

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUANA BARCELOS SEVERO

**UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO E CORREÇÃO DAS
DISTRORÇÕES NAS FORMAS DE ONDA DE CORRENTE
SECUNDÁRIA EM TC'S SATURADOS: UMA ABORDAGEM
UTILIZANDO RNA'S**

Alegrete

2023

LUANA BARCELOS SEVERO

**UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO E CORREÇÃO DAS
DISTRORÇÕES NAS FORMAS DE ONDA DE CORRENTE
SECUNDÁRIA EM TC'S SATURADOS: UMA ABORDAGEM
UTILIZANDO RNA'S**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos.

Alegrete

2023

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) .

S498n Severo, Luana Barcelos

Uma nova proposta para detecção e correção das distorções
nas formas de onda de corrente secundária em TC's saturados:
uma abordagem utilizando RNA's / Luana Barcelos Severo.

82 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2023.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Transformadores de Corrente. 2. Sistemas Elétricos de
Potência. 3. Redes Neurais Artificiais. 4. Saturação. 5.
Correção. I. Título.

LUANA BARCELOS SEVERO

UMA NOVA PROPOSTA PARA DETECÇÃO E CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES NAS FORMAS DE ONDA DE CORRENTE SECUNDÁRIA EM TC'S SATURADOS: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO RNA'S

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Dissertação defendida e aprovada em: 05 de Outubro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva

UNIPAMPA

Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

UTFPR



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/10/2023, às 12:36, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CHRYSITIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/10/2023, às 12:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Paulo Cícero Fritzen, Usuário Externo**, em 05/10/2023, às 21:57, 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, informando o código verificador **1259173** e o código CRC **CE2B4D5B**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo dom da vida, pela força e proteção de sempre, pois sem Ele nada seria possível.

Aos meus pais, Massilon e Maria, por todo o amor, incentivo e apoio.

Ao meu irmão Jonatha, por todo amor e apoio doados a mim.

A todos os meus professores, minha gratidão pela forma de conduzir o curso em todas as etapas, em especial, ao meu orientador prof. Eduardo Machado dos Santos pela orientação, apoio, dedicação e aprendizado durante a realização desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e à Universidade de Federal do Pampa por toda a minha formação.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos e colegas que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos membros do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP).

“Buscai primeiro o Reino de Deus, e a sua justiça, e as demais coisas vos serão acrescentadas.”

Mateus 6-33.

RESUMO

Os relés de proteção dependem da qualidade do sinal de saída dos transformadores de corrente (TCs) para seu correto funcionamento. No entanto, em algumas condições, o aumento do fluxo magnético no núcleo dos TCs pode levar a saturação do núcleo, ocasionando muitos problemas na proteção dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Por esse motivo, este trabalho apresenta uma metodologia para detecção e correção da forma de onda secundária de um TC saturado com relação de transformação 2000:5. O algoritmo de correção está baseado na utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA), que tem como saída os parâmetros desconhecidos da corrente de falta procedentes do método dos Mínimos Quadrados. Um método para detectar o instante que a saturação ocorre é apresentado e está baseado na técnica da terceira função-diferença. Os sinais analisados foram obtidos via simulações a partir de um sistema teste implementado no *software* ATPDraw, onde foram estudadas diferentes condições de saturação. Um banco de dados foi gerado para usar no treinamento da RNA, sendo este obtido com base em mudanças no sistema teste, como: tipo de curto-circuito, ângulo de falta e fluxo remanescente no TC, sendo um total de 224 casos analisados. Os métodos foram implementados no *software* MATLAB, no qual, os resultados apontam para um algoritmo robusto, capaz de reconstruir o sinal distorcido mesmo em casos de elevada saturação. Logo, a metodologia proposta contribuirá para melhorar os sistemas de proteção de SEP, aumentando a confiabilidade dos TCs ao suprimir o efeito da saturação após a ocorrência de uma falta.

Palavras-chave: Transformadores de Corrente. Sistemas Elétricos de Potência. Redes Neurais Artificiais. Saturação. Detecção. Correção.

ABSTRACT

Protection relays depend on the quality of the output signal from current transformers (CTs) for their correct operation. However, in some conditions, the increase in magnetic flux in the CT core can lead to core saturation, causing many problems in the protection of Electrical Power Systems (EPS). For this reason, this work presents a methodology for detecting and correcting the secondary waveform of a saturated CT with a transformation ratio of 2000:5. The correction algorithm is based on the use of Artificial Neural Networks (ANN), which has as its output the unknown parameters of the fault current coming from the Least Squares Method. A method to detect the instant that saturation occurs is presented and is based on the third difference function technique. The analyzed signals were obtained via simulations from a test system implemented in the ATPDraw software, where different saturation conditions were studied. A database was generated to use in ANN training, which was obtained based on changes in the test system, such as: type of short circuit, fault angle and remaining flux in the CT, with a total of 224 cases analyzed. The methods were implemented in the MATLAB software, in which the results point to a robust algorithm, capable of reconstructing the distorted signal even in cases of high saturation. Therefore, the proposed methodology will contribute to improving EPS protection systems, increasing the reliability of CTs by suppressing the effect of saturation after the occurrence of a fault.

Key-words: Current Transformers. Electric Power Systems. Artificial Neural Networks. Saturation. Detection. Correction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Circuito magnético do TC.	25
Figura 2.2 – Modelo do circuito equivalente do TC.	26
Figura 2.3 – Curvas de excitação típicas para TC's Classe C com várias relações de transformação.	28
Figura 2.4 – Comportamento da corrente de excitação em função da curva de magnetização.	29
Figura 2.5 – Circuito Simplificado do Transformador de Corrente.	31
Figura 2.6 – Formas de onda da corrente secundária de um TC sem saturação e com saturação.	32
Figura 3.1 – Relação dos neurônios. (a) Biológico. (b) Artificial.	36
Figura 3.2 – Função de limiar.	37
Figura 3.3 – Função linear.	38
Figura 3.4 – Função linear por partes.	38
Figura 3.5 – Função sigmóide.	39
Figura 3.6 – Função tangente hiperbólica.	39
Figura 3.7 – Redes Feedforward de a) Uma camada e b) Duas camadas.	40
Figura 4.1 – Função-diferença de um sinal de corrente distorcida por um TC saturado. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da primeira função-diferença del_1 . (c) Resultado da segunda função-diferença del_2 . (d) Resultado da terceira função-diferença del_3	43
Figura 4.2 – Detecção de falta através da função-diferença. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença $ del_3 $. (c) Sinal do Detector de falta.	45
Figura 4.3 – Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença do sinal estudado. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença $ del_3 $. (c) Resultado do sinal Detalhe. (d) Sinal do Detector de saturação.	46
Figura 4.4 – Correção com MMQ para um sinal sem saturação.	48
Figura 4.5 – Correção com MMQ para um sinal com saturação.	49
Figura 4.6 – Arquitetura da RNA com duas camadas ocultas.	50
Figura 5.1 – Curva de excitação $V \times I$ do TC com relação 2000/5.	53
Figura 5.2 – Curva de Magnetização com histerese para algumas situações do fluxo residual. (a) 10% do fluxo. (b) 25% do fluxo. (c) 50% do fluxo. (d) 80% do fluxo.	54
Figura 5.3 – Características do indutor <i>Type 96</i> vista no ATP para 80% do fluxo residual.	55

Figura 5.4 – Sistema teste analisado.	55
Figura 5.5 – Visão geral do sistema implementado no ATPDraw.	57
Figura 5.6 – Sinais de corrente no primário do TC para uma falta bifásica.	58
Figura 5.7 – Sinais de corrente no secundário do TC para uma falta bifásica.	59
Figura 5.8 – Sinais de corrente no primário do TC para uma falta trifásica.	59
Figura 5.9 – Sinais de corrente no secundário do TC para uma falta trifásica.	60
Figura 6.1 – Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença para o cenário 1. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença <i>del3</i> . (c) Sinal do detector de saturação proposto.	63
Figura 6.2 – Correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida para o cenário 1.	64
Figura 6.3 – Valores RMS das correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida com o método proposto para o cenário 1.	64
Figura 6.4 – Comparação entre os valores RMS das correntes secundárias corrigida com MMQ e corrigida com o método proposto para o cenário 1.	65
Figura 6.5 – Erro transitório percentual para o cenário 1.	66
Figura 6.6 – Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença para o cenário 2. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença <i>del3</i> . (c) Sinal do Detector proposto.	67
Figura 6.7 – Correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida para o cenário 2.	68
Figura 6.8 – Valores RMS das correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida com o método proposto para o cenário 2	68
Figura 6.9 – Comparação entre os valores RMS das correntes secundárias corrigida com MMQ e corrigida com o método proposto para o cenário 2.	69
Figura 6.10–Erro transitório percentual para o cenário 2.	70
Figura 6.11–Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença para o cenário 3. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença <i>del3</i> . (c) Sinal do detector de saturação proposto.	71
Figura 6.12–Correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida para o cenário 3.	72
Figura 6.13–Valores RMS das correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida com o método proposto para o cenário 3.	72
Figura 6.14–Comparação entre os valores RMS das correntes secundárias corrigida com MMQ e corrigida com o método proposto para o cenário 3.	73
Figura 6.15–Erro transitório percentual para o cenário 3.	74
Figura 6.16–Corrente secundária saturada em 60 Hz e 59 Hz para o Teste complementar.	75

Figura 6.17–Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença para o Teste Complementar I. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Sinal do detector de saturação proposto. (c) Valores RMS das correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida.	76
Figura 6.18–Correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida para o Teste complementar	77
Figura 6.19–Comparação entre os valores RMS das correntes secundárias corrigida com MMQ e corrigida com o método proposto para o Teste complementar I.	77
Figura 6.20–Erro transitório percentual para o Teste complementar I.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DC	<i>Direct Current</i>
EQM	Erro Quadrático Médio
EMTP	<i>Electromagnetic Transient Program</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NBR	Denominação de norma da ABNT
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNA	Rede Neural Artificial
RTC	Razão de Transformação do TC
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	18
1.2	Objetivos	18
1.3	Revisão Bibliográfica	19
1.3.1	Considerações Gerais	19
1.3.2	Detecção dos Sinais Distorcidos	20
1.3.3	Reconstrução da Forma de Onda	22
1.4	Estrutura do Trabalho	23
2	FUNDAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE	24
2.1	Considerações Iniciais	24
2.2	Modelagem do Transformador de Corrente	24
2.2.1	Relação de Transformação do TC	24
2.2.2	Circuito Equivalente de um Transformador de Corrente	26
2.2.3	Fator de Sobrecorrente de um TC	27
2.2.4	Curva de Excitação Secundária	27
2.2.5	Classe de Exatidão do TC	30
2.2.6	Saturação de TCs	31
2.2.7	Causas da Saturação	32
2.2.8	Efeitos da Saturação nos Principais Tipos de Proteção	33
2.2.8.1	Relés de Distância	33
2.2.8.2	Relés de Sobrecorrente	33
2.2.8.3	Relés Diferenciais	34
2.3	Considerações Finais	34
3	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	35
3.1	Considerações Iniciais	35
3.2	Vantagens das RNA's	35
3.3	Modelo do Neurônio Artificial	36
3.4	Tipos de Função de Ativação	37
3.5	Arquitetura das Redes Neurais Artificiais	40
3.6	Aprendizagem de uma Rede Neural Artificial	41
3.7	Considerações Finais	41
4	ALGORITMO PROPOSTO PARA DETECÇÃO E CORREÇÃO DOS SINAIS DISTORCIDOS POR SATURAÇÃO	42

4.1	Considerações Iniciais	42
4.2	Proposta para Detecção dos Intervalos de Saturação	42
4.3	Correção dos Intervalos de Saturação	47
4.3.1	Correção dos Intervalos de Saturação por Mínimos Quadrados	47
4.3.2	Proposta para Correção dos Intervalos Saturados com RNA	49
4.4	Considerações Finais	51
5	O SISTEMA ANALISADO	52
5.1	Considerações Iniciais	52
5.2	Especificações do TC saturável com histerese no ATPDraw	52
5.3	Sistema Elétrico Estudado	55
5.4	Exemplos de Sinais de Falta Simulados	58
5.5	Considerações Finais	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
6.1	Considerações Iniciais	61
6.2	Resultados Obtidos	61
6.2.1	Cenário 1: Falta trifásica-terra com 20% de fluxo remanescente, carga de 4 Ω e ângulo de falta de 60°	62
6.2.2	Cenário 2: Falta bifásica-terra com 70% de fluxo remanescente, carga de 4 Ω e ângulo de falta de 270°	66
6.2.3	Cenário 3: Falta bifásica com 80% de fluxo remanescente, carga de 4 Ω e ângulo de falta de 45°	70
6.2.4	Teste Complementar I: Falta trifásica-terra com 50% de fluxo remanescente, carga de 10 Ω , ângulo de falta de 0° e frequência de 59 Hz	74
6.3	Considerações Finais	79
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
7.1	Conclusões	80
7.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Os Transformadores de corrente (TCs) são equipamentos de fundamental importância na proteção de Sistemas Elétricos de Potência (SEPs). São eles os responsáveis por fornecer aos relés de proteção as informações para obtenção do fasor da corrente do circuito primário. Além disso, possuem a função de isolar os equipamentos conectados em seu secundário do circuito de alta tensão. No entanto, diante das suas características construtivas e condições de funcionamento, os TCs podem entrar em estado de saturação, o que pode causar o funcionamento inadequado do relé de proteção, retardando ou mesmo impedindo a emissão do seu sinal de *trip*.

De acordo com Hargrave (2017), esse fenômeno pode perdurar vários ciclos para o caso de uma saturação assimétrica, causando a distorção da forma de onda da corrente primária no secundário, que, por sua vez, tem consequência direta na redução do valor RMS (da língua inglesa, *Root Mean Square*) da corrente do secundário comparada ao seu valor ideal, resultante da divisão do valor eficaz da corrente do primário pela relação de transformação do TC. Logo, a leitura errada desse valor pode fazer com que a falta demore a ser extinta, ocasionando danos mais acentuados de natureza mecânica e térmica nos SEPs.

Contudo, a construção de TCs de modo a evitar a ocorrência da saturação seria inviável financeiramente, pois necessitaria de uma grande área da seção transversal dos seus núcleos. Segundo Schettino (2012), a saída para este problema está na utilização de algoritmos adequados para a detecção e correção da forma de onda saturada. Assim, muitas pesquisas foram realizadas e apresentadas na literatura com o propósito de detectar a saturação e corrigir a forma de onda da corrente secundária utilizando tecnologias de processamento digital de sinais e inteligência computacional (Santos *et al.*, 2010).

No estudo de Yu *et al.* (2001), um protótipo utilizando um microcontrolador foi realizado para testes em tempo real com o objetivo de corrigir numericamente a saturação de TCs, onde verificou-se que a Rede Neural Artificial (RNA) aplicada foi capaz de corrigir o sinal saturado inclusive para sinais com alto nível de componentes harmônicas. Como resultado, foi verificado que o esforço computacional com o uso deste método é relativamente pequeno, obtendo-se um tempo de resposta viável para implementação em tempo real, de cerca de 130 micro segundos (μs).

Assim, nessa dissertação será utilizada uma técnica de inteligência computacional baseada em RNA, a qual tem sido aplicada de forma efetiva na resolução de problemas complexos. De modo a minimizar os efeitos da saturação em TCs, este trabalho apresenta um método para detecção e correção da forma de onda saturada aplicado a um sistema

trifásico implementado no *software* ATPDraw.

1.1 Motivação

A ocorrência de um evento transitório, como a de um curto-circuito, pode surgir em qualquer momento no SEP, já que em sua maioria se trata de eventos naturais de curta duração, o que provoca alterações na forma de onda de corrente. Dependendo da intensidade da falta, o sistema deve ser isolado rapidamente para garantir o funcionamento adequado do sistema elétrico, o que torna necessária a existência de um sistema de proteção eficiente. No entanto, em certas condições, o transformador de corrente pode entrar em estado de saturação, fenômeno que distorce a forma de onda de corrente secundária do TC, levando a uma leitura errada de seu valor RMS. Desse modo, torna-se necessário que os relés numéricos de proteção sejam programados com uso de técnicas para corrigir a forma de onda de corrente. Uma dessas técnicas presentes na literatura é o uso de RNA para correção do sinal distorcido, ferramenta na qual está fundamentada a proposta desta dissertação.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem por objetivo oferecer uma contribuição para os estudos de sistemas digitais de proteção abordando assuntos exclusivamente relacionados à saturação dos transformadores de corrente, sendo este um dos fenômenos que afetam o desempenho de sistemas de proteção em SEP. Para isto, o trabalho proposto utiliza uma metodologia de correção da forma de onda secundária dos transformadores de corrente baseada em inteligência artificial, além de apresentar um algoritmo de detecção dos intervalos de saturação.

Os objetivos específicos são:

- Estudar e compreender o comportamento da saturação com o auxílio da ferramenta computacional ATPDraw na aplicação de um sistema teste sujeito à diferentes condições operacionais e tipos de falta;
- Realizar testes para avaliar e definir a melhor arquitetura da RNA para aplicação na proteção do sistema analisado;
- Implementar um método de detecção capaz de identificar o trecho saturado no qual exclusivamente atuará a RNA para correção do sinal;
- Desenvolver um método de correção da forma de onda de corrente secundária de um TC capaz de lidar as diferentes condições operacionais do sistema;

- Criar uma base de dados para uso no treinamento e validação da RNA, adquirido em simulações com mudanças nos parâmetros de: ângulo de falta, tipo de falta e fluxo remanescente.
- Verificar o desempenho dos métodos por meio do sinal RMS, uma vez que os relés de proteção se baseiam neste sinal para determinação de sua atuação.

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 Considerações Gerais

Publicações a respeito do desempenho de TCs em regime transitório tem sido realizadas ao longo dos anos. Um dos primeiros estudos foi realizado por Marshall e Lannguth em 1929, onde os autores estudaram a corrente de excitação do transformador de corrente (*apud* Coelho, 2011).

Em 1992, o padrão internacional IEC 60044-6 especificou os requisitos para TCs de proteção de resposta transitória. A norma IEC 61869-2 (2012) especificou as classes dos transformadores de corrente de proteção, sendo definidos três tipos de classes de TCs para falta transitória (TPX, TPY e TPZ). Já a norma brasileira vigente sobre especificações de TC, NBR 6856 – ABNT (2015), definiu os requisitos de desempenho para TCs de proteção, no entanto, sua especificação das classes de TCs de proteção não enquadra os TCs com resposta a transitórios.

São muitos os programas de estudo e simulação de transitórios eletromagnéticos já consagrados aplicados à SEP. Um que se destaca é o *software* ATPDraw. De Carvalho (2015) fez um estudo comparativo dos resultados reais de medição e ensaio com os modelos computacionais via ATPDraw para um TC de relação de transformação igual a 2000:5. Nesse estudo, alguns fatores relevantes a entrada de dados dos modelos foram detalhados, como curva de magnetização do TC e a forma de determinar o maior laço de histerese. Tal conhecimento é importante para combinar a qualidade da simulação com a eficiência dos sistemas de proteção em tempo real.

No trabalho de Coelho (2011) foi abordado o problema da distorção da forma de onda devido à saturação do TC e seu impacto em relés de sobrecorrente. Já em Roselli (2007) foram abordados seus efeitos na proteção de distância.

Em geral, tais problemas relacionados ao comportamento dos TCs em regime transitório podem ser minimizados através de três medidas (Pereira, 2016):

- Modificação do projeto do núcleo do TC;
- Técnicas baseadas no emprego de *hardware*;

- Técnicas de reconstrução da forma de onda distorcida.

Uma forma intuitiva de evitar a saturação em TCs quando sujeito a uma falta está relacionada a modificação do projeto do núcleo. No caso, o aumento da área de seção do núcleo magnético do TC permite uma maior quantidade de fluxo magnético sem saturação. No entanto, de acordo com Pereira (2016), o sobredimensionamento do núcleo resultaria em um TC grande, pesado e caro. No estudo do IEEE *Power System Relay Committee* (IEEE PSRC, 1990), aspectos importantes sobre o desempenho de TCs em regime transitório foram abordados, na qual se discutiu as vantagens de inserir entreferros em núcleos magnéticos. Como descrito em De Carvalho (2015), o uso de entreferros em TCs é uma forma de evitar a saturação após o religamento automático do sistema elétrico, pois resulta na redução da indutância de magnetização, o que leva a uma desmagnetização mais rápida do TC durante o tempo morto.

