

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**EDUARDO FIALHO DE ABREU**

**IDENTIFICAÇÃO DAS CORRENTES DE INRUSH EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO GRADIENTE DA  
CORRENTE**

**ALEGRETE  
2022**

**EDUARDO FIALHO DE ABREU**

**IDENTIFICAÇÃO DAS CORRENTES DE INRUSH EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO GRADIENTE DA  
CORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Chrystian Dalla Lana Da Silva

**ALEGRETE  
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

d2781 de Abreu, Eduardo  
IDENTIFICAÇÃO DAS CORRENTES DE INRUSH EM TRANSFORMADORES DE  
POTÊNCIA ATRAVÉS DO GRADIENTE DA CORRENTE / Eduardo de Abreu.  
46 p.  
  
Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2022.  
"Orientação: Chrystian Da Silva".  
  
1. Corrente Inrush. 2. Gradiente de corrente. 3.  
Transformadores . I. Título.

**EDUARDO FIALHO DE ABREU**

**IDENTIFICAÇÃO DAS CORRENTES DE INRUSH EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO GRADIENTE DA CORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de janeiro de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Paula Carboni de Mello

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CHRYSYIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/03/2022, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/03/2022, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **ANA PAULA CARBONI DE MELLO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/03/2022, às 14:02, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0719245** e o código CRC **4497E14D**.

---

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete  
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550  
Telefone: (55) 3422-8400

## **AGRADECIMENTOS**

De maneira alguma chegaria a esta etapa do curso, e na conclusão deste trabalho sem a ajuda, paciência e os conselhos de duas pessoas canônicas na minha existência: minha querida mãe biológica Meiry Rosane Quintana Fialho e minha mãe de coração Vanusa Cardoso da Silva, serei grato a vocês até meus últimos dias. Eu sei os obstáculos que vocês passaram para eu estar aqui hoje, sem dúvida alguma a conclusão deste trabalho e do curso de Engenharia Elétrica eu dedico a vocês.

Sinto-me imensamente grato e satisfeito em contar com a orientação do professor Chrystian Dalla Lana Da Silva ao longo dessa caminhada, a qual foi complexa, porém enfim concluída. De coração: muito obrigado pela sua paciência e por compartilhar um pouco da sua sapiência comigo.

Deixo meu esmero e cordial obrigado a Deus e as forças que regem o universo.

*"Não menospreze o dever que a consciência te impõe, não deixe pra depois valorize a vida. Resgate suas forças e se sinta bem! Rompendo a sombra da própria loucura; cuide de quem corre do seu lado, e quem te quer bem. Essa é a coisa mais pura! " - Alexandre Magno Abrão*



## RESUMO

Parte-se do pressuposto de que todo sistema elétrico de potência deve suprir a demanda de maneira eficiente e segura, ou seja, todos equipamentos devem estar em plena harmonia com o sistema de proteção para haver um sistema com seletividade e coordenação. Com o aumento de instalações e, logicamente, da demanda de energia, deve-se incentivar a pesquisa de novas metodologias para implementação em equipamentos que tragam cada vez mais segurança para o sistema, visto que eles são responsáveis por proteger tanto o sistema em si quanto seus equipamentos, que por muitas vezes são custosos. Dessa forma, este trabalho tem como escopo a abordagem de uma metodologia para diferenciação da correntes de *inrush* e de curto-circuito de transformadores, através do uso do vetor gradiente e índices numéricos. Busca-se apresentar todo embasamento necessário para compreensão do tema, com auxílio de softwares e recursos visuais, e por fim apresentar os resultados das simulações. Ressalta-se que os resultados foram profícuos, dessa forma, retornando os resultados esperados.

Palavras-Chave: corrente de *inrush*, relés de proteção, sistema elétrico potência, vetor gradiente.

## **ABSTRACT**

Assuming that every electrical power system must meet their demand efficiently and safely, that is, all equipment must be in full harmony with the protection devices to provide coordination for the system. Due to increasingly size and demands, research into new methodologies is incentivized, with the goal of applications in equipment that increases safety for the system, since they are used to protect the system itself as well as its equipment, which are often costly. Thus, this work aims to propose a method for differentiation of inrush and short circuit currents in transformers. The theoretical basis needed to understand the topic will also be presented, as well as the software and visual aids used. Finally, the simulations results will be shown, showing the effectiveness of the method. The method is effective and generated the expected results.

Keywords: electrical power system, gradient vector, inrush current, protection relays.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema elétrico de potência com fluxo unilateral.....	12
Figura 2 – Curva de histerese de alguns materiais.....	14
Figura 3 – Modelagem de um transformador ideal.....	20
Figura 4 – Comparação de correntes em um sistema diferencial .....	22
Figura 5 – Forma de onda corrente senoidal distorcida pela saturação.....	23
Figura 6 – Ilustração do cálculo usando um forma de onda segmentada.....	27
Figura 7 – Sistema de potência teste com 4 barras.....	28
Figura 8 – Fluxograma.....	29
Figura 9 – Forma de onda senoidal para teste de validação.....	30
Figura 10 – Forma de onda senoidal com componente exponencial decrescente para validação. Gerado no software Matlab.....	31
Figura 11 – Forma de onda de corrente inrush para validação.....	32
Figura 12 – Relação de tensão e corrente derivada da saturação.....	34
Figura 13 – Sistema de potência teste com 4 barras em condições nominais.....	35
Figura 14 – Forma de onda extraída do sistema de potência teste com 4 barras.....	35
Figura 15 – SEP teste com 4 barras em condições de curto circuito na barra 2.....	36
Figura 16 – Forma de onda da corrente do SEP teste, curto circuito na barra 2....	36
Figura 17 – SEP teste com 4 barras em condições de curto circuito na barra 3.....	37
Figura 18 – Forma de onda da corrente do SEP teste, curto circuito na barra 3.....	37
Figura 19 – SEP teste com 4 barras em condições de curto circuito na barra 4.....	38
Figura 20 – Forma de onda da corrente do SEP teste, curto circuito na barra 4.....	38
Figura 21 – Forma de onda de corrente com a atuação no fenômeno de inrush.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices de magnitude e ângulo.....	27
Tabela 2 – Classificação dos sinais.....	28
Tabela 3 – Dados das linhas de transmissão.....	33
Tabela 4 – Dados transformador em condições de <i>inrush</i> .....	34
Tabela 5 – Relação tensão e corrente no enrolamento primário.....	34

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ATP - Alternative Transient Program

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

SEP - Sistemas elétricos de potência

TAP - Load Tap Changer

TC - Transformador de corrente

TP - Transformador de potência

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1. JUSTIFICATIVA.....	13
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.3. OBJETIVOS .....	15
1.3.1. OBJETIVO GERAL .....	15
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.4. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	15
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2. EMBASAMENTO TEÓRICO</b> .....	18
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	18
2.2. TRANSFORMADORES.....	18
2.3. CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES.....	19
2.4. RELÉS DE SOBRECORRENTE.....	20
2.5. RELE DE DISTANCIA .....	21
2.6. RELÉ DIFERENCIAL.....	21
2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	24
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	24
3.2. MÉTODO PROPOSTO.....	24
3.3. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO.....	29
3.3.1. CORRENTE SENOIDAL.....	30
3.3.2. CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO .....	30
3.3.3. CORRENTE DE INRUSH.....	31
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSOES</b> .....	33
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	33
4.2. SIMULAÇÕES REALIZADAS.....	33
4.2.1. CASO 1: CORRENTE DE CARGA SENOIDAL.....	35
4.2.2 CASO 2: CURTO-CIRCUITO NA BARRA 2 .....	36
4.2.3. CASO 3: CURTO-CIRCUITO NA BARRA 3.....	37
4.2.4 CASO 4: CURTO-CIRCUITO NA BARRA 4.....	38

4.2.5. CASO 5: CORRENTE DE INRUSH .....	39
4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	40
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>41</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	41
5.2. <b>SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>42</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento das cidades em grandes distritos, tornou-se imprescindível desenvolver meios de transmitir a eletricidade com segurança e eficiência de um ponto a outro.

A Figura 1 representa um sistema elétrico de potência, que englobam todos os equipamentos e componentes instalados para prover a geração, transmissão, controle e distribuição de energia elétrica. O sistema brasileiro, denominado Sistema Interligado Nacional, é um dos maiores do mundo devido à extensão territorial do país. Todo sistema elétrico possui perdas, classificadas devido à sua causa, sendo elas perdas técnicas e perdas não técnicas. A primeira é intrínseca ao deslocamento de energia e conversão em diversos níveis de tensão, suas causas são basicamente fugas de corrente e perda por efeito Joule, que se faz presente em condutores, transformadores, e todo equipamento que possua contato físico por um condutor de eletricidade. A segunda nos diz respeito ao processo de comércio da energia, sejam perdas por furtos de energia, erros de medição ou fraudes (ZANETTA JR. 2006).

Para fazer com que a energia elétrica chegue com uma boa qualidade para todas as regiões do Brasil são utilizados transformadores, os quais tem a função primária de converter energia elétrica CA em um nível de tensão para outro, com o intuito de minimizar as perdas por efeito Joule (CHAPMAN. 2013). Assim, são aplicados diversos níveis de tensão para a transmissão em longa distância, pois com a diminuição da magnitude da corrente nos condutores há uma diminuição nas perdas elétricas dissipadas por calor, em contrabalanço ocorre um aumento na tensão para se manter a mesma potência elétrica (SADIKU. 2013).

A maioria das linhas de transmissão são dadas em algumas centenas de quilovolts (por exemplo, 750 kV), as quais chegam nas subestações dos municípios sendo repassadas para as linhas de distribuição com algumas dezenas de quilovolts (por exemplo, 13,8 kV), que ainda seguem até os transformadores de distribuição para serem distribuídas aos consumidores em baixa tensão, normalmente, 220/380 V ou 127/220 V no Brasil. Com esse pressuposto, frisa-se que os transformadores compõem uma parte fundamental de todo o sistema elétrico e, sendo um aparelho com um custo relativamente alto, faz-se necessária uma proteção adequada, seletiva e coordenada para condições anormais de operação, sejam para curtos-circuitos, sobrecarga ou afins. A Figura 1 ilustra um sistema elétrico de potência

genérico: em preto sistema de geração; em azul, a transmissão; e, em verde, a distribuição.

Para o sistema elétrico de potência ser continuamente e adequadamente monitorado pelo seu sistema de proteção, usam-se os transformadores de potencial e de corrente. Geralmente, em subestações, eles são visíveis por serem relativamente de grande porte. São de grande importância, pois são responsáveis por adequarem os valores de tensão e corrente para níveis mais baixos, de modo a ser possível para o sistema de monitoramento e proteção lidar com esses valores de magnitudes menores.

