

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARCO ANTONIO LUFT

**DETECÇÃO DAS CORRENTES DE INRUSH EM SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA**

Alegrete

2018.

MARCO ANTONIO LUFT

**DETECCÃO DAS CORRENTES DE INRUSH EM SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA**

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

Orientador: Eduardo Machado dos Santos

**Alegrete
2018.**

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).

L949d Luft, Marco Antonio
Detecção das Correntes de Inrush em Sistemas
Elétricos de Potência / Marco Antonio Luft.
53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA,
2018.
"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Corrente de Inrush. 2. Curto-Circuito. 3. Proteção
Diferencial. 4. Energização de Transformador. 5.
Magnetização. I. Título.

MARCO ANTONIO LUFT

DETECÇÃO DAS CORRENTES DE INRUSH EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

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.

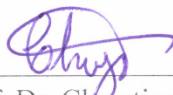
Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 3 de dezembro de 2018.

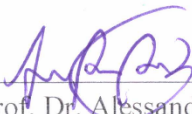
Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador



Prof. Dr. Christian Dalla Lana da Silva
UNIPAMPA



Prof. Dr. Alessandro Botti Benevides
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer aos meus pais, Julci e Eclair, pois devo tudo a eles, e a minha companheira Daiane pelo amor, carinho e pela confiança que depositaram em mim, sempre me apoiando em todos os momentos.

Ao Professor Eduardo Machado dos Santos pelos conhecimentos transmitidos e toda ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como pela sua amizade.

Aos amigos e colegas do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP), pela amizade, companheirismo e conhecimentos compartilhados nesses últimos dois anos em que tive a honra de ser integrante.

Aos demais colegas de curso e amigos que conheci durante a graduação, pela amizade, estudos e momentos de descontração.

Aos demais professores, pelos ensinamentos e contribuições na formação acadêmica.

RESUMO

É bem sabido que a proteção diferencial é a mais adequada para proteção de transformadores de potência. No entanto, durante a energização do transformador, surge uma corrente de magnetização de grande amplitude conhecida como corrente de *inrush*, que pode parecer uma falha do ponto de vista do relé de proteção diferencial. Para melhorar a segurança, mantendo os níveis necessários de sensibilidade, muitos métodos para a detecção desta corrente foram propostos com o objetivo de inibir a operação do elemento diferencial. Este trabalho apresenta, primeiramente, uma breve revisão dos princípios de proteção diferencial em transformadores, para um melhor entendimento de como as correntes de *inrush* podem interferir no correto funcionamento destes equipamentos. Posteriormente, são apresentados os principais conceitos a respeito das correntes de *inrush*, suas causas e consequências à proteção dos Sistemas Elétricos de Potência, bem como uma abordagem a respeito dos eventos e condições de chaveamento no surgimento deste fenômeno. Por fim, é proposto um novo método para a detecção das correntes de *inrush*, bem como são apresentados os sistemas teste utilizados nas simulações através do software ATP Draw e os resultados obtidos.

Palavras-chave: Proteção diferencial, corrente de *inrush*, curto-circuito, energização do transformador, chaveamento, magnetização.

ABSTRACT

It is well known that the differential protection is the most suitable for protection of power transformers. However, during the energization of the transformer, a large amplitude magnetization current known as the inrush current arises, which may appear to be a fault from the point of view of the differential protection relay. To improve safety while maintaining the necessary levels of sensitivity, many methods for detecting this current have been proposed in order to inhibit the operation of the differential element. This work presents, first, a brief review of the principles of differential protection in transformers, for a better understanding of how the inrush currents can interfere in the correct functioning of these equipments. Afterwards, the main concepts regarding inrush currents, their causes and consequences for the protection of the Electric Power Systems, as well as an approach regarding the events and switching conditions in the emergence of this phenomenon are presented. Finally, a new method for the detection of inrush currents is proposed, as well as the test systems used in the simulations using the ATP Draw software and the results obtained.

Keywords: Differential protection, inrush current, fault current, transformer energization, switching, magnetization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama típico de conexão do relé diferencial.	18
Figura 2 – Curva de histerese de um material ferromagnético.	19
Figura 3 - Distorção da corrente de inrush devido à saturação. (a) curva B-H relacionando indiretamente a tensão à corrente de inrush. (b) corrente de inrush proporcional a H versus tempo.	23
Figura 4 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão nula e sem magnetismo residual.	25
Figura 5 – Comportamento da corrente a vazio em relação a indução magnética.	26
Figura 6 – Típica forma de onda da corrente de inrush.	26
Figura 7 – Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão nula e magnetismo residual com polaridade oposta ao fluxo magnético.	27
Figura 8 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão nula e magnetismo residual de mesma polaridade que o fluxo magnético.	28
Figura 9 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão nula e magnetismo residual igual e de mesma polaridade que o fluxo magnético.	28
Figura 10 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão máxima e com máximo magnetismo residual com polaridade oposta ao fluxo magnético.	29
Figura 11 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão máxima e com máximo magnetismo residual de mesma polaridade que o fluxo magnético.	30
Figura 12 - Forma de onda típica da corrente de <i>inrush</i>	31
Figura 13 - Forma de onda típica da corrente de curto-circuito.	32
Figura 14 - Sistema teste para <i>inrush</i>	33
Figura 15 - Sistema teste para curto-circuito.	34
Figura 16 - Curva de saturação do transformador.	35

Figura 17 - Simulação do caso 1 para a fase A. (a) Corrente da fase A. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase A. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase A.....	37
Figura 18 - Simulação do caso 1 para a fase B. (a) Corrente da fase B. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase B. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase B.....	38
Figura 19 - Simulação do caso 1 para a fase C. (a) Corrente da fase C. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase C. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase C.....	38
Figura 20 - Simulação do caso 1 para a fase A. (a) Valor RMS da corrente da fase A. (b) Sensibilização do Relé para a fase A. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.	39
Figura 21 - Simulação do caso 1 para a fase B. (a) Valor RMS da corrente da fase B. (b) Sensibilização do Relé para a fase B. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.....	39
Figura 22 - Simulação do caso 1 para a fase C. (a) Valor RMS da corrente da fase C. (b) Sensibilização do Relé para a fase C. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.....	40
Figura 23 - Simulação do caso 2 para a fase A. (a) Corrente da fase A. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase A. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase A.....	41
Figura 24 - Simulação do caso 2 para a fase B. (a) Corrente da fase B. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase B. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase B.....	41
Figura 25 - Simulação do caso 2 para a fase C. (a) Corrente da fase C. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase C. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase C.....	42
Figura 26 - Simulação do caso 2 para a fase A. (a) Valor RMS da corrente da fase A. (b) Sensibilização do Relé para a fase A. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.	42
Figura 27 - Simulação do caso 2 para a fase B. (a) Valor RMS da corrente da fase B. (b) Sensibilização do Relé para a fase B. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.....	43
Figura 28 - Simulação do caso 2 para a fase C. (a) Valor RMS da corrente da fase C. (b) Sensibilização do Relé para a fase C. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.....	43

Figura 29 - Simulação do caso 3 para a fase A. (a) Corrente da fase A. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase A. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase A.....	44
Figura 30 - Simulação do caso 3 para a fase A. (a) Valor RMS da corrente da fase A. (b) Sensibilização do Relé para a fase A. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.	44
Figura 31 - Simulação do caso 4 para a fase A. (a) Corrente da fase A. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase A. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase A.....	45
Figura 32 - Simulação do caso 4 para a fase B. (a) Corrente da fase B. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase B. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase B.....	46
Figura 33 - Simulação do caso 4 para a fase C. (a) Corrente da fase C. (b) Corrente de <i>inrush</i> da fase C. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase C.....	46
Figura 34 - Simulação do caso 4 para a fase A. (a) Valor RMS da corrente da fase A. (b) Sensibilização do Relé para a fase A. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.	47
Figura 35 - Simulação do caso 4 para a fase B. (a) Valor RMS da corrente da fase B. (b) Sensibilização do Relé para a fase B. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.....	48
Figura 36 - Simulação do caso 4 para a fase C. (a) Valor RMS da corrente da fase C. (b) Sensibilização do Relé para a fase C. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do transformador de potência monofásico.	34
Tabela 2 - Parâmetros do gerador trifásico.....	34
Tabela 3 - Impedância das fontes geradoras.....	35
Tabela 4 - Impedância da linha.....	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Considerações Gerais	13
1.2 Revisão Bibliográfica	13
1.3 Motivação	15
1.4 Objetivos do Trabalho	15
1.5 Estrutura do Trabalho	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Considerações Gerais	17
2.2 Correntes de Inrush.....	17
2.2.1 Princípios de Proteção Diferencial em Transformadores	17
2.2.2 Caracterização das Correntes de Inrush.....	18
2.3 Descrição Física do Fenômeno.....	20
2.4 Condições Iniciais do Fenômeno de Inrush.....	24
2.4.1 Eventos que Resultam nas Correntes de Inrush	24
2.4.2 Condições de Manobra no Surgimento do Fenômeno de Inrush	25
2.5 Considerações Finais	30
3. METODOLOGIA.....	31
3.1 Considerações Gerais	31
3.2 Método Proposto	31
3.3 Sistema Teste.....	33
3.4 Considerações Finais	36
4. RESULTADOS	37
4.1 Considerações Gerais	37
4.2 Caso 1: Energização de Banco de Transformadores sem Carga	37
4.3 Caso 2: Energização de Banco de Transformadores sob Carga	40
4.4 Caso 3: Curto-Circuito Monofásico em 25% da LT	44
4.5 Caso 4: Curto-Circuito Trifásico em 50% da LT	45
4.6 Considerações Finais	48
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O sistema elétrico de potência é um grande conjunto de sistemas que englobam a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica. Os transformadores de potência fazem parte da transmissão e da distribuição da energia gerada por esse sistema. Com o objetivo de garantir a qualidade da transmissão e distribuição desta energia, torna-se muito importante analisar diversos aspectos do transformador de potência, pois este está exposto a condições adversas e imprevisíveis, como diversos fenômenos que ocorrem no período transitório, os quais podem levar a situações de falha ou má operação.

Sabe-se que, quando uma unidade transformadora entra em operação, é necessário magnetizá-la, o que resulta em uma corrente de magnetização de grande amplitude e forma de onda distorcida, conhecida como corrente de *inrush* ou corrente de irrupção. Este fenômeno pode ocorrer quando há a inserção de uma nova unidade transformadora de potência no sistema elétrico, quando ocorre um desligamento seguido do religamento deste na rede elétrica ou quando ocorre um dos dois fatos já citados em um transformador conectado em paralelo a um transformador já energizado.

Como a corrente de *inrush* tem, em muitos casos, mesma magnitude que a corrente de curto-circuito do transformador, o relé vê a condição de energização como uma falha, por isso a proteção diferencial por restrição da segunda harmônica é ainda a principal técnica utilizada para prevenir a má operação de transformadores de potência durante a sua energização. Para melhorar a segurança, mantendo os níveis necessários de confiabilidade, muitos métodos de restrição foram propostos para bloquear a operação do elemento diferencial devido à corrente de *inrush*.

1.2 Revisão Bibliográfica

O estudo do fenômeno das correntes de *inrush* remete a mais de 80 anos. Desde então, muitos trabalhos foram publicados discutindo soluções para os problemas causados por esse fenômeno. A análise apresentada aqui se concentra principalmente na proteção diferencial. Os relés diferenciais são propensos a erros de operação na presença de correntes de *inrush* do

transformador, que resultam de transientes no fluxo magnético do transformador. Os métodos utilizados atualmente para discriminar faltas internas de condições de *inrush* se dividem em dois grupos: aqueles que usam harmônicos para restringir ou bloquear e aqueles baseados na identificação de forma de onda.

Cordray (1931a) e Monseth e Robinson (1935) propuseram a primeira solução para o problema, introduzindo um atraso de tempo intencional no relé diferencial. Outra proposta feita por Cordray (1931a, 1931b) foi dessensibilizar o relé por um determinado período de tempo para que este não percebesse a condição de *inrush*. Uma outra solução encontrada foi adicionar um sinal de tensão para, segundo Monseth e Robinson (1935), restringir, e segundo Harder e Marter (1948), inspecionar o relé diferencial.

No entanto, estas primeiras soluções encontradas para o problema não eram as mais apropriadas, visto que deixavam a máquina desprotegida, o que pode acarretar em diversos danos, mesmo que por um pequeno período de tempo. Tendo isto em vista, os pesquisadores rapidamente reconheceram que o conteúdo harmônico da corrente diferencial fornecia informações que ajudavam a diferenciar as falhas das condições de *inrush*. Kennedy e Hayward (1938) propuseram um relé diferencial com restrição apenas harmônica para a proteção do barramento. Hayward (1941) e Mathews (1954) desenvolveram este método adicionando restrição percentual diferencial para proteção do transformador. Esses primeiros relés usavam todos os harmônicos para contenção. Com um relé que usava apenas o segundo harmônico para bloquear, Sharp e Glassburn (1958) introduziram a ideia de bloqueio harmônico ao invés de restrição harmônica.

Muitos relés diferenciais de transformadores modernos usam métodos de restrição ou bloqueio de harmônicos. Esses métodos garantem a segurança do relé para uma porcentagem muito alta de casos de *inrush* e de superexcitação. No entanto, esses métodos não funcionam em casos com conteúdo harmônico muito baixo na corrente de operação. Assim, a restrição harmônica comum ou bloqueio, introduzido por Einval e Linders (1975), aumenta a segurança do relé para *inrush*, mas pode atrasar a operação para falhas internas combinadas com *inrush* nas fases onde não ocorrem defeito.

Outros autores propuseram vários métodos baseados no reconhecimento de ondas para distinguir falhas de *inrush*. Esses métodos foram aplicados em relés de transformadores. Exemplos destas pesquisas são encontradas em Atabekov (1960), Rockefeller (1969), Dmitrenko

(1970) e Wilkinson (1997). No entanto, essas técnicas não identificam condições de sobreexcitação do transformador.

Recentemente alguns autores propuseram soluções para o *inrush* simpático. Zhang et al. (2016) utilizou a morfologia matemática para a identificação da energização solidária e faltas internas, analisando as características dos picos e vales das correntes diferenciais para cada situação. Marques et al. (2018) propôs um método baseado na análise de diferentes níveis de decomposição dos coeficientes de detalhes provenientes da Transformada Wavelet Discreta aplicada nas correntes diferenciais.

Embora muitas técnicas já tenham sido desenvolvidas para garantir a correta atuação do sistema de proteção durante as correntes de *inrush* e faltas internas, tanto entre as que usam harmônicos para restringir ou bloquear como para aquelas baseadas na forma de onda, ainda não existe uma que possa se classificar como unanimidade.

1.3 Motivação

Os estudos apresentados na revisão bibliográfica mostram uma grande evolução nas técnicas de detecção das correntes de *inrush*, entretanto nenhuma destas técnicas conseguiu se estabelecer. Este fato motivou este trabalho, onde o foco é desenvolver uma nova metodologia capaz de identificar as correntes de *inrush*, de modo a garantir a correta atuação da proteção diferencial.

1.4 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo geral propor uma nova metodologia para a identificação das correntes de *inrush*.

Como objetivos específicos citam-se:

- Construção do sistema teste;
- Criação de banco de dados;
- Implementação de nova técnica;
- Análise dos resultados.

1.5 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1, é apresentado a introdução do tema juntamente com a motivação e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, é apresentada, primeiramente, uma breve revisão dos princípios de proteção diferencial em transformadores, para um melhor entendimento de como as correntes de *inrush* podem interferir no correto funcionamento destes equipamentos. Posteriormente são apresentados os principais conceitos a respeito das correntes de *inrush*, suas causas e consequências à proteção dos Sistemas Elétricos de Potência. Este Capítulo apresenta descrições mais detalhadas a respeito das características da corrente de *inrush*, bem como uma abordagem sobre os eventos que resultam no surgimento deste fenômeno, assim como das condições de chaveamento que podem amenizar ou agravar os efeitos deste.

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia do trabalho, onde é proposto um novo método destinado à detecção das correntes de *inrush*, assim como os sistemas teste utilizados para as simulações de *inrush* e curto-circuito implementados no software ATP Draw.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos através de simulações da atuação do método proposto, bem como a análise desses resultados.