Um dos métodos com emprego do *hardware* é a técnica de desmagnetização, que realiza a desmagnetização do núcleo do TC através de um resistor comutado fixo, produzindo um fluxo magnético com direção reversa para limitar o fluxo total no núcleo. Masson (1979) foi um dos primeiros a estudar essa técnica utilizando uma chave eletrônica a tiristor. No entanto, em algumas condições, o uso deste método apresenta certas desvantagens, como a desmagnetização excessiva e distorções indesejadas resultante do alto valor da resistência. A fim de solucionar esses problemas e aumentar a eficiência do método, Sanati & Alinejad-Beromi (2021) propuseram uma nova técnica baseado em desmagnetização usando um resistor chaveado ajustável conectado ao secundário do TC, na qual, para controlar o processo de compensação um microprocessador foi utilizado, apresentando assim, melhor resposta do que um resistor fixo.

Outra maneira de evitar a saturação é através do uso de TCs ópticos ou eletrônicos (do inglês, OCT), pois não possuem núcleo magnético. No entanto, segundo Sanati & Alinejad-Beromi, (2021), para esses equipamentos serem utilizados é necessário que os dispositivos de proteção conectados a ele possuam capacidade de analisar os sinais digitais produzidos por ele, porém, para equipamentos já utilizados em subestações convencionais essa capacidade não está disponível.

Contudo, com o avanço tecnológico dos relés digitais, cada vez mais novas técnicas para detecção e correção dos intervalos saturados tem sido estudadas e implementadas, tornando assim, os esquemas de proteção mais seguros e confiáveis. Essas técnicas serão discutidas a seguir.

1.3.2 Detecção dos Sinais Distorcidos

Em geral, as técnicas de correção da forma de onda distorcida vinda do secundário do TC atuam em conjunto com as técnicas de detecção da saturação, enviando o detector,

o sinal de gatilho para o método de correção atuar ou não. Na maioria das técnicas de detecção, o detector tem a função de detectar os instantes de início e fim de um trecho saturado assim que ocorre a falta. Ao longo dos anos, muitas técnicas para detectar a saturação de TCs foram propostas, como: terceira função-diferença, Transformada Wavelet discreta e Redes Neurais Artificiais.

Um método proposto por Santos *et al.* (2010) para detecção dos intervalos de saturação dos TCs, foi fundamentado no cálculo dos ângulos formados entre as diferenças de dois pontos consecutivos da corrente secundária, na qual o erro transitório da correção não ultrapassou 10%. Neste método, o início e o fim dos intervalos saturados são caracterizados por picos em que a variação nas diferenças é brusca, portanto, os ângulos são grandes.

Em Santos (2011), foi avaliado o desempenho de alguns métodos de detecção e correção dos trechos distorcidos no secundário devido ao fenômeno da saturação. O autor também apresentou uma técnica fundamentada na análise da distância entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença, a qual obteve bons resultados para diversos níveis de saturação, tendo seu desempenho avaliado a partir da combinação da técnica proposta com métodos de correção.

Um método proposto por Schettino (2012) mostrou-se bastante imune a ruídos se comparado a outros métodos presentes na literatura. Neste método, o autor desenvolveu um algoritmo de detecção através da função da primeira diferença do filtro de Lanczos, na qual, não depende de características do TC e nem da carga *burden* conectada em seu secundário. Outra vantagem desse método é o fato de se utilizar apenas cinco amostras da corrente para identificar a saturação, indicando pouco esforço computacional. No entanto, para níveis elevados de ruído, esse método pode se tornar inviável devido o desvio padrão do erro atingir valores elevados.

Uma nova técnica de detecção baseada na primeira diferença de magnitudes da Curva de Lissajous foi desenvolvida por Kumar *et al.* (2016), sendo sua curva gerada por meio da corrente secundária e sua primeira derivada. Os autores validaram a boa eficiência do método até mesmo para sinais com presença de ruído de 30 e 60 db, o qual demonstrou um algoritmo rápido e simples.

Em (Hong *et al.*, 2017), foi proposto uma nova técnica para detecção da saturação baseado nos parâmetros de assimetria da forma de onda da corrente secundária do TC saturado e não saturado, onde os resultados de simulação através do *software* PSCAD/EMTDC mostram que o esquema proposto pelos autores possui habilidades de detectar a saturação de TCs e também de avaliar o nível de saturação através da determinação de um coeficiente.

1.3.3 Reconstrução da Forma de Onda

Segundo Pereira (2016), as técnicas de reconstrução da forma de onda distorcidas dos TCs podem ser divididas em três categorias:

1. Estimação da corrente de magnetização baseada na curva de saturação ou laço de histerese;
2. Estimação de parâmetros da onda baseada em técnicas aplicadas ao processamento digital do sinal de corrente secundária;
3. Estimação através de redes neurais artificiais.

Kang *et al.* (2005) combinaram a técnica da função-diferença com outras destinadas à estimação do fluxo residual, fundamentada em funções-diferença de segunda ordem, reportando bons resultados para TCs com dimensões reduzidas. Porém, como demonstrado em Pereira (2016), a estimação do fluxo residual pode apresentar falhas quando testada para faltas em diferentes pontos da linha.

Nos métodos de estimação de parâmetros de onda, a corrente de falta é matematicamente expressa pela soma de uma componente senoidal e uma componente com decaimento exponencial. Nesse entendimento, em Pan *et al.* (2004) foi proposto um método de estimação baseado em ajustes de curvas por mínimos quadrados. Porém, como mostrado por Schettino (2012), esse método não apresenta bons resultados em caso de saturação mais severa.

Outra metodologia de estimação de parâmetros da onda foi proposta por Li *et al.* (2002), chamada de técnica de regressão, na qual se utiliza o método de ajuste de curvas por mínimos quadrados, porém, em seu equacionamento, utiliza amostras dos trechos não saturados imediatamente anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação. Em (Santos, 2011), essa técnica foi avaliada em conjunto com outras técnicas de detecção, na qual o autor verificou que os erros transitórios foram relativamente baixos durante a compensação, mostrando o bom desempenho do método.

O bom sucesso das redes neurais artificiais para problemas relacionados à sistemas não lineares fez com que surgissem, na literatura, muitas publicações a respeito da detecção e correção da forma de onda saturada com uso da RNA, como em Khorashadi-Zadeh & Sanaye-Pasand (2006), Haghjoo & Pak (2016) e Silva *et al.* (2020). Na última publicação mencionada, o autor verificou o bom resultado da RNA mesmo na presença de ruídos e alteração na topologia da rede.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação foi dividida em mais seis capítulos, cujo conteúdo é descrito a seguir:

No Capítulo 2, é apresentada uma base teórica sobre os fundamentos dos transformadores de corrente, na qual são abordados tópicos como o seu circuito equivalente, curva de magnetização e classe de exatidão. Além disso, são apresentados aspectos sobre o fenômeno da saturação, incluindo suas causas e consequências sobre o sistema de proteção.

O Capítulo 3 aborda conceitos sobre as Redes Neurais Artificiais, destacando fundamentos sobre seu treinamento, características gerais dos principais tipos de arquitetura e, também, as funções de ativação propostas na literatura.

No Capítulo 4, é descrito o algoritmo de detecção adotado, escolhido após uma investigação dos métodos presentes na literatura. Neste capítulo também é apresentada a metodologia do algoritmo proposto para correção do sinal saturado a qual foi fundamentada no Método dos Mínimos Quadrados com o auxílio da RNA.

O Capítulo 5 apresenta as características gerais do sistema elétrico analisado com os respectivos dados de seus elementos, o qual foi implementado em ambiente ATPDraw. Neste capítulo são mostrados os diversos casos simulados com variação de parâmetros como tipo de falta e fluxo remanescente do TC, gerando a base de dados para treinamento da RNA.

Os resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para detecção e correção da saturação são apresentados no Capítulo 6, os quais com uso do programa MATLAB. Os resultados descritos foram obtidos para diferentes casos de curto-circuito.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros que darão continuidade a essa pesquisa.

2 FUNDAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE

2.1 Considerações Iniciais

Os transformadores de corrente são dispositivos que visam transmitir o sinal da corrente primária aos instrumentos de proteção e medição em níveis mais baixos que o SEP. De acordo com o IEEE Std C37.110-2007, estes dispositivos tem três principais finalidades:

- Isolar os dispositivos conectados em seu secundário, como equipamentos de medição, controle e proteção, do circuito de alta tensão;
- Fornecer em seu secundário uma forma de onda de corrente proporcional, em escala reduzida, a corrente do primário;
- Fornecer em seu secundário uma corrente em níveis aceitáveis aos dispositivos a ele conectados.

Todos os equipamentos ligados ao enrolamento secundário de um TC, como relés, devem ser conectados em série. No Brasil, por uma questão de padronização dos equipamentos de proteção, o seu secundário deve fornecer uma corrente nominal de 5 A (Padrões ANSI e ABNT). Na Europa, essa corrente é padronizada em 1 A.

Igualmente, os equipamentos conectados ao enrolamento primário devem estar todos em série, sendo que, a bobina primária do TC deve ter pequena resistência e reatância para que a queda de tensão e consumo de energia seja desprezível, assim, constituído por um cabo condutor de bitola maior e com poucas espiras.

2.2 Modelagem do Transformador de Corrente

2.2.1 Relação de Transformação do TC

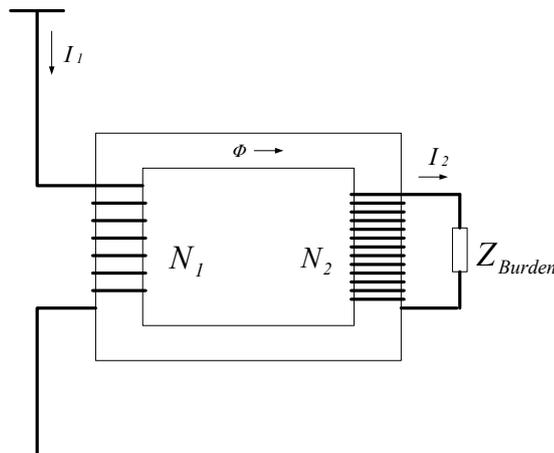
Na Figura 2.1, é mostrado o circuito magnético de um TC, conforme (Roselli, 2007).

Aplicando a lei de Hopkinson tem-se que:

$$F1 - F2 = \mathfrak{R} \cdot \phi \quad (2.1)$$

$$F1 = N1 \cdot I1 \quad (2.2)$$

Figura 2.1 – Circuito magnético do TC.



Fonte: Adaptado de (Roselli, 2007).

$$F2 = N2 \cdot I2 \quad (2.3)$$

Onde:

$N1$ é o número de espiras do primário.

$N2$ é o número de espiras do secundário.

$F1$ é a força magnetomotriz produzida pela bobina primária do TC.

$F2$ é a força magnetomotriz produzida pela bobina secundária do TC.

\mathfrak{R} é a relutância do circuito magnético do núcleo do TC.

ϕ é o fluxo magnético do núcleo do TC.

Desenvolvendo a Equação (2.1) tem-se:

$$N1 \cdot I1 - N2 \cdot I2 = \mathfrak{R} \cdot \phi \quad (2.4)$$

Sabendo que a relutância magnética vale zero quando se supõe um transformador ideal, chega-se a:

$$I2 = \frac{1}{\frac{N2}{N1}} \cdot I1 \quad (2.5)$$

Logo, a relação de transformação de um TC (RTC) pode ser definida pela razão entre as espiras dos enrolamentos do secundário e do primário conforme a Equação (2.6)

$$RTC = \frac{N2}{N1} \quad (2.6)$$

A RTC pode ser expressa, também, em termos das correntes nominais do primário e do secundário do TC, conforme (2.7)

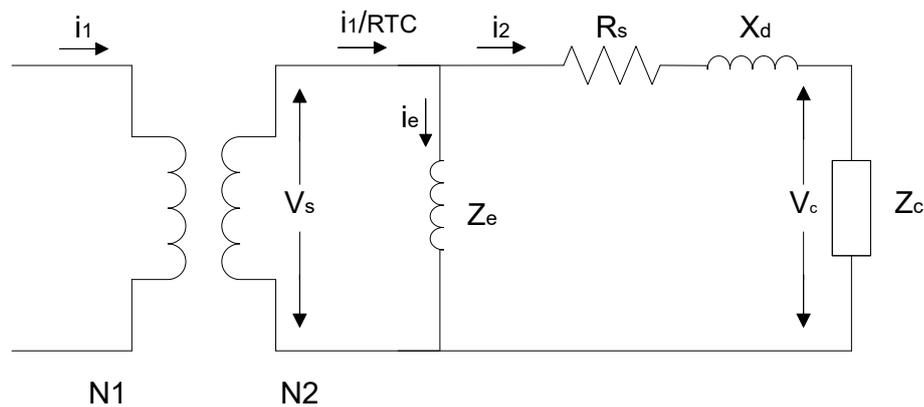
$$RTC = \left(\frac{N2}{N1} \right) \times \frac{5}{5} = \frac{I1_{nom}}{5} \quad (2.7)$$

Conforme o padrão ANSI, os valores de RTC podem ser de 10:5, 15:5, 25:5, 40:5, 50:5, 75:5, 100:5, 200:5, 300:5, 400:5, 600:5, 800:5, 1200:5, 1500:5, 2000:5, 3000:5, 4000:5, 5000:5, 6000:5, 8000:5 e 12000:5 A (IEE Std C57.13-1993). De acordo com a ABNT, os valores de RTC podem ser de 5:5, 10:5, 15:5, 20:5, 30:5, 40:5, 50:5, 60:5, 75:5, 100:5, 125:5, 150:5, 200:5, 250:5, 300:5, 400:5, 500:5, 600:5, 800:5, 1000:5, 1200:5, 1500:5, 2000:5, 3000:5, 4000:5, 5000:5, 6000:5, 8000:5 A (Kindermann, 1999).

2.2.2 Circuito Equivalente de um Transformador de Corrente

Na Figura 2.2, é apresentado o circuito equivalente de um TC conectado a uma carga qualquer. Sabendo-se que a impedância de dispersão primária e a parcela reativa do terminal secundário não afetam significativamente o seu desempenho, estas podem ser desconsideradas (IEEE Std C37.110-2007).

Figura 2.2 – Modelo do circuito equivalente do TC.



Fonte: Adaptado de (Santos, 2011).

Onde, i_1 caracteriza a corrente primária, V_s , a tensão secundária de excitação, i_e , a corrente de excitação, i_1/RTC , a corrente secundária total, Z_e , a impedância do ramo de excitação, i_2 , a corrente secundária que flui pela carga, R_s , a resistência do enrolamento secundário, X_d , a reatância de dispersão, V_c , a tensão na carga e Z_c , a impedância da carga (Santos, 2011).

A corrente de excitação é dada pela expressão (2.8), onde i_M equivale à corrente de magnetização e i_{Loss} , às perdas no núcleo. Em condições normais de operação do TC (região linear da curva de magnetização do núcleo), o valor de i_e é muito pequeno e o erro produzido por essa corrente é desprezível. Contudo, quando ocorre um curto-circuito, a corrente primária é muito elevada e o TC pode entrar na região não linear da curva de excitação do núcleo, gerando erros consideráveis a transformação em razão do incremento desproporcional nos valores de i_e . Tal incremento gera distorções significativas na forma de onda da corrente secundária do TC. Admitem-se erros máximos de 2,5% e 10% para TCs de proteção. Mas, o valor mais utilizado em proteção é o de 10% (IEEE Std C37.110-2007).

$$i_e = i_M + i_{Loss} \quad (2.8)$$

A corrente secundária total é dada pela Equação (2.9).

$$i_1/RTC = i_2 + i_e \quad (2.9)$$

Logo, a corrente primária total é dada por (2.10).

$$i_1 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \times (i_2 + i_e) \quad (2.10)$$

2.2.3 Fator de Sobrecorrente de um TC

Define-se como Fator de Sobrecorrente (FS) de um TC, a relação entre a máxima corrente de curto-circuito suportada pelo primário do TC e a sua corrente primária nominal. Isso deve ocorrer com a correspondente limitação de erro de sua classe de exatidão. O fator de sobrecorrente é mostrado na Equação (2.11).

$$FS = \frac{i_1^{max \text{ de curto-circuito}}}{i_{1nominal}} \quad (2.11)$$

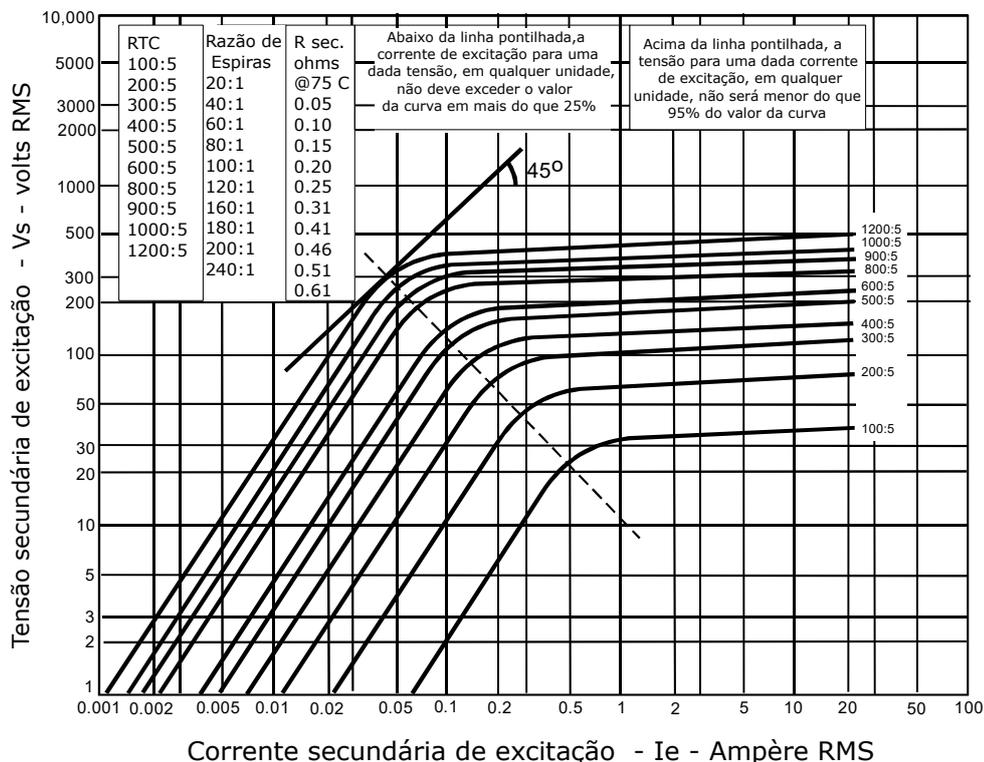
Os seus valores são padronizados de acordo com a norma reguladora do sistema elétrico vigente em cada país. Os valores normalizados de FS são:

- Padrão ANSI: FS = 20.
- Padrão ABNT: FS = 5, 10, 15, 20, 30.

2.2.4 Curva de Excitação Secundária

Os fabricantes de TCs geralmente fornecem curvas entre a relação de tensão de excitação secundária (V_s) e a corrente de excitação do núcleo (i_e), assim chamadas de curvas de excitação, normalmente traçadas em escala logarítmicas, como mostra a Figura 2.3 para o conjunto de curvas de um TC da classe C.

Figura 2.3 – Curvas de excitação típicas para TC’s Classe C com várias relações de transformação.



Fonte: Adaptado de IEEE Std C37.110-2007.

A norma americana *IEEE standard Requirements for Instrument Transformers* (IEEE Std C57.13-1993) define o joelho da curva de excitação como o ponto em que apresenta uma reta tangente com inclinação de 45° para TCs com núcleos sem entreferro, como mostra a Figura 2.3, e 30° para núcleos com entreferro. A norma Européia recomendada pela IEC, define este ponto como sendo o ponto da curva de excitação em que um acréscimo de 10% de V_s causa um acréscimo de 50% em I_e . Normalmente, esse ponto definido pela IEC situa-se acima do definido pelo IEEE.

