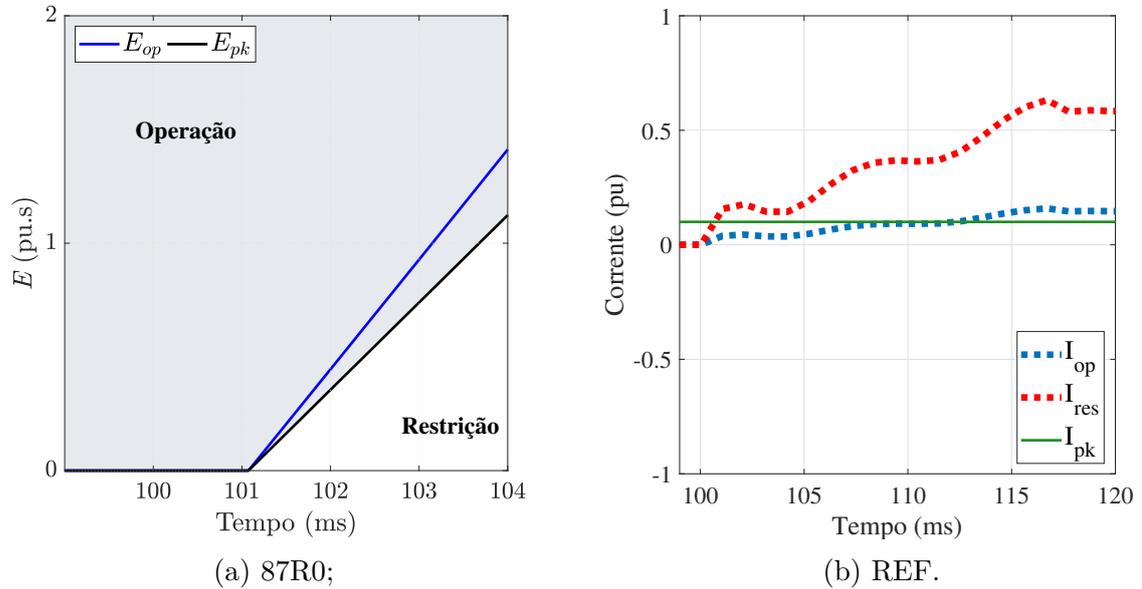


Fonte: Autor.

Os resultados dos casos 11 e 12, apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15, são faltas entre-espiras aplicadas próximo do neutro do reator com 1% espiras envolvidas ( $n_g = 1\%$ ). Das Figuras 5.14a e 5.15a verifica-se o deslocamento de  $E_{op}$  para a região de atuação, o que resulta na atuação da proteção no instante de 1,1 ms. Por outro lado, a proteção *REF* não atuou, como ilustrado nas Figuras 5.14b e 5.15b, pois  $I_{res}$  é muito maior que  $I_{op}$ . Destaca-se que, ainda que essas características resultem em uma corrente de falta muito

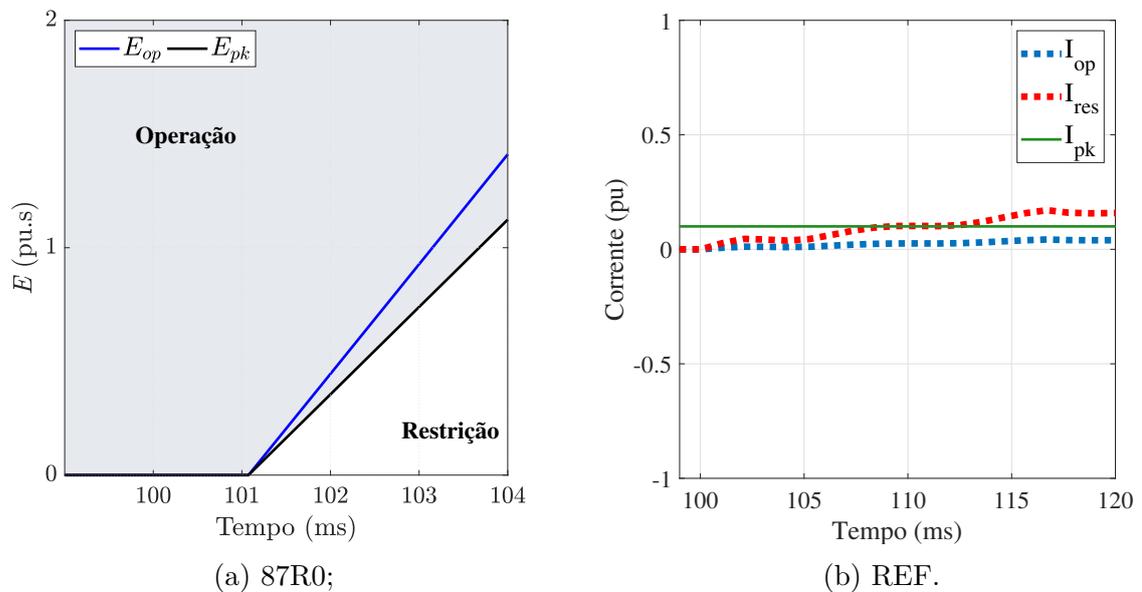
menor, a proteção proposta funciona corretamente e com um tempo menor que um ciclo. Em contraste, a proteção *REF* não detecta faltas entre espiras.