Por fim, no Capítulo 5 são feitas as conclusões e as sugestões para os trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Gerais

O entendimento do fenômeno das correntes de *inrush* é essencial para o desenvolvimento de metodologias capazes de detectar estas correntes e garantir a correta atuação dos sistemas de proteção em sistemas elétricos de potência. Logo, o foco deste Capítulo é apresentar os conceitos fundamentais do fenômeno das correntes de *inrush*, incluindo suas causas, características e uma descrição física do fenômeno.

2.2 Correntes de Inrush

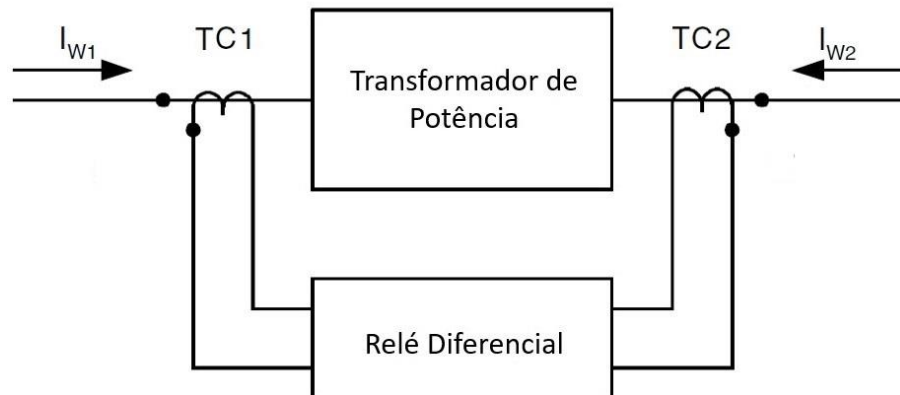
2.2.1 Princípios de Proteção Diferencial em Transformadores

A proteção diferencial é um método rápido e seletivo de proteção contra curto-circuitos em transformadores e é uma aplicação prática da lei de Kirchhoff. A soma das correntes que entram no transformador deve ser igual à soma das correntes que saem do transformador. A proteção diferencial realiza uma soma fasorial entre as correntes medidas que entram e saem do transformador para criar uma corrente diferencial, também conhecida como corrente de operação, I_{OP} :

$$I_{OP} = |\vec{I}_{W1} + \vec{I}_{W2}| \quad (2.1)$$

Assumindo um transformador ideal, como o da Figura 1, e assumindo transformadores de corrente (TCs) ideais, a corrente diferencial é zero quando a corrente está fluindo através do transformador. Uma corrente diferencial maior que zero indica uma condição de falha interna. Na prática, a corrente diferencial para um transformador operando normalmente é sempre maior que zero devido a erros de medição dos TCs, a posição do comutador de derivação de carga e outros fatores que introduzem ruído nos sinais de medição. Portanto, a sensibilidade da proteção é reduzida levemente para levar em conta esses erros (HARLOW, 2006).

Figura 1 - Diagrama típico de conexão do relé diferencial.



FONTE: Imagem adaptada de (Harlow, 2006).

Existem duas situações comuns em que a proteção diferencial pode declarar incorretamente uma condição de falha interna. Uma condição é a saturação do TC para uma falha fora da zona de proteção do transformador. Nesse caso, o erro no sinal de medição do TC saturado resulta em um erro significativo na corrente diferencial. A corrente diferencial errônea pode resultar em operação indesejada do elemento diferencial para uma condição de falha externa. A segunda situação comum é um evento de *inrush* do transformador, no qual algumas situações operacionais alteram instantaneamente o fluxo operacional do núcleo do transformador, exigindo um grande suprimento de corrente. Este fluxo de corrente geralmente ocorre em apenas um enrolamento do transformador. Portanto, as correntes de *inrush* podem produzir uma corrente diferencial que resulta na operação da proteção diferencial. Esse tipo de evento não é uma condição de falha, portanto, a proteção diferencial deve restringir sua operação nessa condição.

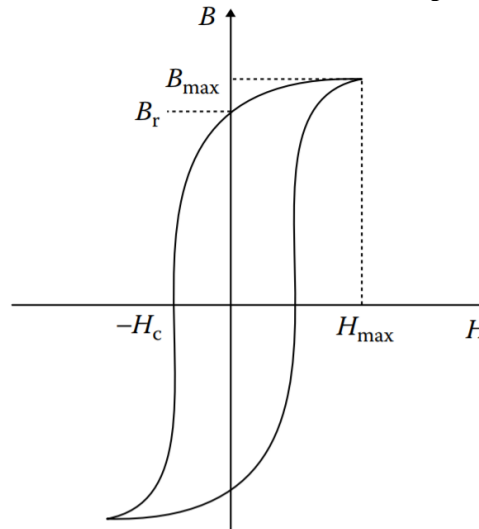
2.2.2 Caracterização das Correntes de Inrush

Quando um transformador sem carga é acionado ou a tensão é recuperada após uma falha externa ser eliminada, uma corrente transitória de alta magnitude chamada corrente de *inrush* ocorrerá em um lado do transformador, o que pode levar a um mau funcionamento da proteção diferencial.

Isto ocorre porque quando um transformador é desconectado de sua fonte de energia, há uma interrupção da corrente que circula na máquina e a intensidade do campo magnético, bem como a força magnetomotriz de excitação do núcleo vão à zero. O núcleo é feito de um material

ferromagnético, o qual apresenta o fenômeno da histerese, que se caracteriza por uma relação não linear entre a intensidade de campo magnético e a indução magnética. A Figura 2 apresenta a curva de histerese de um material ferromagnético.

Figura 2 – Curva de histerese de um material ferromagnético.



FONTE: Del Vecchio et al. (2002).

Quando o transformador é desenergizado, uma certa quantidade de fluxo residual permanece no núcleo devido às propriedades do material do núcleo magnético. O fluxo residual pode ser de 50 a 90% do fluxo operacional máximo, dependendo do tipo de aço no núcleo. Quando a tensão é reaplicada ao transformador, o fluxo introduzido pela tensão da fonte é baseado no que já existe no núcleo. A fim de manter este nível de fluxo no núcleo, que pode estar bem na faixa de saturação do mesmo, o transformador pode extrair uma corrente com magnitude bem acima da corrente de plena carga nominal do transformador. Dependendo do projeto do transformador, a magnitude dessa corrente de entrada pode ser de 3,5 a 40 vezes a corrente nominal de carga total, sendo mais detalhadamente consideradas como aproximadamente 25 vezes a corrente nominal em 0,01 s, e, aproximadamente, 12 vezes a corrente nominal em 0,1 s. A forma de onda da corrente de *inrush* é semelhante a uma onda senoidal, mas em grande parte inclinada para a direção positiva ou negativa. Esta corrente de *inrush* sofre uma queda, em parte devido a perdas que fornecem um efeito de amortecimento. No entanto, a corrente pode permanecer bem acima da corrente nominal por muitos ciclos, (HARLOW, 2006).

Essa corrente de *inrush* pode afetar a operação dos relés e fusíveis localizados no sistema próximo ao transformador. Aproximações decentes da corrente de *inrush* requerem informações detalhadas do projeto do transformador, que podem estar disponíveis no fabricante, mas que normalmente não estão disponíveis para o engenheiro de aplicação. Os valores reais da corrente de *inrush* dependem de onde, na onda de tensão da fonte, ocorrem as operações de chaveamento, o momento de abertura afetando a magnitude do fluxo residual e o momento de fechamento afetando o novo fluxo (HARLOW, 2006).

As magnitudes e formas de onda das correntes de *inrush* dependem de uma multiplicidade de fatores e são quase impossíveis de prever. A seguir são resumidas as principais características das correntes de *inrush*:

- Geralmente, contêm uma componente DC de offset, harmônicos ímpares e harmônicos pares de corrente (SONNEMANN, 1958);
- O conteúdo de segunda harmônica começa com um valor baixo e aumenta conforme a corrente de *inrush* diminui (HARLOW, 2006);
- A constante de decaimento geralmente é muito maior que a constante de decaimento da corrente de falta (HARLOW, 2006).

Sonnemann (1958) inicialmente alegou que o conteúdo de segunda harmônica da corrente de *inrush* nunca foi inferior a 16 a 17% do fundamental. No entanto, percebeu-se posteriormente que a energização do transformador com tensões reduzidas pode gerar correntes de *inrush* com conteúdo de segundo harmônico inferior a 10%, (HARLOW, 2006).

2.3 Descrição Física do Fenômeno

Quando um transformador é reenergizado por uma fonte de tensão V , a variação do fluxo $\frac{d\phi}{dt}$ deve coincidir com a mudança de tensão de acordo com a lei de Faraday, conforme (2.2), onde N é o número de espiras (DEL VECCHIO, 2002).

$$V = N * \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Para uma fonte de tensão com forma de onda senoidal, o fluxo magnético ϕ também possui forma de onda senoidal, como mostrado em (2.3) (DEL VECCHIO, 2002).

$$\phi = \phi_P \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.3)$$

Em (2.3), ϕ_P é o valor de pico do fluxo magnético, ω é a frequência angular e φ é o ângulo de fase da senoide. Este fluxo magnético também pode ser definido por (2.4) (DEL VECCHIO, 2002).

$$\phi = \int B \, dA \quad (2.4)$$

Na Equação 2.4, B é a densidade de fluxo magnético e A é a área da seção transversal por onde passa o fluxo magnético. Pode-se assumir que a densidade de fluxo magnético é uniforme em todo o núcleo, já que a área da seção transversal A_C do mesmo é constante. Sendo assim o fluxo magnético é dado por (2.5) (DEL VECCHIO, 2002).

$$\phi = B A_C \quad (2.5)$$

A partir disto, considerando uma densidade de fluxo magnético máximo B_P , pode-se chegar à uma expressão para o pico de fluxo magnético, como mostrado em (2.6) (DEL VECCHIO, 2002).

$$\phi_P = B_P A_C \quad (2.6)$$

Agora, substituindo-se estas expressões na Equação 2.2, é possível definir uma nova expressão para a tensão, conforme (2.7) (DEL VECCHIO, 2002).

$$V = -N\omega\phi_P \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.7)$$

Sendo assim, a tensão de pico V_P , usando ω como $2\pi f$, sendo f a frequência da rede em hertz, é apresentada na Equação 2.8 (DEL VECCHIO, 2002).

$$V_P = 2\pi f N \phi_P = 2\pi f N B_P A_C \quad (2.8)$$

Percebe-se ao analisar a Equação 2.8 que, para manter a variação de tensão, a indução magnética deve oscilar entre os valores de $\pm B_P$ por um ciclo. Se, na pior das hipóteses, a fonte de tensão é ligada quando a tensão está em um valor que requer um valor de indução equivalente a $-B_P$ e a indução remanescente for de aproximadamente $+B_P$, será necessária uma indução

magnética com valor aproximado de $2B_P$ para atingir o valor de tensão de chaveamento (DEL VECCHIO, 2002).

Como B_P geralmente tem valores entre 10 e 20% abaixo da saturação em transformadores de potência típicos, o núcleo será fortemente saturado, o que requer uma corrente de excitação muito alta. Essa corrente excitante é a corrente de *inrush* e pode ser muitas vezes a corrente de carga normal em um transformador (DEL VECCHIO, 2002).

Seja $\Delta\Phi$ a variação de fluxo magnético necessária para trazer a tensão de seu valor inicial até seu valor máximo, esta pode ser positiva, negativa ou zero, dependendo do ponto de ativação, sendo considerada positiva nesta análise. Parte do aumento em $\Delta\Phi$ simplesmente levará a indução até o nível de saturação, gastando pouca energia ou corrente excitante, e outra parte será B_{inc} , o chamado fluxo incremental. A primeira parte é dada, aproximadamente, por (2.9), onde B_s é a indução de saturação e B_r é a indução magnética remanente no núcleo (DEL VECCHIO, 2002).

$$(B_s - B_r) A_C \quad (2.9)$$

Além deste ponto, para aumentos adicionais em $\Delta\Phi$ se faz necessária uma alta corrente de excitação. Além da saturação, o núcleo e o ar ou óleo têm a mesma permeabilidade, portanto a densidade de fluxo incremental será a mesma em todo o interior da bobina. Pode-se determinar a área transversal da bobina pelo raio médio R_m , onde $A = \pi R_m^2$. Já a densidade de fluxo incremental é dada por (2.10) (DEL VECCHIO, 2002).

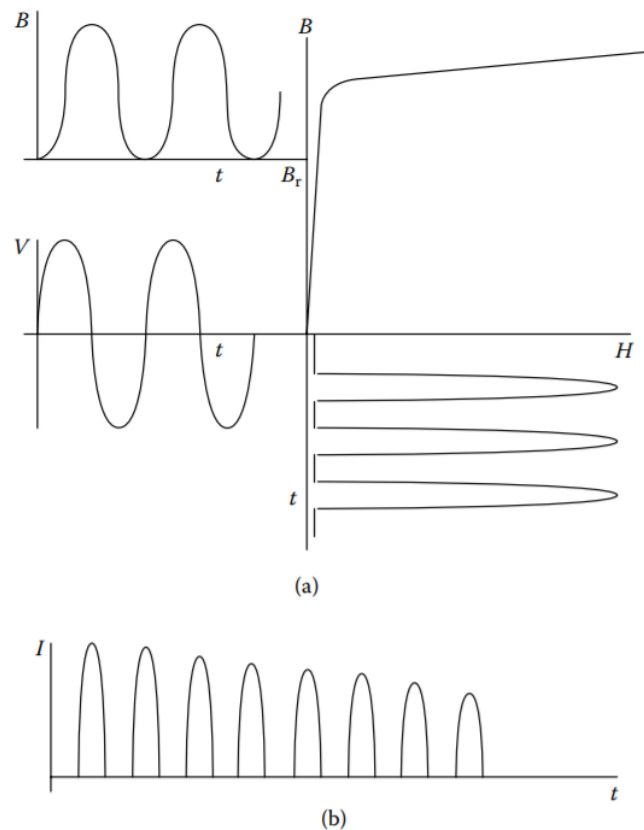
$$B_{inc} = \frac{\Delta\Phi - (B_s - B_r) A_C}{A} \quad (2.10)$$

O campo magnético incremental dentro da bobina é $H_{inc} = NI / h$, onde NI são as voltas excitantes e h é a altura da bobina. Como a permeabilidade para essa mudança de fluxo é μ_0 , tem-se que $B_{inc} = \mu_0 H_{inc} = \mu_0 NI / h$, o que resulta na Equação 2.11. Esta aproximação é possível visto que o campo necessário para atingir a saturação é muito pequeno em relação ao campo magnético total (DEL VECCHIO, 2002).

$$NI = \frac{h[\Delta\Phi - (B_s - B_r) A_C]}{\mu_0 A} \quad (2.11)$$

Enquanto a tensão é senoidal, a corrente de *inrush* será distorcida principalmente devido aos efeitos de saturação. Mesmo abaixo da saturação, há alguma distorção devido à não linearidade na curva B-H. A Figura 3a ilustra a situação no *inrush*. A tensão senoidal é proporcional à indução incremental, que é deslocada pela indução remanescente, exigindo altos valores de H próximo ao seu pico e pequenos valores de H próximo ao seu vale. Isso é refletido na corrente de excitação, que é proporcional a H. Essa corrente aparece como uma série de pulsos positivos separados por amplas regiões de valor próximo de zero, como mostrado na Figura 3a. Os impulsos de corrente positiva aparecem sem distorções porque estão associados à porção saturada da curva B-H, onde a permeabilidade relativa é próxima de 1. A alta corrente de *inrush* diminuirá com o tempo devido a efeitos resistivos, como mostrado na Figura 3b (DEL VECCHIO, 2002).

Figura 3 - Distorção da corrente de inrush devido à saturação. (a) curva B-H relacionando indiretamente a tensão à corrente de inrush. (b) corrente de inrush proporcional a H versus tempo.



FONTE: Del Vecchio (2002).