Um grande problema que ocorre na proteção de transformadores de potência é o erro gerado na proteção diferencial por causa da corrente de *inrush*. Tendo isso em vista, o presente trabalho visa propor um meio de diferenciação da corrente de *inrush* em transformadores para reduzir erros na atuação da proteção.

### Estrutura Básica do Sistema Elétrico de Potência

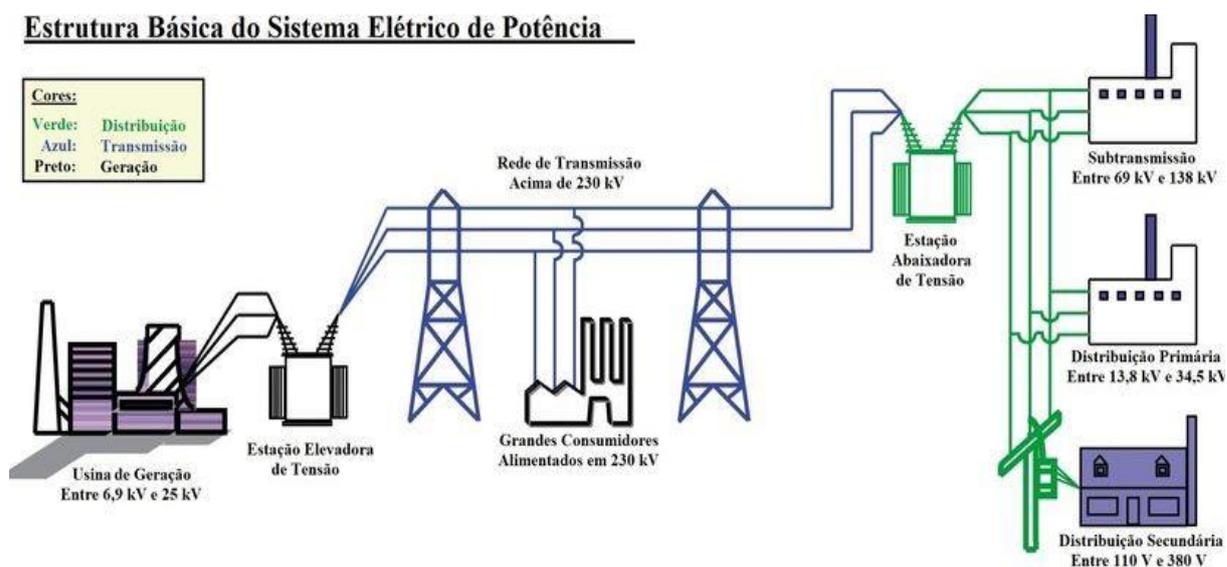


Figura 1 – Sistema elétrico de potência com fluxo unilateral. Fonte: Adaptado de Lancaster 2019.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

Dentre tantos meios e aplicações, faz-se estritamente necessário cada vez mais investir na pesquisa para tecnologias que proporcionem maior segurança e controle para o sistema elétrico de potência. Nessa pesquisa, o foco está sobre a identificação das correntes *inrush*, que, quando presente, pode deformar a onda de corrente, e provocar a atuação indesejada do relé diferencial que deveria proteger o transformador contra defeitos internos. A atuação indevida desse tipo de proteção pode causar grandes transtornos para a operação do sistema, como por exemplo o desligamento desnecessário de um grande número de cargas, dependendo da potência do transformador em questão. Por isso, ressalva-se a importância do bom funcionamento da proteção diferencial e, conseqüentemente, a importância desse estudo para prevenir essa situação.

## 1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Segundo Chapman (2013) Um transformador é basicamente a associação de um circuito elétrico e um circuito magnético que através de uma relação de espiras das bobinas induzem uma tensão específica em outra bobina. Como qualquer circuito elétrico, esse também possui transitórios, ou seja, um comportamento específico, durante um breve período de tempo, até que o sistema entre em regime permanente. No âmbito de transformadores, esse comportamento se dá na sua energização, ou em casos de energização solidária, eventos os quais ocasionam um disparo de corrente muito semelhante a corrente de partida de motores. No caso de transformadores, essa corrente inicial de alto valor chama-se corrente de *inrush*.

Normalmente, o equipamento responsável pela proteção de transformadores é o relé diferencial, onde sua função é identificar as correntes de falta internas ao transformador e desligá-lo o mais rápido possível para evitar danos e princípios de incêndio. Esses relés tem o princípio de funcionamento baseado na comparação das correntes de entrada e saída do transformador, através de transformadores de corrente adequadamente dimensionados. Esse relé ainda é dotado de um algoritmo com restrição por harmônicas, o qual faz exatamente o que seu nome diz: reconhece as harmônicas da corrente e através dessa análise decide se aquela corrente diferencial é uma corrente de um curto-circuito interno ou se foi gerada através da

corrente de *inrush* do transformador. Essa distinção se faz possível devido a diferença existente entre a predominância de harmônicas em cada tipo de corrente, visto que as correntes de curto-circuito possuem predominância da sua harmônica fundamental (60 Hz) e correntes de *inrush* possuem altos níveis de segunda harmônica e ausência de um semiciclo (ALENCAR, BEZERRA, 2013). Todavia, esse método nem sempre é eficaz, visto que para alguns tipos de falta, o padrão de harmônicas nem sempre é respeitado, o que pode ocasionar em uma sensibilização e atuação indesejada do relé.

Outro efeito que pode causar a atuação indevida do relé diferencial é o da saturação magnética do núcleo do transformador. Esse fenômeno ocorre quando o aumento de um campo magnético ( $H$ ), externamente aplicado, não se faz mais proporcional ao aumento da magnetização do material (também chamado de densidade de fluxo magnético), definido como  $B$ . Isso acontece devido ao material magnético do núcleo, que já se encontra totalmente magnetizado e suas linhas de campo magnético alinhadas. Esse comportamento pode ser visualizado através da curva de histerese de cada material. Essa curva determina a relação entre o campo magnético e a densidade de fluxo, onde fica evidente que até um certo ponto (antes da saturação) os dois valores crescem proporcionalmente. A figura 2 mostra a curva de histerese de um material sendo o eixo vertical a densidade de campo (em Tesla), e o eixo horizontal representa o campo magnético (dado em Ampere-espira por polegada).

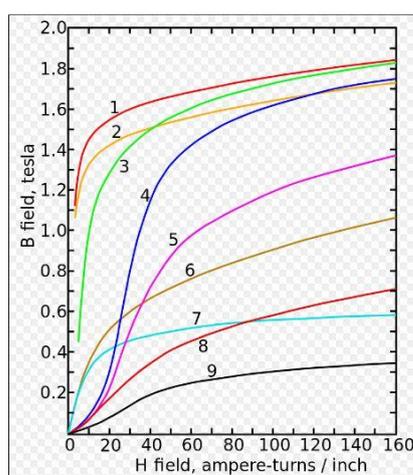


Figura 2 – Curva de histerese de alguns materiais. Sendo: 1 Aço carbono, 2 Aço com silício, 3 Aço fundido, 4 Aço com tungstênio, 5 Ímã de aço, 6 Ferro fundido, 7 Níquel, 8 Cobalto, 9 Magnetita. Fonte: Adaptado de Steinmetz, Charles. (1917).

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral executar o estudo de uma metodologia a ser aplicada em relés diferenciais e combater sua atuação indevida causada pela corrente de *inrush* de transformadores.

#### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, podem-se citar:

- Descrição da metodologia e do algoritmo desenvolvido;
- Validação do método através de análises de sinais gerados por computador;
- Análise de casos em simulação para verificação da eficácia do método.

### 1.4. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A descrição das pesquisas científicas já executadas e discutidos na literatura que convergem com o tema desta proposta são abordados nesta seção. Vale ressaltar que não serão citadas todas, obviamente, porém as mais importantes para o trabalho em questão.

Kennedy e Hayward (1938) sugeriram um dos primeiros relés diferenciais com restrição harmônica para a proteção. Sendo que Hayward e Mathews (1954) aperfeiçoaram este método adicionando uma restrição diferencial percentual para proteção do transformador. Nos primeiros testes usavam-se todos os harmônicos para contenção.

Em 1958, Sharp e Glassburn executaram um dos trabalhos pioneiros que embasavam sobre o fato de que as componentes harmônicas de ordem superior da corrente de *inrush* são muito diferentes quando comparadas com as de faltas internas. Assim, como dito antes nesse trabalho, usa-se dessa característica como um dos critérios para o funcionamento de relés diferenciais.

Mediante um projeto de filtros digitais para utilização em computadores digitais, em 1971, Sykes e Morison propuseram uma metodologia baseada no critério de diferenciação de harmônicos, expondo as respostas destes filtros e também os seus projetos.

No ano de 1988, Habib e Marin propuseram uma verificação de alguns algoritmos destinados à proteção diferencial de transformadores de potência trifásicos. Essa experiência tinha como suporte duas estruturas, primeiramente uma classificação inicial qualitativa, seguida por uma determinação quantitativa do conjunto anterior, considerando dois coeficientes: a otimização temporal de execução do algoritmo, e  $R_f$  sendo o desempenho do mesmo.

Kashtenny et al. (1997) idealizam uma lógica *fuzzy* com o intuito de executar a proteção diferencial de transformadores trifásicos. A proposta baseava-se em diversos critérios para a operação do relé, assim como tomadas de decisões, sendo necessárias diversas variáveis que necessitavam de um ajuste pré-instalação, muitas vezes visto como uma característica negativa, porém o método se mostrou eficiente na época.

Darwish e Lehtonen (2009) mostram uma metodologia inédita para a proteção diferencial de transformadores de potência, a qual tem como objetivo um critério de bloqueio no espectro da potência corrente. Método que também usufrui do fato da distinta forma de onda da corrente de *inrush*, principalmente, na componente harmônica de segunda ordem, juntamente com a potência diferencial e o bloqueio do espectro de potência. Testou-se em apenas um tipo de transformador, entretanto, todos os resultados foram positivos para mais de 1900 amostras, identificando todas as faltas internas.

Gu et al. (2010), visando a saturação dos TC's, na ocorrência de faltas internas, apresentou uma técnica para bloqueio do relé diferencial na proteção de transformadores de potência. Essa nova didática usa-se de transformações simétricas expondo suas características através do gradiente morfológico. O método sustenta-se através de um diagnóstico através da multiresolução da morfologia matemática, conseguindo distinguir satisfatoriamente acontecimentos com grande saturação dos TC's e de faltas internas.