Figura 5.14 – Desempenho falta entre-espiras para o caso 11:



Fonte: Autor.

Figura 5.15 – Desempenho falta entre-espiras para o caso 12:

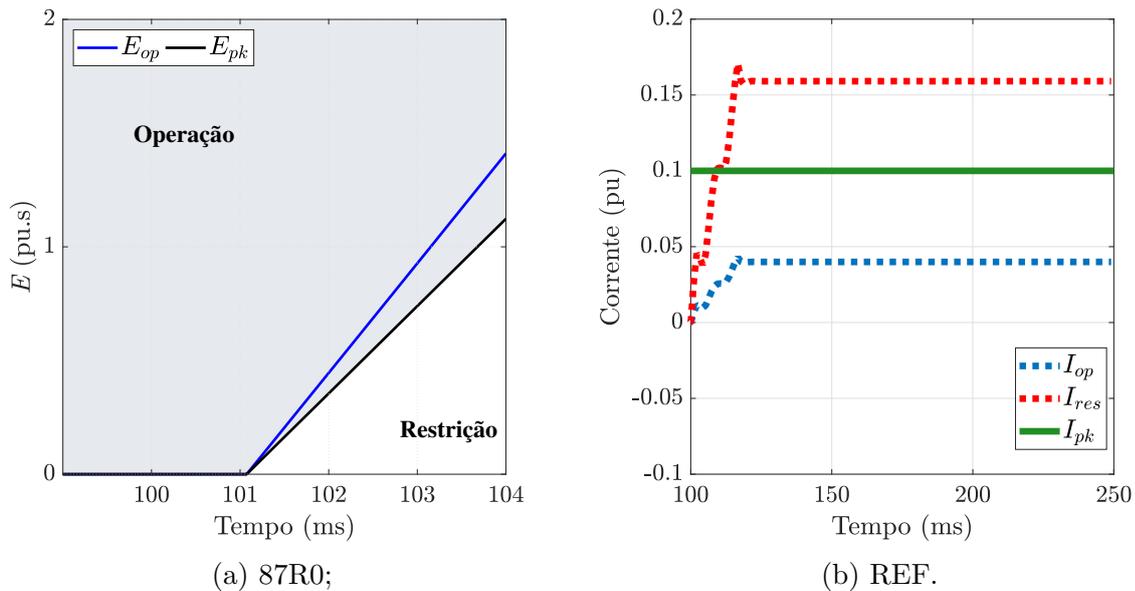


Fonte: Autor.

Os casos 13 e 14 de faltas entre espiras foram simulados com 98% das espiras curto-circuitadas ( $n_g = 98\%$ ), e com fatores de dispersão entre 0,25 e 1,00, respectivamente. Os resultados para os casos 13 e 14 são ilustrados na Figuras 5.16 e 5.17. Das Figuras 5.16a