2.4 Condições Iniciais do Fenômeno de Inrush

2.4.1 Eventos que Resultam nas Correntes de Inrush

Qualquer evento no sistema de potência que causa um aumento significativo na tensão de magnetização do núcleo do transformador resulta na corrente de magnetização de *inrush* fluindo para o transformador. Os três eventos mais comuns são:

- Energização do transformador: Este é um evento típico onde as correntes de *inrush* são uma preocupação. A tensão de excitação em um enrolamento é aumentada de 0 para tensão total. O núcleo do transformador normalmente satura, com a quantidade de saturação determinada pelo projeto do transformador, a impedância do sistema, o fluxo remanescente no núcleo e o ponto na onda de tensão quando o transformador é energizado. A corrente necessária para fornecer esse fluxo pode chegar a 40 vezes a classificação de carga máxima do transformador, com valor típico para transformadores de potência de 2 a 6 vezes a classificação de carga total (GRIGSBY, 2001).
- Recuperação de tensão após a eliminação de uma falta: Uma falha externa pode reduzir significativamente a tensão do sistema e, portanto, reduzir a tensão de excitação do transformador. Quando esta falha é eliminada, a tensão de excitação retorna ao nível normal de voltagem do sistema. O retorno da tensão pode forçar uma componente DC de offset nas ligações do fluxo, resultando na corrente de magnetização de *inrush*. Essa corrente de *inrush* será menor que a de energização, já que na primeira não há fluxo remanescente no núcleo. A corrente medida pelo relé diferencial será razoavelmente linear devido à presença de corrente de carga e pode resultar em baixos níveis de corrente de segundo harmônico (HOROWITZ, 1995).
- *Inrush* simpático: A energização de um transformador no sistema de potência pode fazer com que correntes de magnetização de *inrush* simpáticas fluam para um transformador paralelo já energizado. Energizar o segundo transformador causa uma queda de tensão na resistência da linha da fonte que alimenta os transformadores. Esta queda de tensão pode causar uma saturação do transformador já energizado na direção negativa. Essa saturação faz com que a corrente de magnetização de *inrush* forneça o fluxo. A magnitude desta corrente de *inrush* geralmente não é tão severa quanto nos outros casos (HOROWITZ, 1995).

2.4.2 Condições de Manobra no Surgimento do Fenômeno de Inrush

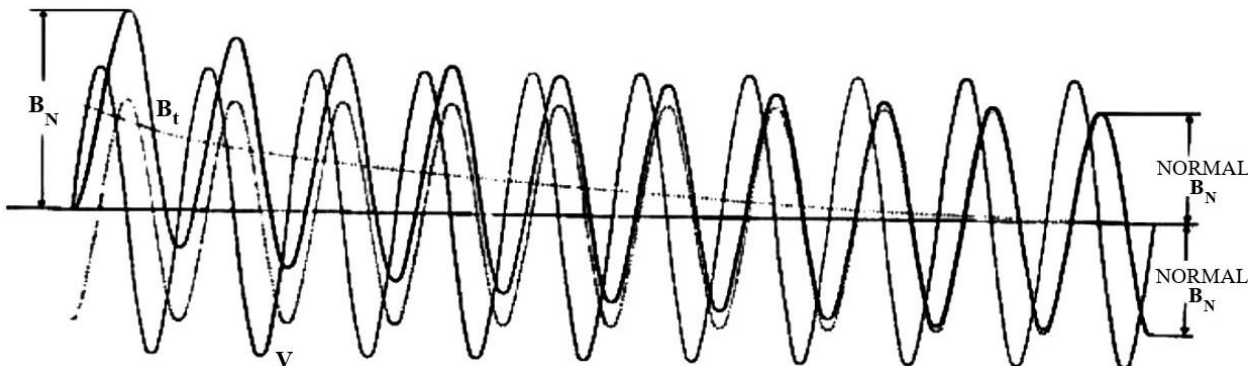
O valor inicial de corrente no transformador no momento da comutação é determinado, principalmente, pelo ponto da onda de tensão no momento do chaveamento. Mas, também depende da magnitude e polaridade do magnetismo residual que pode ser deixado no núcleo após o último chaveamento (HEATHCOTE, 1998). A Seguir serão apresentadas as seis principais condições de chaveamento de transformadores de potência.

2.4.2.1 Chaveamento com Tensão Nula e sem Magnetismo Residual

Em condições normais de operação, o fluxo magnético no núcleo está defasado 90° em relação a tensão, atingindo seu valor máximo quando a senoide da tensão passa por zero. Devido a esta defasagem, é necessário que o fluxo varie de um valor máximo em uma direção a um valor máximo na direção oposta, a fim de produzir meio ciclo de onda da força eletromotriz requerida no enrolamento primário, de modo que o fluxo total, neste intervalo, corresponda a duas vezes a densidade de fluxo máxima (HEATHCOTE, 1998).

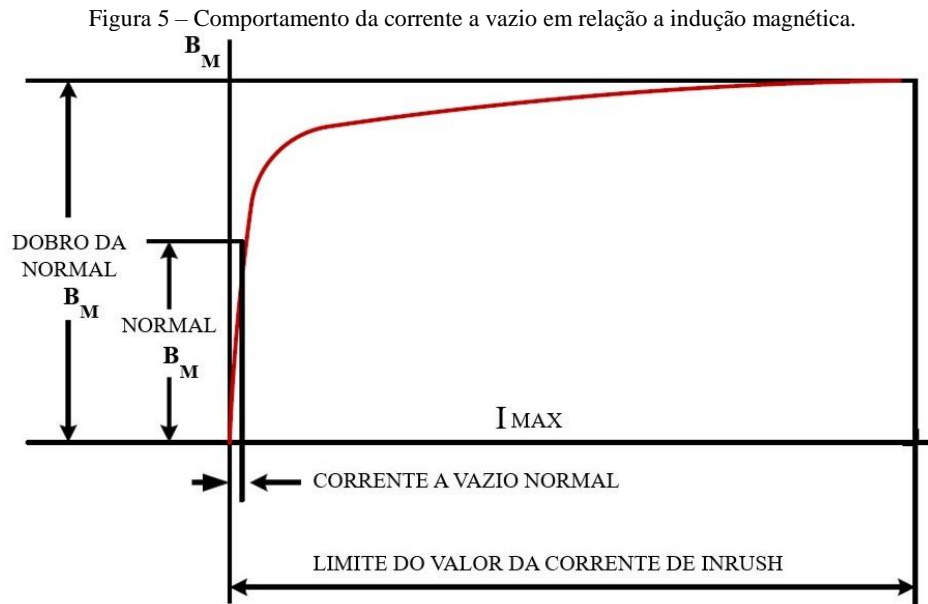
No instante do chaveamento, não havendo magnetismo residual no núcleo, o fluxo deve começar do zero e atingir um valor correspondente a, aproximadamente, o dobro da densidade de fluxo máxima normal para manter o primeiro meio ciclo da onda de tensão. A Figura 4 apresenta as formas de onda da indução magnética desta condição (HEATHCOTE, 1998).

Figura 4 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão nula e sem magnetismo residual.



FONTE: Imagem adaptada de (Heathcote, 1998).

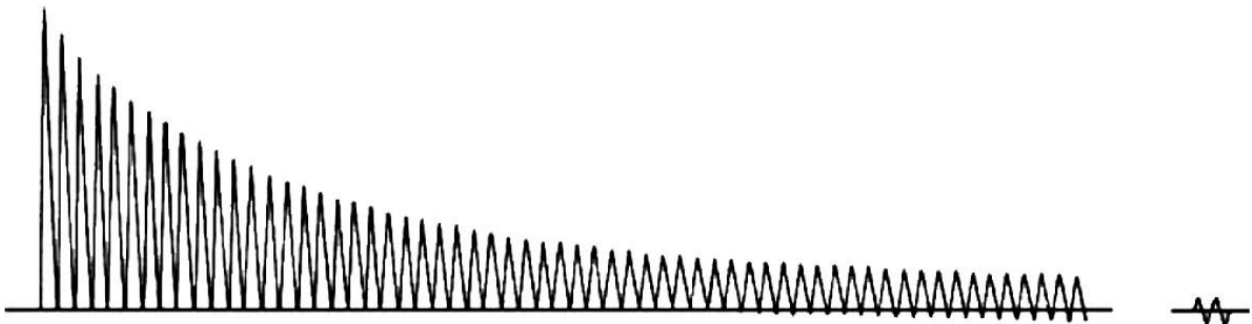
A razão para o surgimento da corrente de *inrush* pode ser explicada ao se analisar a curva B/H do aço do núcleo do transformador, que é mostrada na Figura 5. Pode-se perceber que a corrente a vazio aumenta fora de proporção, para uma indução duas vezes maior que a indução normal, se comparado à corrente nominal de operação (HEATHCOTE, 1998).



FONTE: Imagem adaptada de (Heathcote, 1998).

A Figura 6 ilustra a forma de onda do fenômeno da corrente de *inrush*, que pode ser considerada como sendo a sobreposição da corrente nominal a vazio, com amplitude constante, e da componente transitória, que possui a forma de uma exponencial e surge no chaveamento devido à saturação do núcleo (HEATHCOTE, 1998).

Figura 6 – Típica forma de onda da corrente de inrush.

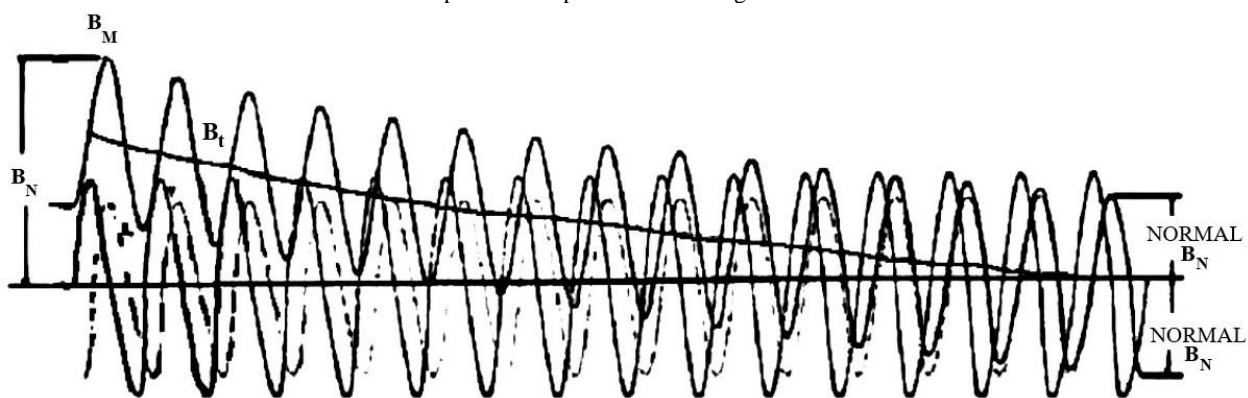


FONTE: Imagem adaptada de (Heathcote, 1998).

2.4.2.2 Chaveamento com Tensão Nula e com Máximo Magnetismo Residual de Polaridade Oposta ao Fluxo Magnético sob Condições de Tensão Normais

Se houver magnetismo residual no núcleo no instante do chaveamento e este possuir uma polaridade oposta ao sentido que o fluxo variável normalmente teria, os fenômenos descritos no item 2.4.2.1 serão acentuados. Isto se deve ao fato da onda de fluxo não partir de zero e sim de um valor correspondente a quantidade de magnetismo residual no núcleo. Assim sendo, o fluxo atinge um valor de aproximadamente três vezes a indução nominal e, para este valor, surge uma corrente de *inrush* similar ao caso 2.4.2.1, porém com amplitude e constante de tempo de decaimento ainda maior. A Figura 7 ilustra o comportamento da indução magnética para esta condição (HEATHCOTE, 1998).

Figura 7 – Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão nula e magnetismo residual com polaridade oposta ao fluxo magnético.

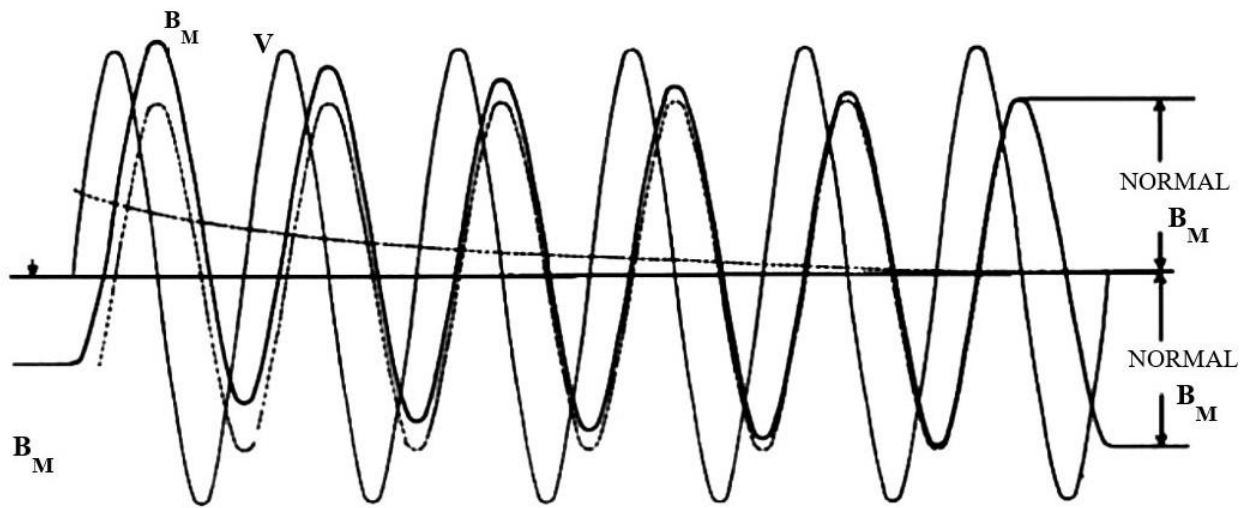


FONTE: Imagem adaptada de (Heathcote, 1998).

2.4.2.3 Chaveamento com Tensão Nula e com Máximo Magnetismo Residual de Mesma Polaridade que o Fluxo Magnético sob Condições de Tensão Normais

Neste caso, o magnetismo residual possui a mesma polaridade que o fluxo variável normalmente teria, isto resulta em uma diminuição nos valores máximos iniciais do fluxo e, conseqüentemente, no valor da corrente de *inrush*, podendo-se dizer que esta é uma das condições mais favoráveis para o chaveamento de transformadores. A Figura 8 apresenta este caso, onde pode-se perceber que a amplitude da indução magnética varia pouco durante os primeiros ciclos (HEATHCOTE, 1998).

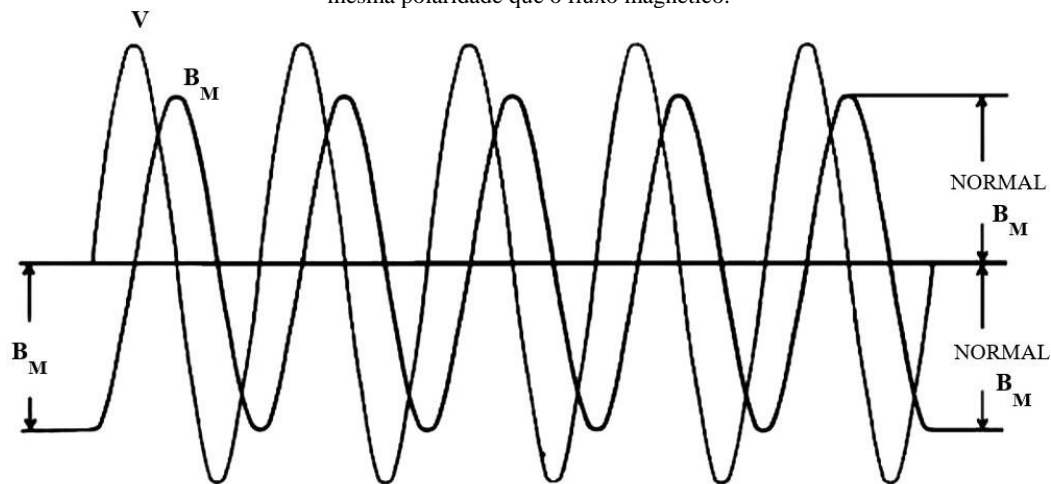
Figura 8 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão nula e magnetismo residual de mesma polaridade que o fluxo magnético.



FONTE: Imagem adaptada de (Heathcote, 1998).