Barbosa et al. (2011) utilizaram a lógica *fuzzy* para demonstrar um método indicado à proteção diferencial de transformadores de potência, partindo-se do pressuposto da análise de situações transitórias tanto energização, como na energização solidária e ainda a excitação da proteção diferencial separando-as das faltas internas. Esse método centrava-se na regra de fuzzificação com referências em certas variáveis, como a corrente de operação, componentes harmônicas de segunda e quinta ordem, e o fluxo estimado no núcleo do transformador, com auxílio

de funções de pertinência do tipo trapezoidal encarregadas de determinar valores binários de alto ou baixo para quatro elementos, dizendo assim se o equipamento está na sua operação adequada ou em defeito. Os resultados dessa técnica foram excelentes, não sendo encontrados erros.

Rahmaati e Pasand (2012) executaram uma faceta inédita para discriminação de faltas internas e correntes de magnetização, com a aplicação de reconhecimento de padrões com foco nas componentes de alta frequência, e também isso fez-se possível graças a uma ampla utilização da ferramenta conhecida como transformada *wavelet*. A frequência de amostragem no projeto foi de 10 kHz e para a decomposição das componentes de *wavelet* determinou-se assim o coeficiente de aproximação A7 e sete componentes de detalhe D1-D7, sendo que a D2 foi a componente empregada. Em suma, esse método compara coeficientes especificados pela relação entre seus valores de pico, logo comparados a um valor pré-determinado, dessa forma o relé computada a tomada de decisão. O testes feitos mostraram resultados corretos para as situações analisadas.

Hooshyar et al. (2012) retratam um método em que o sinal diferencial de potência é demonstrado tendo seus aspectos intrínsecos avaliados para identificação e classificação das correntes de magnetização. Baseando-se no fato que as formas de ondas dessas correntes são peculiares quando comparadas com as de faltas internas. Obtendo-se um grau de similaridade entre a forma de onda do sinal avaliado e uma senóide padrão, todavia esse grau é o índice utilizado para classificação de corrente. Esse estudo determinou que as técnicas propostas são profícuas para todos os cenários de correntes de magnetização e falta internas.

## 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é organizado da seguinte forma:

O capítulo 2 irá conter o embasamento teórico, apresentando todos os conceitos necessários para o entendimento do tema.

O capítulo 3 apresentará a metodologia proposta, de modo a atingir os objetivos definidos pelo trabalho, assim como o sistema teste utilizado para as simulações. O capítulo 4 mostrará os resultados obtidos nas simulações.

O capítulo 5 contém as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, serão apresentadas as referências utilizadas no trabalho.

## 2. EMBASAMENTO TEÓRICO

### 2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo tem como objetivo a apresentação dos conceitos teóricos necessários para o entendimento do trabalho proposto, sendo eles: conceitos básicos de transformadores, principalmente os efeitos como a corrente de magnetização e de inrush, e alguns tipos de relés de proteção.

### 2.2. TRANSFORMADORES

Segundo Alexander e Sadiku (2013), o transformador é um dispositivo magnético que tira proveito do fenômeno da indutância mútua. Geralmente, é um dispositivo com 4 ou mais terminais (dependendo dos TAP's), e formado por duas ou mais bobinas acopladas magneticamente, sendo a bobina diretamente ligada à fonte de alimentação, denominada enrolamento primário, e uma a bobina ligada à carga, chamada enrolamento secundário. A relação de espiras, ou seja, a relação de voltas entre um enrolamento e outro, é o fator determinante para a transformação de tensão e corrente. Ressalta-se que para maximizar o efeito do campo magnético e, conseqüentemente, do fluxo magnético, esses enrolamentos são envoltos em um material ferromagnético, chamado de núcleo do transformador.

Enquanto o transformador de potência tem função de transformar a corrente e tensão para alimentação de uma ou mais cargas, o transformador de corrente (TC) é um dispositivo destinado a reduzir o valor da corrente da rede para níveis seguros, de forma que os relés e aparelhos de instrumentação possam executar suas funções necessárias de forma segura. Segundo a IEE Std C37.110-2007, os TCs possuem três finalidades principais:

- Isolar o circuito de alta tensão dos equipamentos conectados em seu secundário;
- Fornecer em seu secundário uma forma de onda de corrente proporcional a do primário, em módulo e fase;
- Fornecer no secundário níveis de corrente aceitáveis para o trabalho dos equipamentos a ele conectados.

### 2.3. CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES

A corrente de magnetização está sempre presente nos transformadores, sendo seu valor ínfimo em condições plenas, pois o valor da reatância de magnetização é extremamente alta para condições normais de operação. No entanto, durante a energização do transformador, quando o núcleo está relativamente desmagnetizado, o valor dessa reatância, representada por  $X_m$ , tende a ser muito pequeno, causando uma corrente de magnetização de extrema magnitude e com poder de distorcer a forma de onda do sinal recebido pela carga do transformado, e assim sensibilizar os equipamentos de proteção de uma maneira errônea (MONEY, 2008.). A essa corrente de valor elevado dá-se o nome de corrente de *inrush*.

Quando um transformador sofre uma interrupção de potência da sua fonte, logicamente, a corrente transiente na máquina é levada à zero, assim como todas as grandezas físicas que dependem dessa fonte de energia. Porém, a relação não linear entre a intensidade de campo e a indução magnética, definida como fenômeno de histerese, nos diz que, advindo do valor de excitação, ainda permanecerá um resíduo de indução magnética no núcleo do transformador. Dessa forma, quando ocorrer novamente a energização, faz-se necessário um valor de pico acima do valor nominal da densidade de fluxo magnético para o transformador corresponder as suas características de tensão e corrente padrões.

Devido ao aumento do pico da indução magnética, que geralmente é de no máximo três vezes, ocasiona-se o surgimento dessa corrente de *inrush*, com amplitude elevadíssima (de oito a dez vezes) quando comparada à corrente nominal (MAÑANA et al, 2005).

Outro momento de pico da corrente de magnetização dá-se no fenômeno de energização solidária, quando correntes de *inrush* geradas pela energização de um transformador afetam outros transformadores conectados em paralelo a ele.

A Figura 3 mostra a modelagem de um transformador monofásico, evidenciando a lógica descrita no ramo da reatância de magnetização.

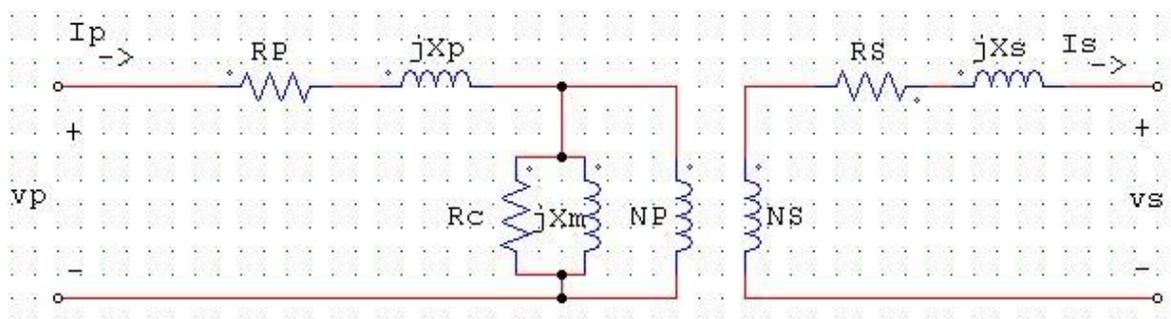


Figura 3 – Modelagem de um transformador ideal monofásico no software Psim. Autoria própria.

A corrente de *inrush*, como só aparece em um lado do transformador, tende a sensibilizar o relé diferencial que está fazendo a proteção do transformador, podendo fazer com que ele atue erroneamente se não houver um sistema de prevenção. Ignorar esse fenômeno torna-se custoso, pois o mesmo provoca desgastes mecânicos na máquina, desgasta o material isolante e principalmente atuação indevida de dispositivos de proteção.

#### 2.4. RELÉS DE SOBRECORRENTE

Todo sistema de proteção é basicamente comandado por relés, os quais têm a função principal de identificar os defeitos e anormalidades do sistema e enviar um sinal para a abertura de um disjuntor, de modo a desligar todo ou parte do sistema envolvido, oferecendo segurança aos equipamentos de um sistema de potência.

Alguns dos relés mais comuns em um sistema de potência são relés de sobrecorrente, de distância e, como já foi mencionado, o diferencial.

Esse tipo de relé tem um vasto uso na proteção de alimentadores de rede de distribuição, na proteção de linhas de transmissão e em máquinas rotativas. São elementos que atuam para uma corrente maior que o seu ajuste, e de acordo com a sua atuação é subdividido em duas classificações: instantânea (função ANSI 50), e temporizada (função ANSI 51), podendo ser de fase, neutro, sequência negativa, entre outros. Construtivamente, pode ser classificado como eletromecânicos, eletrônicos, ou digitais, cada uma com suas particularidades no que diz respeito ao seu ajuste e operação.

De modo geral, é o tipo mais simples de relé. Quando o relé detecta um valor de corrente acima do seu valor de ajuste, ele opera, de modo instantâneo ou temporizado, enviando um sinal de abertura para o disjuntor.

Em sistemas malhados é usado em conjunto com um relé direcional (função ANSI 67), o que faz com que o relé só seja sensibilizado para correntes em uma única direção, de modo a garantir coordenação com outros dispositivos de proteção.

## 2.5. RELE DE DISTANCIA

Amplamente utilizados na proteção de linhas de transmissão, esse tem seu funcionamento baseado em uma estimativa de impedância entre a posição do relé e o local da falta, valendo-se da vantagem que a impedância por quilometro é, em suma, constante. Esse relé também pode responder a outros parâmetros como: admitância ou a reatância até o local da falta.

Basicamente, esse relé tem três facetas de proteção: subalcance, sobrealcance e proteção de distância. Subalcance é o modo no qual os relés de uma proteção não operam para faltas além do equipamento protegido, dessa forma, em complemento tem-se a proteção de sobrealcance é dita quando os relés atuam para faltas além do terminal remoto. Ressalta-se que o relé não operará para uma falta localizada fora da zona de ajuste, mas sim, quando a distância medida até a falta for menor que a do ajuste. Geralmente as áreas de operação são chamadas de “zonas” de atuação, sendo a primeira de subalcance, a segunda de sobrealcance e a terceira uma proteção extra à distância.

## 2.6. RELÉ DIFERENCIAL

Ao longo da evolução da proteção de sistemas elétricos, diversas topologias foram implementadas a fim de evitar condições anômalas de operação, onde uma das mais difundidas é a proteção diferencial. Esse tipo de proteção funciona comparando as correntes que entram e que saem do equipamento em sua zona de proteção (HOROWITZ, PHADKE, 1995).