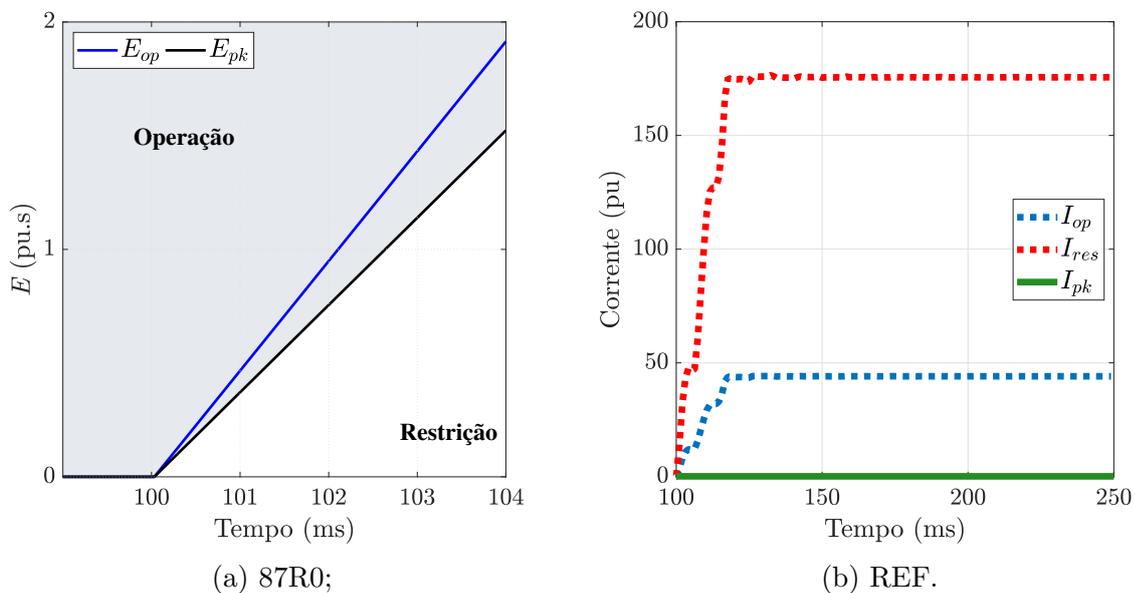
e 5.17a, verificou-se a operação da proteção proposta com tempo de atuação para os casos 13 e 14, respectivamente, de 1,1 ms e 0,1 ms. Ressalta-se que esses casos consideram muitas espiras envolvidas, quase todo o enrolamento e, por isso, suas correntes de curto-circuito são elevadas. Assim, a proteção atua com menor tempo possível, em oposição com a proteção *REF* que não atua. Conforme indicado nas Figuras 5.16b e 5.17b.

Figura 5.16 – Desempenho falta entre-espiras para o caso 13:



Fonte: Autor.

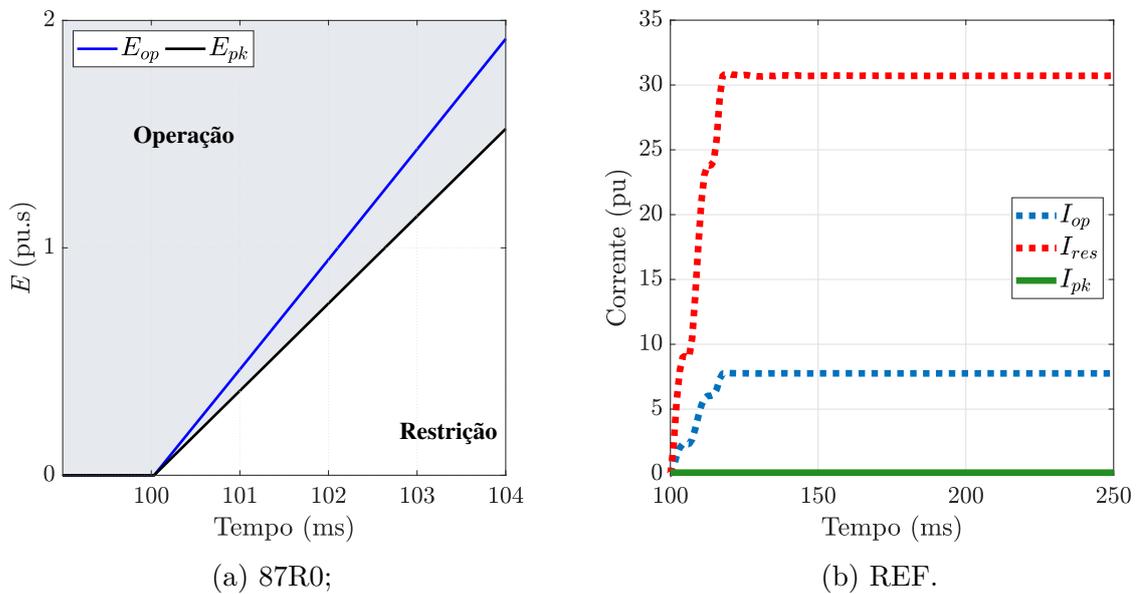
Figura 5.17 – Desempenho falta entre-espiras para o caso 14:



Fonte: Autor.