Se, no entanto, o valor do magnetismo residual corresponder à densidade de fluxo magnético nominal, o fluxo seguirá seu curso normal, evitando assim o surgimento da corrente de *inrush*. A Figura 9 ilustra esta condição, onde se pode perceber que os valores de amplitude máxima se mantêm constantes, verificando-se assim o não surgimento da corrente de *inrush* (HEATHCOTE, 1998).

Figura 9 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão nula e magnetismo residual igual e de mesma polaridade que o fluxo magnético.



FONTE: Imagem adaptada de (Heathcote, 1998).

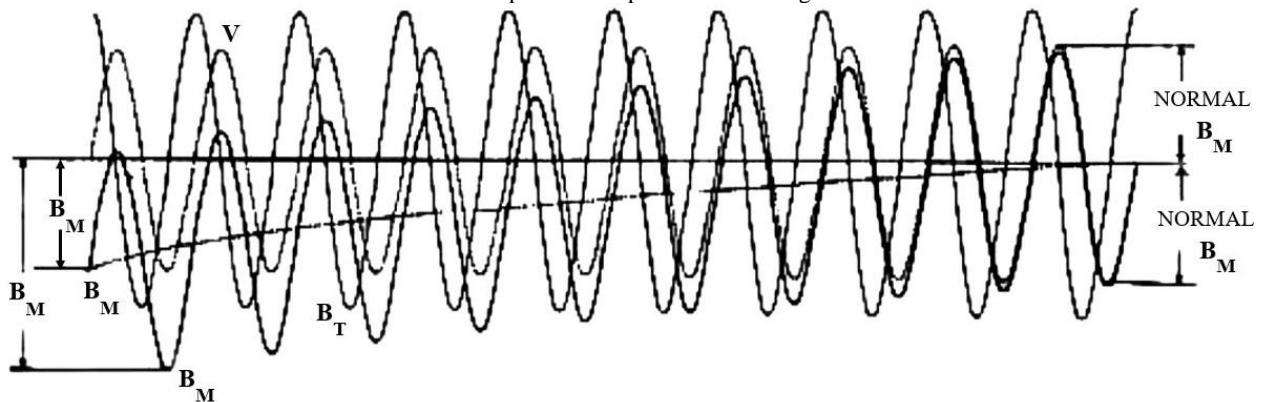
2.4.2.4 Chaveamento com Tensão Máxima e sem Magnetismo Residual

Neste caso, como não há magnetismo residual, no momento do chaveamento o fluxo parte de zero, devido à defasagem de 90° em relação a tensão. Ou seja, no momento do chaveamento o fluxo parte de zero, atinge seu valor máximo em uma direção, volta a zero, atinge seu valor máximo na direção oposta e, novamente, volta a zero, sendo assim simétrica em torno do eixo zero. Desta forma, a corrente a vazio segue seu curso normal e não excede sua amplitude nominal no momento do chaveamento, não apresentando assim o surgimento do fenômeno das correntes de *inrush*. Este caso é ainda mais favorável ao chaveamento de transformadores do que o apresentado no item 2.4.2.3 (HEATHCOTE, 1998).

2.4.2.5 Chaveamento com Tensão Máxima e com Máximo Magnetismo Residual de Polaridade Oposta ao Fluxo Magnético sob Condições de Tensão Normais

Neste caso, o magnetismo residual no núcleo introduz os componentes transitórios da corrente e da indução, de modo que a forma de onda do fluxo é assimétrica em relação ao eixo zero para os primeiros ciclos. E para o caso em que o magnetismo residual tem o mesmo valor que a densidade de fluxo nominal, a corrente de *inrush* tem um valor que corresponde a, aproximadamente, o dobro da densidade de fluxo nominal. Este caso é mostrado na Figura 10 (HEATHCOTE, 1998).

Figura 10 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão máxima e com máximo magnetismo residual com polaridade oposta ao fluxo magnético.

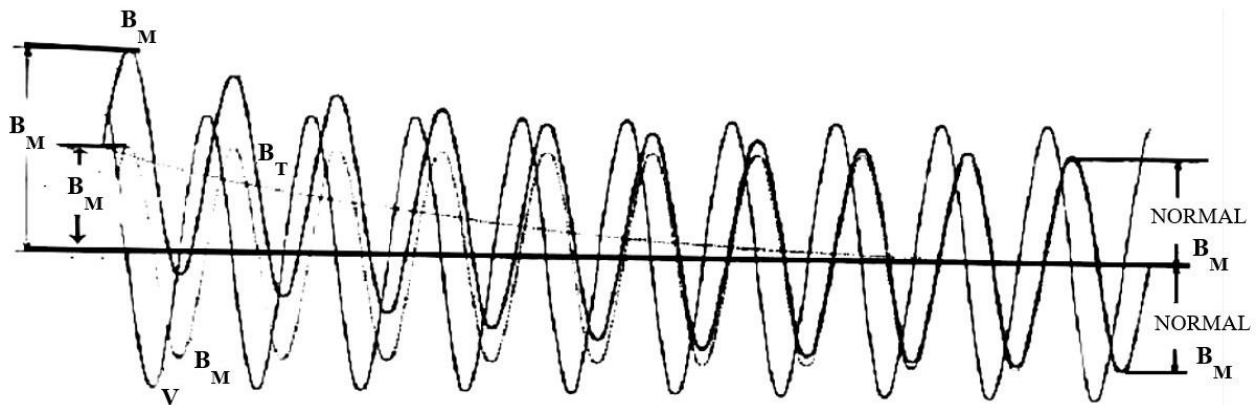


FONTE: Imagem adaptada de (Heathcote, 1998).

2.4.2.6 Chaveamento com Tensão Máxima e com Máximo Magnetismo Residual de Mesma Polaridade que o Fluxo Magnético sob Condições de Tensão Normais

Este caso se assemelha muito ao caso 2.4.2.5, devido ao fato de o fluxo também ser assimétrico em relação ao eixo zero e que, para o mesmo valor de magnetismo residual, o fluxo total necessário para magnetizar o transformador também ser de aproximadamente duas vezes a densidade de fluxo magnético nominal. Entretanto, pode-se diferenciar estes dois casos pelo fato de as ondas de indução e de corrente de cada caso serem dispostas em lados opostos do eixo zero. A Figura 11 ilustra esse caso (HEATHCOTE, 1998).

Figura 11 - Formas de onda da indução magnética no momento do chaveamento com tensão máxima e com máximo magnetismo residual de mesma polaridade que o fluxo magnético.



FONTE: Imagem adaptada de (Heathcote, 1998).

2.5 Considerações Finais

Neste Capítulo, introduziram-se os fundamentos do fenômeno das correntes de *inrush*. Tal abordagem teórica foi realizada com objetivo de fornecer conhecimentos básicos sobre este fenômeno. Noções básicas relacionadas à proteção diferencial foram abordadas. Também foi feita uma análise física do fenômeno, bem como as causas e condições de seu surgimento.

Por fim, ressalta-se que o fenômeno das correntes de *inrush* pode implicar na operação indevida dos relés de proteção diferencial.

3. METODOLOGIA

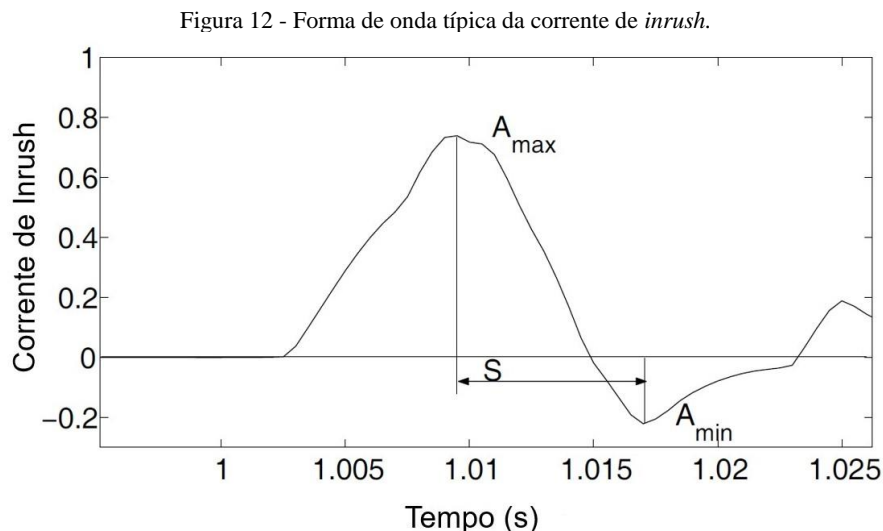
3.1 Considerações Gerais

Neste trabalho, é proposto um novo método destinado à detecção das correntes de *inrush*, o qual é avaliado em termos da capacidade de detecção destas correntes, do intervalo até a detecção e do tempo de processamento dos algoritmos. Os resultados são obtidos a partir de simulações da atuação do método no software MATLAB®, que faz o processamento de sinais provenientes de um banco de dados, o qual foi obtido a partir de simulações de *inrush* e de curto-circuito em sistemas teste no software ATP Draw.

A metodologia proposta, os sistemas testados e as simulações são detalhadas nas subseções seguintes.

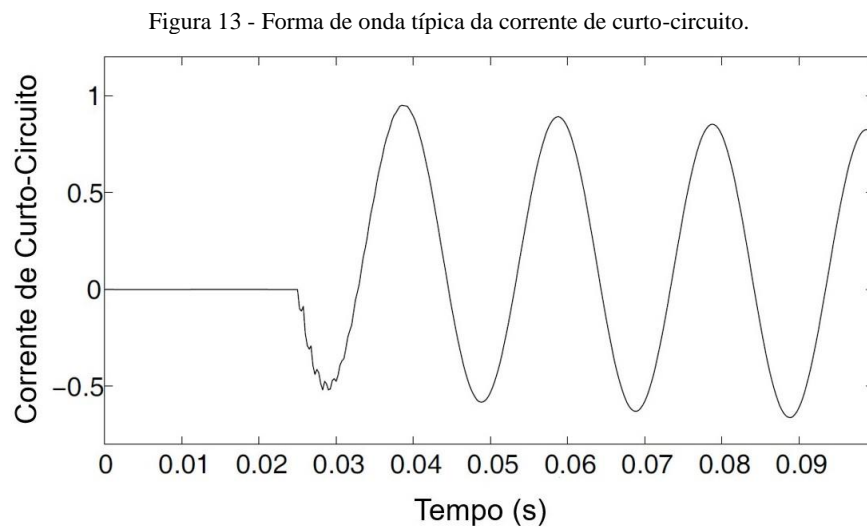
3.2 Método Proposto

Analisando um típico ciclo da corrente de *inrush*, como ilustrado na Figura 12, onde é apresentado um sinal de corrente I , normalizado como I / I_n , sendo I_n a corrente nominal do secundário do transformador, é possível perceber claramente as assimetrias da forma de onda, tanto na amplitude quanto na duração dos segmentos positivo e negativo (Q. H. WU, Z. LU, T. Y. Ji, 2009).



FONTE: Imagem adaptada de (Q. H. Wu, Z. Lu, T. Y. Ji, 2009).

Extraindo do sinal da corrente de *inrush* o valor do pico A_{\max} e do vale A_{\min} , pode-se comparar a diferença de amplitude de A_{\max} e A_{\min} , bem como o intervalo de tempo S entre eles com o que acontece em um evento de curto-circuito. Comparada com a corrente de *inrush*, a forma de onda da corrente de curto-circuito é um sinal periódico regular com deslocamento DC em decaimento exponencial. Se o deslocamento DC for desconsiderado, a forma de onda se torna uma senoide normal. Quando extraídos do sinal da corrente de curto-circuito, os valores de A_{\max} e A_{\min} , conforme aplicado no sinal da corrente de *inrush*, devem ter amplitudes semelhantes, com intervalos aproximadamente iguais a metade do ciclo do sistema de potência, como mostrado na Figura 13 (Q. H. WU, Z. LU, T. Y. Ji, 2009).



FONTE: Imagem adaptada de (Q. H. Wu, Z. Lu, T. Y. Ji, 2009).

Para determinar o valor do pico A_{\max} , uma janela com três amostras da forma de onda da corrente é analisada. Quando a primeira e a terceira amostra da janela têm valor inferior ao da amostra central (segunda posição na janela de dados), o valor da segunda amostra é registrado como sendo o valor de pico A_{\max} . Enquanto esta condição não for satisfeita, o algoritmo incrementa uma nova amostra na terceira posição, descartando a primeira e deslocando as amostras restantes para a esquerda, de modo que a segunda e a terceira amostra da janela anterior ocupem a primeira e a segunda posições na janela atual. O mesmo processo acontece na determinação do valor do vale A_{\min} , onde o valor da amostra central é registrado quando este possui valor inferior a primeira e a terceira amostra da janela analisada. Após a determinação do

valor do pico A_{max} e do vale A_{min} é possível determinar o intervalo de tempo, S , entre ambos com uma simples operação de subtração.

Após a extração de A_{max} , A_{min} e S do sinal analisado, critérios simples podem ser empregados para quantificar a assimetria deste sinal, conforme as Equações 3.1 e 3.2 (Q. H. WU, Z. LU, T. Y. Ji, 2009).

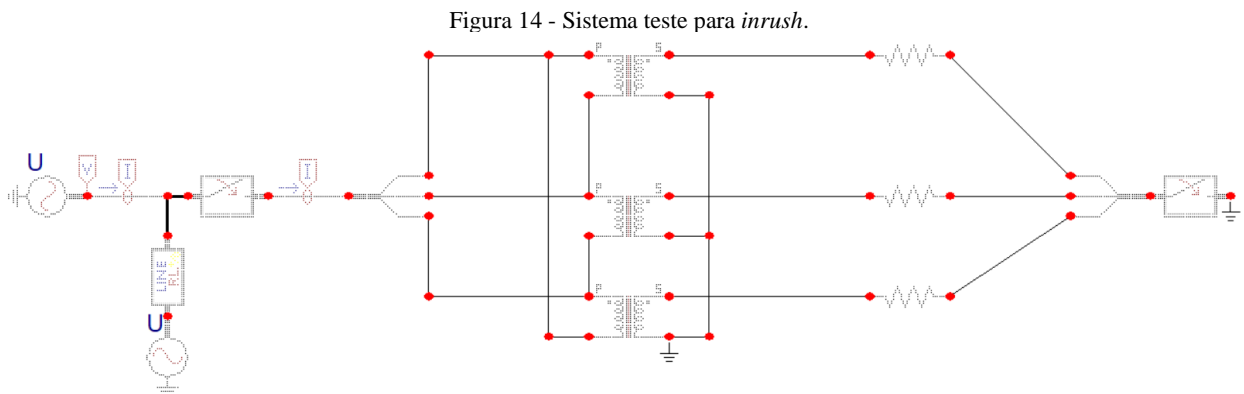
$$\delta_I = \frac{|A_{max} - |A_{min}||}{A_{max} + |A_{min}|} * 100\% \quad (3.1)$$

$$\delta_t = \frac{|S - 0,00833|}{0,00833} * 100\% \quad (3.2)$$

Onde δ_I representa a assimetria de amplitude entre os picos (A_{max}) e vales (A_{min}) extraídos e δ_t representa a assimetria do intervalo entre o pico e o vale, normalizada pela metade do ciclo do sistema de potência, que é 0,00833 no caso de frequência nominal igual a 60 Hz. Quanto maior forem δ_I e δ_t , maior será a assimetria do sinal. Portanto, se δ_I e δ_t excederem um limite pré-definido, pode-se identificar uma corrente de *inrush*. Os valores utilizados como limite para δ_I e δ_t são 10% e 20%, respectivamente (Q. H. WU, Z. LU, T. Y. Ji, 2009).