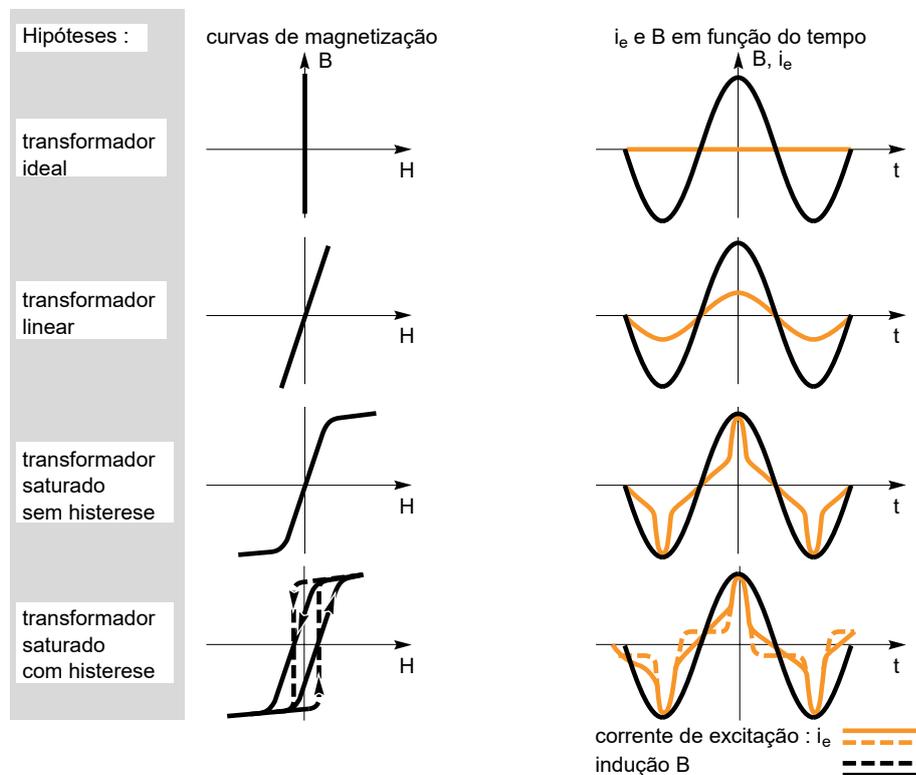
Caso não seja disponibilizado pelo fabricante, a curva de excitação pode ser obtida via ensaio em laboratório, onde os valores eficazes de V_s e I_e secundário são obtidos com o primário a vazio, considerando diferentes valores de tensão da fonte até ser alcançado o grau de saturação.

Embora sejam fornecidos pelos fabricantes as características dos TCs em função dos valores eficazes de V_s e I_e , é necessário para o cálculo de processos transitórios que esses valores sejam expressados em valores de fluxo de enlace e da corrente de magnetização.

Essa curva de excitação também pode ser representada em função do fluxo ou indução magnética do material (B) e intensidade do campo magnético (H), chamada de curva de magnetização do TC, sendo que, em regime senoidal, B representa a tensão e H

representa a intensidade da corrente de excitação. A Figura 2.4 mostra quatro situações que representam as possibilidades de operação do TC.

Figura 2.4 – Comportamento da corrente de excitação em função da curva de magnetização.



Fonte: Adaptado de (Orlhac, 1992).

Na primeira hipótese, I_2 é uma réplica perfeita de I_1 . No segundo caso, para um transformador linear, a permeabilidade magnética do núcleo é constante, no qual I_e e I_2 são funções senoidais sem distorções. Já para o caso de um transformador saturado sem histerese, ocorre uma abrupta variação permeabilidade magnética do material magnético. Essa variação acontece dentro de uma faixa que cresce rapidamente até o ponto de joelho da curva de saturação. A partir desse ponto, B cresce muito lentamente e I_e começa a se deformar passando a representar um ponto.

Uma propriedade que existe nos materiais ferromagnéticos é a histerese eletromagnética. No caso do transformador saturado com histerese, a curva de magnetização é duplicada caracterizando a resistência do material do circuito magnético sobre as variações de indução, sendo que, neste caso, I_e apresenta uma forma de onda característica. Essa propriedade significa que pode haver uma densidade de fluxo magnético residual no núcleo do transformador mesmo após a corrente que gera o campo H se tornar nula.

A presença desse fluxo magnético remanescente pode levar a uma saturação precoce do transformador, induzindo ele a erros que serão discutidos mais adiante.

2.2.5 Classe de Exatidão do TC

A ABNT define a classe de exatidão como sendo a máxima potência aparente, em VA, que pode ser ligada ao secundário do TC em regime permanente (5A), de modo que, quando ocorrer a máxima corrente de curto-circuito limitada pelo fator de sobrecorrente, o erro do TC não ultrapasse o da sua classe de exatidão. Conforme a norma NBR 6856, são previstos quatro tipos construtivos de TC para proteção, designados pelas classes P, PR, PX e PXR. De acordo com a caracterização das classes de proteção, as classes P e PR são definidas pelos requisitos de uma corrente de curto-circuito simétrica e as classes PX e PXR são definidas pela especificação de suas características de magnetização.

Para TC tipo P, as classes de exatidão padronizadas são: 5P e 10P. Já as classes de exatidão padronizadas PR são: 5PR e 10PR. Os demais tipos de classes, são aplicados em casos específicos, constituindo casos especiais, como por exemplo, em casos de sistemas que prevêem religamento automático, sendo os requisitos de exatidão devendo ser indicados por especificações de desempenho.

Tomando como exemplo um TC da classe P, pelo novo formato padrão conforme norma ABNT NBR 6856:2021, a marcação da classe de exatidão na placa de identificação de um TC de proteção deve apresentar a carga nominal seguida do limite de erro composto, a designação da classe e o fator-limite de exatidão, apresentando a seguinte forma, por exemplo: 25VA 5P15. O que significa dizer que esse é um exemplo de um TC com uma carga secundária de 25 VA que atende uma classe de exatidão de 5%, com fator-limite de exatidão de 15 vezes a corrente nominal.

No entanto, a classe de exatidão por meio do padrão ANSI é determinada por uma letra e pelo valor da tensão secundária que descreve o desempenho do transformador em regime permanente. A expressão de acordo com o padrão ANSI pode ser vista em (2.12).

$$\left\{ \begin{array}{c} C \\ K \\ T \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{array} \right\} \quad (2.12)$$

Em que:

- *C*: Informa que o fluxo de dispersão é desprezível e também que a característica de excitação pode ser usada diretamente para determinar a performance do transformador.

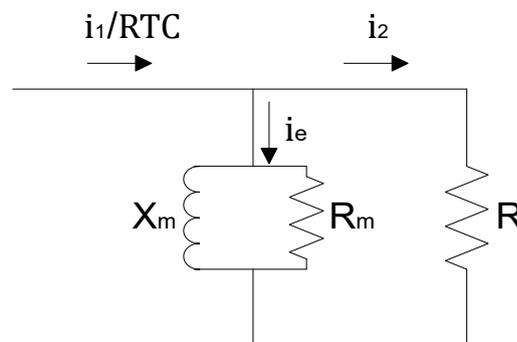
- *K*: Possui as mesmas informações que a classe *C*, contudo, em sua curva de excitação, a tensão no joelho da curva deve ser no mínimo de 70% do valor nominal da tensão no secundário do TC especificada na nomenclatura.
- *T*: Informa que o erro deve ser determinado via testes e apresenta um erro bastante considerável, pois essa classe apresenta significativo fluxo de dispersão no seu núcleo.

2.2.6 Saturação de TCs

Na Figura 2.5, é ilustrado o circuito simplificado de um TC. A corrente disponível em seu terminal secundário (i_2), que alimenta a resistência do *burden* R , pode ser expressa pela Equação (2.13), onde i_1/RTC é a corrente secundária total (corrente primária dividida pela relação de transformação) e i_e é a corrente de excitação do núcleo. X_m e R_m representam, respectivamente a reatância e a resistência do ramo de magnetização.

$$i_2 = \frac{i_1}{RTC} - i_e \quad (2.13)$$

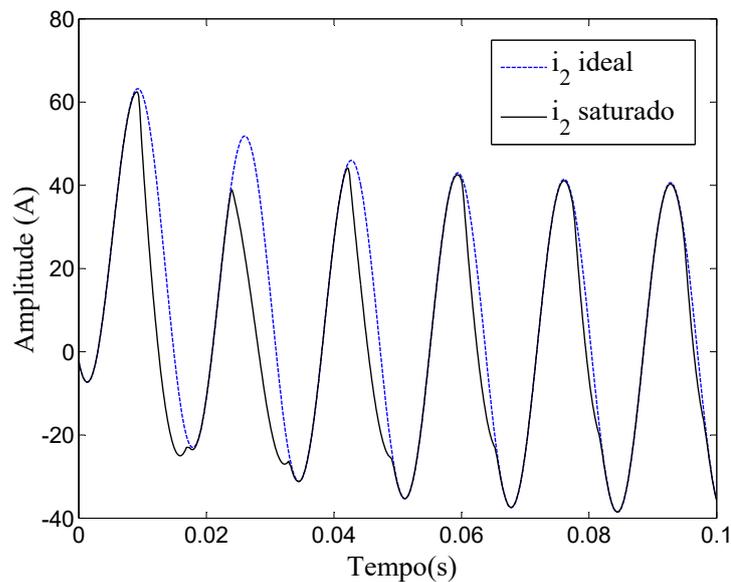
Figura 2.5 – Circuito Simplificado do Transformador de Corrente.



Fonte: Autora.

Em condições normais de operação, a impedância do ramo de magnetização é expressivamente grande, o que faz com que a corrente de excitação apresente um valor muito pequeno, podendo assim ser desconsiderada. Entretanto, quando ocorre a saturação do TC, a impedância de magnetização cai drasticamente, fazendo com que esta parcela de corrente que é subtraída de i_1/RTC gere uma distorção na forma de onda do sinal de corrente que vai para a carga do TC. A Figura 2.6 ilustra a diferença de uma forma de onda ideal de um sinal distorcido pela saturação.

Figura 2.6 – Formas de onda da corrente secundária de um TC sem saturação e com saturação.



Fonte: Autora.

Segundo Schettino (2012), existem alguns fatores que podem atuar em conjunto ou separadamente, aumentando a tendência do efeito da saturação em TCs, como: elevadas correntes no primário, componentes unidirecionais exponencialmente declinantes de curto-circuito, fluxo remanescente no núcleo e carga conectada ao secundário do TC.

Para El-Amin & Al-Abbas (2006), os TCs saturados podem prover corrente suficiente para a operação de relés de sobrecorrente instantâneos, não afetando o seu desempenho. No entanto, no modo temporizado, dependendo da severidade da saturação, os relés podem apresentar atrasos significativos em sua operação.

2.2.7 Causas da Saturação

Normalmente, um TC consegue reproduzir precisamente as correntes assimétricas por um ou dois ciclos antes de entrar em regime de saturação. Segundo IEEE Std C37.110-2007, os principais fatores que levam os núcleos dos TCs à saturação são:

- Grau de Assimetria da Corrente de Curto-Circuito: A razão entre X e R do sistema e o ângulo de incidência da falta influenciam diretamente no grau de assimetria da forma de onda da corrente primária. Assim, quanto maior o grau de assimetria mais rápido o TC irá saturar.
- Magnitude da Corrente de Curto-Circuito no Primário: A magnitude da corrente assimétrica é proporcional à magnitude da componente senoidal da corrente primária.

Quanto maior for a magnitude da corrente, maior será a indução magnética imposta ao núcleo do TC.

- Fluxo Remanescente no Núcleo Magnético: O fluxo residual irá se somar ou subtrair ao fluxo gerados pelas correntes do primário de acordo com a polaridade desse fluxo gerado. Assim, caso o fluxo remanescente seja elevado, o desempenho do transformador fica comprometido, pois uma corrente de falta baixa pode também levar o TC a um regime de saturação idêntico ao causado por uma corrente de valor maior. Em um estudo realizado com 141 TCs em um sistema de 230 kV mostrou que 27% dos TCs apresentavam um nível de fluxo residual de 60% a 80% após a desenergização do enrolamento primário (Pereira, 2016).
- Impedância do Circuito Secundário: Um TC com uma elevada carga secundária satura de forma mais rápida do que quando conectado à cargas menores com mesmo fator de potência. Para um fator de potência da carga do TC menor, ou seja, com maior componente indutiva, mais lentamente o TC satura, pois a indutância proporciona baixa impedância para componentes de baixa frequência das correntes de falta assimétricas. Em contrapartida, quanto maior for a componente resistiva mais rapidamente o TC satura, pois maior será a componente a indução magnética imposta ao núcleo do TC.
- Área da seção do núcleo: A quantidade de ferro no núcleo do TC influencia diretamente na impedância secundária de excitação. Assim, quanto maior for a área da seção transversal do núcleo do TC, maior será o fluxo requerido, o que aumenta o valor da tensão de saturação, logo, aumenta o tempo até a saturação.
- Relação de Espiras do TC: Quanto maior for a relação de espiras do TC, o fluxo diminui e, consequentemente, a densidade de fluxo é reduzida .

2.2.8 Efeitos da Saturação nos Principais Tipos de Proteção

2.2.8.1 Relés de Distância

Conforme Mooney (2008), a saturação em TCs resulta em uma redução da magnitude da corrente e atraso do ângulo de fase da mesma, ocasionando um aumento significativo na impedância vista por relés de distância. Como consequência, isso pode gerar problemas de subbalcance e atrasos na operação dos relés.

2.2.8.2 Relés de Sobrecorrente

De acordo com El-Amin & Al-Abbas (2006), mesmo em regime saturado, os TCs podem fornecer corrente suficiente para a operação de relés de sobrecorrente instantâneos, sem afetar o seu desempenho. No entanto, dependendo da severidade da saturação, podem

ocorrer atrasos relevantes na operação de relés temporizados, no qual, a intensidade da saturação está associada com o nível da corrente de curto-circuito, a constante X/R do sistema, a carga do TC e ao fluxo remanescente do núcleo do transformador.

Porém, é importante lembrar que, se os relés de sobrecorrente forem ajustados adequadamente, os atrasos na operação desses dispositivos não causarão problemas de descoorenação com outros dispositivos de proteção.

2.2.8.3 Relés Diferenciais

De acordo com Phadke & Thorp (2009), a saturação dos TCs afeta, em ordem crescente, o desempenho dos relés diferenciais na proteção de transformadores, geradores e barras. Este problema ocorre dado o fato de que, em caso de curtos-circuitos externos a zona de proteção, essa saturação pode gerar correntes diferenciais fictícias, que podem ser maiores que os valores de ajuste de operação do relé, podendo este operar de forma indevida.

2.3 Considerações Finais

Nesse Capítulo, foram abordados os fundamentos dos transformadores de corrente, envolvendo as causas e os efeitos da saturação nos principais tipos de proteção. Conceitos como modelagem e curva de magnetização também foram abordados.

No próximo Capítulo, serão abordados os conceitos básicos referentes as redes neurais artificiais.

3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

3.1 Considerações Iniciais

As RNA's pertencem a um campo da ciência da computação conhecido como Inteligência Artificial e são baseadas na estrutura neural do cérebro humano, operando por elementos computacionais chamados neurônios artificiais, sendo que estes estão interconectados de modo a formar uma rede, representando assim o cérebro humano.

As RNA's constituem uma importante ferramenta na solução de problemas de SEP, tais como previsões de carga, classificação e localização de falta, além da correção de sinais distorcidos do TC, sendo um excelente método alternativo para aqueles casos em que os métodos tradicionais não apresentem bons resultados. Dada a sua importância, neste Capítulo são abordados alguns conceitos básicos das redes neurais artificiais.

3.2 Vantagens das RNA's

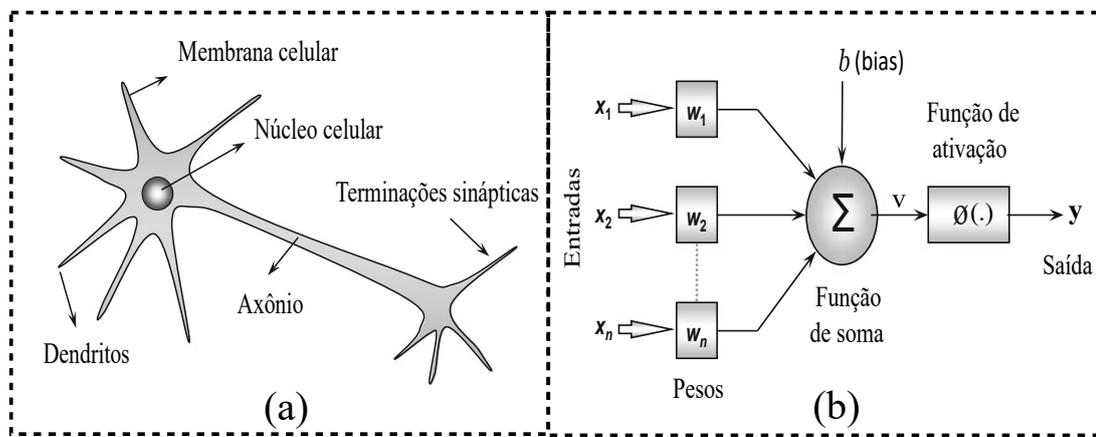
As principais vantagens no uso de RNA's para as soluções de problemas complexos provém de algumas propriedades e capacidades, como são descritas a seguir (Haykin, 2001):

- **Aprendizagem:** possuem a capacidade de absorver informações, por meio de um processo iterativo de ajustes dos seus pesos sinápticos;
- **Generalização:** apresentam uma saída adequada para uma entrada que não está presente nos processos iterativos de aprendizagem;
- **Adaptabilidade:** possuem capacidade em adaptar seus pesos sinápticos após modificações em seu meio ambiente, possibilitando absorver essas modificações perante um novo treinamento;
- **Não Linearidade:** uma vez que os neurônios que compõem uma RNA forem não-lineares, a mesma terá o mesmo comportamento. Essa é uma característica importante, pois a grande maioria dos sistemas físicos que realizam a geração dos sinais de entrada de uma RNA são não-lineares;
- **Tolerância à Falhas:** mesmo que uma parte das conexões esteja inoperante, não haverá significativas mudanças em sua performance. Essa característica ocorre devido ao fato do conhecimento estar distribuído por toda a RNA.

3.3 Modelo do Neurônio Artificial

Como relatado anteriormente, as RNA's buscam reproduzir a fisiologia do neurônio biológico. Na Figura 3.1, pode-se observar a semelhança de um neurônio artificial com um neurônio biológico, na qual, as entradas do neurônio artificial (X) são análogas aos terminais de entrada de informações do neurônio biológico (Dendritos). A Função de soma representa o corpo celular do neurônio biológico e a Função de ativação (ϕ) desempenha a atuação das reações químicas ao longo do neurônio biológico. O sinal de saída da RNA (Y) equivale aos terminais do Axônio que gera a saída de informação do neurônio biológico.

Figura 3.1 – Relação dos neurônios. (a) Biológico. (b) Artificial.



Fonte: Adaptado de (Da Silva; Spatti; Flauzino, 2010).

No neurônio artificial tem-se também o conjunto de pesos sinápticos (W), que desempenha papel análogo às reações das conexões sinápticas entre neurônios, onde ocorrem o processamento de informações. Nestas conexões entre neurônios, cada dendrito conectado possui uma reação diferente, estabelecida por diferentes liberações químicas vindas dos neurônios pré-sinápticos, onde poderão possuir caráter excitatório ou inibitório ao neurônio pós-sináptico. Os pesos representam, portanto, a disposição excitatória ou inibitória dos sinais de entrada (Faria, 2014).

Assim, a saída de um neurônio artificial pode ser determinada através do somatório da multiplicação das entradas pelos pesos sinápticos, levados a uma determinada função de ativação. Matematicamente, um neurônio pode ser descrito com as seguintes equações:

$$V = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i + b \quad (3.1)$$

$$Y = \phi(V) \quad (3.2)$$

O termo b adicionado no modelo é denominado *bias* ou limiar de ativação com valor normalmente igual a -1 e V descreve o nível de atividade interna do neurônio. No

processo denominado treinamento, os pesos sinápticos e limiares devem ser ajustados para acontecer o aprendizado do neurônio, assim como de toda rede neural.