Para avaliar a função 87R0 para mais casos de curtos-circuitos entre-espiras, os casos 15 e 16 são simulados. Nas Figuras 5.18a e 5.19a, verificou-se que  $E_{op}$  desloca-se para região de operação em um tempo 0,1 ms e 1,1ms, respectivamente, para os casos 15 e 16. Portanto, destaca-se que a proteção proposta opera corretamente, independentemente da porcentagem de espiras envolvidas próximas a fase (bucha) e ao neutro. Por outro lado, a proteção REF não funciona, como exibido nas Figuras 5.18b e 5.19b, pois  $I_{res}$  é maior que  $I_{op}$ .

Figura 5.18 – Desempenho falta entre-espiras para o caso 15:



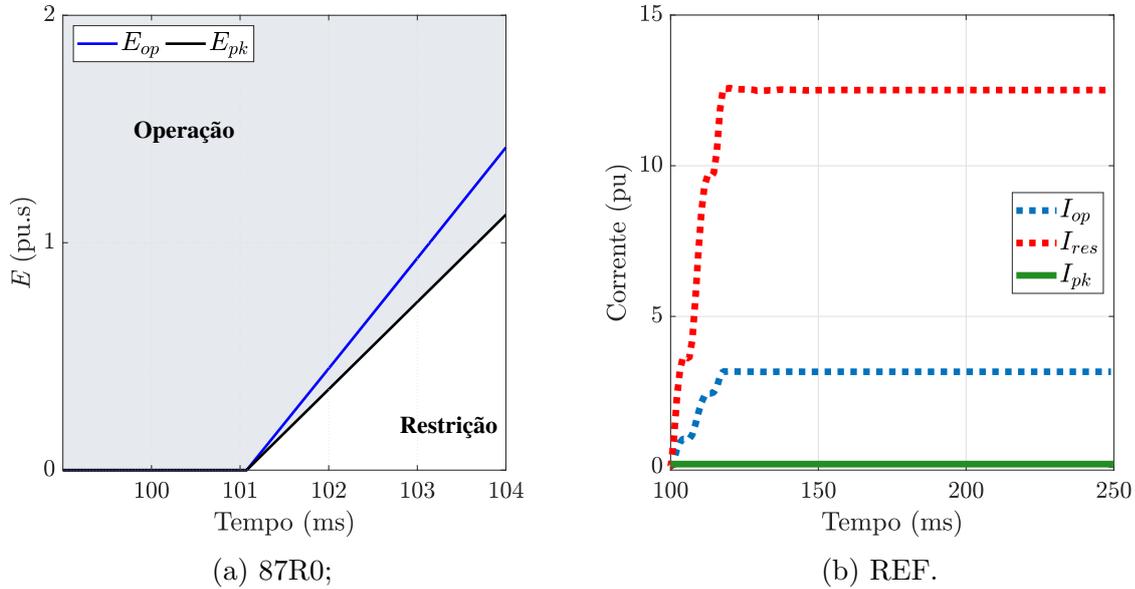
Fonte: Autor.

### 5.2.3 Curtos-circuitos Externos

Foi analisado, também, o comportamento da proteção proposta para curtos-circuitos externos ao reator, aplicados na subestação ou na linha de transmissão, onde o equipamento está conectado. Destaca-se que, como os reatores são instalados em derivação com a linha, faltas no barramento podem induzir erroneamente a operação de proteção do reator. Portanto, um curto-circuito trifásico externo e um curto-circuito monofásico externo foram aplicadas em 100 ms. Esses resultados são apresentados nas Figuras 5.20a e 5.20b.

Para o curto-circuito trifásico, observa-se na Figura 5.20a  $E_{op}$  permaneceu no ponto 0, pois é uma falta simétrica e o sistema permanece equilibrado, de modo que  $E_{op}$  e  $E_{pk}$  não se deslocam para região de operação. Para o curto-circuito externo monofásico, nota-se na Figura 5.20b, que  $E_{op}$  desloca para região de restrição, conforme a lógica proposta, caso após 1 ms  $E_{op}$  for maior que  $E_{pk}$ , inicia-se uma nova análise, o qual levará em consideração as harmônicas. Conforme é observado a lógica proposta funciona para

Figura 5.19 – Desempenho falta entre-espiras para o caso 16:



Fonte: Autor.

curtos-circuitos externos, restringindo a sua atuação. Além disso, na Figura 5.20c foi avaliado curtos-circuitos externos com TCs saturados validando o desempenho da lógica proposta.