Em condições normais de operação as correntes que entram e saem de um transformador devem ser análogas, sendo que as diferenças na amplitude e fase, devido à relação de transformação e a ligação do transformador, respectivamente,

devem ser compensadas pelo relé. Assim, em condições normais, a corrente diferencial, representada por  $I_D$ , como mostra a Figura 4, é próxima de zero, e o relé não opera. A corrente diferencial nada mais é do que a subtração entre as correntes primária e secundária, ou seja,  $I_{2P} - I_{2S}$ .

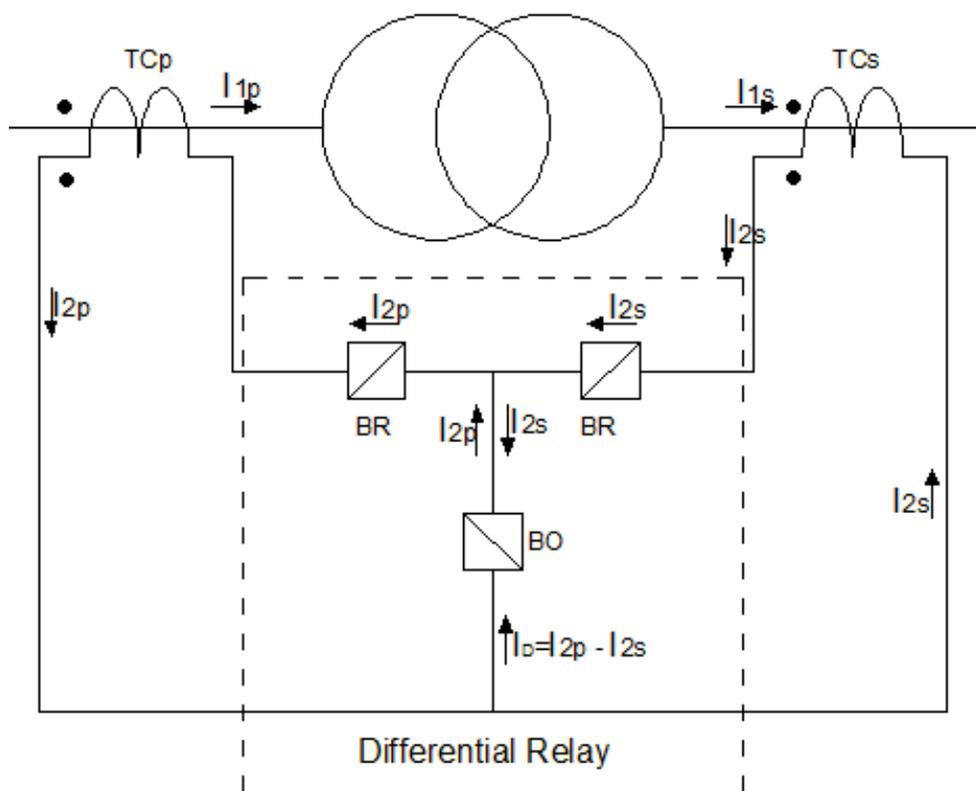


Figura 4 – Comparação de correntes em um sistema diferencial. Adaptado de Soares e De Alencar. (2015).

Visto que a maioria dos relés de proteção determina sua sensibilização através do valor RMS da corrente de falta, se o sinal fornecido pelo TC for distorcido pela saturação ou pela corrente de *inrush*, o valor eficaz poderá ser muito diferente que o valor da magnitude da corrente de falta real. A figura 5 demonstra um exemplo de uma onda senoidal de corrente distorcida pela saturação do transformador.

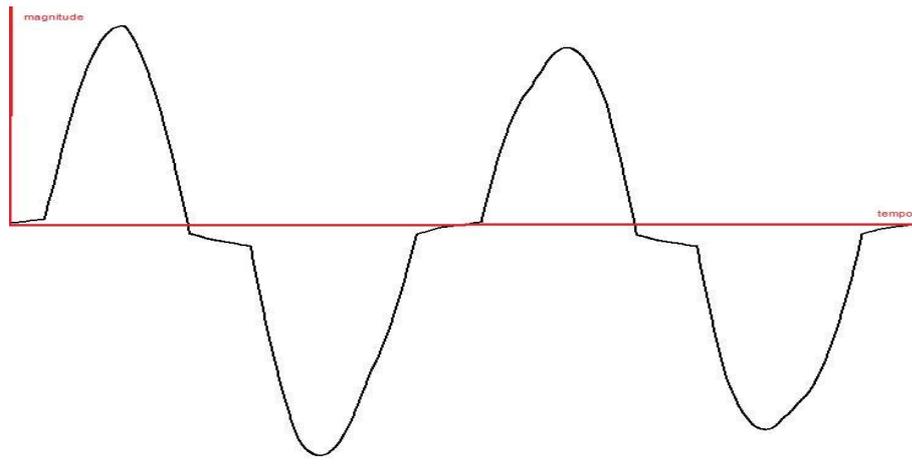


Figura 5 – Forma de onda corrente senoidal distorcida pela saturação, gerada no ATP.

Tendo essa operação em mente, evidencia-se a importância de um sistema de compensação ou identificação da corrente de *inrush*, que só surge em um dos lados do transformador e tem potencial de causar uma operação indevida.

## 2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo serviu como introdução teórica para alguns dos tópicos que serão abordados neste trabalho. A partir daqui, o próximo passo é a apresentação da metodologia proposta e como ela irá ajudar a prevenir a operação indevida do relé diferencial.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia proposta no trabalho, explicando os princípios teóricos do funcionamento do algoritmo, mostrando os índices que serão usados para classificação, e a validação do método.

#### 3.2. MÉTODO PROPOSTO

Nesta seção demonstra-se o desenvolvimento do método proposto e os procedimentos necessários para almejar o escopo do estudo em questão, que se baseia no uso do vetor gradiente, uma ferramenta do cálculo diferencial a qual delimita magnitude, sentido e direção de um deslocamento ou variação a partir de um ponto específico. Para esse estudo, foram utilizados os softwares ATP, através de sua interface gráfica ATPDraw, e Matlab®. No ATP foram feitas as simulações do sistema teste que será apresentado a seguir, e o Matlab® foi usado para implementar o algoritmo proposto, e também para cálculos matriciais e plotagem dos gráficos.

O conceito tem por base a análise dos módulos e das inclinações da forma de onda de uma corrente a ser classificada como sendo ou não corrente de *inrush* (caso negativo, ela pode ser corrente de carga ou corrente de curto-circuito). Será usada como base a metodologia proposta por Alencar e Bezerra em 2013, adotando o vetor gradiente para a corrente diferencial mostrado na Equação 1:

$$\nabla ID = \partial \frac{ID}{\partial t} \hat{i} + \partial \frac{ID}{\partial \phi} \hat{j} + \partial \frac{ID}{\partial \beta} \hat{k} \quad (1)$$

Sendo: a parcela com o vetor canônico  $\hat{i}$  a derivada de primeira ordem em relação ao tempo, a parcela com vetor  $\hat{j}$  é a derivada de primeira ordem em relação ao magnetismo residual, e a última parcela correspondente ao vetor  $\hat{k}$  é a derivada de primeira ordem em relação ao ângulo de chaveamento da fonte de tensão.

Dessa maneira, o módulo é dado pela Equação 2.

$$\|\nabla ID\| = \sqrt{\left(\frac{\partial ID}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial ID}{\partial \phi}\right)^2 + \left(\frac{\partial ID}{\partial \beta}\right)^2} \quad (2)$$

As condições iniciais nos delimitam que esta equação é reduzida apenas ao vetor canônico  $\hat{i}$ , como mostra a Equação 3:

$$\nabla ID = \left(\frac{\partial ID}{\partial t}\right) \hat{i} \left(\frac{A}{s}\right) \quad (3)$$

Segundo Soares e De Alencar, 2015, considera-se um vetor, o qual é denominado vetor gradiente, tangente à curva da corrente diferencial em um determinado ponto da análise. O ângulo desse vetor em relação ao vetor unitário é dado pela Equação 4:

$$\theta_i = \text{atan}\left(\frac{\partial ID}{\partial t}\right) \quad (4)$$

O objetivo do método proposto é partir dessa ideia e calcular dois vetores de dimensão  $n \times 1$  cada, que serão usados na classificação das correntes: a cada ciclo do sinal, são feitas várias leituras do sinal de corrente a uma determinada taxa de amostragem, que foi definida em 16 leituras por ciclo. A cada ponto de leitura, são registrados o valor do sinal de corrente no vetor das magnitudes, e o ângulo do sinal de corrente no vetor dos ângulos. É importante ressaltar que é registrado apenas valores de 1 e -1: no vetor das magnitudes, se a corrente é positiva atribui-se valor 1, e se a corrente é negativa atribui-se valor -1. Similarmente, no vetor dos ângulos, se o ângulo é positivo atribui-se valor 1, e se negativo, o valor -1. Após a simulação completa, que foi de 10 ciclos do sinal, pode-se classificar a corrente através da análise desses vetores, comparando os valores obtidos com os de referência.

Por exemplo, sabe-se que, em uma senóide, em um ciclo completo do sinal, se forem somados todos os valores contidos no vetor das magnitudes durante um ciclo completo, o resultado será zero, pois é uma onda simétrica. Similarmente, se forem somados os valores contidos no vetor dos ângulos, o resultado também será zero pelo mesmo motivo.

Em outro caso, em uma corrente de curto-circuito, que contém uma componente exponencialmente decrescente, a soma dos valores contidos no vetor dos ângulos

ao longo de um ciclo ainda é zero, porém a soma dos valores contidos no vetor das magnitudes será não-nulo, pois a onda é assimétrica.

Logo, torna-se evidente que essa característica pode ser explorada para a diferenciação dessas correntes.

No ATP, foi usado um intervalo de simulação de  $10^{-6}$  s, portanto, como serão simulados 10 ciclos do sinal, como mencionado anteriormente, temos o número total de amostras, mostrado na Equação 5.

$$\frac{\frac{10}{60}}{10^{-6}} \approx 16666 \text{ amostras} \quad (5)$$

Como foi definido 16 registros de magnitude e ângulo por ciclo, é preciso calcular de quantas em quantas amostras será feito o registro dos valores. Como temos um total de aproximadamente 16.666 amostras em 10 ciclos, isso representa aproximadamente 1.666 por ciclo. Dividindo esse valor por 16, temos então que registrar um valor nos vetores das magnitudes e dos ângulos a cada 104 amostras, aproximadamente.

A determinação do valor da magnitude da corrente é direta, basta verificar se ela é positiva ou negativa, e registrar valor 1 ou -1, como mencionado anteriormente. Para a determinação do valor do ângulo, é necessário um cálculo usando os princípios da trigonometria, como mostra a Figura 6. Sabendo o valor do tempo, que age como cateto adjacente (CA), e o valor da corrente, que age como cateto oposto (CO), pode-se determinar o ângulo do sinal de corrente  $\theta$  através da Equação 6.