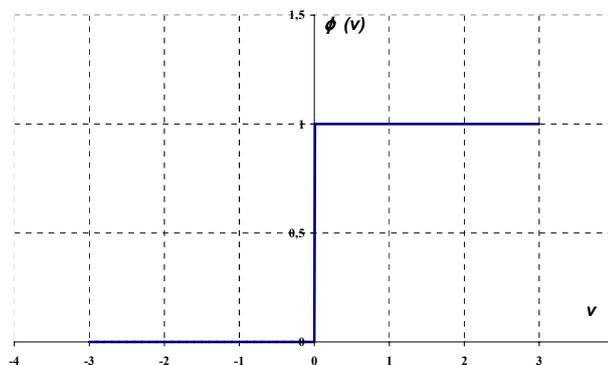
3.4 Tipos de Função de Ativação

No caso da função de ativação, existem diversas funções que podem ser utilizadas. Segundo Haykin (2001), ela define a saída de um neurônio de acordo com o grau de ativação produzida pelas suas entradas, sendo que as mais empregadas são:

- Função de ativação limiar: é uma função semelhante a função degrau unitário, onde a saída terá valor igual a 1 se o resultado do somador no neurônio for não negativo e valor zero se for negativo. Ela pode ser definida pela Equação (3.3) e seu gráfico está representado na Figura 3.2.

$$\phi(V) = \begin{cases} 1, & \text{se } V \geq 0 \\ 0, & \text{se } V < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Figura 3.2 – Função de limiar.

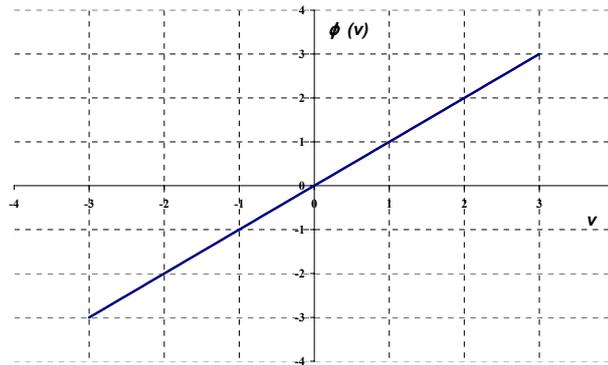


Fonte: (Roselli, 2007).

- Função linear: sua função é definida pela Equação (3.4) e seu gráfico está representado na Figura 3.3.

$$\phi(V) = V \quad (3.4)$$

Figura 3.3 – Função linear.

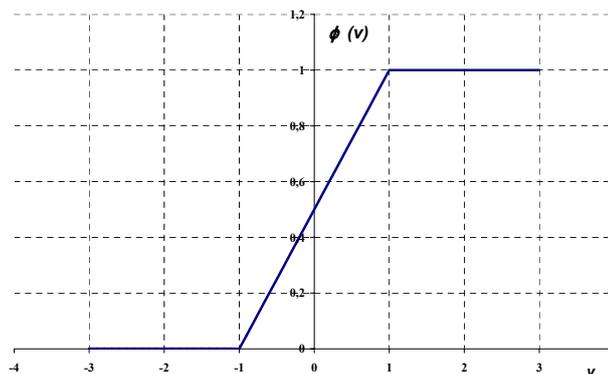


Fonte: (Roselli, 2007).

- Função de ativação linear por partes: Ela serve para limitar a saída da rede entre os valores -1 e 1. Pode ser definida pela Equação (3.5) e seu gráfico está representado na Figura 3.4.

$$\phi(V) = \begin{cases} 1, & \text{se } V \geq 1 \\ v, & \text{se } -1 < V < 1 \\ 0, & \text{se } V \leq -1 \end{cases} \quad (3.5)$$

Figura 3.4 – Função linear por partes.

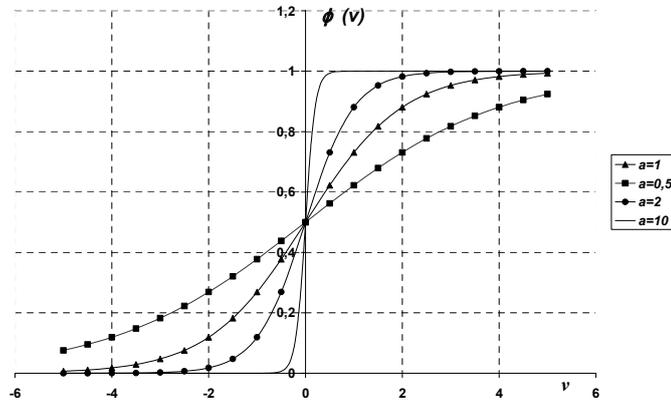


Fonte: (Roselli, 2007).

- Função sigmóide: Também chamada de função sigmóide logística, ela é uma das funções mais utilizadas em RNA, principalmente usada em aplicações com comportamento não linear. Ela pode ser definida pela Equação (3.6) e seu gráfico está representado na Figura 3.5, onde o termo a representa o parâmetro de inclinação da função.

$$\phi(V) = \frac{1}{1 + e^{-aV}} \tag{3.6}$$

Figura 3.5 – Função sigmóide.

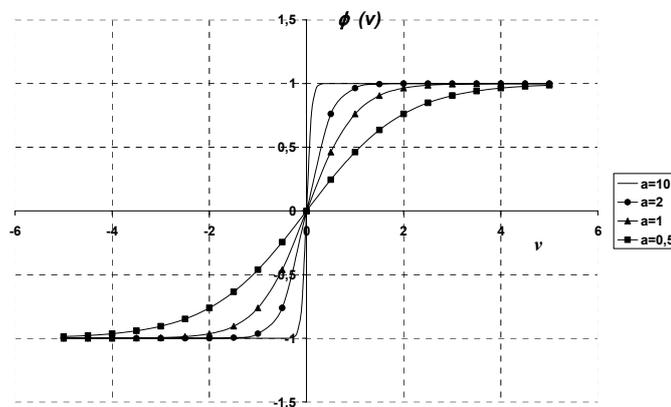


Fonte: (Roselli, 2007).

- Função hiperbólica: Essa é uma função similar a função logística. Pelo fato da função sigmóide apresentar valores apenas entre 0 e 1, ela é utilizada para preservar a forma sigmoidal porém limitando seus valores entre -1 e 1. Sua função é definida pela Equação (3.7) e seu gráfico está representado na Figura 3.6.

$$\phi(V) = \tanh(aV) = \frac{e^{aV} - e^{-aV}}{e^{aV} + e^{-aV}} \tag{3.7}$$

Figura 3.6 – Função tangente hiperbólica.



Fonte: (Roselli, 2007).

3.5 Arquitetura das Redes Neurais Artificiais

A RNA é fundamentalmente constituída de uma camada de entrada, uma camada de saída, e pode ou não ter uma ou mais camadas ocultas. Sendo que:

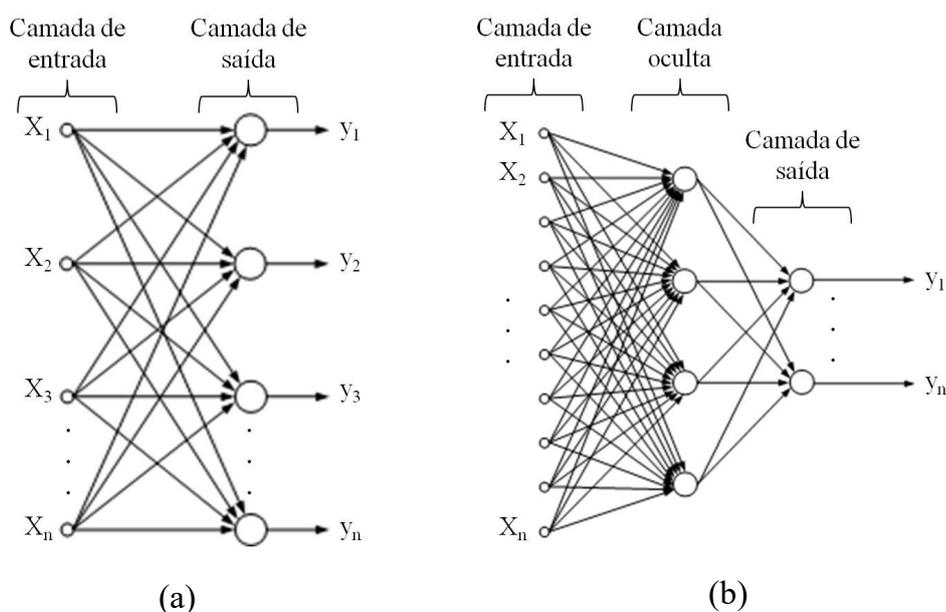
- **Camada de entrada:** é a camada que recebe os sinais vindos do ambiente para que sejam introduzidos dentro da rede. No caso de redes que utilizem uma realimentação, uma ou mais saídas da rede podem servir como sinal de entrada. Geralmente as entradas são normalizadas para facilitar as faixas de trabalho nas quais a função de ativação deve atuar.

- **Camada oculta ou intermediária:** é a camada composta de neurônios responsáveis por extrair e armazenar o conhecimento advindo do meio externo. Todo processamento do conhecimento da rede é geralmente feito nesta camada.

- **Camada de saída:** é a camada onde se obtém todo o sinal processado pela rede, e também é constituída de neurônios.

As RNA's podem ter diversos tipos de arquiteturas e topologias. Sua arquitetura define, por exemplo, se esta terá ou não o uso de realimentação, se será uma rede de camada simples ou múltipla, entre outros aspectos. No caso da topologia, ela define o tipo de função de ativação utilizada, o número de neurônios em cada camada, ou o número de camadas ocultas no caso de uma rede de camadas múltiplas.

Figura 3.7 – Redes Feedforward de a) Uma camada e b) Duas camadas.



Fonte: Oliveira (2016).

Uma das primeiras e mais simples arquitetura desenvolvida foi a RNA *feedforward*.

Nesse tipo de arquitetura, como o próprio nome sugere, as informações se movem apenas para frente, dos nós de entrada para a camada de saída e não vice-versa, ou seja, não há laços de realimentação. A Figura 3.7 mostra dois tipos de arquiteturas de RNA *feedforward*.

3.6 Aprendizagem de uma Rede Neural Artificial

A principal característica de uma RNA é a capacidade de aprender a partir de exemplos objetivando alcançar a saída desejada ou chegar ao mais próximo possível dela com erro mínimo. Para isso acontecer a RNA deve ser treinada através de um processo iterativo de ajustes aplicado aos pesos sinápticos para minimização da função de erro, com o ajuste dos pesos realizado de forma sequencial (Faria, 2014). Em geral, o processo de treinamento de uma RNA pode ser dividido em duas grandes classes: treinamento supervisionado (ou com professor) e treinamento não supervisionado (sem um professor).

No treinamento supervisionado são fornecidos padrões de entrada e saída desejada para a rede com o objetivo de fazer uma associação entre os valores de entrada e saída, resultando em um menor erro possível, buscando sempre um valor ideal com o erro tendendo a zero. O erro é calculado de acordo com a diferença do valor que se deseja obter na saída com o valor gerado pela rede, sendo que os pesos sinápticos são alterados de forma a ajustar os valores na saída da rede com os valores desejados.

Já no aprendizado não supervisionado, não há pares de entrada e saída desejada, sendo disponível a rede apenas padrões de entrada. Dessa forma, não existe um professor para monitorar os erros gerados. Esse treinamento é útil para aplicações onde não se tem disponível informações a respeito do ambiente, como por exemplo, os estágios iniciais dos sistemas de audição e visão do ser humano que ocorre pelo aprendizado sem professor.

3.7 Considerações Finais

Neste Capítulo foram apresentados alguns conceitos básicos referentes às redes neurais artificiais, destacando suas principais vantagens, assim como fundamentos de treinamento da RNA, tipos de arquitetura mais utilizadas e tipos de função de ativação. O Capítulo seguinte descreve o algoritmo proposto para detecção e correção dos sinais distorcidos pela saturação dos TCs.

4 ALGORITMO PROPOSTO PARA DETECÇÃO E CORREÇÃO DOS SINAIS DISTORCIDOS POR SATURAÇÃO

4.1 Considerações Iniciais

Como visto anteriormente, a saturação de TCs pode ocasionar uma indevida operação do relé, já que a corrente eficaz vista por este pode ser menor que a corrente real entregue. Assim, cada vez mais novas metodologias vêm surgindo para correção da forma de onda saturada, utilizando ferramentas matemáticas e computacionais, ou inteligência artificial, tornando o sistema de proteção cada vez mais confiável e seguro.

Uma das técnicas de reconstrução de sinais distorcidos já estudada na literatura é a estimação através de redes neurais artificiais. Para desenvolvimento do algoritmo proposto nesta dissertação, foi utilizada a técnica de reconstrução por RNA, já que apresenta bons resultados para sistemas não lineares. Contudo, para o bom funcionamento desse método de correção, é preciso um método de detecção adequado, que detecte com precisão os intervalos distorcidos pela saturação. Uma dessas técnicas é o método da terceira função-diferença proposta por Kang *et al.* (2004).

O presente Capítulo descreve a metodologia proposta para a detecção e correção da corrente do enrolamento secundário sobre influência do fenômeno da saturação.

4.2 Proposta para Detecção dos Intervalos de Saturação

No caso de regiões saturadas, a modelagem se torna mais complexa. Em Kang *et al.* (2004), foi observada a existência de uma mudança brusca de comportamento da corrente nos pontos onde a região de saturação se inicia e termina, propondo assim, o método da terceira função-diferença do sinal de corrente, o qual mostrou-se bastante eficiente no processo de detecção. Nesse contexto, o método proposto está baseado nessa lógica.

As três primeiras funções-diferença do valor instantâneo do sinal discretizado da corrente i_2 na amostra atual n são obtidas conforme (4.1), (4.2) e (4.3), respectivamente.

$$del_1(n) = i_2(n) - i_2(n - 1) \quad (4.1)$$

$$del_2(n) = del_1(n) - del_1(n - 1) \quad (4.2)$$

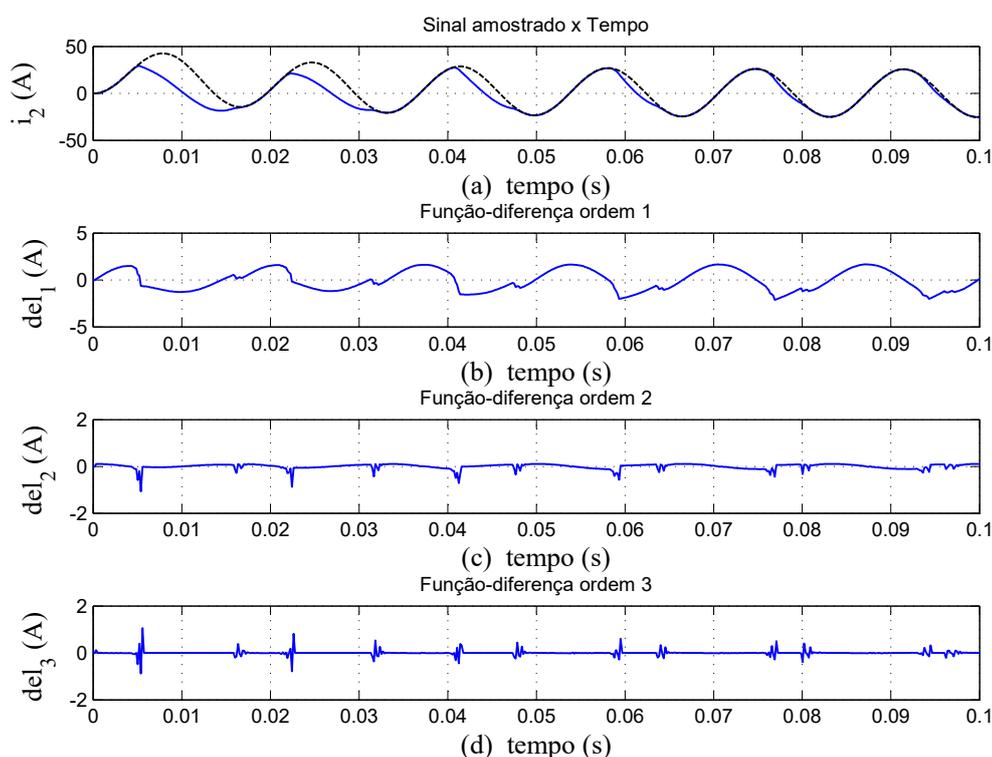
$$del_2(n) = i_2(n) - 2 \cdot i_2(n - 1) + i_2(n - 2)$$

$$del_3(n) = del_2(n) - del_2(n - 1) \quad (4.3)$$

$$del_3(n) = i_2(n) - 3 \cdot i_2(n - 1) + 3 \cdot i_2(n - 2) - i_2(n - 3)$$

Os sinais da função-diferença para as ordens 1, 2 e 3 podem ser visualizados na Figura 4.1 para um exemplo de sinal distorcido sob efeito da saturação, sendo, em momentos de descontinuidade do sinal, o detalhe de início e fim da saturação fica mais evidente com os surgimento de picos na terceira função-diferença.

Figura 4.1 – Função-diferença de um sinal de corrente distorcida por um TC saturado. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da primeira função-diferença del_1 . (c) Resultado da segunda função-diferença del_2 . (d) Resultado da terceira função-diferença del_3 .



Fonte: Autora.

De modo geral, são necessárias apenas quatro amostras de corrente, a atual e as três últimas amostras, o que faz com que esse método possua um esforço computacional extremamente baixo, o que representa uma grande vantagem se comparado a outros métodos presentes na literatura, conforme Schettino (2012).

Como podemos analisar na Figura 4.1, qualquer descontinuidade no sinal de corrente pode ser detectado pela terceira função-diferença. Logo, para o desenvolvimento da proposta de detecção de saturação foi realizada primeiramente uma estratégia de detecção de curto-circuito, já que a presença da saturação pode ocorrer somente após a existência de uma falta. Assim, utilizando a condição matemática para detecção estabelecida por Kang *et al.* (2004) conforme (4.4), baseou-se esta lógica de detecção de falta. Nesse sentido, quando o módulo de del_3 para a amostra atual for maior que seu valor limítrofe estabelecido pela expressão (4.5), baseada em (Kumar *et al.*, 2016), o sinal Detector Falta muda de zero para 1. Avisando, portanto, que houve uma falta no sistema, permanecendo o detector em estado lógico igual a 1 ao longo de toda a simulação.

$$|del_3(n)| > Th_{falta} \quad (4.4)$$

$$Th_{falta} = m_j + 4 \cdot \sigma_j \quad (4.5)$$

Onde m e σ representam, respectivamente, a média e o desvio padrão do sinal de corrente secundária, para a j -ésima janela. Para este método, a taxa de amostragem adotada foi de 96 amostras por ciclo e o tamanho da janela para cálculo da média e do desvio padrão foi de 30 amostras, sendo definidos após vários testes realizados. A Figura 4.2 ilustra o funcionamento do detector de falta para uma simulação onde a falta ocorre no tempo de 0,01875 segundo.

Uma vez detectada a falta, um temporizador deve ser acionado. Desse modo, após transcorrido um período de 0,005 segundo é verificado se existe ou não saturação no sinal, no qual, o processo de detecção de saturação proposto foi desenvolvido com base também na terceira função-diferença.