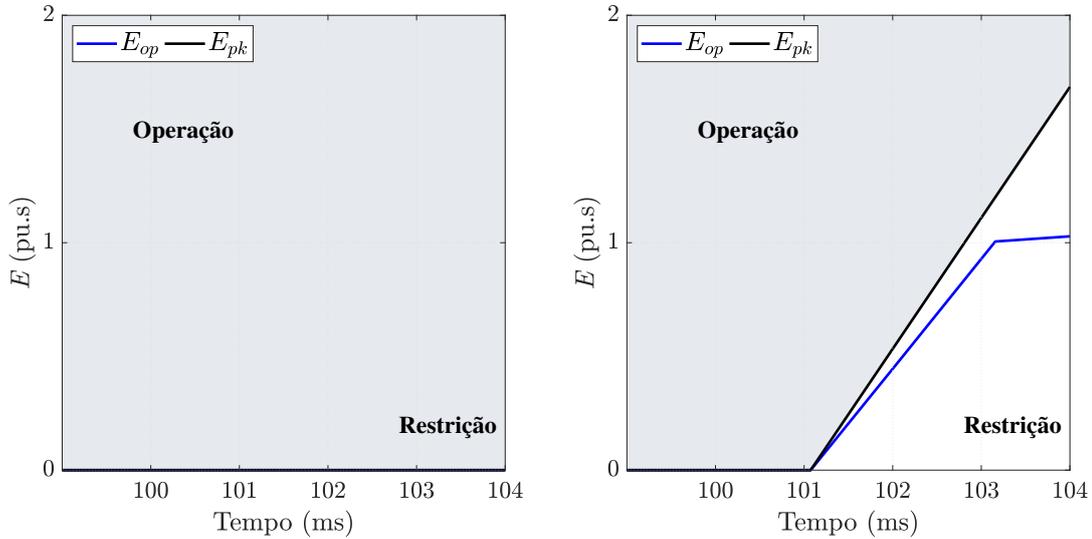
### 5.3 Discussão dos resultados

Dos resultados avaliados, verificou-se que a proteção 87R0 adaptada opera corretamente para todas as faltas espira-terra e faltas entre-espiras testadas, independentemente da quantidade de enrolamentos envolvidas e do valor do fator de dispersão. Mesmo diante de maiores fatores de dispersão, que resultam em menores correntes de curto-circuito no neutro e nas fases.

Sobre os curtos-circuitos espira-terra, observou-se que quanto maior a porcentagem de espiras envolvidas ( $g\%$ ), maior é a corrente no neutro e menor é a corrente na fase defeituosa. Para esse tipo de curto-circuito, notou-se ainda que maiores valores de resistência de falta resultam em menores correntes de falta. Sobre os curtos-circuitos entre espiras, verificou-se que quanto maior a porcentagem de espiras  $g\%$ , maiores os módulos das correntes no neutro e na fase defeituosa. Comprovou-se, também, o impacto nas correntes de neutro dada a ocorrência de faltas internas ao reator, tal que a análise dessa corrente deve ser considerada no ajuste da proteção, principalmente para o correto dimensionamento dos TCs de neutro.

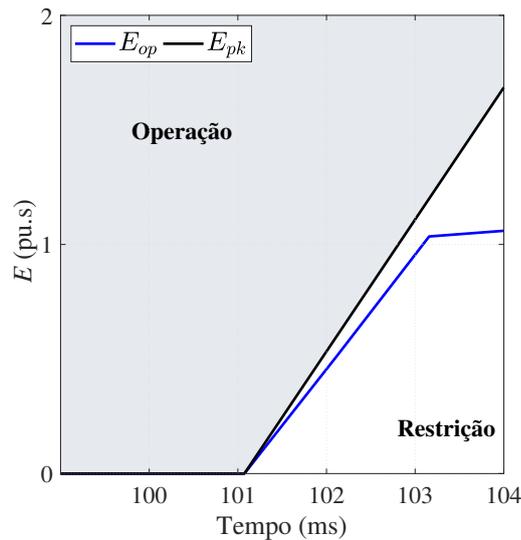
Comparando o desempenho da 87R0 e da REF, observa-se que o algoritmo proposto

Figura 5.20 – Desempenho para curtos-circuitos externos:



(a) Trifásico;

(b) Monofásico;



(c) TC Saturado;

Fonte: Autor.

obteve um desempenho superior a função  $REF$  para todos os casos, com um tempo de atuação de, aproximadamente, 1 ms. Além disso, foi observado que a função  $REF$  não apresentou atuação para curtos-circuitos espira-terra com elevada resistência e para curtos-circuitos entre-espiras.

Essa capacidade do algoritmo proposto para identificar faltas do tipo espira-terra e entre-espiras corresponde a uma vantagem sobre as outras proteções descritas na literatura. Isto é justificado, devido a simplicidade da lógica proposta, o qual faz análise dentro do domínio do tempo, enquanto as lógicas normalmente utilizadas necessitam de TPs, e outras proteções complementares.