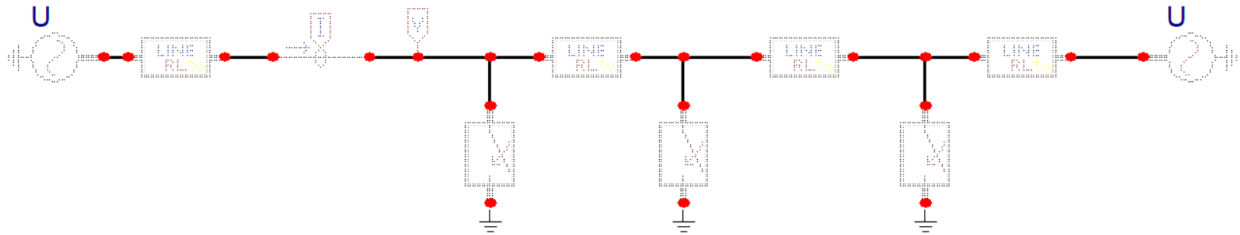
3.3 Sistema Teste

Os sinais do banco de dados foram obtidos através de simulações de *inrush* e de curto-circuito em sistemas teste no software ATP Draw, conforme as Figuras 14 e 15 respectivamente.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Sistema teste para curto-circuito.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Para o fenômeno de *inrush*, foram simuladas diferentes situações, variando o instante de chaveamento para simular a inserção de um banco de transformadores no sistema e o ângulo de carregamento, para que se possa haver variação no nível da tensão no instante de chaveamento, provocando assim diferentes níveis de indução remanescente no núcleo do transformador. Os tempos de chaveamento simulados foram de 0,2 s, 0,202083 s, 0,204166 s, 0,20625 s, 0,208333 s, 0,210416 s, 0,2125 s e 0,21453 s, de modo a variar o ângulo de incidência da energização do transformador. Para todas as situações, foi variado o ângulo de carregamento em 0°, 1°, 5°, 10°, 15°, 30°, 45° e 60°.

Os parâmetros dos elementos que compõe o circuito de ensaio da corrente de *inrush* são apresentados nas Tabelas 1 e 2. Além disso, a curva de saturação do transformador simulado corresponde àquela mostrada na Figura 16 (RAFFO, 2010).

Tabela 1 - Parâmetros do transformador de potência monofásico.

Resistência de magnetização [Ω]	Indutância do enrolamento primário [mH]	Resistência do enrolamento primário [Ω]	Resistência do enrolamento secundário [Ω]	Tensão do primário [kV]	Tensão do secundário [kV]
1000000	0,68	0,0256	3,96	13,8	132,79

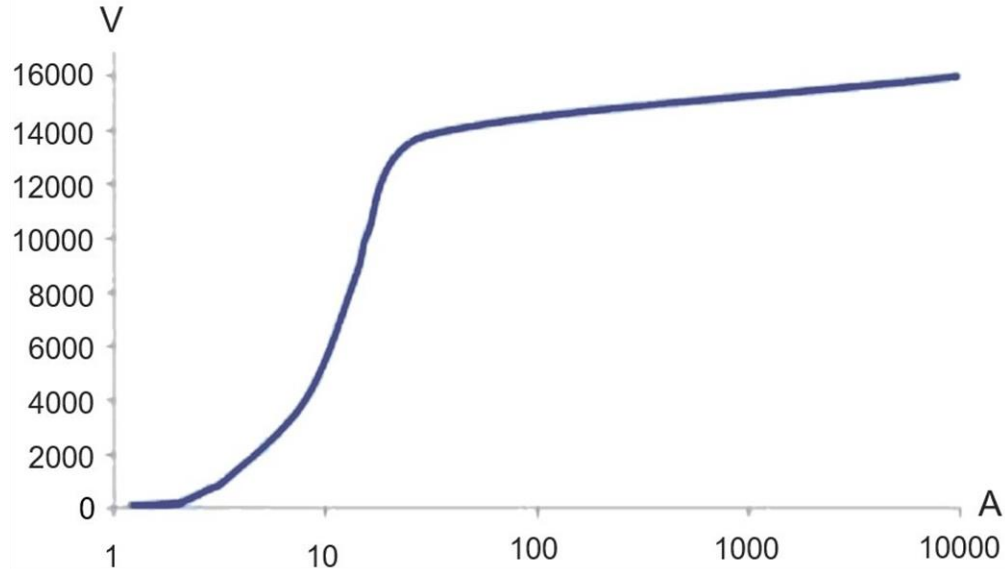
FONTE: Imagem adaptada de (Raffo, 2009).

Tabela 2 - Parâmetros do gerador trifásico.

Amplitude [kV]	Frequência [Hz]	Tempo de início [s]	Tempo final [s]
13,8	60	-1	1000

FONTE: Tabela adaptada de (Raffo, 2009).

Figura 16 - Curva de saturação do transformador.



FONTE: Imagem adaptada de (Raffo, 2009).

Para as simulações de curto-circuito, também foi variado o carregamento do sistema em 0°, 1°, 5°, 10°, 15°, 30°, 45° e 60°. Para cada uma das variações do ângulo, foram simulados curtos-circuitos em 0%, 25%, 50%, 75%, 85% e 100% da linha, sendo estes monofásicos, bifásicos e trifásicos. Os parâmetros de impedância utilizados para as simulações de curto-circuito foram os mesmos utilizados para as simulações de *inrush*, conforme as Tabelas 3 e 4 (SANTOS et al, 2013).

Tabela 3 - Impedância das fontes geradoras.

Resistência de sequência zero [Ω]	Indutância de sequência zero [Ω]	Resistência de sequência positiva [Ω]	Indutância de sequência positiva [Ω]
3,681	24,515	0,819	7,757

FONTE: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Impedância da linha.

Resistência de sequência zero [Ω]	Indutância de sequência zero [Ω]	Resistência de sequência positiva [Ω]	Indutância de sequência positiva [Ω]
18,408	122,57	4,102	38,786

FONTE: Elaborado pelo autor.

3.4 Considerações Finais

Neste Capítulo, foi apresentada a metodologia proposta para a detecção das correntes de *inrush*, bem como os sistemas teste utilizados para obtenção dos sinais a serem analisados. Para todos os casos analisados, os resultados são referentes a uma taxa de amostragem correspondente a 96 amostras por ciclo e considerando um relé de sobrecorrente. No Capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos para essa técnica, fazendo bloqueio da atuação do relé quando uma condição de *inrush* é detectada.

4. RESULTADOS

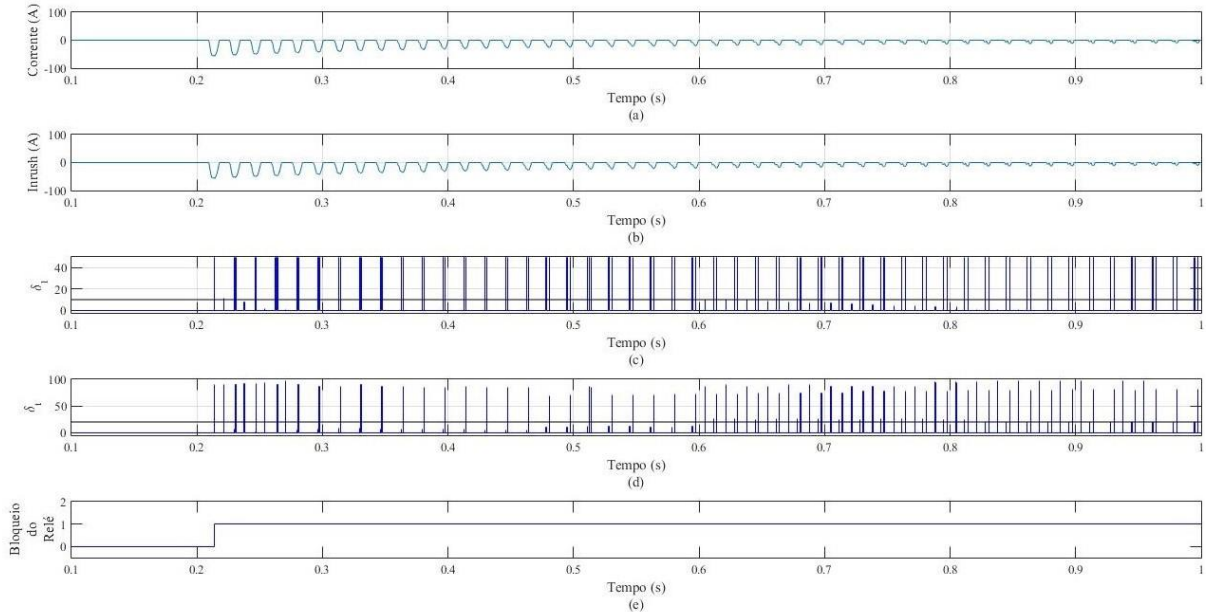
4.1 Considerações Gerais

Neste Capítulo, são apresentados os resultados obtidos através de simulações da atuação do método proposto no software MATLAB[®], que faz o processamento de sinais provenientes de um banco de dados, o qual foi obtido a partir das simulações de *inrush* e curto-circuito, as quais foram realizadas no software ATP Draw, como apresentado no Capítulo anterior.

4.2 Caso 1: Energização de Banco de Transformadores sem Carga

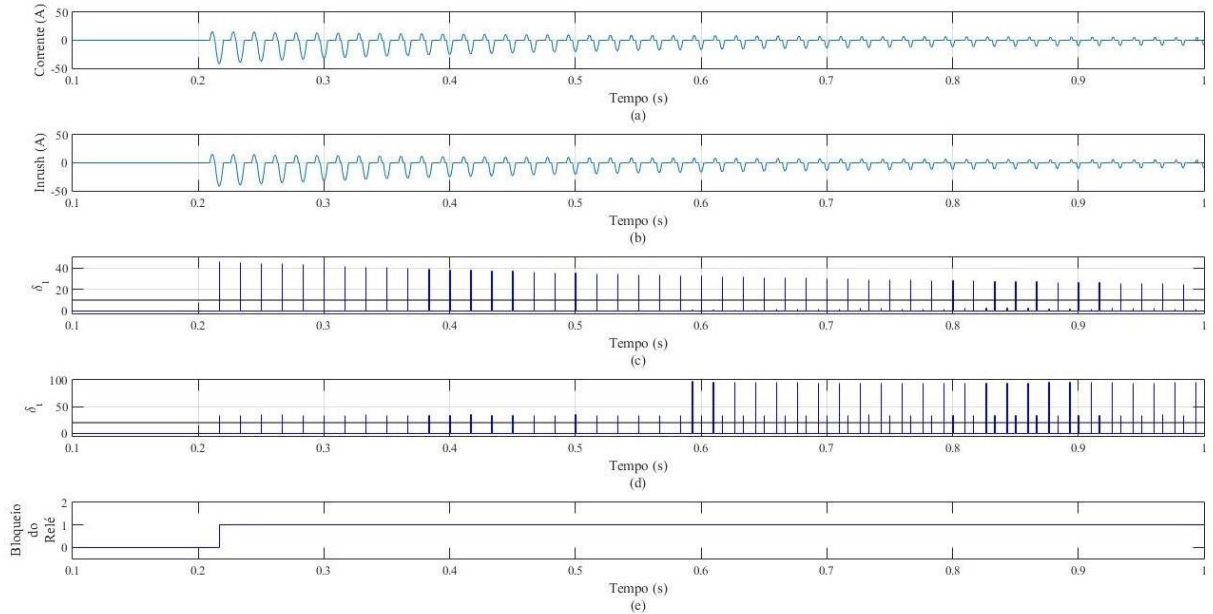
Neste caso, foi simulado o *inrush* através da energização do banco de transformadores da Figura 14, para um carregamento de 0°, onde o chaveamento ocorreu aos 0,20625 segundos e o banco de transformadores estava sem carga. Os resultados do processamento dos dados são apresentados nas Figuras 17, 18, 19, 20, 21 e 22.

Figura 17 - Simulação do caso 1 para a fase A. (a) Corrente da fase A. (b) Corrente de *inrush* da fase A. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase A.



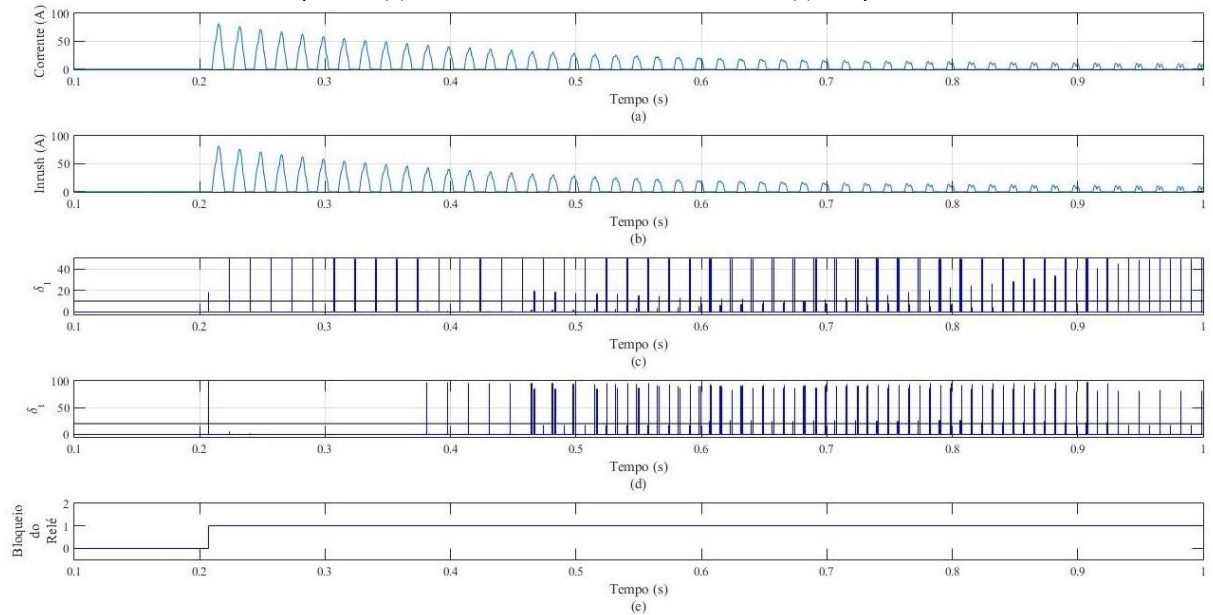
FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Simulação do caso 1 para a fase B. (a) Corrente da fase B. (b) Corrente de *inrush* da fase B. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase B.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Simulação do caso 1 para a fase C. (a) Corrente da fase C. (b) Corrente de *inrush* da fase C. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase C.

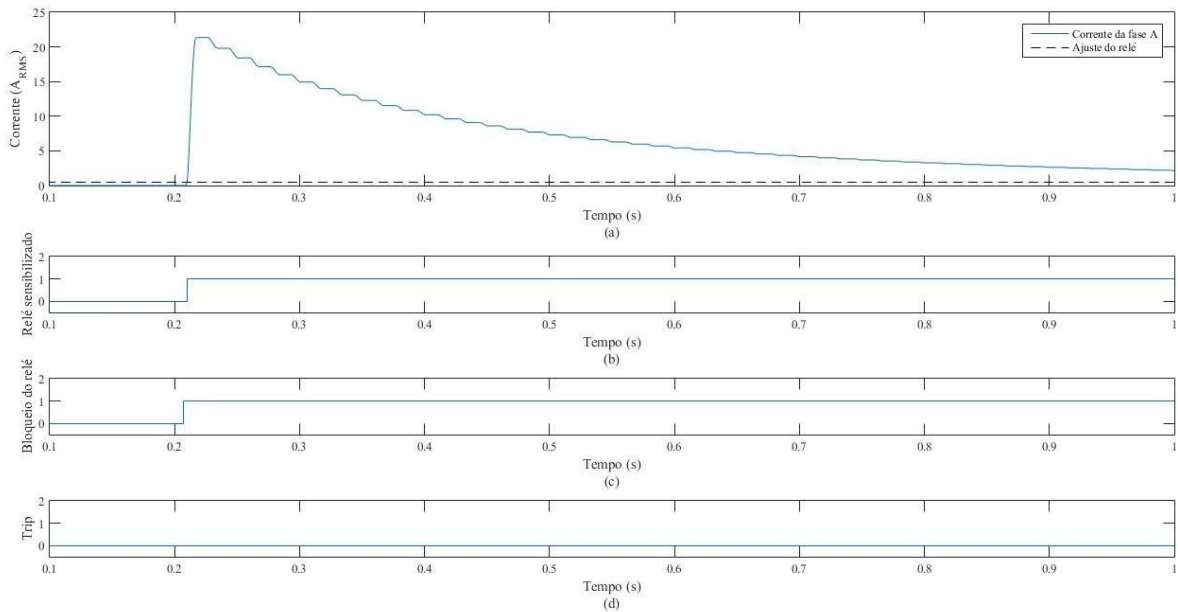


FONTE: Elaborado pelo autor.