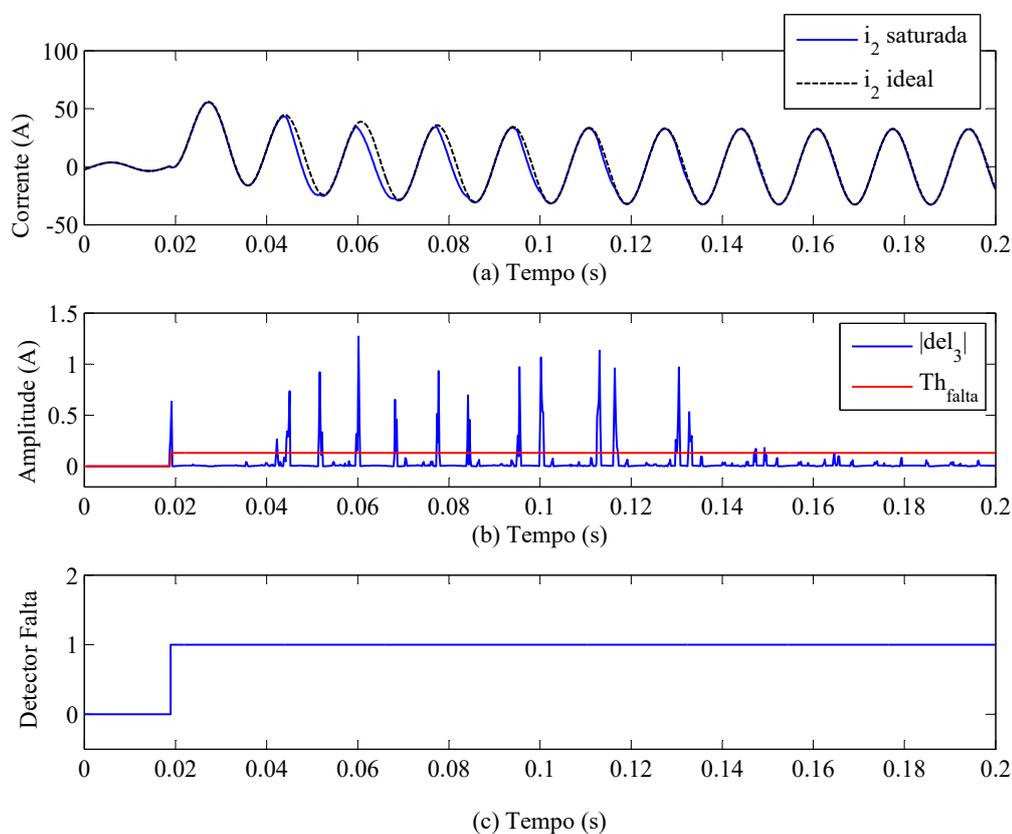
Para detectar tal fenômeno, utilizamos a mesma condição determinada por Kang *et al.* (2004), conforme (4.6). Quando essa condição é satisfeita, o sinal Detalhe permanece em estado lógico 1, caso contrário terá valor zero.

$$|del_3(n)| > Th \quad (4.6)$$

O valor limítrofe (Th) pode ser definido como o valor de ajuste que representa o maior valor de del_3 para o qual o TC é considerado livre de saturação. Para o cálculo de Th foi usada a mesma expressão matemática de (4.5).

No sinal Detalhe, a primeira amplitude do sinal com valor lógico igual a 1, representa o início do intervalo saturado e, a segunda amplitude igual a 1, representa o final do intervalo saturado, determinando assim o primeiro trecho saturado. No entanto, dependendo da saturação, os instantes de início e o fim dos trechos saturados podem ser muito próximos, o

Figura 4.2 – Detecção de falta através da função-diferença. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença $|del_3|$. (c) Sinal do Detector de falta.

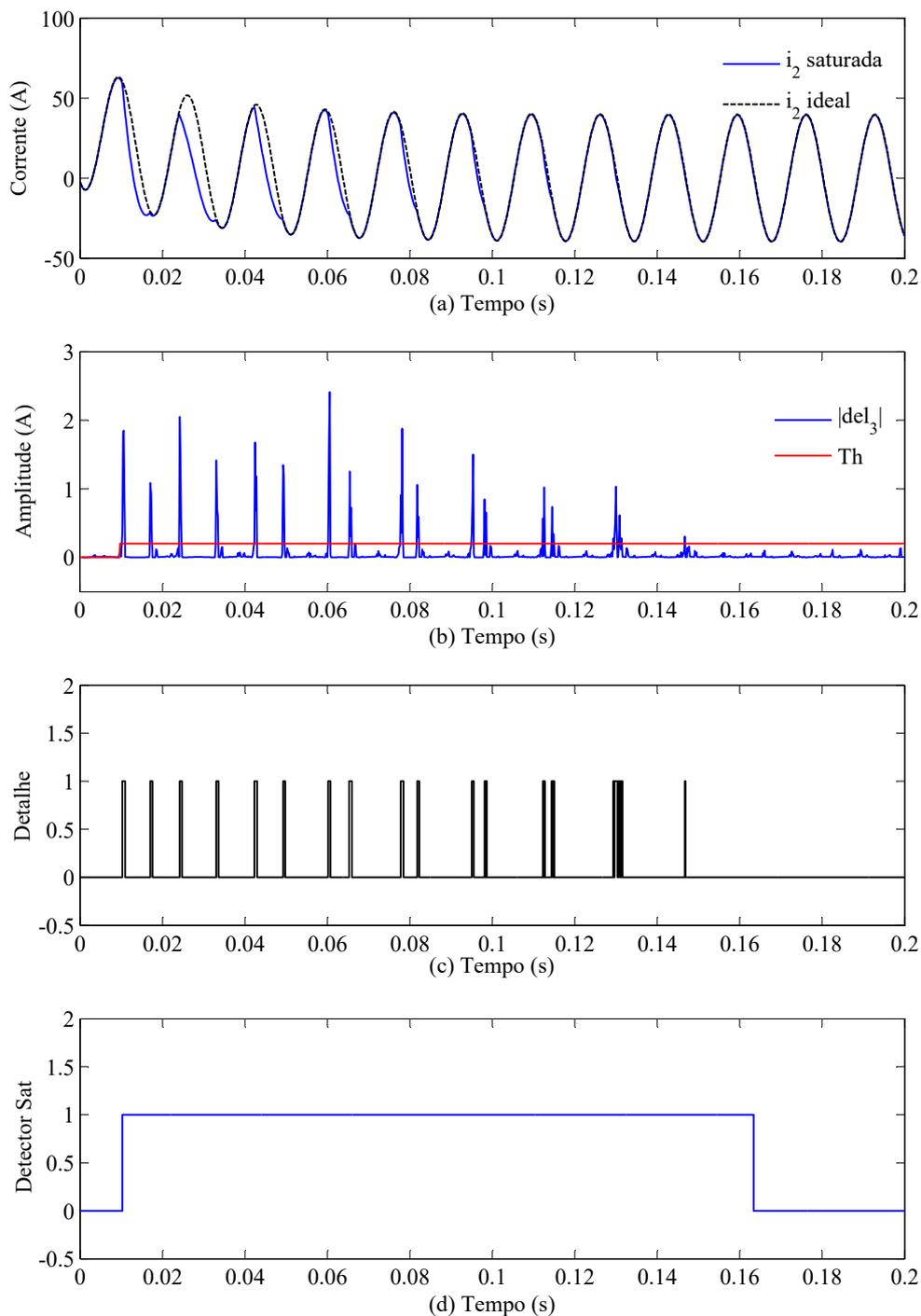


Fonte: Autora.

que pode causar erro na detecção. Para evitar esse problema, uma condição foi estabelecida. Enquanto a média do sinal Detalhe para uma janela de um ciclo for igual a zero, o sinal do Detector permanece em estado lógico igual a zero, caso contrário, o seu valor resultante será 1.

Nessa metodologia, o algoritmo de correção só deve iniciar assim que o valor do detector mudar o seu estado lógico de zero para 1 e deve parar quando o seu estado lógico mudar novamente, ou seja, o critério garante que enquanto houver intervalos de saturação na janela de um ciclo do sinal Detalhe, intervalo este escolhido para corrigir toda a região saturada e evitar erros no processo de detecção do início e fim da saturação, o detector permanecerá em 1, o qual representa as variações bruscas do sinal de corrente secundária. A Figura 4.3 ilustra o funcionamento dessa metodologia para uma falta gerada no início da simulação..

Figura 4.3 – Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença do sinal estudado. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença $|del_3|$. (c) Resultado do sinal Detalhe. (d) Sinal do Detector de saturação.



Fonte: Autora.

4.3 Correção dos Intervalos de Saturação

4.3.1 Correção dos Intervalos de Saturação por Mínimos Quadrados

Em geral, em regiões não saturadas, a corrente do secundário do TC possui uma componente CA e uma componente com decaimento exponencial. De conhecimento desse fato, no trabalho de Pan *et al.* (2004) foi proposto uma metodologia para correção dos efeitos da saturação fundamentada no Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), a qual consiste na determinação de parâmetros de uma determinada forma de onda, através da solução de sistemas de equações não-lineares.

Sendo assim, a Equação (4.7) deve ser satisfeita para qualquer ponto de um trecho não saturado da forma de onda da corrente de falta.

$$i(n) = A \cdot \cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot f}{f_{s\text{amp}}} + \varphi \right) + B \cdot e^{D \cdot n} \quad (4.7)$$

Onde, $f_{s\text{amp}}$ representa a frequência de amostragem e f é a frequência do sistema de potência. A , B , φ e D são parâmetros desconhecidos. A Equação (4.7) também pode ser reescrita pela expansão da parcela cossenoidal e pela aproximação até a primeira ordem da Série de Taylor para a função exponencial, conforme (4.9).

$$i(n) \cong (A \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \omega n + (-A \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \omega n + B + B \cdot D \cdot n \quad (4.8)$$

$$i(n) \cong C_1 \cdot \cos \omega n + C_2 \cdot \sin \omega n + \lambda n + B \quad (4.9)$$

Onde ω é a frequência angular e representa $2 \cdot \pi \cdot f / f_{s\text{amp}}$. Além disso, $C_1 = A \cdot \cos(\varphi)$, $C_2 = -A \cdot \sin(\varphi)$ e $\lambda = B \cdot D$. Para N amostras de corrente contidas em uma região não saturada, pode-se escrever matricialmente o conjunto de equações da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \cos \omega \cdot n & \sin \omega \cdot n & n & 1 \\ \cos \omega \cdot (n-1) & \sin \omega \cdot (n-1) & n-1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \omega \cdot (n-N) & \sin \omega \cdot (n-N) & n-N & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \lambda \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(n) \\ i(n-1) \\ \vdots \\ i(n-N) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$M P = I \Rightarrow P = (M^T M)^{-1} M^T I \quad (4.11)$$

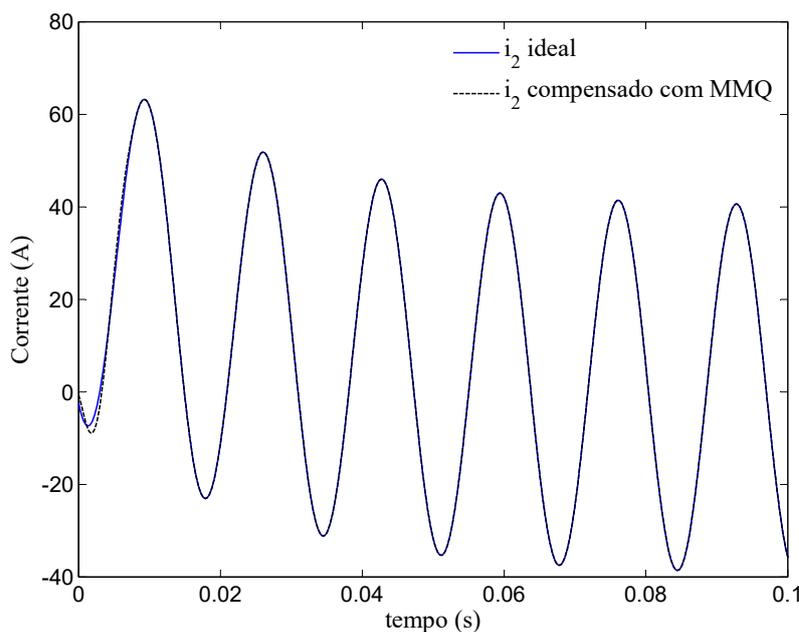
A Equação (4.10) pode ser expressa por (4.11), onde M representa a matriz de senos e cossenos, P o vetor com os parâmetros desconhecidos e I , o vetor com as amostras de corrente das respectivas regiões não distorcidas pela saturação. Os parâmetros C_1 , C_2 ,

λ e B podem ser obtidos através de (4.11), onde a parcela $(M^T M)^{-1} M^T$ representa a pseudo-inversa da matriz M e T representa o operador da matriz transposta.

Contudo, para estimação dos valores desconhecidos com MMQ é necessário um mínimo de quatro amostras e, após o cálculo desses parâmetros, as possíveis amostras de um trecho saturado podem ser substituídas por valores estimados de corrente a partir de (4.9).

Um exemplo do sinal corrigido com MMQ pode ser visto na Figura 4.4. Nesse exemplo a metodologia foi aplicada para um sinal sem distorção, o qual se refere ao sinal do primário do transformador dividido pela relação de transformação do mesmo. Nota-se assim que o método MMQ produz uma boa aproximação do valor ideal de corrente para casos sem saturação. No entanto, como pode-se notar na figura, no início de um curto-circuito, quando ocorre um aumento relevante da corrente, o método sempre apresenta um erro significativo no primeiro 1/8 de ciclo. Uma forma de diminuir esse erro é aumentando a taxa de amostragem e modificando o valor de N em (4.10).

Figura 4.4 – Correção com MMQ para um sinal sem saturação.

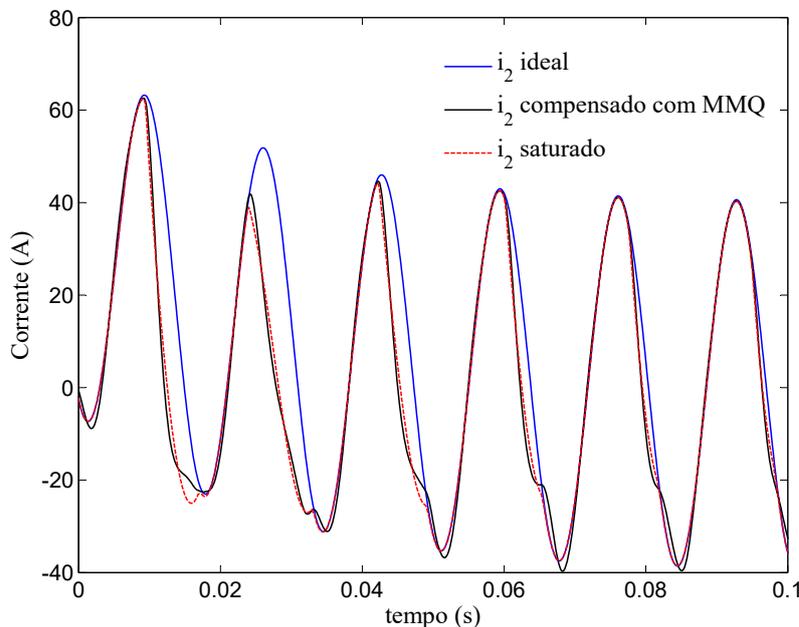


Fonte: Autora.

Apesar de ser um estimador de fácil implementação, segundo Schettino (2012), o uso deste método não apresenta bons resultados para casos de saturação severa, como pode ser visto na Figura 4.5, onde é mostrado um exemplo do sinal corrigido com MMQ aplicado a um sinal distorcido pela saturação. Com o intuito de solucionar esse problema para o caso de um TC saturado, propõe-se um algoritmo de correção da forma de onda

secundária a partir do MMQ com o uso das redes neurais artificiais. A metodologia adotada será descrita a seguir.

Figura 4.5 – Correção com MMQ para um sinal com saturação.



Fonte: Autora.

4.3.2 Proposta para Correção dos Intervalos Saturados com RNA

Para treinamento e validação da RNA, utilizou-se a ferramenta computacional *Neural Network Toolbox* do MATLAB, a qual é composta por modelos pré-definidos, visualização de dados e testes e também uma boa interface gráfica. A geração dos sinais para treinamento e validação da RNA foi realizado por meio de um sistema teste que será descrito no próximo Capítulo.

A estrutura da RNA foi definida como sendo do tipo *feedforward* com Múltiplas Camadas. Durante seu treinamento, foram testados dois algoritmos supervisionados, o algoritmo convencional *Backpropagation* e o algoritmo *Levenberg-Marquardt*. Enquanto o algoritmo *Backpropagation* levava mais tempo no treinamento e obteve maior erro, o algoritmo *Marquardt-Levenberg*, que é um algoritmo não linear de mínimos quadrados, apresentou uma maior velocidade de convergência e melhor desempenho. Por este motivo, para esta aplicação, este último foi escolhido na implementação da RNA.

O algoritmo de treinamento e operação da RNA foram elaborados conforme as instruções de Roselli (2007), onde o autor utilizou uma RNA com uma estrutura de apenas um sinal de saída (Y), que representava diretamente a corrente do primário. No entanto, a estrutura da RNA aqui escolhida foi implementada para se obter quatro elementos na

camada de saída, sendo estes os coeficientes calculados através do método MMQ por meio de (4.11), obtendo uma melhor representação na forma de onda de corrente.

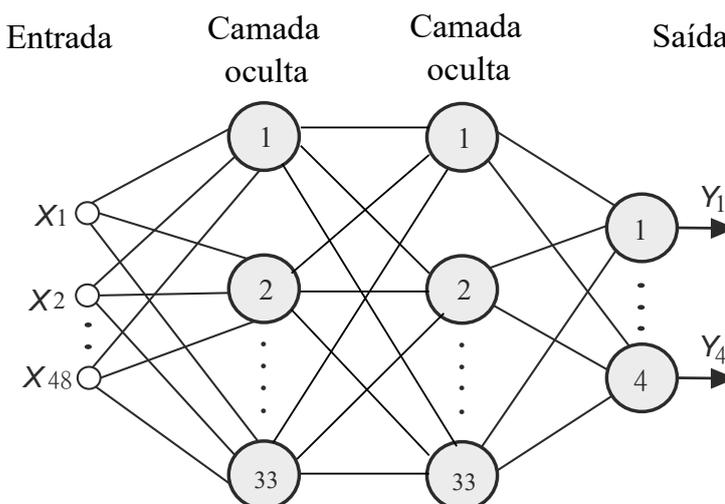
Para definição da melhor topologia da RNA, várias configurações foram testadas, considerando variações na taxa de amostragem, tamanho da janela de dados, número de camadas, número de neurônios por camada e tipo de função de ativação, sendo que a melhor topologia foi obtida para 96 amostras por ciclo.

O treinamento foi realizado apenas com os trechos saturados após o processo de detecção, ou seja, quando o detector estava em estado lógico 1. Um banco de dados foi então criado a partir de diversas situações para um sistema teste analisado. Durante o treinamento se verificou a necessidade de operação da RNA com uma entrada de amostras menor que um ciclo para minimizar o surgimento de falha pelo método MMQ no início da falta. Portanto, optou-se por utilizar uma entrada de meio ciclo, ou seja, 48 amostras de entrada (X), que representam o sinal de corrente do secundário, sendo uma relativa a amostra atual n e mais 47 amostras anteriores. No final do treinamento, os pesos sinápticos foram ajustados.

A arquitetura da RNA selecionada é apresentada na Figura 4.6 e descrita a seguir:

- Camada de entrada: 48 amostras;
- Duas camadas ocultas: 33 neurônios, função de ativação tangente hiperbólica;
- Camada de saída: 4 neurônios, função de ativação linear.

Figura 4.6 – Arquitetura da RNA com duas camadas ocultas.



Fonte: Autora.

A aplicação da RNA neste trabalho tem o objetivo de estimar os parâmetros C_1 , C_2 , λ e B do sinal secundário do TC sem interferência do fenômeno causado pela saturação

para condições de diferentes faltas no sistema, atuando assim como uma aproximadora de função do sinal de corrente ideal. Após estimados os parâmetros pela RNA, o sinal corrigido de corrente secundária é calculado por (4.9).

Portanto, para implementação deste método, adotou-se uma frequência de amostragem de 5760 Hz, o equivalente a uma taxa de amostragem igual a 96 amostras/ciclo. Como resultado para essa topologia foi obtido um Erro Quadrático Médio (EQM) de treinamento igual a $6,77 \times 10^{-4}$ para as especificações de treinamento definidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Especificações do treinamento.

Descrição	Valor
Número máximo de épocas	500
Erro desejado	1×10^{-9}
Taxa de aprendizado	0.01
<i>Momentum</i>	0.9

4.4 Considerações Finais

Neste Capítulo foi apresentada a descrição da técnica proposta para detecção e correção da onda distorcida no enrolamento secundário de TCs, tendo como base o uso de Redes Neurais Artificiais. Questões como a definição da melhor arquitetura da RNA para o sistema analisado e também escolha da taxa de amostragem foram abordados. O Capítulo seguinte apresenta o sistema teste implementado no *software* ATPDraw.

5 O SISTEMA ANALISADO

5.1 Considerações Iniciais

O programa ATP/EMTP é uma poderosa ferramenta usada para simulação de fenômenos transitórios eletromagnéticos no SEP. Nele os componentes do sistema elétrico podem ser modelados, sendo possível analisar o comportamento das formas de onda de tensão e corrente em diferentes nós do sistema.

No programa, a entrada de dados e a configuração dos parâmetros da simulação podem ser feitas por meio da utilização de uma ferramenta gráfica denominada *ATPDraw*, desenvolvida por Hans Kristian Hoidalén. Já para a plotagem de gráfico é comumente utilizado a ferramenta *PlotXY*. Este foi desenvolvido por Massimo Ceraolo e tornou-se uma ferramenta gráfica de uso extensivo, reconhecida pela interface gráfica amigável e de fácil utilização.