Para curtos-circuitos externos, a proteção apresentou um comportamento satisfatória. Mesmo com a sua alta sensibilidade, o algoritmo conseguiu restringir a atuação diante perturbações externas. O valor considerado de  $E_{pk}$  foi de 0,6, o qual após a detecção da perturbação externa a proteção identifica o tipo de falta (interna ou externa), sendo externa, restringe a atuação, conforme foi observado nas Figura 5.20. Na Tabela 5.3, é feita uma comparação do algoritmo proposto com a função REF, e nota-se um desempenho superior da nova lógica. A proteção 87R0 apresenta 100% de desempenho para todas as faltas simuladas. Entretanto, para REF não foi possível obter essa mesma eficiência. Isso foi verificado através da simulação de 126 curtos-circuitos, sendo 60 faltas espira-terra, 60 faltas entre-espiras e 6 faltas externas.

Tabela 5.3 – Relação de eficiência da proteção ao tipo de falta.

Proteção	Fator Sensibilidade	Espira Terra	Entre Espiras	Externo
87R0	0,6	100%	100%	0%
REF	0,6	98%	100%	100%

Fonte: Autor.

Naquelas configurações em que o ajuste de *pick-up* é baixa, observa-se a necessidade de uma lógica de bloqueio adicional que possibilite a detecção para tais casos. Salienta-se que o algoritmo proposto se destaca em relação aos apresentados na literatura, pois sua característica de restrição é simplesmente definida sem a medição de tensão (TP). Tal realidade é vantajosa, pois além de simplificar a implementação da proteção, o algoritmo proposto pode ser usado para proteção de reatores *shunt* quando a medição de tensão não for possível.

## 6 Conclusão

Nesta dissertação, foi apresentada uma proposta de proteção diferencial de reatores *shunt*, a partir de uma adaptação da proteção diferencial de transformadores por [Peres \(2019\)](#). Essa adaptação foi baseada nas componentes de sequência zero e de neutro. A implementação utiliza os sinais de corrente reconstruído de sequência zero e de neutro para calcular uma razão integrada de operação para distinção de faltas internas e externas. Também é incorporado uma lógica para detecção de distúrbios e uma lógica de restrição por harmônicos, assegurando a confiabilidade do algoritmo adaptado.

Com objetivo de fundamentar aspectos importantes sobre o reator *shunt* e a proteção diferencial adaptada, no Capítulo 2, foram abordado os principais filosofias de proteção de reatores *shunt*, bem como seu funcionamento interno. Sendo assim, foram levantados as principais atuações indevidas da proteção em reatores *shunt*, bem como as soluções normalmente empregada. Essa breve contextualização sobre as características construtivas do reator e os problemas associados à proteção e operação foram essenciais para o uso da componente de sequência zero para análise.

No Capítulo 3, foi feito uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos que investigam sobre a proteção diferencial de reatores *shunt*. Assim, com base nesse levantamento, foi possível identificar as contribuições de cada um deles, bem o problema dos métodos de proteção utilizado.

A descrição do algoritmo e sua adaptação é feita no Capítulo 4, com detalhamento de cada um dos seus módulos que compõem a sua implementação. Os sinais de corrente, medidos próximos a bucha do reator e no TC de neutro, são normalizados, e só assim manipulados para obter a corrente de sequência zero, e reconstruídos no tempo, resultando na determinação das razões integradas de operação e *pick-up*. Nesse sentido, a lógica é baseada na comparação entre as razões integradas o qual gera um sinal se  $E_{op}$  for maior que  $E_{pk}$ .

No Capítulo 5, foram aplicadas diferentes tipos de faltas, a partir da variação dos valores de dispersão, ao reator e verificado o comportamento da proteção proposta em comparação com a proteção tradicional (REF). Dos resultados obtidos, verificou-se que a proteção apresenta um excelente desempenho para faltas espira terra e entre espiras. Isso é observado principalmente para faltas entre espiras, que apresenta corrente de falta baixíssima e, conseqüentemente, uma dificuldade na detecção por parte da proteção. Em comparação com a REF, percebe-se que a mesma não conseguiu identificar faltas entre espiras em sua maioria.