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{I}{t}\right) \quad (6)$$

Para esse cálculo, foram usadas 5 amostras para reduzir imprecisões eventuais causadas por ruídos, ou seja, se for feito esse cálculo de ângulo em um certo valor de amostra  $n$  qualquer, o resultado ficaria como mostrado na Equação 7. Em outras palavras, formaria-se um triângulo retângulo com 5 amostras de tempo no cateto adjacente e 5 amostras de magnitude da corrente no cateto oposto.

$$\theta(n) = \text{atan}\left(\frac{I(n+5)-I(n)}{t(n+5)-t(n)}\right) \quad (7)$$

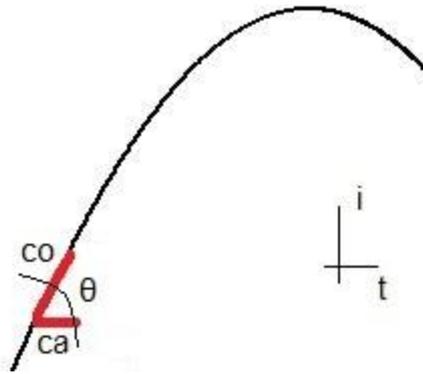


Figura 6 – Ilustração do cálculo usando um forma de onda segmentada. Gerada no ATP.

Esse cálculo é feito 16 vezes por ciclo, e o valor é registrado no vetor dos ângulos como sendo 1, caso o ângulo seja positivo, ou -1, caso o ângulo seja negativo.

Tendo os dois vetores para toda a simulação de 10 ciclos, o classificador deve classificar a corrente, identificando a onda como sendo ou não uma corrente de *inrush*. É feito o somatório de todos os valores do vetor de ângulo e o somatório de todos os valores do vetor de magnitude para o primeiro ciclo do sinal. De posse desses valores finais provenientes dos somatórios, a classificação dada pelo algoritmo é responsável pelo bloqueio ou não do relé. A Tabela 1 mostra como são atribuídos os índices para cada vetor, e a classificação final da forma de onda da corrente dá-se com base na Tabela 2, que apresenta todas as possibilidades de combinações dos dois valores dos vetores de magnitude e ângulo. É importante ainda destacar que os resultados identificados são para um caso ideal. Obviamente, ruídos, harmônicos ou outros fatores que modificam a forma de onda irão influenciar e inserir imprecisões nas classificações.

Tabela 1 – Índices de magnitude e ângulo.

<b>Magnitude</b>	<b>Índice mag.</b>	<b>Ângulo</b>	<b>Índice ang.</b>
Positiva	1	Positivo	1
Negativa	-1	Negativo	-1
Nula	0	Nulo	0

Tabela 2 – Classificação dos sinais.

$\sum$ índice magnitude	$\sum$ índice ângulo	CLASSIFICAÇÃO
0	0	Não é <i>inrush</i> .
0	+	<i>Inrush</i> .
0	-	<i>Inrush</i> .
+	+	<i>Inrush</i> .
+	-	<i>Inrush</i> .
+	0	Não é <i>inrush</i> .
-	-	<i>Inrush</i> .
-	0	Não é <i>inrush</i> .
-	+	<i>Inrush</i> .

Lembrando que o objetivo principal é saber identificar se é ou não *inrush*, e não identificar os tipos de curtos-circuitos. Como mostra a Tabela 2 existem nove combinações de classificação, que classificam a corrente analisada como *inrush* ou não. A Figura 7 representa o diagrama unifilar do sistema de potência usado nos testes da metodologia, e a Figura 8 apresenta um fluxograma do método proposto.

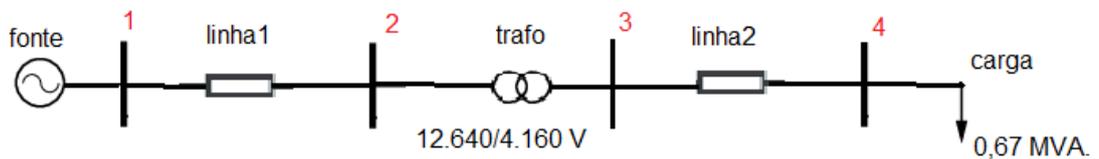


Figura 7 – Diagrama unifilar do sistema teste, com carga em delta. Autoria própria.

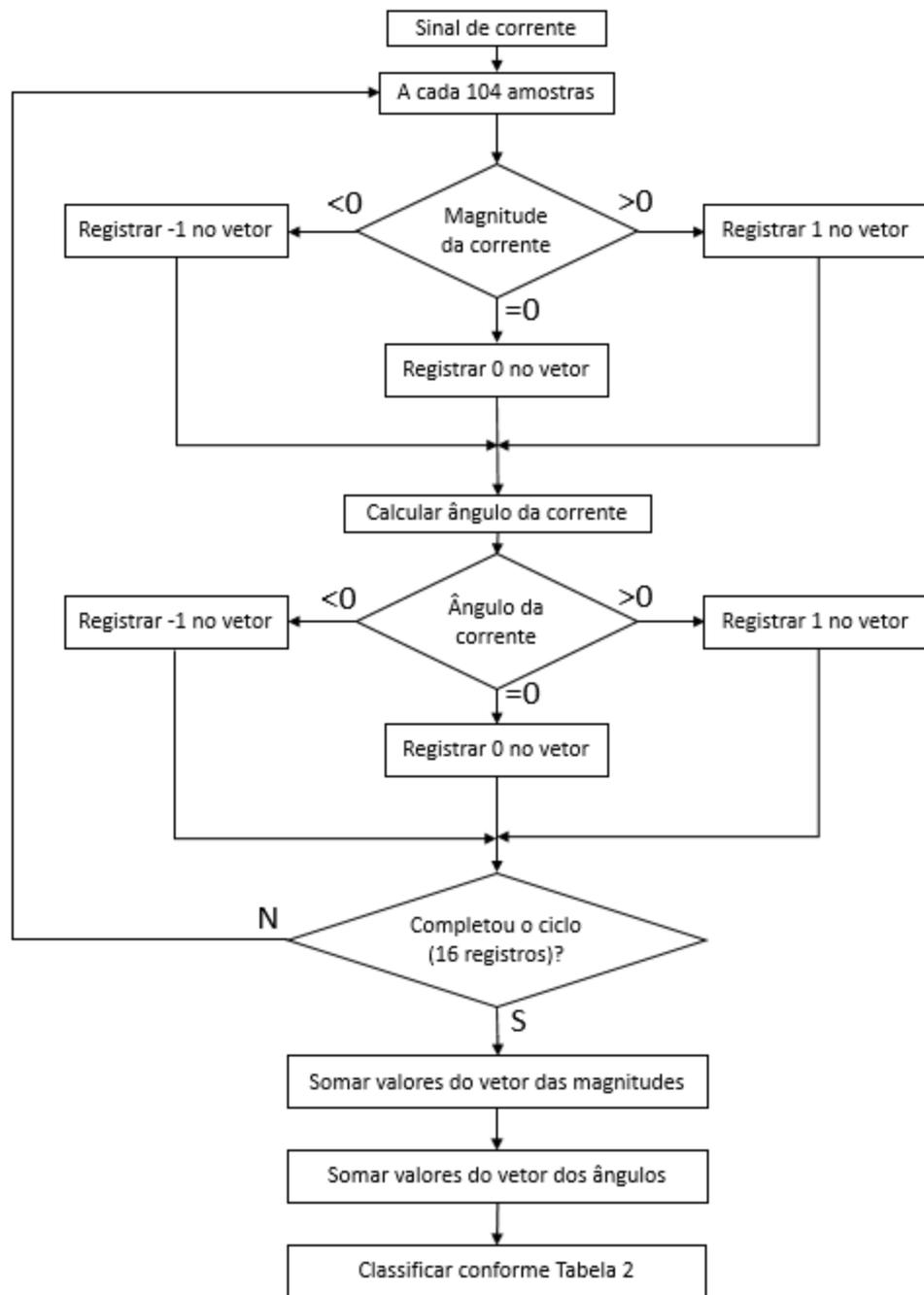


Figura 8 – Fluxograma.

### 3.3. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

Nesta seção do trabalho executa-se uma validação das etapas propostas no algoritmo descrito na metodologia. Para isso, serão analisados algumas formas de onda geradas no Matlab® para mostrar o funcionamento do método.

Geraram-se três sinais para executar essa validação: o primeiro uma senoide normal, representando uma operação normal do sistema; segundo, uma situação de curto-circuito; e terceiro, uma ocorrência de inrush.

### 3.3.1. CORRENTE SENOIDAL

Neste primeiro caso, foi simulada uma forma de onda senoidal de 60 Hz e amplitude 1 no Matlab. A figura 9 demonstra o sinal gerado.

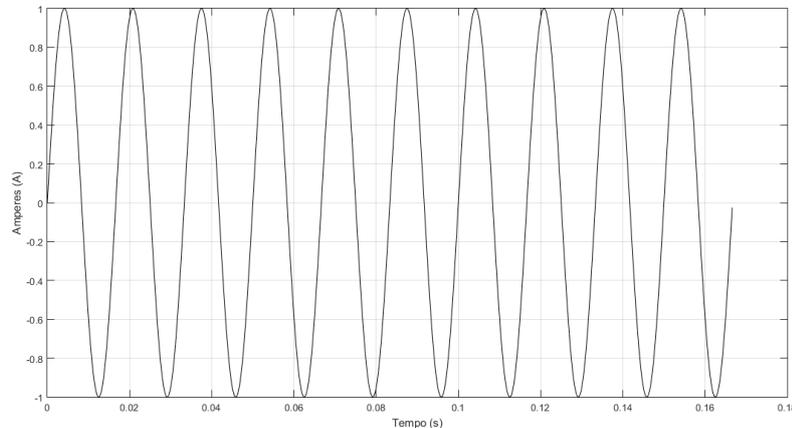


Figura 9 – Forma de onda senoidal para teste de validação. Gerado no software Matlab.

Primeiramente, como descrito na metodologia, cada ciclo terá 16 registros em cada vetor, sendo 8 para cada semiciclo. Nesse caso, para o primeiro ciclo, os valores nos vetores são:

Vetor magnitude = [1 1 1 1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1]

Vetor ângulo = [1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1]

Ressalta-se que os vetores foram representados na forma 1xn ao invés de nx1 como apenas para fins de espaço.

Quando forem feitos os somatórios, nota-se que o somatório tanto do vetor magnitude quanto do vetor ângulo serão ambos zero, o que classificaria este sinal, conforme a Tabela 2, como não sendo inrush.