As Figuras 17, 18 e 19 apresentam as correntes, os coeficientes calculados e o bloqueio do relé para as fases A, B e C, respectivamente, do caso simulado.

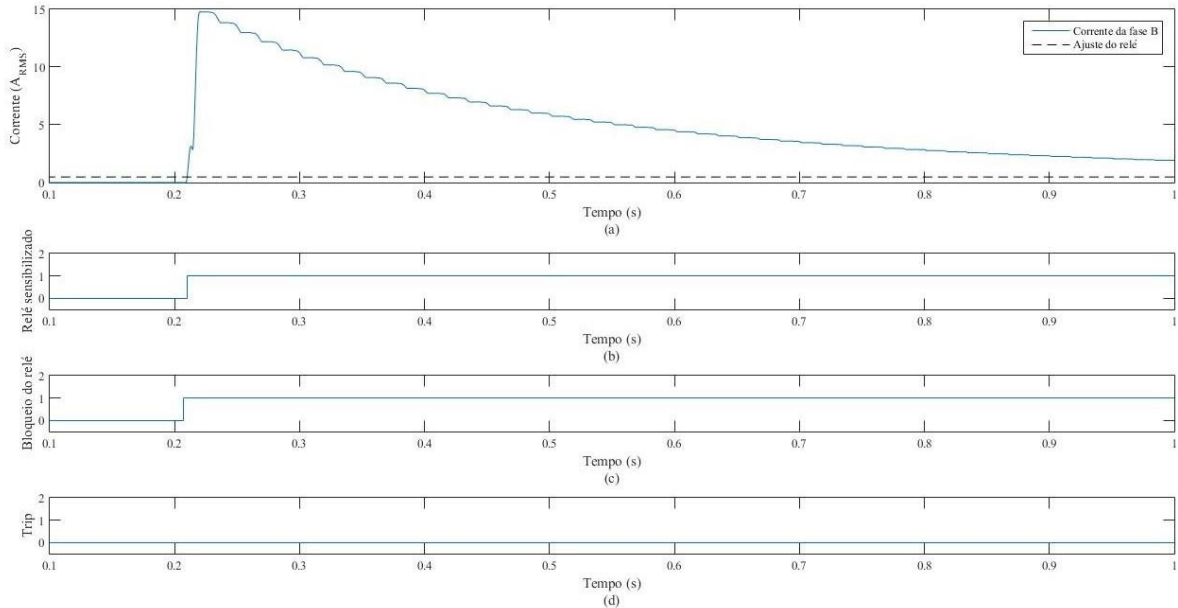
Como é possível perceber, nas três fases, tanto o parâmetro δ_I como δ_t ultrapassaram os limites predeterminados, 10% e 20%, respectivamente, e assim permaneceram, caracterizando o *inrush*.

Figura 20 - Simulação do caso 1 para a fase A. (a) Valor RMS da corrente da fase A. (b) Sensibilização do Relé para a fase A. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



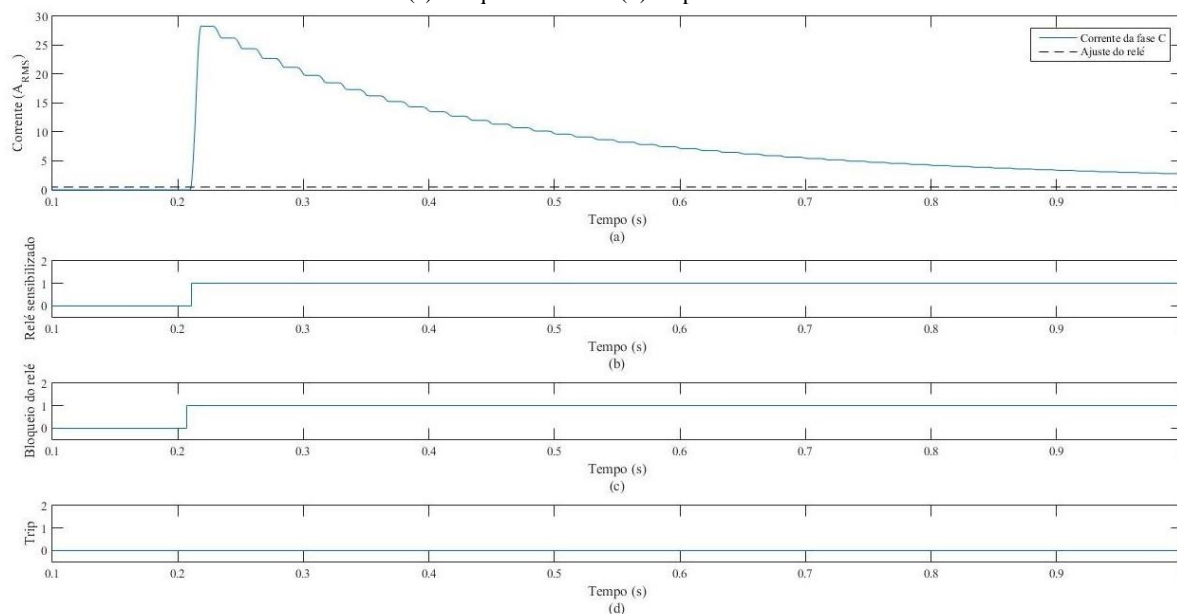
FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Simulação do caso 1 para a fase B. (a) Valor RMS da corrente da fase B. (b) Sensibilização do Relé para a fase B. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Simulação do caso 1 para a fase C. (a) Valor RMS da corrente da fase C. (b) Sensibilização do Relé para a fase C. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



FONTE: Elaborado pelo autor.

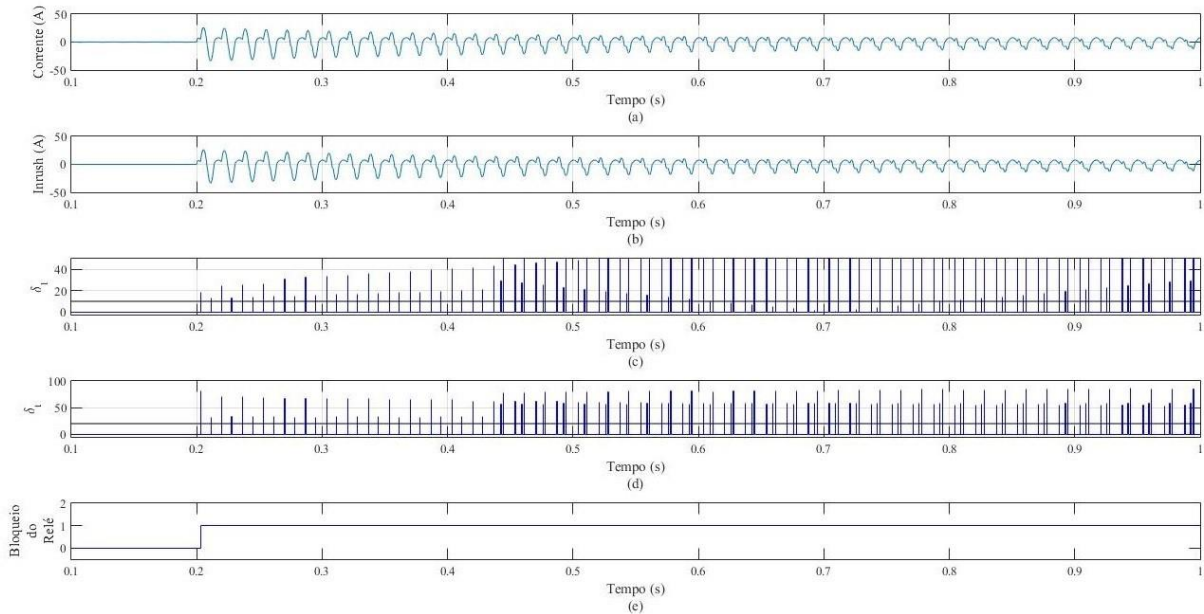
As Figuras 20, 21 e 22 mostram as correntes com valores RMS, a sensibilização do relé, o bloqueio do mesmo e o *trip* do relé para as fases A, B e C, respectivamente.

Nas três fases o relé se encontra sensibilizado, ou seja, apto a enviar o comando de *trip* ao disjuntor para que este interrompa o circuito. Como mostrado nas Figuras 17, 18 e 19, o método proposto foi capaz de identificar o *inrush* e realizar o bloqueio do relé, impedindo assim que este envie o comando de abertura para o disjuntor, não atuando indevidamente para a energização do transformador.

4.3 Caso 2: Energização de Banco de Transformadores sob Carga

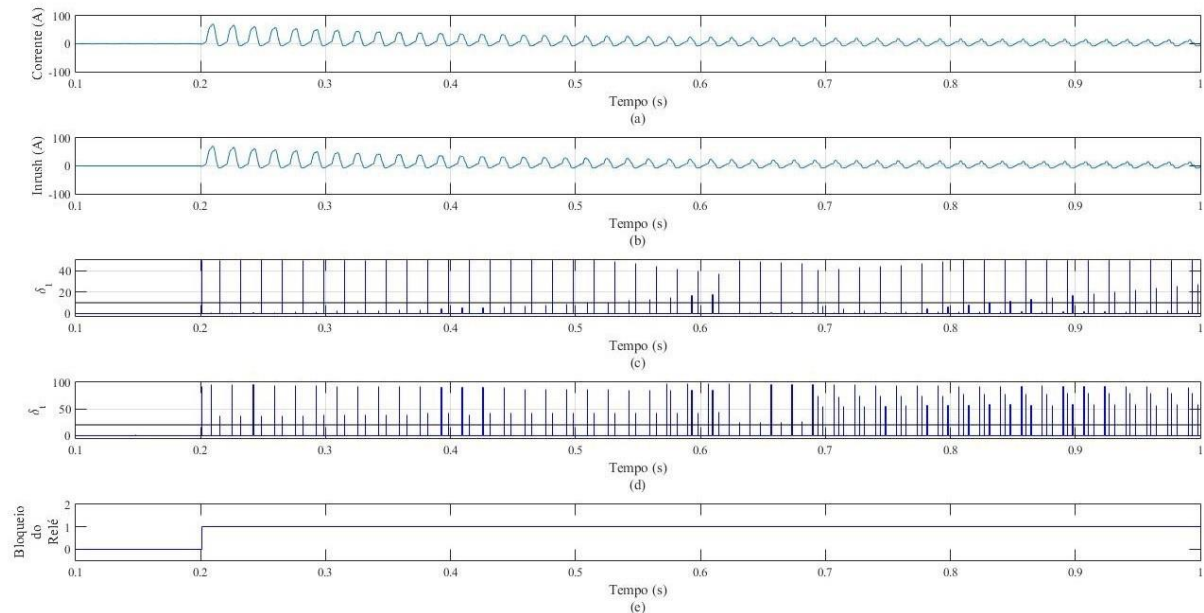
Para este segundo caso foi simulado o *inrush* através da energização do banco de transformadores da Figura 14, para um carregamento de 30%, onde o chaveamento ocorreu aos 0,2 segundos e o banco de transformadores estava sob carga. Os resultados do processamento dos dados são apresentados nas Figuras 23, 24, 25, 26, 27 e 28.

Figura 23 - Simulação do caso 2 para a fase A. (a) Corrente da fase A. (b) Corrente de *inrush* da fase A. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase A.



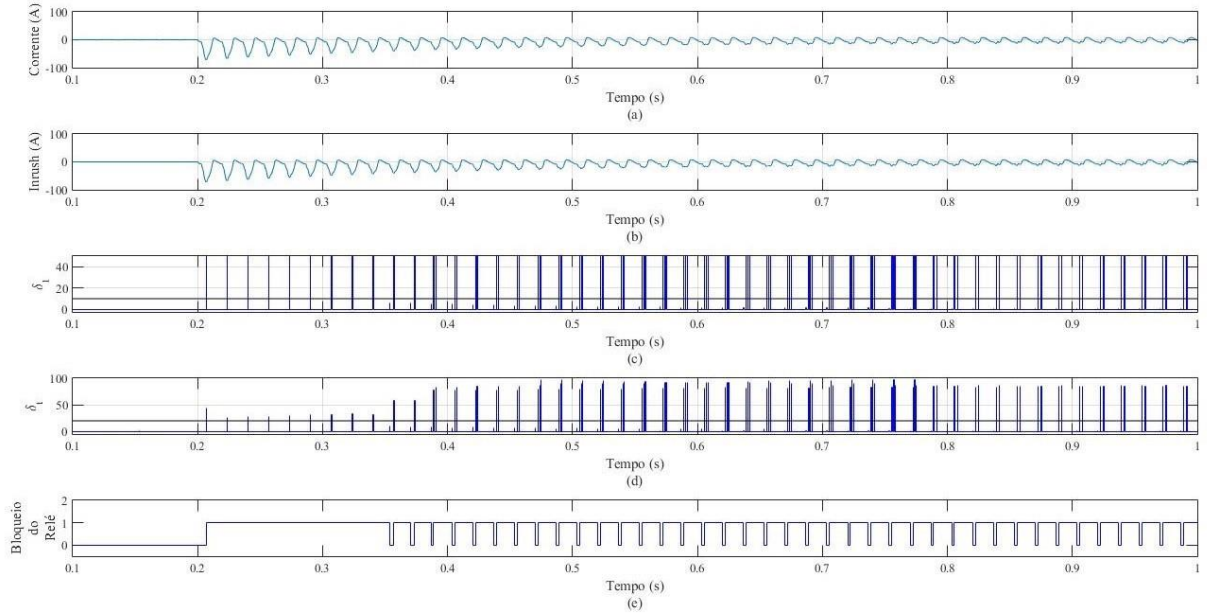
FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Simulação do caso 2 para a fase B. (a) Corrente da fase B. (b) Corrente de *inrush* da fase B. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase B.



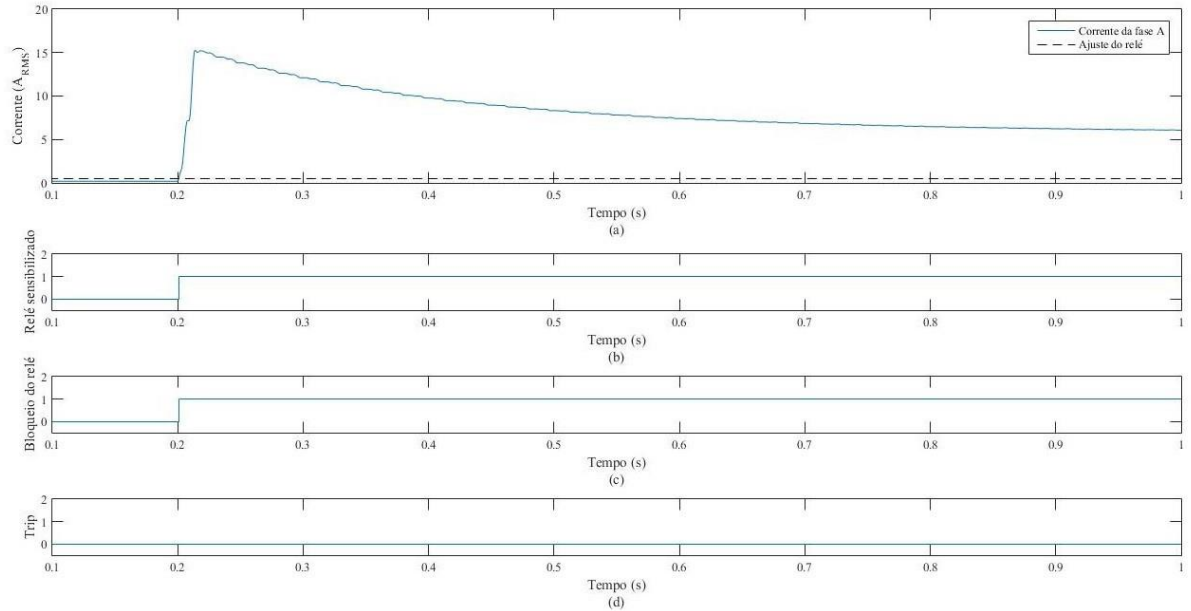
FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 25 - Simulação do caso 2 para a fase C. (a) Corrente da fase C. (b) Corrente de *inrush* da fase C. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase C.