Ainda no Capítulo 5, realizou-se a análise do comportamento da proteção para

faltas externas. Constatou-se que, mesmo com a alta sensibilidade da proteção proposta, a mesma apresentou bom desempenho, não operando em condições desse tipo de falta. Conclui-se, portanto, que a proteção diferencial baseado na componente de sequência zero e de neutro tem um desempenho satisfatório frente as faltas internas, e também faltas externas, assegurando assim total integridade do reator *shunt*. Além disso, após a constatação empírica que o ângulo da corrente era maior que zero para faltas entre-espiras, adicionou-se uma lógica, o qual é multiplicado esse ângulo por  $-1$ , se o mesmo for maior que zero. É apresentado uma tabela que mostra em termos percentuais a eficiência da proteção 87R0 em relação a REF.

Como continuação dos estudos realizados, são sugeridas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Avaliar a atuação da proteção para modelos de reatores *shunt* núcleo de ferro do tipo à óleo;
- Avaliar a aplicação do método desenvolvido na proteção de reatores *shunt* conectado ao terciário de um transformador;
- Avaliar o desempenho do algoritmo proposto com registros reais;

# Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório de Desligamentos Forçados 2016*. Brasília, Brasil, 2018. Citado na página 25.

ALMEIDA, M. L. S. *Proteção diferencial de linhas de transmissão baseada no plano alfa de potências complexas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Brasília, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 31, 44 e 45.

ALMEIDA, M. L. S. d.; PERES, L. M.; SANTOS, G. G. d. 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 53.

ALVES, T. M. T. d. S. *Desempenho da proteção de reatores de linhas de transmissão frente a manobras e falhas internas e externas*. 2011. Citado 10 vezes nas páginas 25, 29, 30, 33, 35, 38, 39, 40, 42 e 44.

BASHA, F. K.; THOMPSON, M. Practical ehv reactor protection. In: IEEE. *66th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2013. Citado 6 vezes nas páginas 34, 36, 41, 42, 49 e 54.

BASTARD, P.; BERTRAND, P.; MEUNIER, M. A transformer model for winding fault studies. In: IEEE. *IEEE Transactions on Power Delivery*. [S.l.], 1994. v. 9. Citado 4 vezes nas páginas 47, 69, 70 e 71.

BASTARD, P.; BERTRAND, P.; MEUNIER, M. A transformer model for winding fault studies. In: 43RD ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.* [S.l.], 2016. Citado na página 54.

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 Internacional Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy System (ICPEICES)*. [S.l.]: IEEE, 2016. Citado na página 39.

BENMOUYAL, G.; LEE, T. Securing sequence-current differential elements. In: 31ST ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.* [S.l.], 2004. Citado na página 59.

CARLSON, A. *Shunt reactor Manual*. [S.l.: s.n.], 2002. 08–20 p. Citado na página 30.

CARVALHO, F.; FABIANO, L.; LIDSTROM, S.; GAJIC, Z.; SAHA, M. Application of numerical relays for hv shunt reactor protection. In: *2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956)*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 587–590. Citado na página 48.

CIGRE. Protection, monitoring and control of shunt reactors. In: *CIGRE WG B5.37*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 6 vezes nas páginas 29, 30, 32, 35, 39 e 41.

DAS, S.; SIDHU, T.; ZADEH, M. R. D.; ZHANG, Z. A novel method for turn to turn fault detection in shunt reactors. In: *2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–9. Citado na página 50.

- DIAS, O. F. d. R. *Religamento Monopolar em linhas de meio comprimento de onda*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 34.
- ESKANDARI, H.; JAFARIAN, P. Effect of interphase magnetic coupling of shunt reactor on transmission-line open-phase overvoltages and neutral reactor optimization. *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 11, 10 2016. Citado na página 50.
- FUCHS, D. R. *Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. [S.l.]: LTC/EFEL, 1979. Citado na página 31.
- GAJIC, Z.; HILLSTROM, B.; KOCKOTT, M. Application of numerical relays for hv shunt reactor protection. In: *ABB Automation Technologies AB Vasteras, Sweden*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado 4 vezes nas páginas 25, 36, 38 e 42.
- HARLOW, J. H. Electric power transformer engineering. In: *CRC press*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 35.
- HART, D. G.; NOVOSEL, D.; SMITH, R. A. Modified cosine filters. In: *U.S. Patent 6,154,687*. [S.l.: s.n.], 2000. Citado na página 57.
- HILLSTRÖM, B. Hv shunt reactor secrets for protection engineers. In: . [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 47.
- IEEE. Ieee guide for the application of shunt reactor switching. *IEEE Std C37.015-2017 (Revision of IEEE Std C37.015-2009)*, p. 1–63, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 36.
- IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. *IEEE Guide for the Protection of Shunt Reactors*. New York, USA, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 25, 34, 43 e 48.
- KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V.; FISCHER, N. Sequence component applications in protective relays - advantages, limitations, and solutions. In: 46TH ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.* [S.l.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 63.
- Kasztenny, B.; Thompson, M.; Fischer, N. Fundamentals of short-circuit protection for transformers. In: *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–13. Citado na página 26.
- KÜSEL, B. F. *Proteção de linhas de transmissão com puco mais de meio comprimento de onda*. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 40, 55 e 57.
- Li Yongli; Li Bin; Sheng Kun; Feng Chongzhi; Ma Zhiyu. A novel protection scheme for shunt reactors. In: *2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 352–355 Vol.1. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 48.
- LOPES, F. V.; FERNANDES, D. J.; NEVES, W. L. A. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. In: IEEE. *IEEE Transactions on Power Delivery*. [S.l.], 2013. v. 28. Citado na página 60.