### 3.3.2. CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

O segundo tipo de sinal de corrente a ser analisado será o de um curto-circuito, que é mostrado na Figura 10. Para esse caso, foi gerado um sinal no Matlab de uma corrente de 60 Hz e amplitude 1, somada à uma componente exponencialmente decrescente.

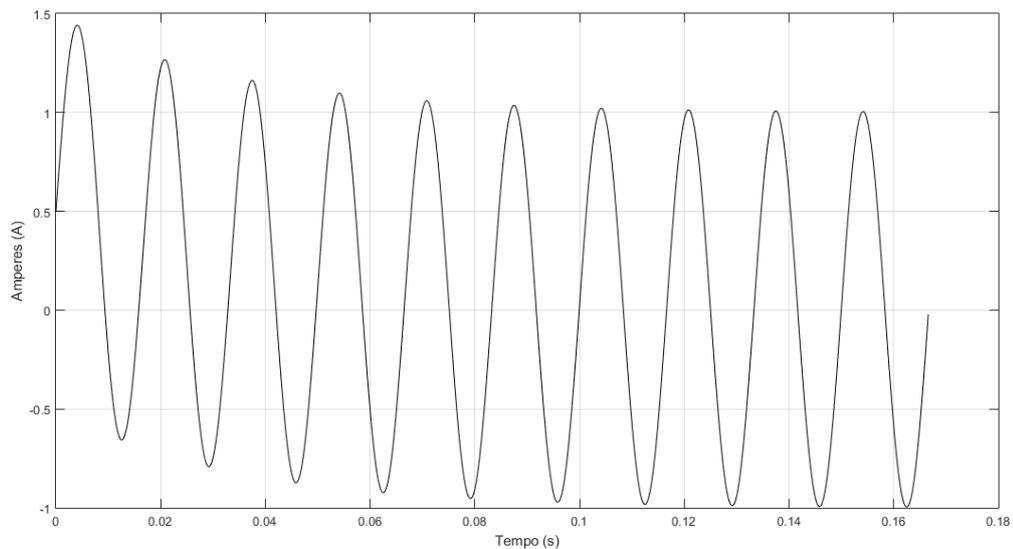


Figura 10 – Forma de onda senoidal com componente exponencial decrescente para validação. Gerado no software Matlab.

Para esse caso, os passos são idênticos ao anterior, e os valores obtidos nos vetores são:

$$\text{Vetor magnitude} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1]$$

$$\text{Vetor ângulo} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

Nota-se o comportamento descrito anteriormente, onde nesse caso, o somatório do vetor ângulo será nulo, mas o somatório do vetor magnitude será não-nulo. De acordo com a Tabela 2, essa combinação indica que o sinal não representa uma corrente não é *inrush*.

### 3.3.3. CORRENTE DE INRUSH

Finalmente, como não temos como gerar uma forma de corrente com fenômeno de *inrush* no Matlab, usaremos a mesma figura exposta nos resultados, mostrada aqui na Figura 11 para verificar qual o vetor resposta e quais os índices atribuídos a ela.

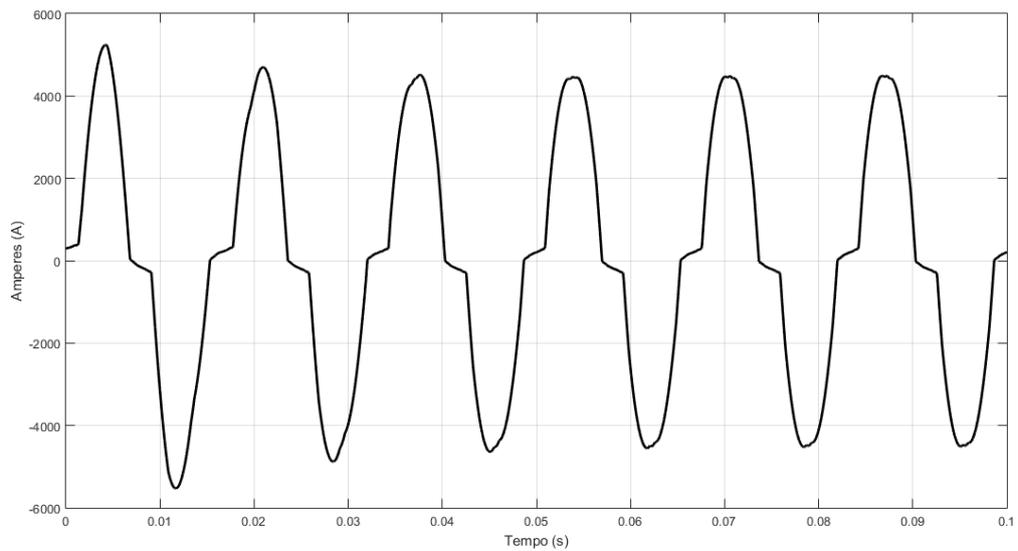


Figura 11 – Forma de onda de corrente *inrush* para validação.

Nesse caso o efeito de *inrush*, espera-se que os resultados dos somatórios dos vetores magnitude e ângulo sejam valores que a classifiquem corretamente como corrente de *inrush*. Para esse caso, os valores obtidos dos vetores são:

Vetor magnitude = [1 1 1 1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1]

Vetor ângulo = [1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1]

Nesse caso, a soma do vetor magnitude será nula, e a soma do vetor ângulo será não-nula. Segundo a Tabela 2, essa combinação classifica essa forma de onda corretamente como sendo de *inrush*.

### 3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo serviu para apresentar a metodologia proposta de forma que o algoritmo e os conceitos propostos fiquem claros. A seguir, serão apresentadas as simulações realizadas e os resultados obtidos com o método.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSOES

### 4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo irá apresentar as informações referente aos resultados e simulações: o sistema teste usado, incluindo seus dados e parâmetros, os casos simulados e os resultados obtidos. Por fim, será feito uma análise dos resultados comparando-os com o que era esperado.

### 4.2. SIMULAÇÕES REALIZADAS

É inviável avaliar todos os sistemas e situações existentes, portanto essa seção tem como escopo expor o resultados obtidos na análise dos dados coletados para situações pontuais ocorridas para um sistemas de potência teste que possui 4 barras, apresentado anteriormente na Figura 7.

Como mostra a Figura 7, o sistema em questão possui os seguintes elementos: uma fonte, que representa um barramento infinito, um transformador abaixador com relação de espiras de 3:1, duas linhas de transmissão, uma no primário e outra no secundário do transformador, e uma carga terminal. Os dados da linhas mostrados na Tabela 3. A Tabela 4 mostra os dados gerais do transformador, enquanto que a Tabela 5 e a Figura 12 mostram os dados de saturação do transformador. Destaca-se que o software ATP usa ohm por metro como unidade, foi considerado uma distância unitária. A fonte de tensão do sistema, que representa um barramento infinito, tem seu início em -1s. Sempre será observada a primeira fase que abre do disjuntor.

Tabela 3 – Dados das linhas de transmissão

Linha	$R_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$X_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$R_+$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$L_+$ ( $\Omega/\text{km}$ )
1-2	0,2241	1,1306	0,1158	0,2375
3-4	0,2802	1,4133	0,1448	0,2969

Tabela 4 – Dados transformador em condições de *inrush*.

	Primario	Secundário
Tensão (V)	12470	4160
Resistência ( $\Omega$ )	0,1296	0,0144
Reatância ( $\Omega$ )	0,7775	0,0865
Ligação	Estrela	Estrela

Tabela 5 – Relação de tensão e corrente no enrolamento primário

Saturação (primário)	
I [A] RMS	U [V] RMS
2.1	251
2.8	700
3.3	1000
8	1500
15	1750
20	2000
30	2800
10000	3000

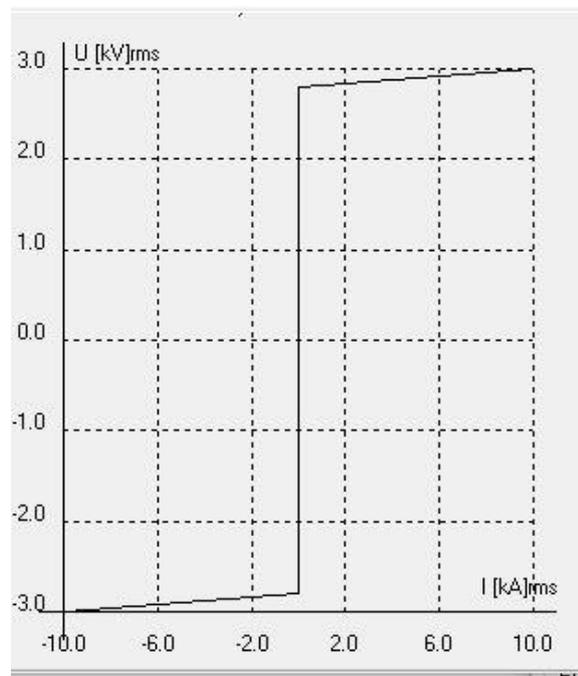


Figura 12 – Relação de tensão e corrente derivada da saturação

#### 4.2.1. CASO 1: CORRENTE DE CARGA SENOIDAL

O primeiro caso testado para classificação do algoritmo foi o de carga nominal da Figura 13, onde o valor da potência aparente da carga em operação nominal é de 0,67 MVA. Para esse caso, a forma de corrente obtida é mostrada na Figura 14, em condições normais de operação, medida no primário do transformador.

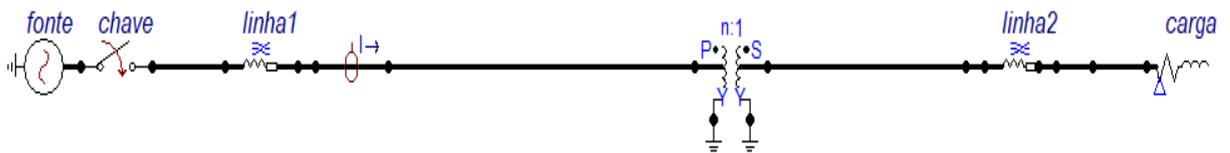


Figura 13 – Sistema de potência teste com 4 barras em condições nominais.