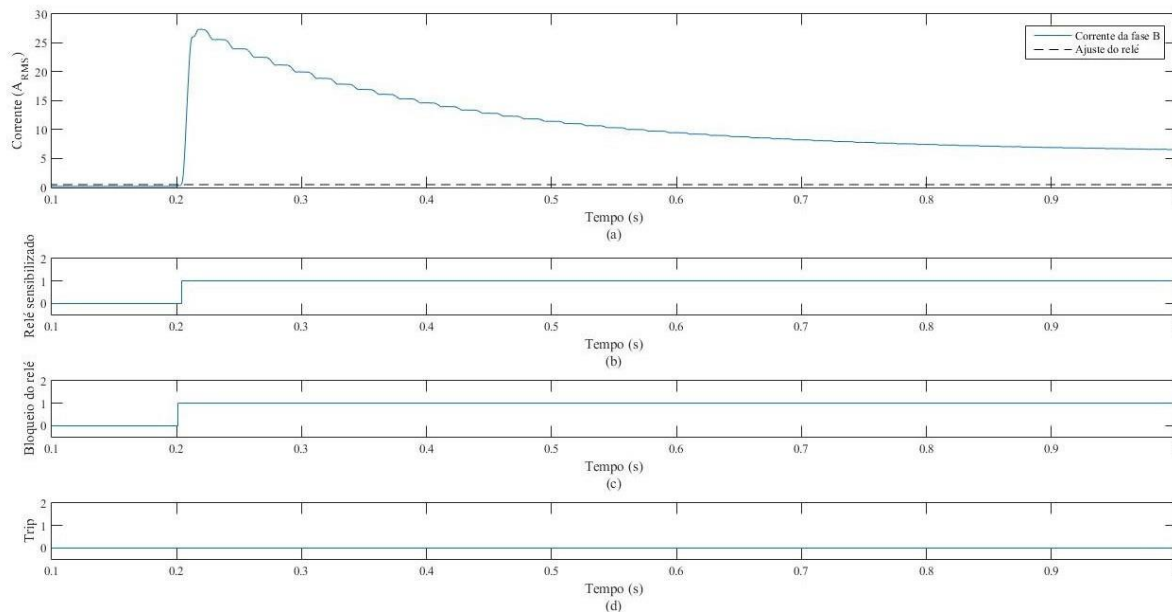
FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Simulação do caso 2 para a fase A. (a) Valor RMS da corrente da fase A. (b) Sensibilização do Relé para a fase A. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



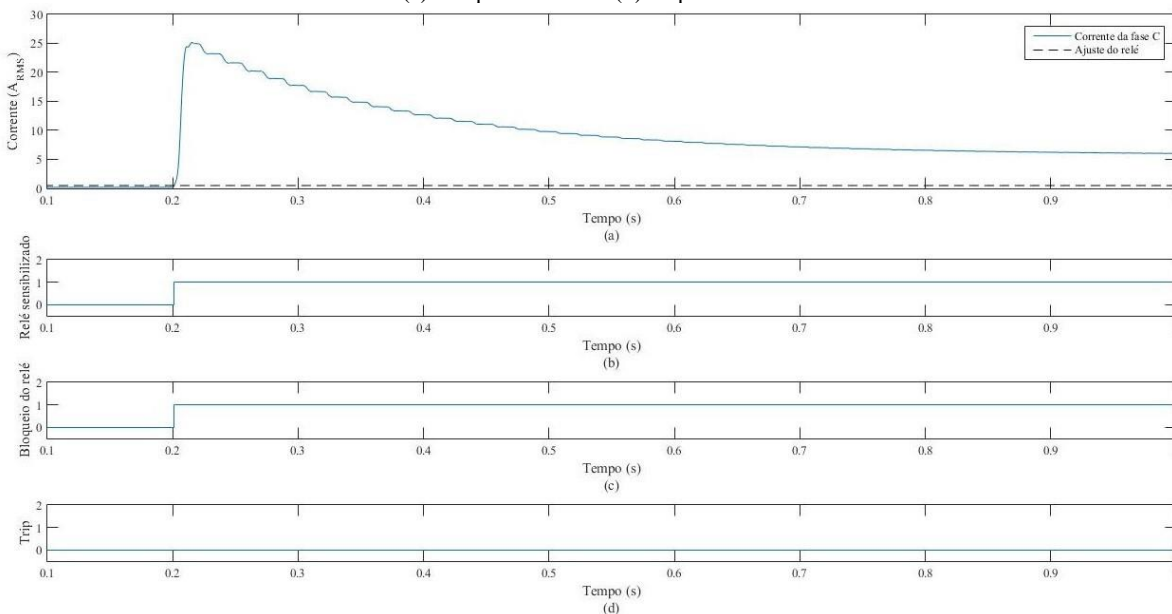
FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Simulação do caso 2 para a fase B. (a) Valor RMS da corrente da fase B. (b) Sensibilização do Relé para a fase B. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Simulação do caso 2 para a fase C. (a) Valor RMS da corrente da fase C. (b) Sensibilização do Relé para a fase C. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



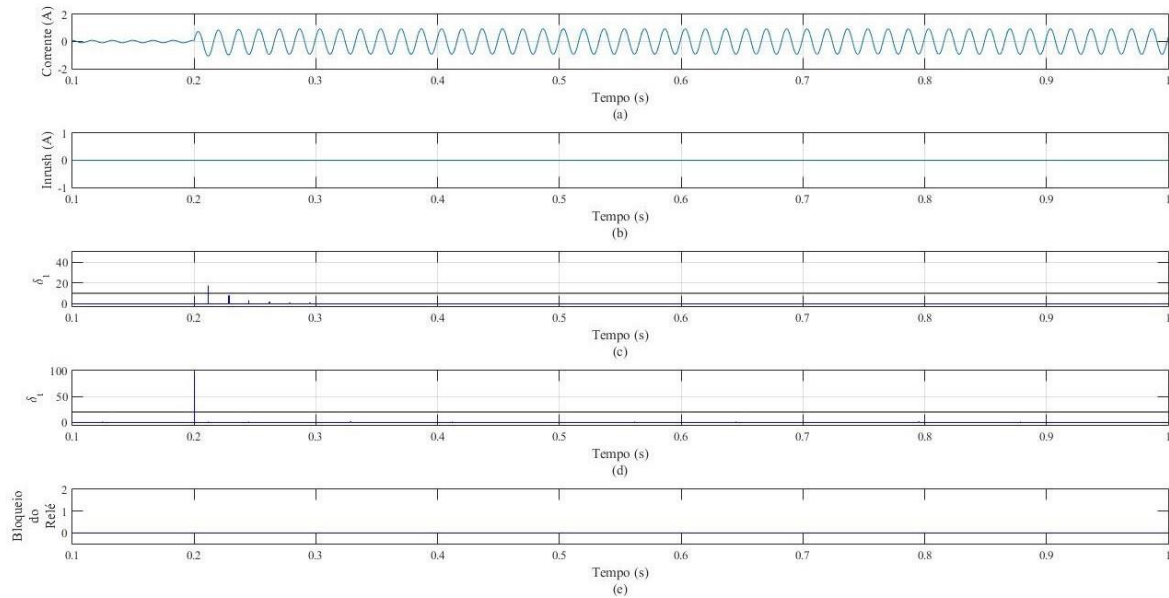
FONTE: Elaborado pelo autor.

Assim como no primeiro caso, o método proposto foi capaz de identificar o *inrush* e realizar o bloqueio do relé, impedindo que este enviasse o sinal para a abertura do disjuntor, o que iria interromper o sistema inadequadamente durante a energização do transformador.

4.4 Caso 3: Curto-Circuito Monofásico em 25% da LT

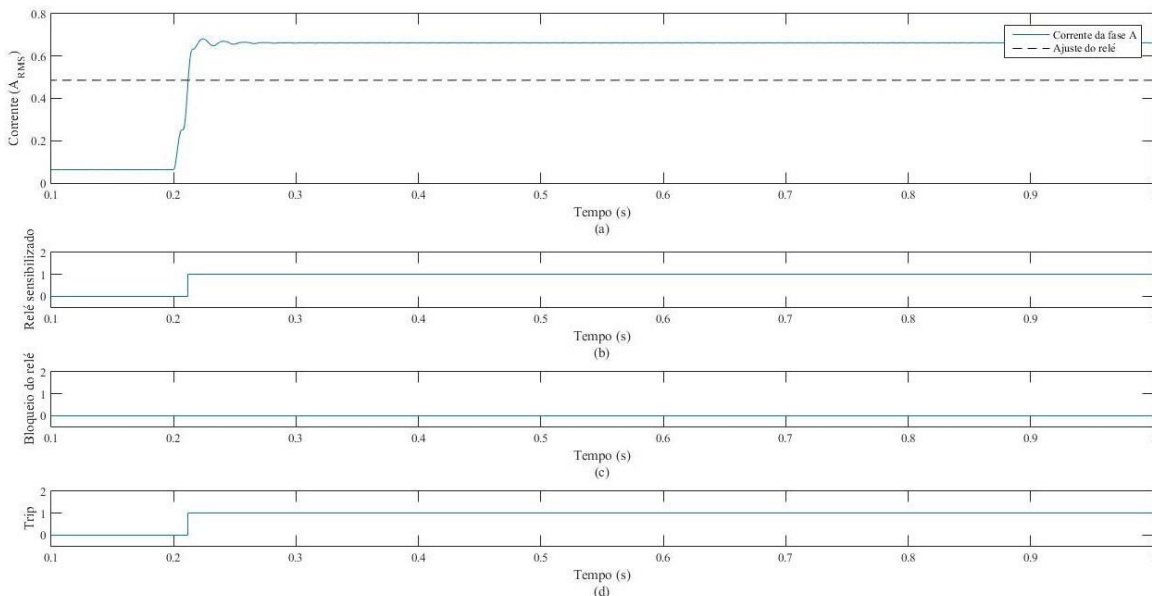
Neste caso, foi simulado um curto-circuito monofásico em 25% da linha do sistema da Figura 15, para um carregamento de 10°. Os resultados do processamento dos dados são apresentados nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 - Simulação do caso 3 para a fase A. (a) Corrente da fase A. (b) Corrente de *inrush* da fase A. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase A.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Simulação do caso 3 para a fase A. (a) Valor RMS da corrente da fase A. (b) Sensibilização do Relé para a fase A. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



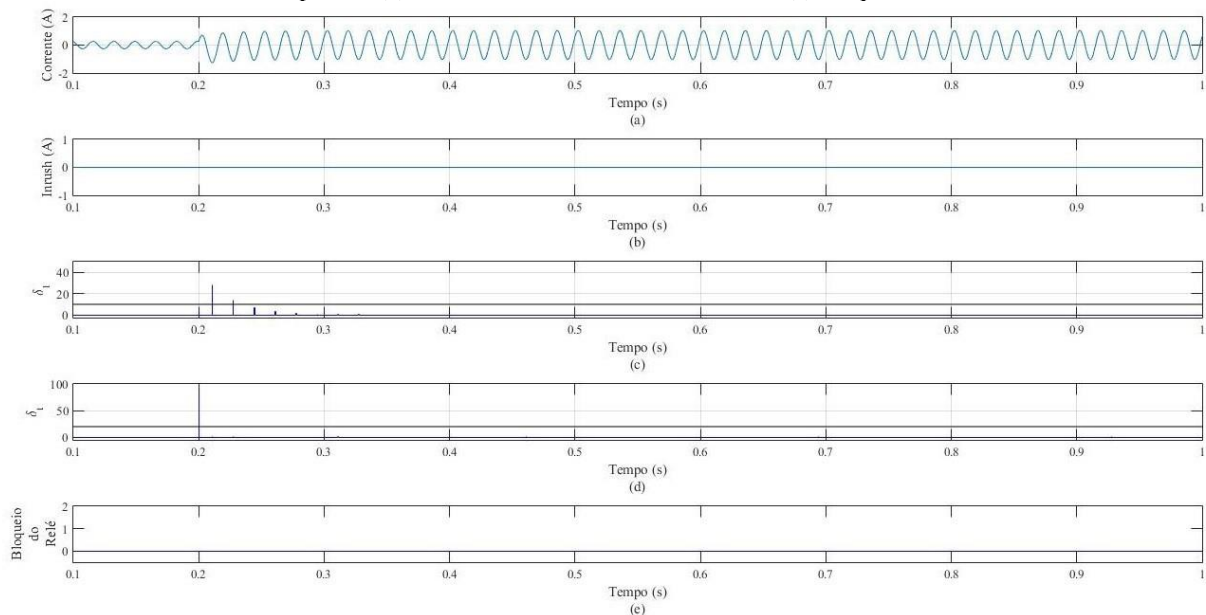
FONTE: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 29 é possível perceber que somente o parâmetro δ_I ultrapassa o limite predeterminado, enquanto o parâmetro δ_i se mantém abaixo do limite, não caracterizando, portanto, o *inrush*. Vale destacar que o Parâmetro δ_I ultrapassa o limite predeterminado devido ao fato de, no curto-circuito, estar presente um deslocamento DC em decaimento exponencial, o que explica a ultrapassagem só nos primeiros instantes do curto-circuito.

4.5 Caso 4: Curto-Circuito Trifásico em 50% da LT

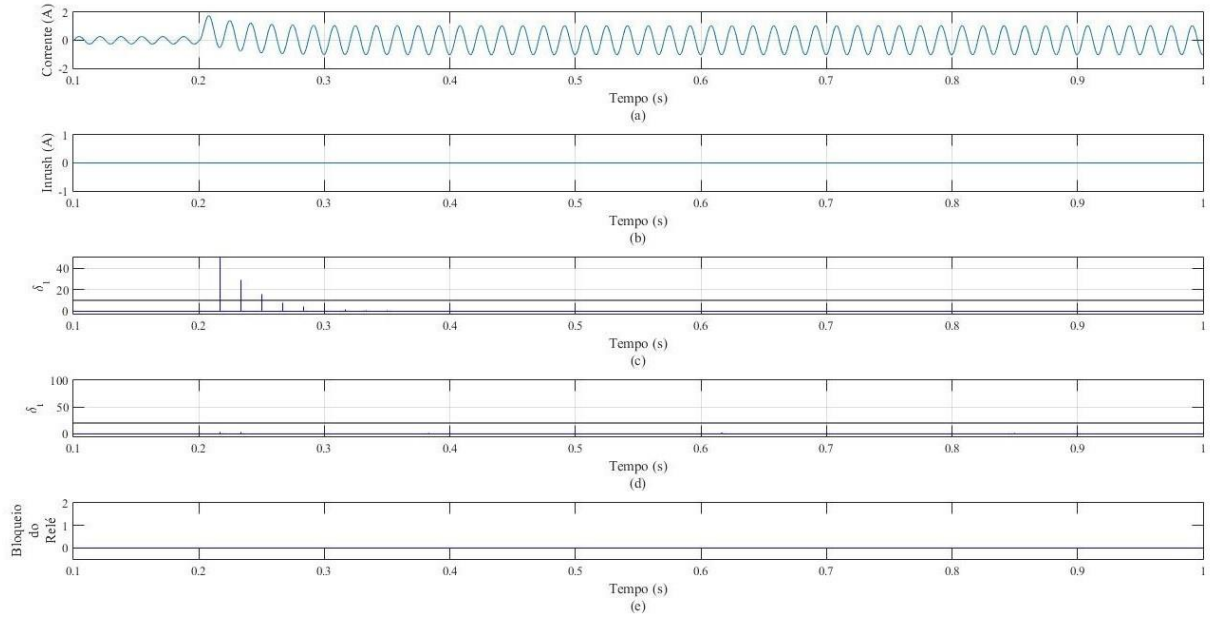
Para este último caso, foi simulado um curto-circuito trifásico em 50% da linha do sistema da Figura 15, para um carregamento de 30°. As Figuras 31, 32, 33, 34, 35 e 36 apresentam os resultados do processamento dos dados.

Figura 31 - Simulação do caso 4 para a fase A. (a) Corrente da fase A. (b) Corrente de *inrush* da fase A. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase A.