- Mao, P.; Qin, H.; Lin Xiangning; Shuai, L.; Xiong Qixin. A interturn fault protection method of hv shunt reactors based on unbalanced parameter detection. In: *2010 International Conference on Power System Technology*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado na página 49.
- MOHAMMAD, A. I.; JOHNSON, B. K.; FISCHER, N.; DAMRON, K. Turn-to-turn fault protection for dry-type shunt reactors. In: IEEE. [S.l.], 2018. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 54.
- MONTEIRO, A. M. *Um estudo de dispositivos limitadores de correntes de curto-circuito com ênfase no ipc*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. Citado na página 29.
- NASHAWATI, E.; FISCHER, N.; LE, B.; TAYLOR, D. Impacts of shunt reactors on transmission line protection. In: 38TH ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.* [S.l.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 36.
- ONS. *SINDAT - Horizonte 2024*. 2020. Disponível em: <<http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema>>. Acesso em: 11 nov. 2020. Citado na página 24.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICA. *Relatório de Anáse de Pertubação*. Rio de Janeiro, Brasil, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICA. *Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos*. Rio de Janeiro, Brasil, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICA. *Submódulo 2.11 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção*. Rio de Janeiro, Brasil, 2021. Citado na página 42.
- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Power System Protection*. 2nd. ed. [S.l.: s.n.]. Citado na página 26.
- PAPP, K.; SHARP, M. R.; PEEL, D. F. High voltage dry-type air-core shunt reactors. In: CIGRE. *Elektrotechnik & Informationstechnik*. [S.l.], 2014. p. 349–354. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 54.
- PERES, L. M. *Proteção diferencial de transformadores de potência baseada na corrente de sequência negativa*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Brasília, 2019. Citado 12 vezes nas páginas 26, 27, 51, 52, 54, 55, 58, 61, 65, 67, 69 e 85.
- RIBEIRO, J. A. R.; ALMEIDA, M. L. S.; SANTOS, G. G. Uma modelagem alternativa de reatores shunt. In: SBSE. *VII Simósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. [S.l.], 2020. Citado 4 vezes nas páginas 65, 66, 69 e 70.
- RIBEIRO, J. R. *Modelagem e Proteção de Reatores Shunt do Tipo Seco com Núcleo a Ar*. 2020. Citado 11 vezes nas páginas 26, 31, 32, 33, 39, 40, 53, 69, 70, 71 e 73.
- RODRIGUES, J. P. C.; SILVA, L. d. P. *Avaliação da Proteção de Reatores Shunt de linhas de transmissão*. 2014. Citado na página 36.

- STEVENSON, W. D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. [S.l.]: Rio de Janeiro, Brasil: McGraw-Hill, 1975. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 38.
- Uriondo, F.; Hernández, J. R.; García, J. M. Improving hv shunt reactors ref relaying. In: . [S.l.: s.n.], 2008. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.
- Yarong, G.; Xingguo, W.; Chunxia, Z.; Feiyang, D.; Huanzhang, L. Zero sequence current protection for shunt reactor with auxiliary winding system inter-turn fault. In: *2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1595–1599. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 52.
- YUE, H.; XU, Y.; LIU, Y.; ZHU, Y.; XIAO, X. 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 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- ZHENG, T.; ZHAO, Y. J. Microprocessor-based protection scheme for high-voltage magnetically controlled shunt reactors. In: *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. Citado na página 50.
- ZHENTAO, X.; XIANGGEN, Y.; DESHU, C.; JINGCHAO, Y. A novel theory of ehv parallel connection reactor interturn protection based on equivalent inductance. In: *2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 417–420 Vol.1. Citado na página 48.