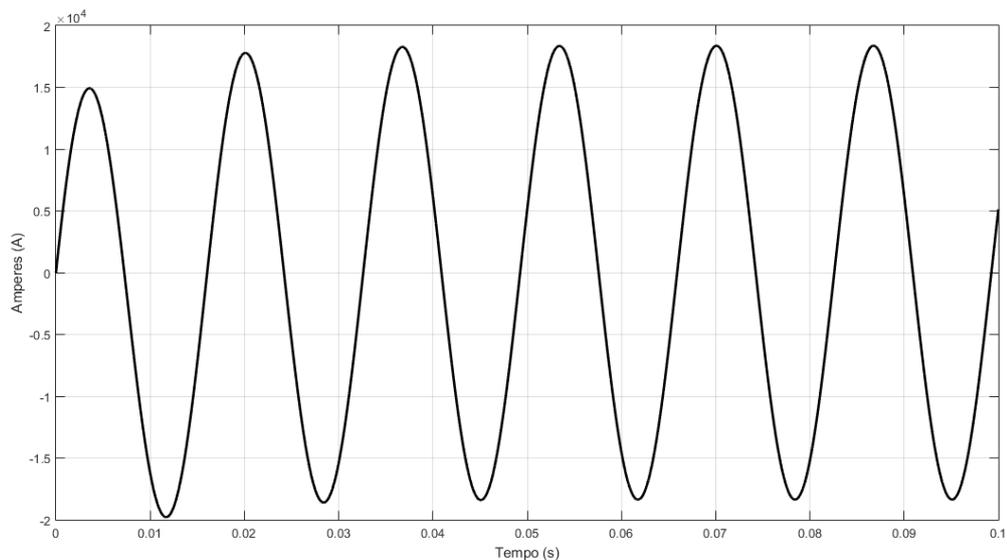


Figura 14 – Forma de onda extraída do sistema de potência teste com 4 barras em condições nominais.

Fica evidente que após o efeito transitório, desconsiderando as partes próximas de zero, o sistema tem um comportamento simétrico e periódico, como era de ser esperar para um sistema em regime permanente (a partir do tempo 0,33s) exposto a condições normais de funcionamento. Para análise classificatória, a parte simétrica irá de zerar os somatórios dos vetores do algoritmo (de ângulo e de

magnitude), retornando assim dois valores nulos, que como mostra a Tabela 2 uma classificação de “não é *inrush*”. Este caso foi, portanto, classificado corretamente.

#### 4.2.2 CASO 2: CURTO-CIRCUITO NA BARRA 2

Neste caso, o sistema simulado é o mesmo, onde foi inserido um curto-circuito trifásico na barra 2, como mostra a Figura 15. A resistência de curto-circuito é de  $0,001 \Omega$  e foi inserida apenas para evitar erros no ATP. Essa resistência tem o mesmo valor para os casos seguintes.

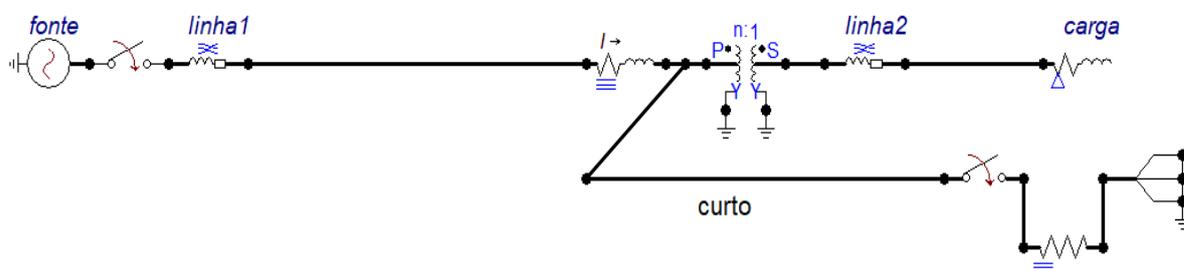


Figura 15 – Sistema de potência teste com 4 barras em condições de curto circuito na barra 2.

A figura 16 demonstra a forma de onda, de corrente, extraída pelo ATP, medida no primário do transformador.

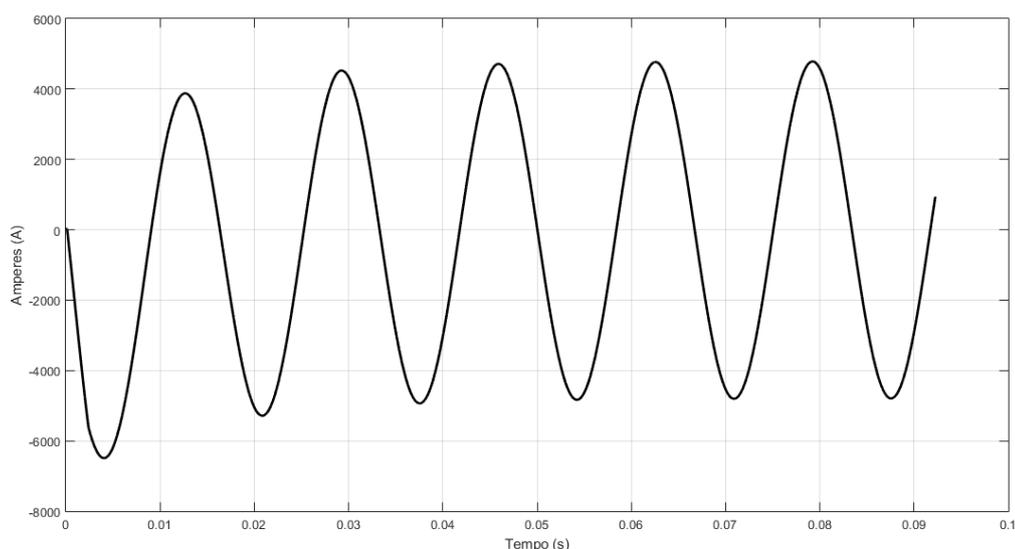


Figura 16 – Forma de onda da corrente do sistema de potência teste, com 4 barras, em condições de curto circuito na barra 2, fase b.

Ao observarmos a forma de onda de curto circuito, é possível perceber que os índices do algoritmo devem retornar que o somatório do vetor de magnitude será diferente de zero, já que a onda apresenta a assimetria característica de um curto-circuito em um sistema indutivo. Já o somatório do vetor de ângulo será zero pela característica da onda. Portanto, de acordo com a Tabela 2, o algoritmo retorna a classificação de “não é *inrush*”, que é a classificação corrente para este caso.

#### 4.2.3. CASO 3: CURTO-CIRCUITO NA BARRA 3

Este caso também contém um curto circuito, agora alocado na barra 3, o qual segue a mesma lógica para análise do caso 2. As Figuras 17 e 18 mostram, respectivamente, o circuito simulado no ATP e a forma de onda de corrente obtida, medida no primário do transformador.

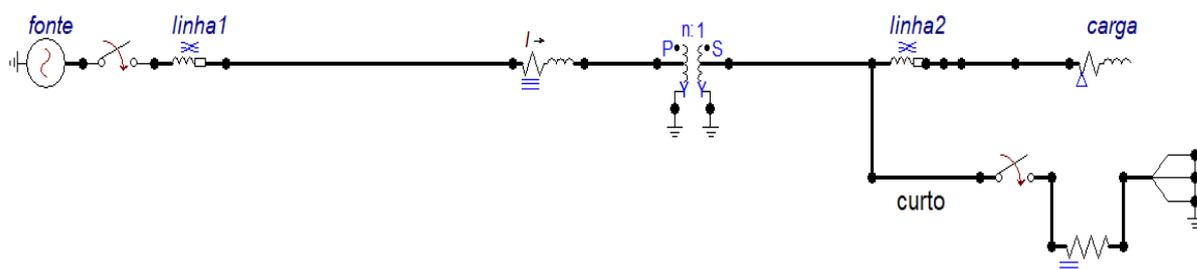


Figura 17 – Sistema de potência teste com 4 barras em condições de curto circuito na barra 3.

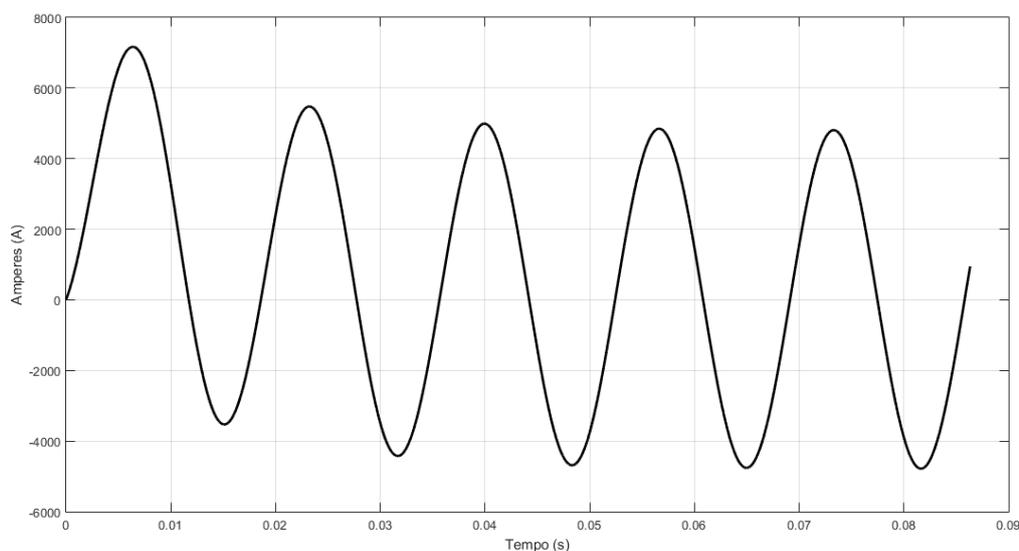


Figura 18 – Forma de onda da corrente do sistema de potência teste, com 4 barras, em condições de curto circuito na barra 3, fase a.

A classificação e os índices encontrados são semelhantes ao caso 2, por também se tratar de uma corrente de curto-circuito. O somatório do vetor de magnitude é diferente de zero, e o somatório do vetor de ângulo é igual a zero, logo o algoritmo retorna que a corrente “não é inrush”, classificando-a corretamente.

#### 4.2.4 CASO 4: CURTO-CIRCUITO NA BARRA 4

A próxima iteração será com o sistema de potência com um curto circuito na barra 4. As Figuras 19 e 20 mostram, respectivamente, o sistema simulado no ATP e a forma de onda da corrente medida no primário do transformador.

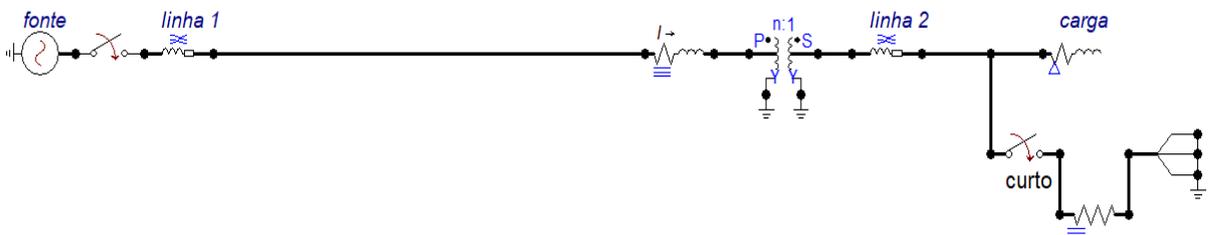


Figura 19 – Sistema de potência teste com 4 barras em condições de curto circuito na barra 4.