Sendo assim, neste Capítulo, é apresentado o sistema teste em estudo que foi implementado e simulado no programa *ATPDraw*. As características e variações dos parâmetros do sistema na qual são utilizadas nas simulações são aqui abordadas, descrevendo como foi gerado o banco de dados com os sinais de corrente processados pelo algoritmo proposto com RNA.

5.2 Especificações do TC saturável com histerese no ATPDraw

Em De Carvalho (2015), diversos modelos de TCs implementados no ATP/EMTP foram comparados por ensaios de curto-circuito no laboratório de altas correntes do CEPEL/RJ (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica), cujo o modelo no ATP foi validado. As especificações do TC com relação 2000/5 e tensão máxima de 245 kV obtidas em ensaio para uma carga de 50 VA por De Carvalho (2015) podem ser observados a seguir:

- Tensão máxima = 245 kV_{eficaz};
- Corrente de Curto-Circuito = 50 kA;
- Fator Térmico = 1.2;
- Relação de transformação = 2000-5A;
- Frequência = 60 Hz;
- Erro de relação = 2.5% ($i_1=1,0$ a $1,2i_{1nominal}$);

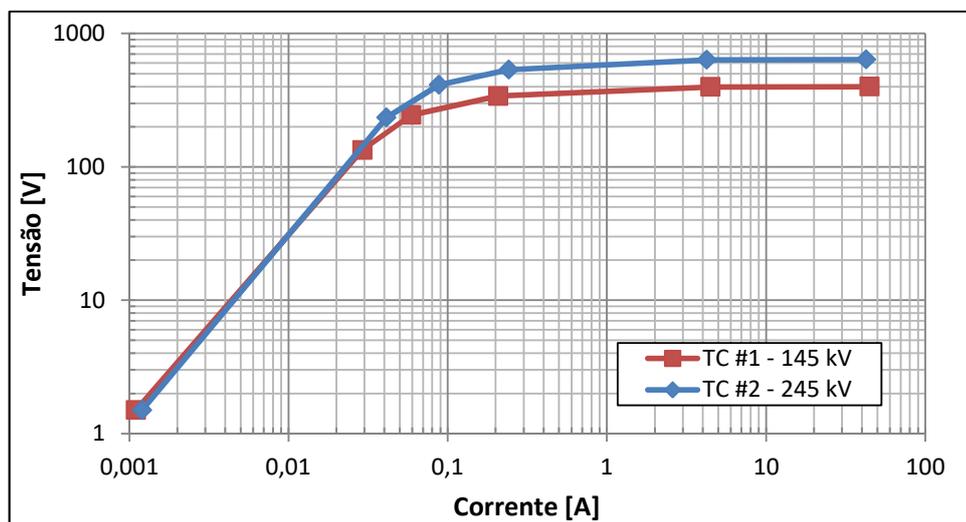
- Fator Limite de Exatidão = 25.

Segundo De Carvalho (2015), para casos de TCs com entreferro, tipos TPY e TPZ da norma IEC 61869-2 (2012), não é necessário a modelagem da histerese, pois o fluxo residual é naturalmente muito baixo podendo este ser desprezado no modelo. No entanto, para TCs sem entreferro (tipo TPX), por possuírem fluxo remanescente elevado, é importante considerar a histerese no modelo para estudo, já que a existência de um fluxo residual pode fazer com que o TC entre em estado de saturação caso ocorra um religamento do sistema após desmagnetização do transformador.

A maior dificuldade da modelagem do TC saturável com histerese no ATP/EMTP está relacionada a obtenção do maior laço de histerese, para entrada no indutor não-linear que representa o ramo de magnetização do TC. Essa modelagem se dá por meio do indutor *Type 96*, onde a entrada de dados é dada em termos do Fluxo Enlaçado e Corrente. Porém, os dados do TC fornecidos pelos fabricantes são normalmente dados pela curva Tensão x Corrente, devendo esta ser convertida para entrada de dados do indutor.

A curva de excitação V x I do TC com relação 2000/5 obtida em ensaio por De Carvalho (2015) pode ser vista na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Curva de excitação V x I do TC com relação 2000/5.

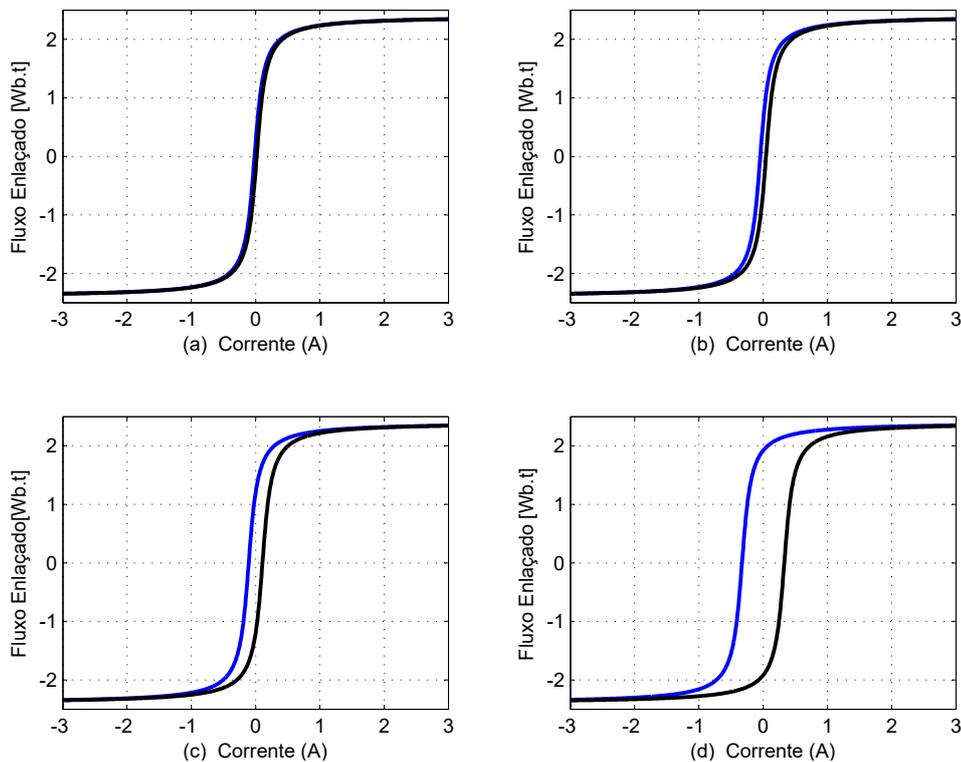


Fonte: Adaptado de (De Carvalho, 2015).

Considerando como base a curva de excitação da Figura 5.1 e através do Método Arco Tangente descrito por De Carvalho (2015), foi possível encontrar a histerese da curva de magnetização para o TC com tensão máxima de 245 KV (curva em azul), cuja o fluxo remanescente normalmente é elevado para esse tipo de TC sem entreferro. Assim, obtida

através do programa MATLAB, é mostrada na Figura 5.2 a curva de magnetização com histerese para o TC de 245 kV considerando quatro situações de fluxo remanescente, as quais foram utilizadas nessa dissertação.

Figura 5.2 – Curva de Magnetização com histerese para algumas situações do fluxo residual. (a) 10% do fluxo. (b) 25% do fluxo. (c) 50% do fluxo. (d) 80% do fluxo.

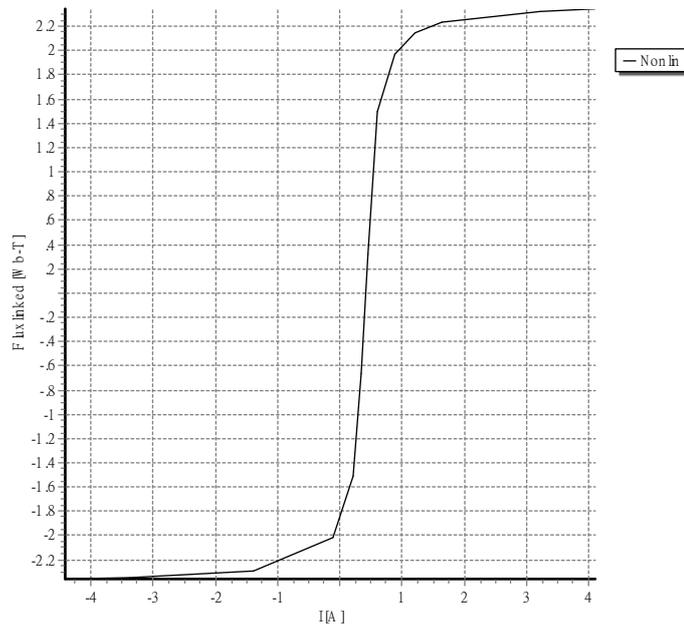


Fonte: Autora.

Para entrada do indutor *type 96* foram selecionados 10 pontos da curva de magnetização do laço inferior (curva em preto) da Figura 5.2. De acordo com De Carvalho (2015), essa quantidade de pontos é suficiente para representar adequadamente a região de saturação do TC sem ocasionar erro no modelo do ATP/EMTP de forma significativa.

A Figura 5.3 mostra o exemplo da curva de magnetização vista pelo ATP depois de inseridos os dados do indutor para o caso de 80% do fluxo remanescente.

Figura 5.3 – Características do indutor *Type 96* vista no ATP para 80% do fluxo residual.



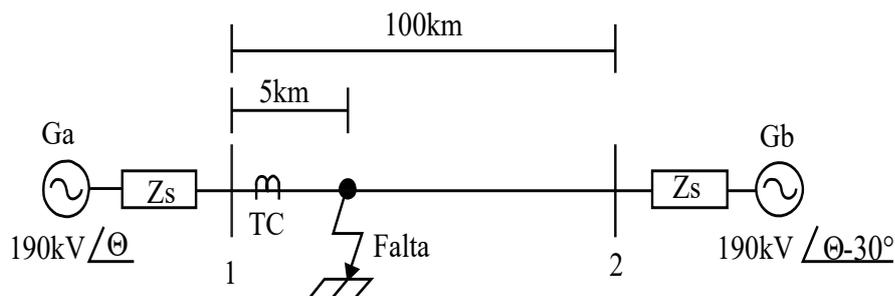
Fonte: Autora.

Para representação do transformador foi utilizado o modelo de transformador ideal monofásico, chamado no ATP de "*ideal 1 Phase*". A sua informação de entrada é dada pela relação de transformação, que para este caso é igual a 0.0025 ($5 \div 2000$). Além disso, a resistência e a indutância do secundário do TC são respectivamente $0,5 \Omega$ e $0,3 \text{ mH}$.

5.3 Sistema Elétrico Estudado

O sistema teste é semelhante ao utilizado na referência (Santos, 2011). Os sinais analisados foram obtidos por meio de simulações realizadas via ATPDraw, seguindo o modelo representado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Sistema teste analisado.



Fonte: Autora.

A Figura 5.4 representa o diagrama unifilar de um sistema trifásico com frequência nominal de 60 Hz. No circuito, Ga e Gb representam, respectivamente, os geradores das barras 1 e 2 os quais possuem a mesma impedância, sendo a de sequência zero igual a $3,681 + j24,515 \Omega$ e de sequência positiva e negativa iguais a $0,819 + j7,757 \Omega$. O valor eficaz de tensão nos geradores é de 190 kV e o ângulo de Gb está atrasado 30 graus em relação ao ângulo de Ga. O comprimento total da Linha de Transmissão (LT) é de 100 km e tem uma impedância de sequência zero igual a $0,1841 + j1,2258 \Omega/\text{km}$ e impedância de sequência positiva igual a $0,041 + j0,3878 \Omega/\text{km}$. A saturação do TC foi obtida através da simulação de curtos-circuitos localizados a 5 km da barra 1.

Como visto anteriormente, o modelo do transformador de corrente utilizado nas simulações possui relação de transformação de 2000:5. As simulações foram realizadas para 10% a 80% do fluxo remanescente com variação de 10%. Além disso, foram feitas simulações com uma carga puramente resistiva de 4Ω .

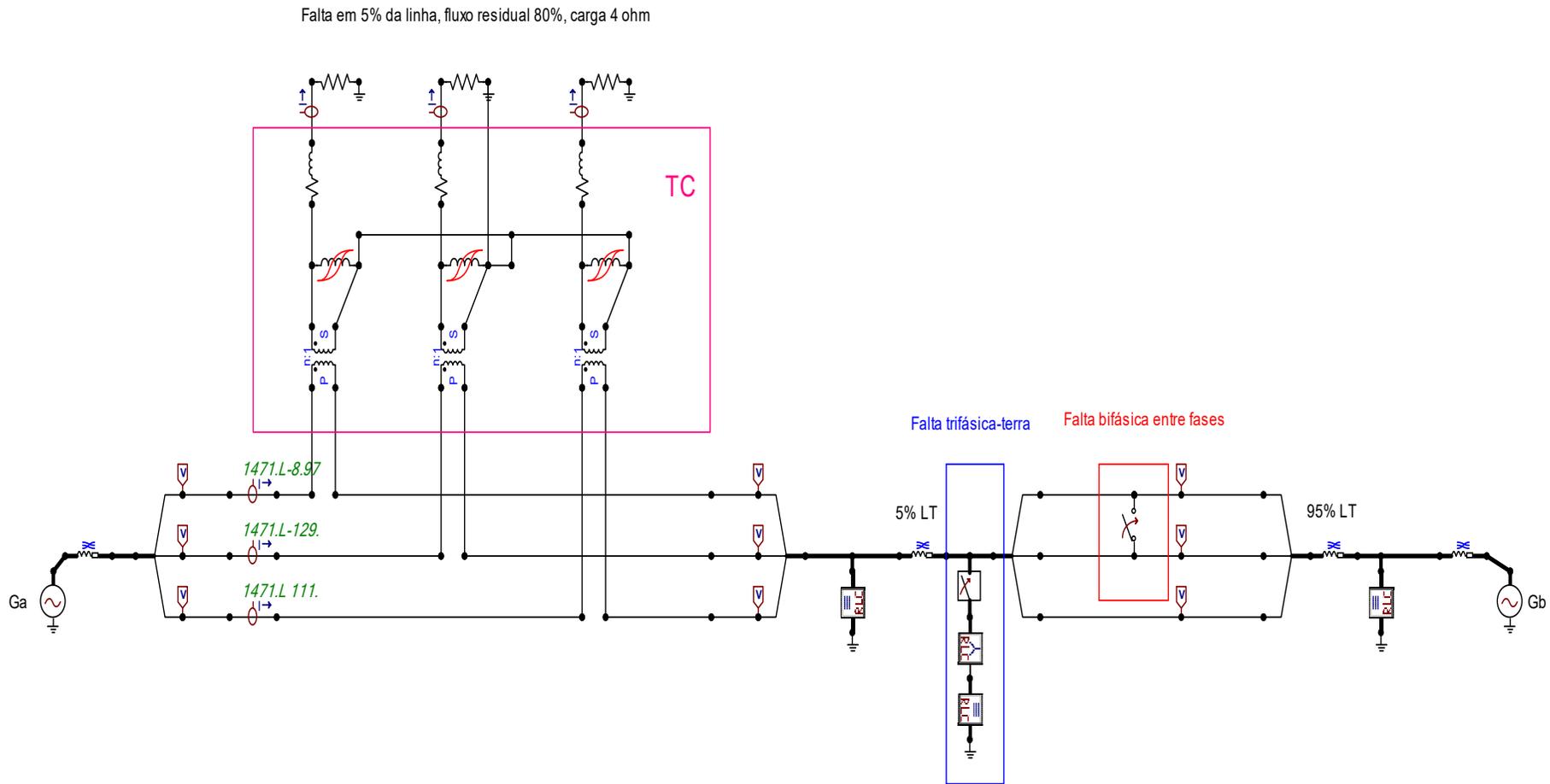
Ainda, diferentes tipos de curtos-circuitos foram simulados (monofásico, bifásico e trifásico), todos localizados em 5% da linha de transmissão. Logo, um total de 224 casos foram analisados. A Tabela 5.1 mostra a relação de todos os casos simulados e utilizados para treinamento da RNA.

Tabela 5.1 – Relação de Casos Simulados.

Parâmetros	Valores
Fluxo residual	10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%
Ângulo da falta	0° , 30° , 45° , 60° , 90° , 180° , 270°
Total de Faltas	4 tipos
Total de Casos	224

Logo, dada as especificações dos parâmetros para cada elemento do sistema trifásico, o circuito pode ser enfim implementado no programa *ATPDraw*, como mostra a Figura 5.5.

Figura 5.5 – Visão geral do sistema implementado no ATPDraw.



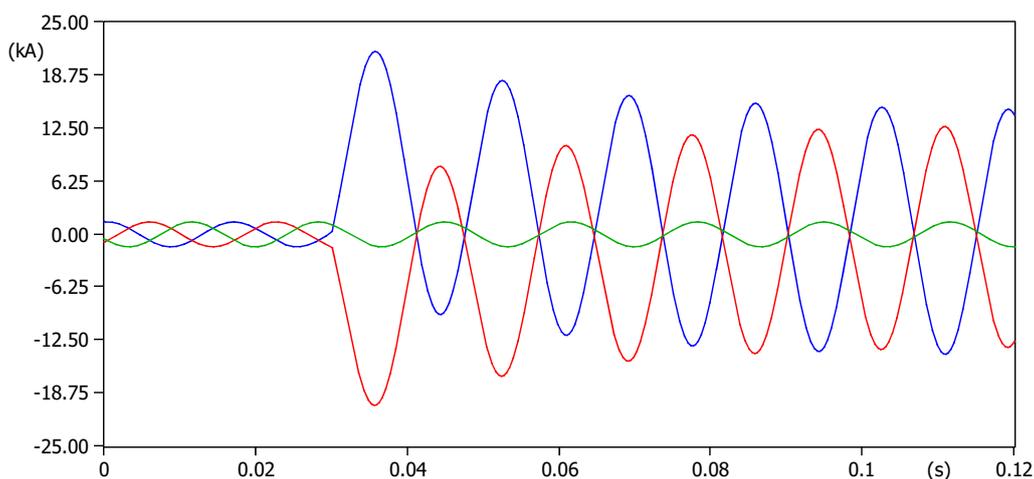
Fonte: Autora.

5.4 Exemplos de Sinais de Falta Simulados

Para ilustrar as situações de falta foram simulados dois tipos de curto-circuito, nos quais, os sinais gerados podem servir como base para compor o banco de dados no treinamento da RNA, sendo necessário para desenvolvimento da técnica de correção os sinais de corrente primária (ideal) e corrente secundária (distorcida) do TC.

O primeiro exemplo foi dado para uma falta bifásica que ocorre entre as fases A e B em 5% da LT no instante de tempo igual 0,03 segundo e, ainda, com as características do TC para 80% de fluxo magnético remanescente e uma carga *burden* de 4Ω . A Figura 5.6 mostra o resultado dos sinais de corrente referente as fases A, B e C do sistema obtidos via ATPDraw através da ferramenta *PlotXY* para a corrente no primário do TC. De mesmo modo, a Figura 5.7 mostra o sinal equivalente de corrente no secundário.

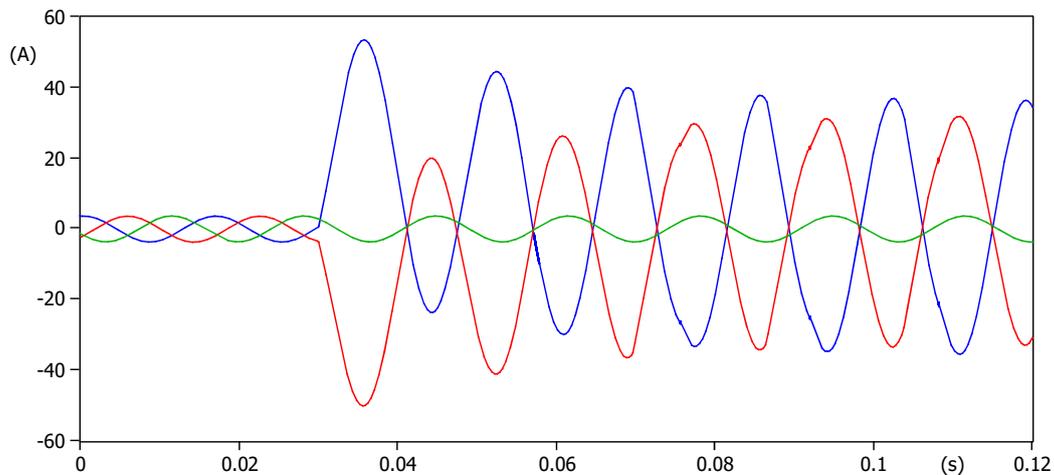
Figura 5.6 – Sinais de corrente no primário do TC para uma falta bifásica.