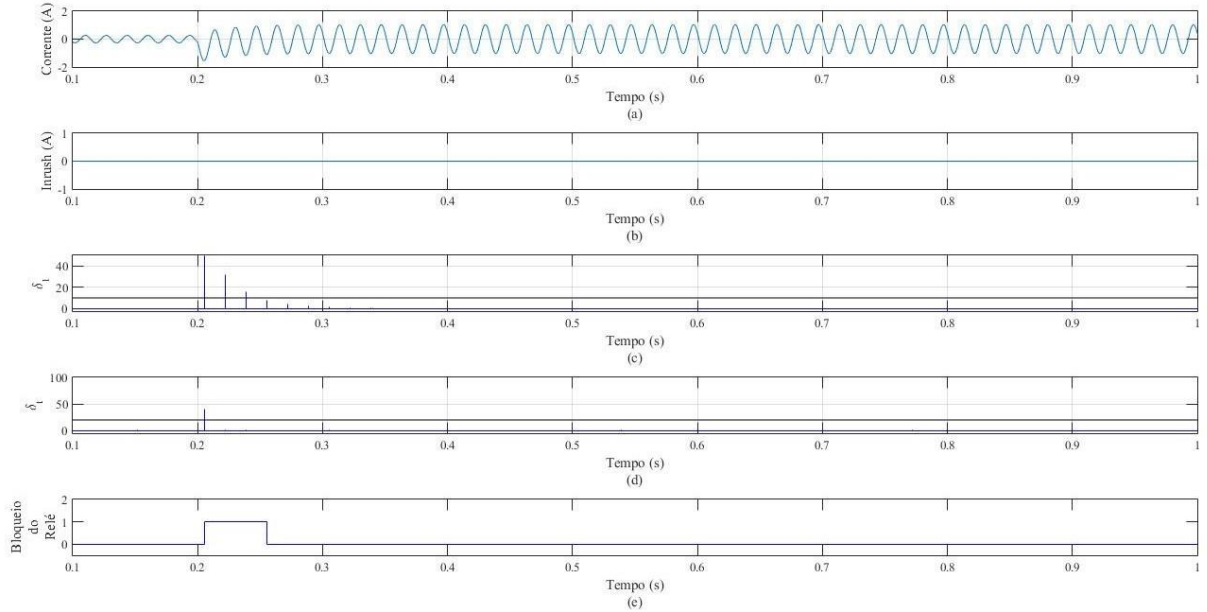
FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Simulação do caso 4 para a fase B. (a) Corrente da fase B. (b) Corrente de *inrush* da fase B. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase B.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Simulação do caso 4 para a fase C. (a) Corrente da fase C. (b) Corrente de *inrush* da fase C. (c) Coeficiente de assimetria de amplitude. (d) Coeficiente de assimetria de intervalo. (e) Bloqueio do Relé da fase C.

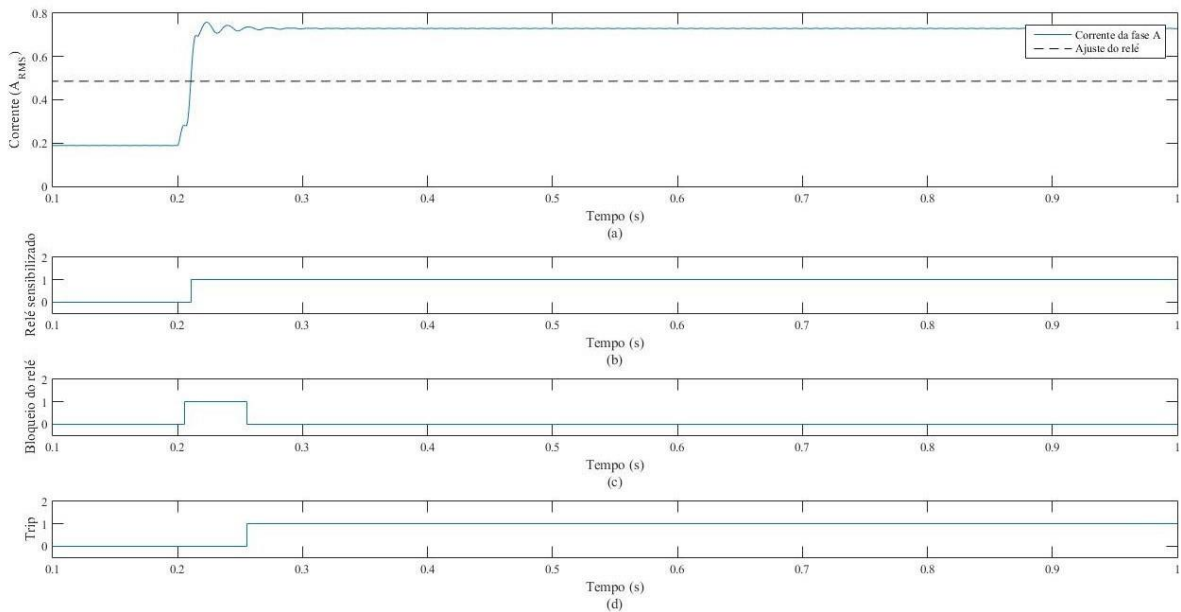


FONTE: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser visto nas Figuras 31 e 32, para as fases A e B respectivamente, somente o parâmetro δ_i ultrapassa o limite pré-definido de 10% de assimetria. Assim como ocorrido no caso 3, isto se explica pela presença de uma componente DC no curto-circuito.

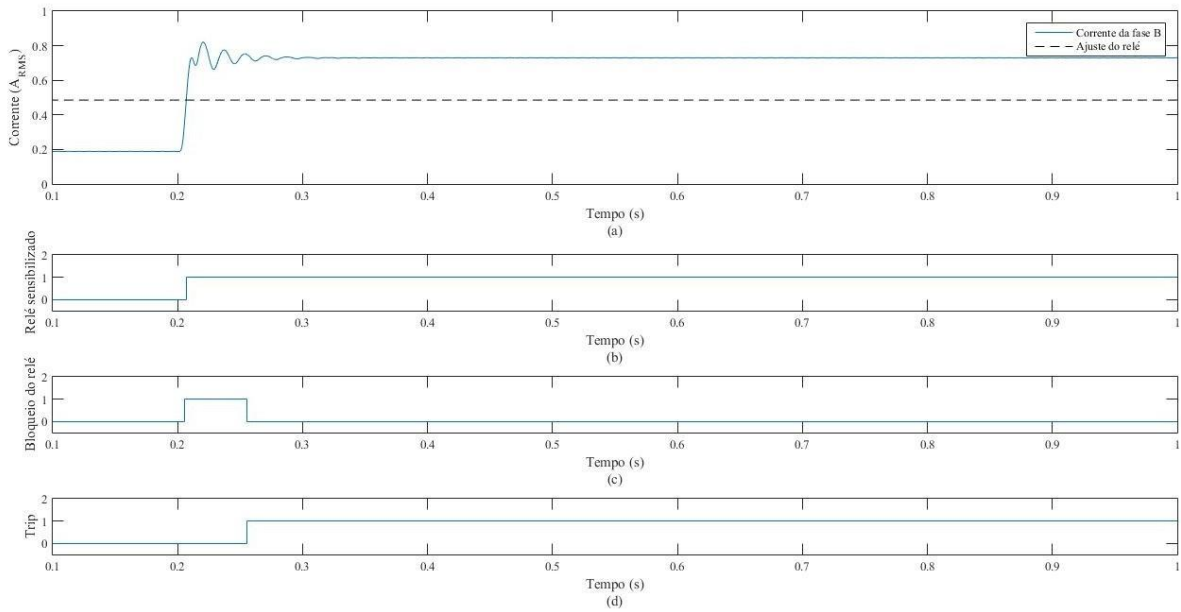
Já para a fase C, como é apresentado na Figura 33, a presença da componente DC é ainda mais perceptível, pois além de ocorrer a ultrapassagem do limite do parâmetro δ_I , também ocorre a ultrapassagem do limite do parâmetro δ_t , o que resulta no bloqueio do relé por alguns instantes, até que ambos os parâmetros retornem a valores inferiores aos limites pré-determinados. Isso provoca um pequeno atraso na atuação do relé. Isso pode ser melhor observado nas Figuras 34 a 36.

Figura 34 - Simulação do caso 4 para a fase A. (a) Valor RMS da corrente da fase A. (b) Sensibilização do Relé para a fase A. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



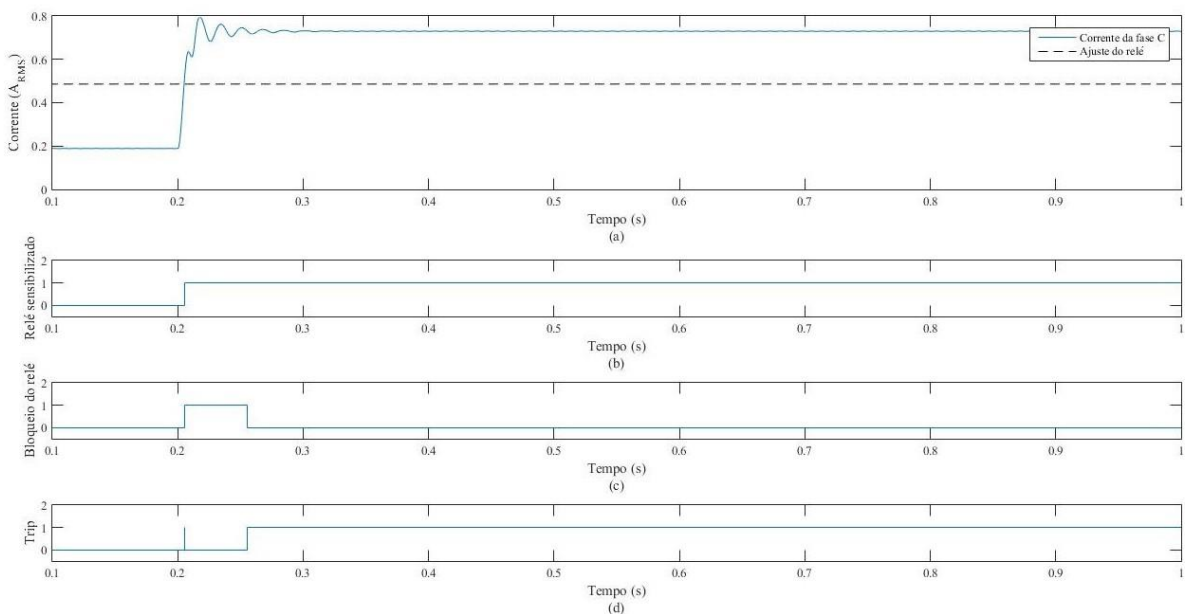
FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 35 - Simulação do caso 4 para a fase B. (a) Valor RMS da corrente da fase B. (b) Sensibilização do Relé para a fase B. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



FONTE: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Simulação do caso 4 para a fase C. (a) Valor RMS da corrente da fase C. (b) Sensibilização do Relé para a fase C. (c) Bloqueio do Relé. (d) Trip do Relé.



FONTE: Elaborado pelo autor.

4.6 Considerações Finais

A atuação correta da proteção diferencial durante a energização do transformador exige uma certa preocupação. A corrente de *inrush* ocorre em apenas um lado do transformador e pode

causar o disparo do elemento diferencial, quando este não deveria atuar. A metodologia proposta para detecção da corrente de *inrush* foi testada em todos os casos, para um total de 128 simulações de energização de um banco de transformadores e 144 simulações de curto-circuito. O método proposto apresentou bons resultados, atuando corretamente para todos os casos de *inrush* e somente apresentando um pequeno atraso no *trip* para algumas simulações de curto-circuito trifásico.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

O presente trabalho abordou o problema do fenômeno das correntes de *inrush*, o qual pode prejudicar o desempenho dos esquemas de proteção, principalmente, a proteção diferencial, visto que o *inrush* ocorre somente em um dos enrolamentos do transformador, produzindo uma corrente diferencial que resulta na operação indevida desta proteção.

Inicialmente, foram abordados os fundamentos das correntes de *inrush*, para um melhor entendimento do fenômeno, assim como suas causas e por que podem interferir no correto funcionamento do relé diferencial.

Tendo em vista que o transformador de potência é o principal equipamento de um sistema elétrico e também o mais custoso, é de fundamental importância garantir seu funcionamento de forma correta e segura.

A metodologia de detecção proposta fundamenta-se na análise da assimetria da forma de onda, tanto na amplitude quanto nos intervalos de tempo entre um segmento positivo e um negativo.

Por fim, o método proposto apresentou robustez e precisão na detecção da corrente de *inrush*, tendo como principal vantagem a sua simplicidade, apesar de possíveis atrasos para a detecção de faltas em alguns casos. Dessa forma, espera-se que a metodologia proposta possa contribuir para o aumento da confiabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência, tendo em vista seu desempenho para os casos analisados.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros citam-se:

- Avaliar o desempenho da metodologia para o caso de *inrush* simpático;
- Aplicar a metodologia em diferentes transformadores e sistemas teste; e
- Fazer uma análise qualitativa e quantitativa do desempenho da metodologia, frente a diferentes taxas de amostragem e distorção harmônica dos sinais, bem como do desempenho para sinais contendo ruídos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATABEKOV, G.I., **The Relay Protection of High Voltage Networks**, Pergamon Press, London, 1960.

CORDRAY, R.E., **Percentage differential transformer protection**, *Electrical Eng.*, 50, p. 361–363, 1931.

_____. **Preventing false operation of differential relays**, *Electrical World*, p. 160–161, July 25, 1931.

DEL VECCHIO, R. M. et al, **Transformer Design Principles**, Boca Raton, CRC Press, p. 39–85, 2002.

DMITRENKO, A.M., **Semiconductor pulse-duration differential restraint relay**, *Izv. Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Elektromekhanika*, No. 3, p. 335–339, March 1970.

EINVAL, C.H., LINDERS, J.R., **A three-phase differential relay for transformer protection**, *IEEE Trans.*, PAS-94, p. 1971–1980, 1975.

GRIGSSBY, L. L., **The Electric Power Engineering Handbook**, CRC Press LLC, Boca Raton, FL, p. 3-29, 2001.

HARDER, E.L., MARTER, W.E., **Principles and practices of relaying in the United States**, *AIEE Trans.*, 67, p. 1005–1023, 1948.

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

HAYWARD, C.D., **Harmonic-current-restrained relays for transformer differential protection**, *AIEE Trans.*, 60, p. 377–382, 1941.

HEATHCOTE, M. J., **The J & P Transformer Book (12th ed.)**, Oxford, Newnes, 945 p, 1998.

HOROWITZ, S. H., PHADKE, A. G., **Power System Relaying, 2nd edition**, Research Studies Press Ltd., Somerset, England, p. 210-214, 1995.

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

MARQUES, J. P. et al., **New Methodology for Identification of Sympathetic Inrush for a Power Transformer using Wavelet Transform**, IEEE Latin America Trans., vol. 16, no. 4, Abr. 2018.

MATHEWS, C.A., **An improved transformer differential relay**, AIEE Trans., 73, p. 645–650, 1954.

MONSETH, I.T., ROBINSON, P.H., **Relay Systems: Theory and Applications**, McGraw Hill, New York, 1935.

Q. H. Wu, Z. Lu, T. Y. Ji, **Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology**, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, p. 103-107, 2009.

ROCKEFELLER, G.D., **Fault protection with a digital computer**, IEEE Trans., PAS-98, p. 438-464, 1969.

SANTOS, E. M. et al., **CT Saturation Detection Based on the Distance Between Consecutive Points in the Plans Formed by the Secondary Current Samples and Their Difference-Functions**, IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 1, Jan. 2013.

SHARP, R.L., GLASSBURN, W.E., **A transformer differential relay with second-harmonic restraint**, AIEE Trans., 77, p. 913–918, 1958.

SONNEMANN, W. K., WAGNER, C. L., and ROCKEFELLER, G. D., **Magnetizing inrush phenomena in transformer banks**, Trans. Amer. Inst. Elect. Eng. Power App. Syst., vol. 77, no. 3, pt. III, p. 884–892, Apr. 1958.

RAFFO, G.V., **Análise da Corrente de inrush em Transformadores de Potência**, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

WILKINSON, S.B., **Transformer Differential Relay**, U.S. Patent 5,627,712, May 6, 1997.

ZHANG A. Q. et al., **An identification method based on mathematical morphology for sympathetic inrush**, IEEE Trans. Power Del., 2016.