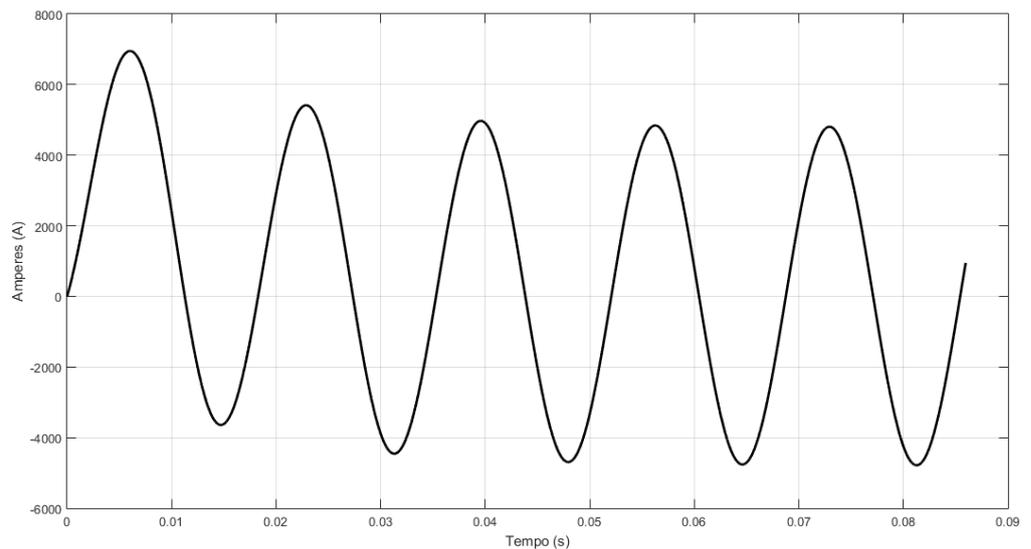


Figura 20 – Forma de onda da corrente do sistema de potência teste, com 4 barras, em condições de curto circuito na barra 4, fase a.

Similarmente aos casos de curtos-circuitos anteriores, o somatório do vetor de magnitude resulta em um valor não-nulo, e o somatório do vetor de ângulo resulta em zero, de onde o algoritmo classifica a corrente corretamente como não sendo *inrush*.

#### 4.2.5. CASO 5: CORRENTE DE INRUSH

Iremos agora observar a resposta do algoritmo a uma corrente de *inrush*. Desse modo, simula-se o mesmo caso de carga nominal inicial. A diferença está no fechamento da chave no instante zero, para forçar uma corrente de *inrush* no transformador.

Considerando-se esse cenário, a forma de onda de corrente obtida é mostrada na figura 21, medida no primário do transformador.

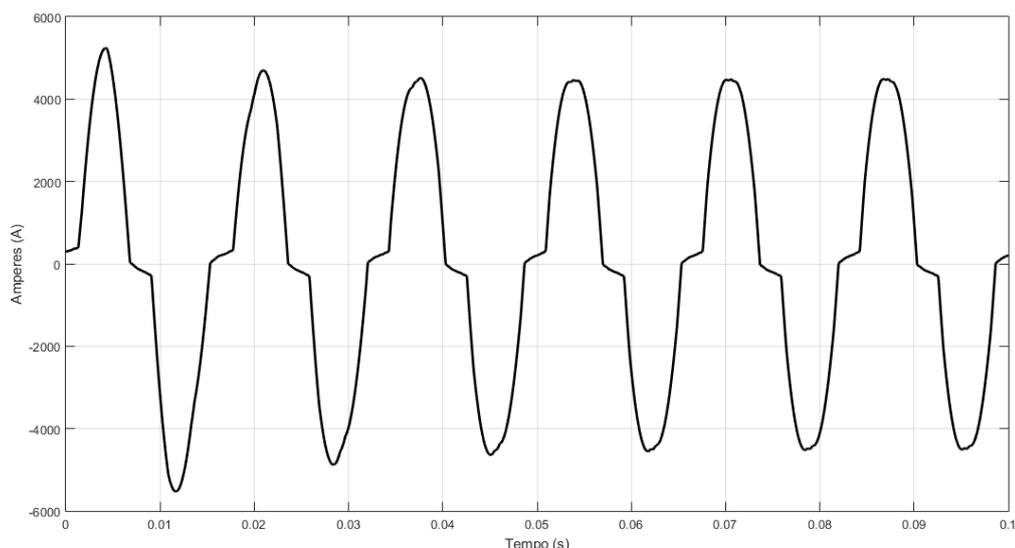


Figura 21 – Forma de onda de corrente com a atuação no fenômeno de inrush.

É possível ver que dessa forma nossos dois índices de somatórios serão diferentes de zero, devido a apresentar uma forma de onda deformada. Assim dadas as classificações da Tabela 2, o algoritmo retorna corretamente que a corrente nesse caso é de *inrush*.

De todas as simulações realizadas, nota-se que o método proposto foi capaz de obter resultados muito bons, classificando todos os casos corretamente com base nas possibilidades expostas na Tabela 2.

### 4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo mostrou os resultados obtidos das simulações realizadas, mostrando a eficiência do método em classificar as formas de onda corretamente para os casos analisados.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou de forma geral o embasamento teórico de um método de classificação de correntes de *inrush* em transformadores de potência tendo por base o vetor gradiente, utilizando dois vetores de análise: o vetor das magnitudes e o vetor dos ângulos. O objetivo do algoritmo é de conseguir identificar e assim diferenciar a corrente de *inrush* no transformador e assim prevenir a operação indesejada de relés diferenciais.

O algoritmo foi exposto a casos distintos de operação para um sistema de quatro barras tendo retornado o resultado esperado em todas as simulações executadas, provando assim que o método é eficiente e preciso, considerando as situações apresentadas. Deve-se mencionar que o algoritmo proposto, assim como tem potencial de classificar corretamente as correntes, também, devido à sua natureza, tem um grande potencial de ser bastante sensível à fenômenos que distorcem a forma de onda da corrente, como ruídos, harmônicos, frequências fora da nominal, entre outros.

Para uma análise mais ampla e completa, estudos adicionais devem ser realizados para garantir que o algoritmo mantenha o bom funcionamento nessas situações.

### 5.2. SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, citam-se:

- Teste do método proposto em sistemas teste de maior complexidade, incluindo sistemas malhados
- Verificação do bom funcionamento do método proposto para situações com ruídos, harmônicos, e outras formas de distorção da forma de onda da corrente.
- Verificação da viabilidade prática do método, incluindo fatores como tempo de resposta

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, R. J. N.; BEZERRA, U. H. **Power Transformer Differential Protection Through Gradient of the Differential Current**, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Vol. 24, No. 1-2, p. 162-173. 2013.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. **Fundamentos de circuitos elétricos**, AMGH Editora, 5. ed. 2013.

BARBOSA, D., COURY, D. V., NETTO, U. C. e OLESKOVICZ, M. **Logica Nebulosa Aplicada à Proteção Diferencial de Transformadores de Potência, Controle & Automação**. Vol.22 no.5. 2011.

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T.J. **Protective Relaying – Principles and Applications – 3ªEd.** Taylor & Francis Group, LLC. 2007.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª edição. Rio de Janeiro: McGraw Hill do Ensino Superior. 2013.

DARWISH, H. e LEHTOMEN, M. **Current Differential Relay with a Power-Current Spectrum Blocking for Transformer Protection**, IEEE Bucharest Power Tech Conference. 2009.

GU, J., ZHENG, T. e HUANG, S. F. **A New Algorithm Based on the Morphological Gradient for Avoiding Mal-operation of Transformer Differential Protection**, IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2010.

HABIB, M. e MARIN, M. A. **A Comparative Analysis of Digital Relaying Algorithms for the Differential Protection of Three Pahe Transformers**, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 3, No. 3, August 1988.

HARLOW, J. H., **Electric Power Transformer Engineering** (2nd Ed.), Boca Raton, CRC Press, 536 p, 2006.

HOOSHYAR, A., AFSHARMIA, S. SANAYEI-PASAND, M. DAVARPANAH, M. e EBRAHIMI, B. M. **Time-Domain Analysis of Differential Power Signal to Detect Magnetizing Inrush in Power Transformers**, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 27. No. 3. July 2012.

HOROWITZ, S. H. ; . PHADKE, A. G. **Power System Relaying**, 3<sup>a</sup> Ed, John Wiley & Sons Ltd. 1995.

KASXTENNY, B., et al. **A Self-organizing Fuzzy Logic Based Protective Relay – An Application to Power Transformer Protection**, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 3. 1997.

KENNEDY, L.F., HAYWARD, C.D., **Harmonic-current-restrained relays for differential protection**, AIEE Trans., 57, p. 262–266, 1938.

MAÑANA, M., et al. **Effects of Magnetizing Inrush Current on Power Quality and Distribution Generation**, [S.1.] 2005.

MCCULLOCH, W. S. ; PITTS, W. **A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The bulletin of mathematical biophysics**, p. 115–133, 1943.

MOONEY, J. **Distance Element Performance under Conditions of CT Saturation**, IEEE 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2008.

RAHMATI, A. e PASAND, M. S. (2012), **A Fast WT-based Algorithm to Distinguish Between Transformer Internal Faults and Inrush Currents**, European Transactions on Electrical Power 2012; Vol 22, Pg. 471-490.

SHARP, R. L. e GLASSBURN, W. E. **A Transformer Differential Relay with Second-Harmonic Restrain. AIEE Transaction of Power, Apparatus and Systems, Part II**, Vol 77, p. 913-918, 1958.

Sistemas de Potência: **A estrutura do sistema elétrico de potência compreende os sistemas de geração, transmissão, distribuição e subestações de energia.**, [s.d]. Disponível em: < <https://slideplayer.com.br/slide/5814496/>>. Acesso em 13 de nov. de 2019.

SOARES, I. S.; DE ALENCAR, R. J. **Identificação de correntes de inrush na proteção diferencial de transformadores.** Gesep - grupo de estudos de sistemas elétricos de potência, instituto federal do Pará, 2015.

SYKES, J A. e MORRISON, I. F. **A Proposed Method of Harmonic Restrain Differential Protection of Transformers by Digital Computers**, IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, Portland, Ore., July 18-23, 1971.

VIANELLO, R. et al. **New phasor estimator in the presence of harmonics, DC offset, and interharmonics.** In: 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Bergamo, 2010. p. 1–5.

ZANETTA JR, L. C. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência.** Livraria De Física, 1. ed, São Paulo, 2006.