(file falta_4ohm_80fr_5km_245V.pl4; x-var t) c:X0001A-XX0013 c:X0001B-XX0015 c:X0001C-XX0014

Fonte: Autora.

Figura 5.7 – Sinais de corrente no secundário do TC para uma falta bifásica.

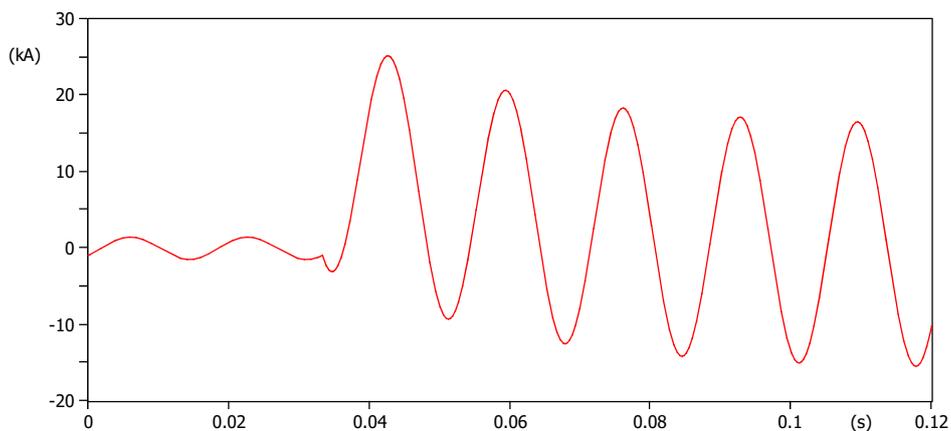


(file falta_4ohm_80fr_5km_245V.pl4; x-var t) c:XX0004-XX0007 c:XX0005-XX0008 c:XX0006-XX0009

Fonte: Autora.

O segundo exemplo trata-se de uma falta trifásica-terra ocorrida no instante de 0,0333 segundo com o TC saturado para 20% do fluxo residual e com uma carga igual a 10Ω . A Figura 5.8 mostra o resultado para esta simulação obtidos através do *software* ATPDraw para a corrente primária do TC na fase B. Na Figura 5.9, é apresentado o resultado da corrente secundária na fase B.

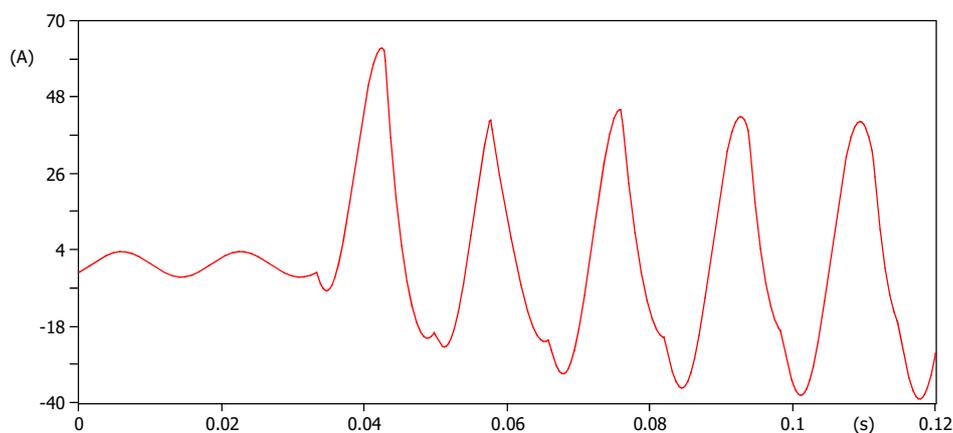
Figura 5.8 – Sinais de corrente no primário do TC para uma falta trifásica.



(file falta_10ohm_20fr_5km_245V.pl4; x-var t) c:X0001B-XX0017

Fonte: Autora.

Figura 5.9 – Sinais de corrente no secundário do TC para uma falta trifásica.



(file falta_10ohm_20fr_5km_245V.pl4; x-var t) c:XX0005-XX0008

Fonte: Autora.

Nota-se que, para o treinamento da RNA, os sinais de corrente do primário devem ser multiplicados por 0,0025, o que representa o sinal de corrente no secundário ideal (sem saturação), para o TC com relação 2000:5. Lembrando que todos os sinais de corrente utilizados para validação dos métodos serão exclusivamente referentes a fase B.

5.5 Considerações Finais

Neste Capítulo foram apresentadas as informações sobre o sistema trifásico em estudo, onde, foi implementado e simulado em ambiente ATP/EMTP, descrevendo os parâmetros utilizados para representação da linha de transmissão e demais elementos do sistema.

A taxa de discretização adotada no programa ATP/EMTP foi escolhida de acordo com as configurações da melhor RNA observada para o sistema em análise, ou seja, 96 amostras por ciclo (veja o Capítulo 4), o que gerou um intervalo entre uma amostra e outra de aproximadamente 174 (μs). Assim, com o resultado das simulações, foram obtidos os sinais de corrente primária do TC, necessários para o treinamento da RNA, e os sinais de corrente secundária da fase B, utilizada na operação e validação dos métodos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Considerações Iniciais

Vale ressaltar que o sinal do detector de saturação proposto informa todo o trecho saturado e um ciclo a mais do último instante que detecta o fim do intervalo saturado. Essa metodologia foi adotada, visto que, dependendo da saturação, os instantes de início e o fim dos intervalos saturados eram muito próximos, o que gerava erro no detector. Nota-se que essa metodologia não prejudica o método de correção desde que a RNA apresente bom desempenho, corrigindo apenas um ciclo a mais do trecho saturado total.

Além disso, a operação dos relés se baseia nos valores eficazes simétricos de tensão e corrente, promovendo o sinal de abertura dos disjuntores. Dentre as diversas técnicas de estimação fasorial, uma que se destaca por sua melhor capacidade de rejeição das componentes exponenciais existentes nas faltas e também pela capacidade de atenuação ou rejeição das componentes harmônicas é o filtro cosseno. Por essas vantagens mencionadas, o valor RMS estimado para todas as simulações analisadas foi calculado através do filtro cosseno.

Outro ponto a ser lembrado é que os primeiros picos de amplitude sinalizados nos gráficos do detector de saturação sempre mostram o ponto onde a falta ocorre, identificado corretamente pelo detector de falta através da terceira função-diferença, sendo que somente após uma falta a saturação pode ocorrer.

Para verificação do desempenho dos métodos propostos, foram simulados três cenários com diferentes características de saturação e um teste complementar para verificar o comportamento da RNA para uma possível queda de frequência no sistema. Os casos testados foram gerados a partir de mudanças no tipo de curto-circuito, alteração no fluxo residual, e variação no ângulo de falta. Ainda, uma forma de avaliar a eficiência do método de correção proposto, este foi comparado com o método MMQ. Os resultados para os casos testados serão mostrados neste Capítulo.

6.2 Resultados Obtidos

Para avaliação do desempenho do método proposto será utilizada a equação do erro transitório amostral conforme (6.1). Esse erro é calculado para cada instante de amostragem, como mostrado em Santos (2011).

$$erro(\%) = \frac{i_1 - RTC \cdot i_2'}{\sqrt{2} \cdot I_{1(RMS)}} \times 100\% \quad (6.1)$$

Onde i'_2 é a corrente secundária corrigida pelo método proposto, i_1 é a corrente primária do TC (corrente ideal) e $I_{1(RMS)}$ é o valor RMS da corrente primária referida ao secundário do TC. Lembrando que o valor RMS foi obtido através da decomposição fasorial do sinal de corrente por meio do filtro cosseno.

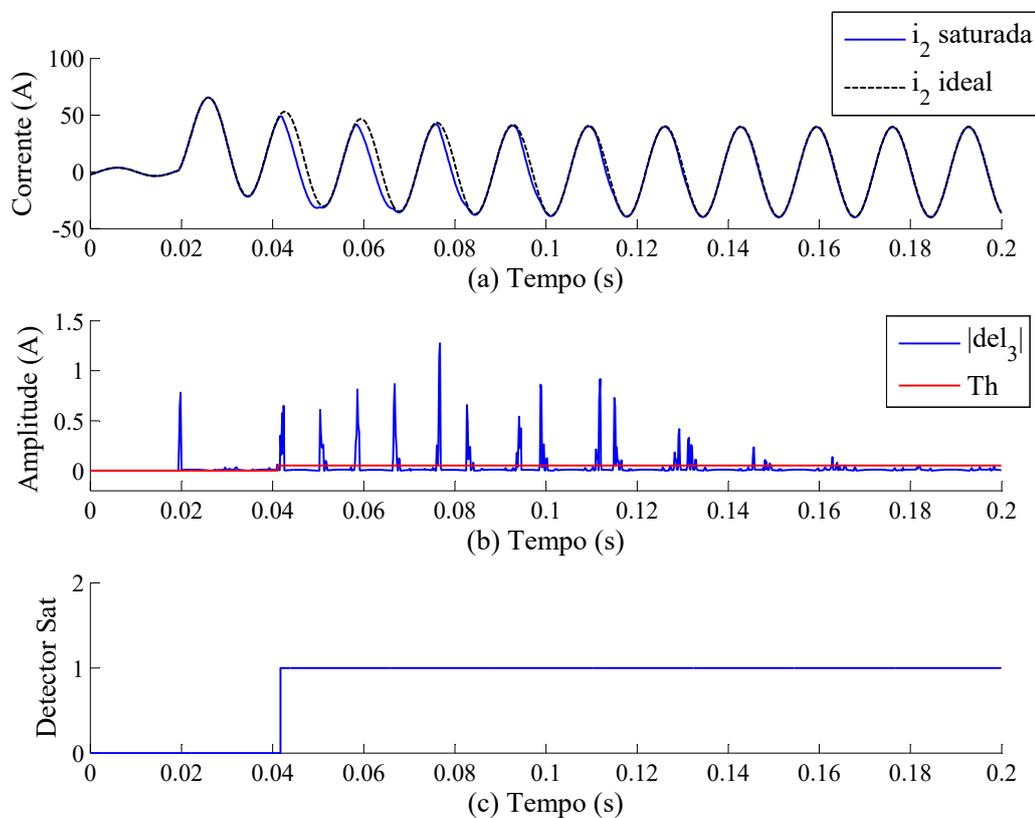
Para verificar o funcionamento dos métodos propostos de detecção e correção, foram simulados quatro casos utilizando o sistema teste descrito no Capítulo 5, caracterizando diferenças entre eles pelo tipo de falta, alteração no ângulo de falta, mudança na carga e fluxo remanescente do TC. A seguir os resultados para as simulações são apresentados de acordo com cada caso com uma taxa de amostragem de 96 amostras por ciclo.

6.2.1 Cenário 1: Falta trifásica-terra com 20% de fluxo remanescente, carga de 4Ω e ângulo de falta de 60°

Para o primeiro cenário foi simulado um curto-circuito trifásico-terra em 5% da LT que ocorre no de tempo 0,019444 segundo, representando um ângulo de falta de 60° . A carga conectada no secundário do TC apresenta valor de 4Ω e o fluxo residual é de 20%. Nota-se que a forma de onda começa a ser distorcida a partir do segundo ciclo do sinal após a ocorrência da falta e os efeitos da saturação são relevantes até o final da simulação.

A Figura 6.1 mostra a atuação do método de detecção para o primeiro caso analisado, onde é possível observar os instantes de início e fim dos intervalos de saturação através da terceira função-diferença. Além disso, é possível verificar que o Detector atuou de forma adequada identificando todo o trecho saturado.

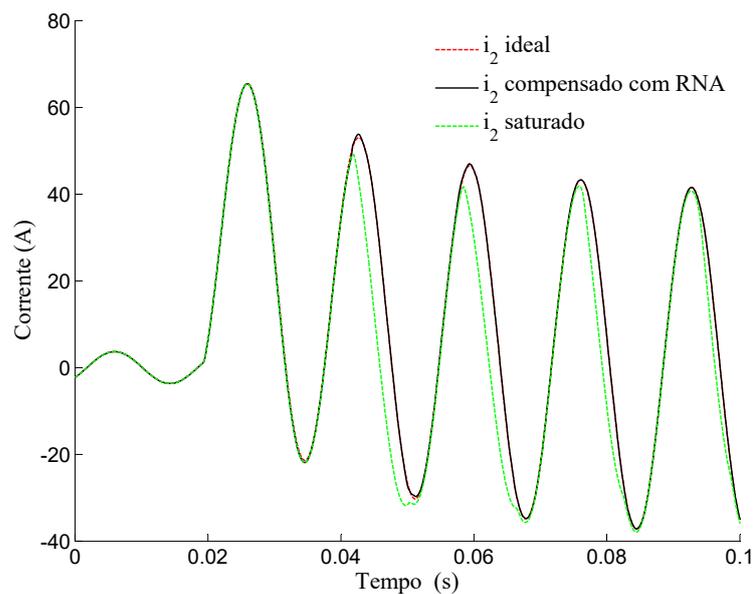
Figura 6.1 – Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença para o cenário 1. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença $del3$. (c) Sinal do detector de saturação proposto.



Fonte: Autora.

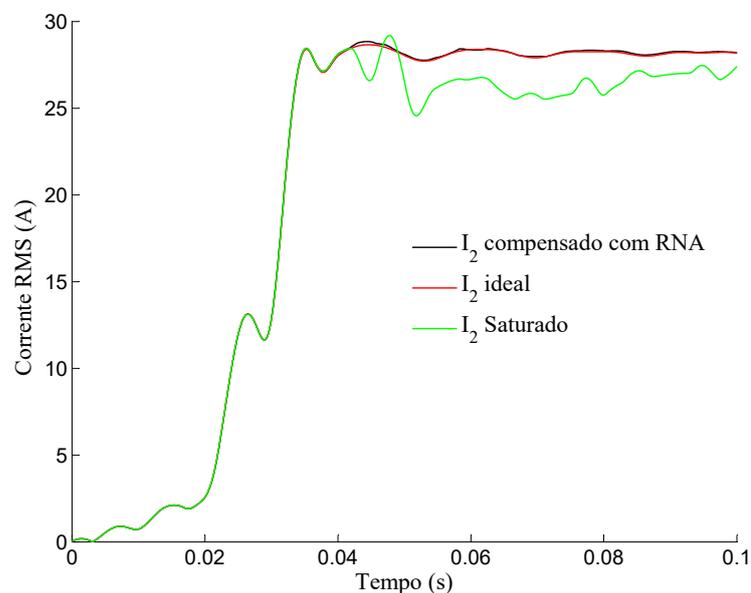
O resultado da correção do sinal de corrente secundária através do método proposto pode ser observado na Figura 6.2 para o trecho que o detector se encontra em estado lógico com valor 1, em 0,04176 segundo até 0,1 segundo. Além disso, são mostrados os valores de corrente ideal (corrente primária dividida pela RTC) e corrente secundária (distorcida pela saturação). Já o valor RMS da corrente a partir do filtro cosseno para a metodologia proposta é mostrado na Figura 6.3, onde é possível verificar a boa aproximação do sinal corrigido da corrente secundária com o valor ideal de corrente.

Figura 6.2 – Correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida para o cenário 1.



Fonte: Autora.

Figura 6.3 – Valores RMS das correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida com o método proposto para o cenário 1.

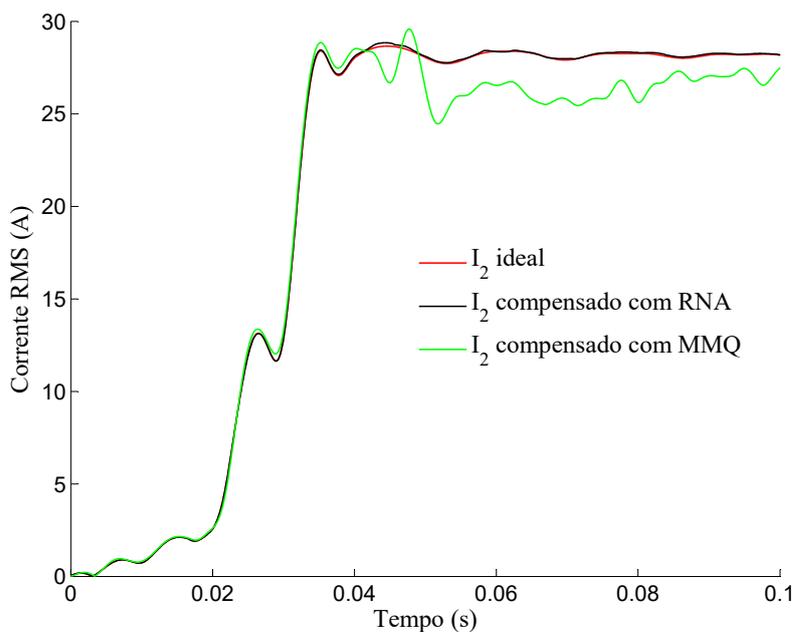


Fonte: Autora.

Para verificar a eficiência do método proposto, comparou-se o método de correção MMQ, proposto por Pan *et al.* (2004), com o método MMQ utilizando RNA. Os resultados da corrente RMS ideal, da corrente secundária corrigida com o método proposto e da

corrente corrigida com MMQ podem ser vistas na Figura 6.4. Os resultados para esse cenário mostram que o método MMQ não apresentou bom resultado, levando a um erro até mesmo maior que o sinal sem correção. Já o método proposto apresentou baixo erro, corrigindo todo o sinal saturado de forma satisfatória.

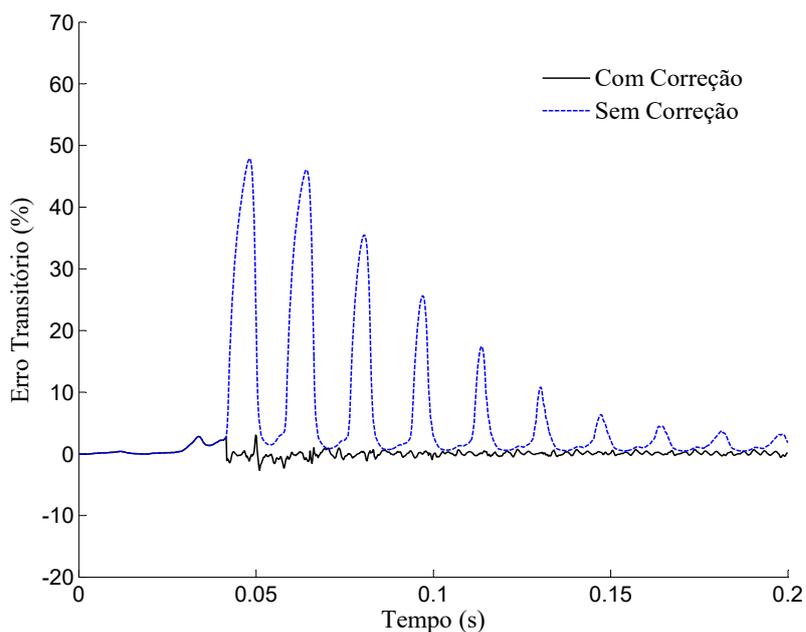
Figura 6.4 – Comparação entre os valores RMS das correntes secundárias corrigida com MMQ e corrigida com o método proposto para o cenário 1.



Fonte: Autora.

O valor do erro transitório máximo percentual para o método proposto neste cenário foi de 3,0083% e ocorre durante o primeiro intervalo distorcido do sinal de corrente. Isso pode ser visto na Figura 6.5 o qual é observado o erro para cada instante de tempo para o sinal de corrente sem correção e para o método proposto com RNA.

Figura 6.5 – Erro transitório percentual para o cenário 1.



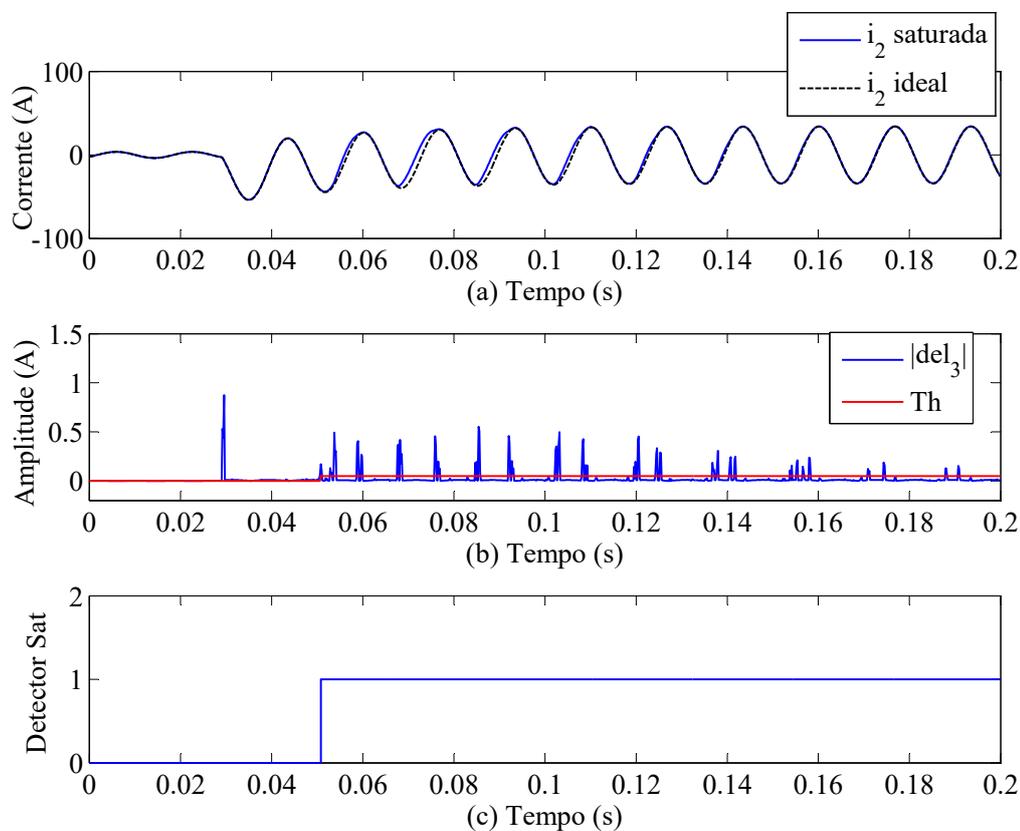
Fonte: Autora.

6.2.2 Cenário 2: Falta bifásica-terra com 70% de fluxo remanescente, carga de 4Ω e ângulo de falta de 270°

Para este segundo cenário, foi realizada a simulação de uma falta bifásica-terra que ocorre no instante de tempo igual a 0,02916 segundo. A carga do TC foi de 4Ω e o fluxo residual foi modificado para 70%. Nota-se que, a alteração do ângulo de falta para 270° fez a componente exponencial DC apresentasse uma curva crescente, iniciando com valores negativos mas também tendendo a zero até a corrente de falta alcançar seu valor simétrico permanente.

A resposta para o cenário 2 utilizando o método de detecção proposto através da terceira função-diferença é apresentado na Figura 6.6. O trecho que caracteriza o início da saturação foi identificado em 0,05081 segundo, sendo que o sinal do detector atuou adequadamente, compreendendo todo o trecho saturado.

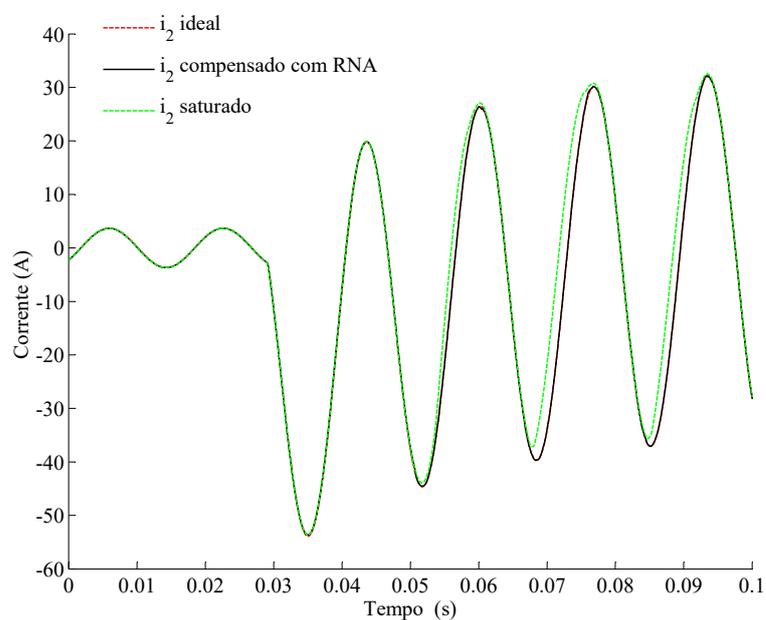
Figura 6.6 – Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença para o cenário 2. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença del_3 . (c) Sinal do Detector proposto.



Fonte: Autora.

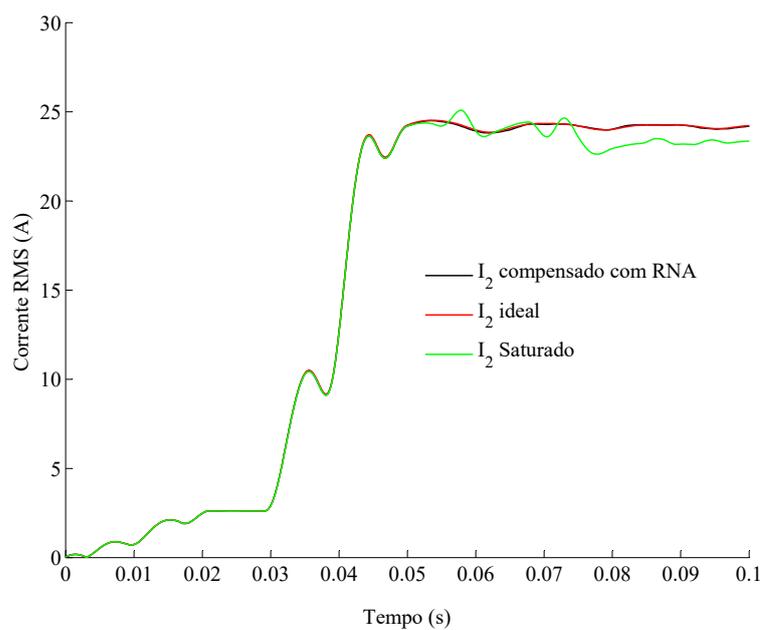
Na Figura 6.7, é mostrado o resultado da correção do sinal de corrente secundária através do método proposto para o cenário 2. Apesar de apresentar uma menor distorção, a saturação foi identificada pelo detector até o final da simulação em 0,2 segundo. Seu valor RMS pode ser comparado com sinal sem correção através Figura 6.8, onde é possível verificar que o sinal corrigido se aproxima bastante do seu sinal ideal.

Figura 6.7 – Correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida para o cenário 2.



Fonte: Autora.

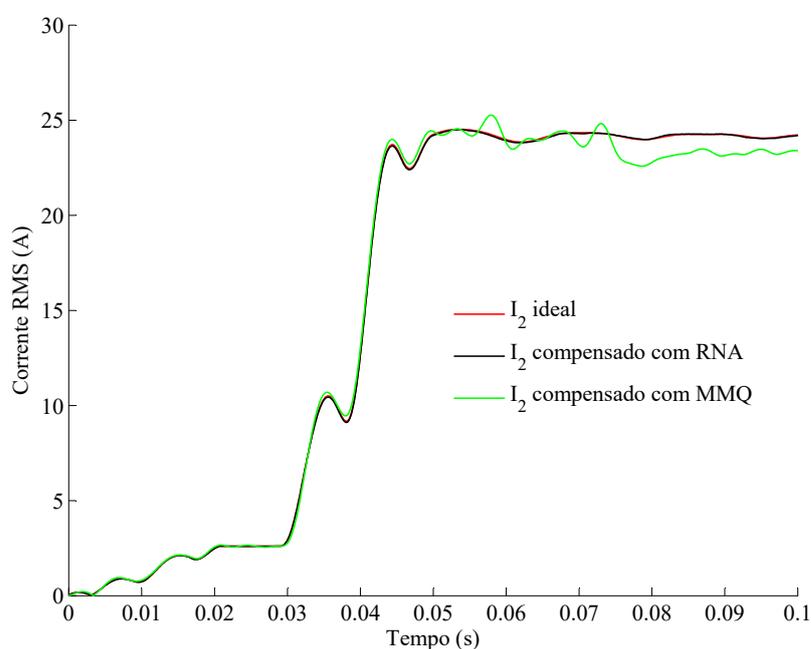
Figura 6.8 – Valores RMS das correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida com o método proposto para o cenário 2



Fonte: Autora.

Fazendo uma comparação entre os métodos MMQ e o proposto com RNA, verificou-se que o método MMQ não apresentou bons resultados, com erro máximo ainda maior do que seu valor sem correção, no entanto, o método MMQ com RNA melhorou bastante a correção mesmo em casos com a polaridade inicial negativa da componente exponencial. O resultado desta comparação através dos valores RMS dos sinais de corrente secundária pode ser visto na Figura 6.9.

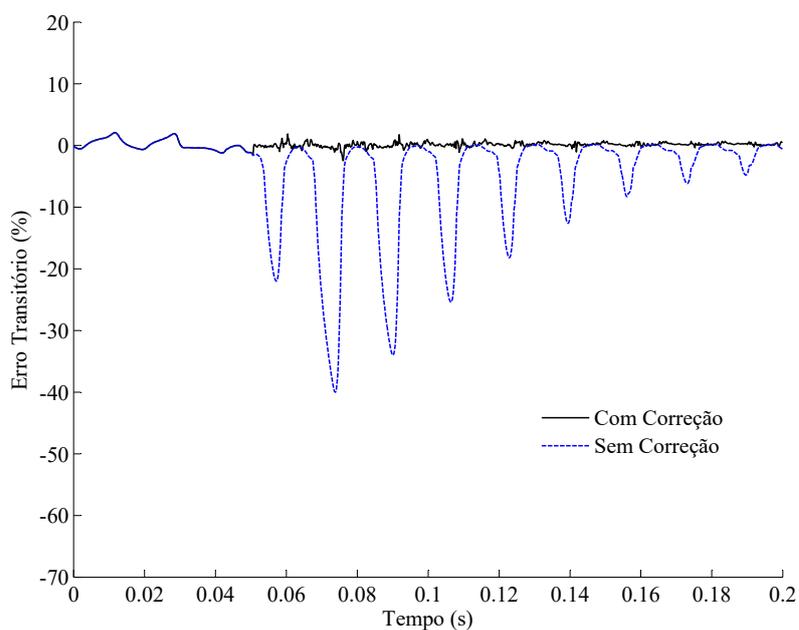
Figura 6.9 – Comparação entre os valores RMS das correntes secundárias corrigida com MMQ e corrigida com o método proposto para o cenário 2.



Fonte: Autora.

O valor do erro transitório máximo percentual para o método proposto neste cenário foi de 2,4662% e ocorreu no tempo igual a 0,07604 segundo. Esse resultado pode ser visto na Figura 6.10, onde é observado o erro para cada instante de tempo para o sinal de corrente sem correção e para o método proposto com RNA.

Figura 6.10 – Erro transitório percentual para o cenário 2.

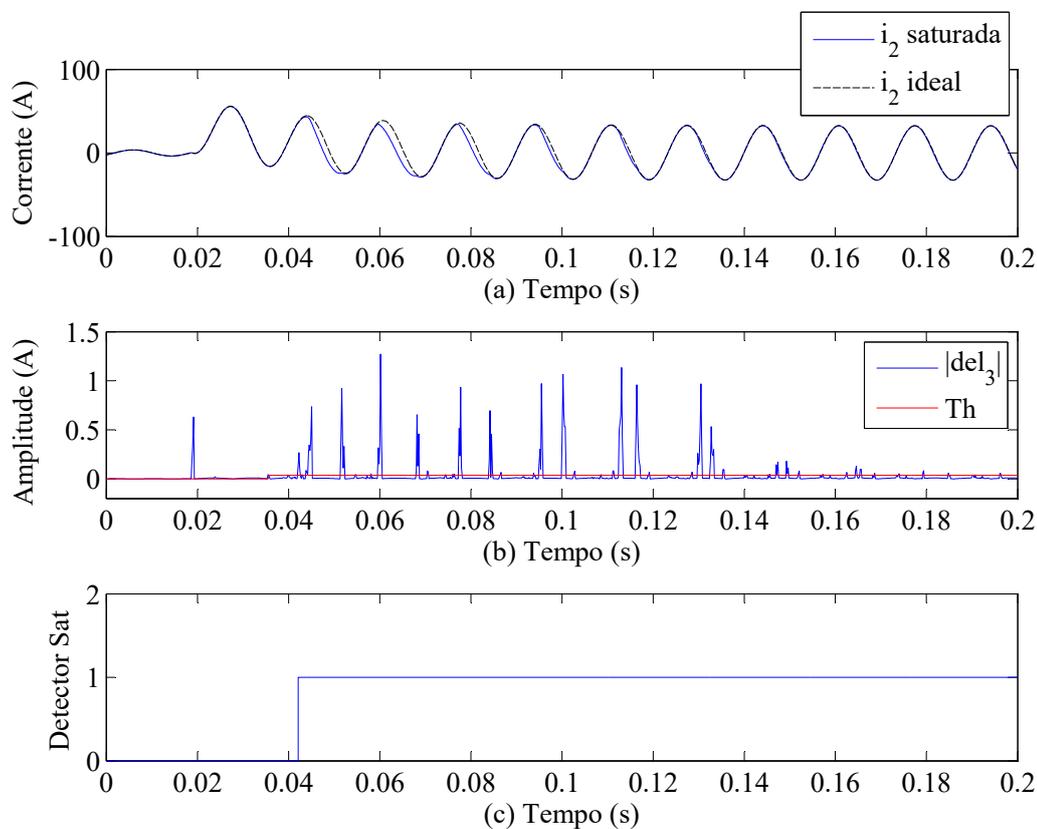


Fonte: Autora.

6.2.3 Cenário 3: Falta bifásica com 80% de fluxo remanescente, carga de 4Ω e ângulo de falta de 45°

Para o terceiro cenário foi realizada a simulação de uma falta bifásica entre as fases A e B que ocorre no tempo de 0,01875 segundo, representando um ângulo de falta de 45° na fase B. A carga do TC foi de 4Ω e o fluxo residual foi aumentado para 80%. A Figura 6.11 mostra a resposta dessa simulação, perdurando o detector de saturação acionado desde 0,04211 segundo até 0,2 segundo, atuando adequadamente em todo trecho saturado.

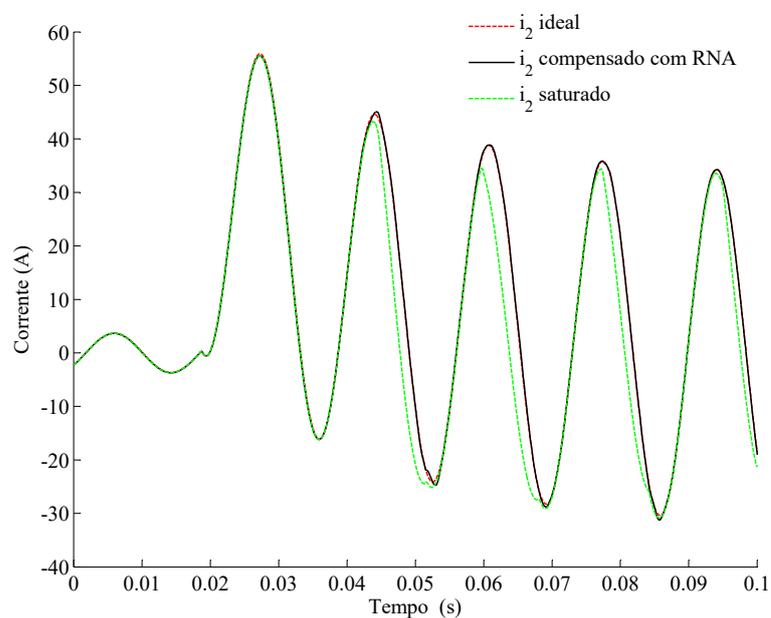
Figura 6.11 – Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença para o cenário 3. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Resultado da terceira função-diferença del_3 . (c) Sinal do detector de saturação proposto.



Fonte: Autora.

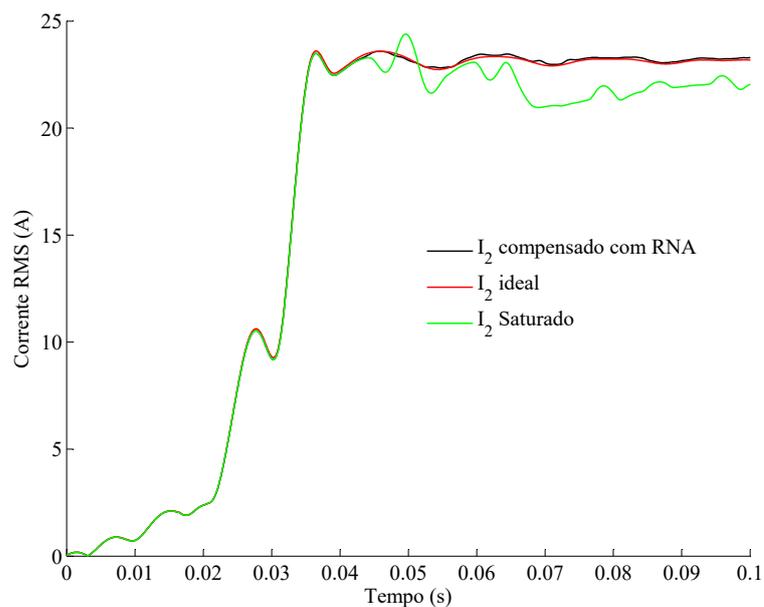
No cenário 3, o resultado da correção do sinal de corrente secundária através do método proposto pode ser observado na Figura 6.12 quando o detector se encontra em estado lógico com valor 1. Já na Figura 6.13, é observado o valor RMS da corrente a partir do filtro cosseno, onde é possível notar uma eficiente correção pela RNA com boa aproximação do sinal corrigido com seu valor ideal.

Figura 6.12 – Correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida para o cenário 3.



Fonte: Autora.

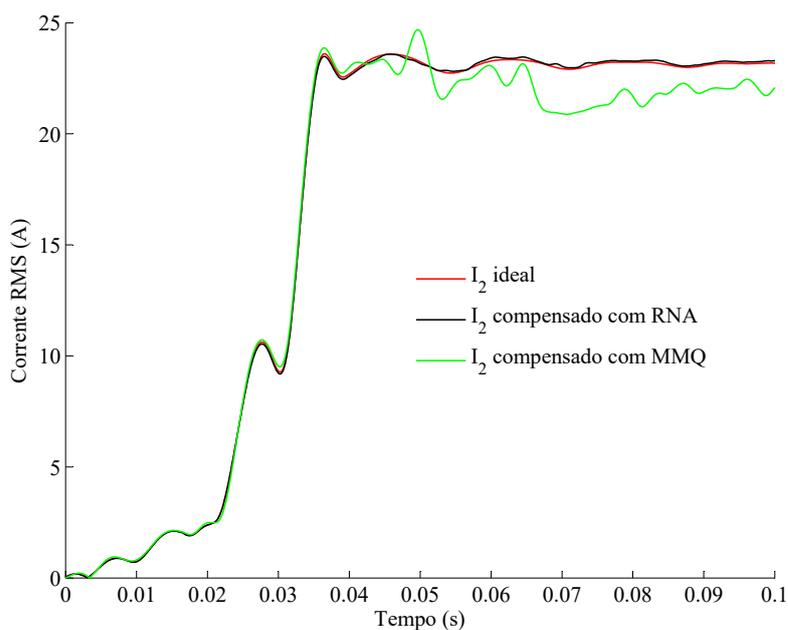
Figura 6.13 – Valores RMS das correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida com o método proposto para o cenário 3.



Fonte: Autora.

Uma comparação entre o método de correção proposto e o método MMQ foi realizada para o cenário 3 e pode ser vista na Figura 6.14. O resultado dessa simulação em valores RMS mostra que o método MMQ não obteve bom resultado, o que demonstra a superioridade do método MMQ com uso da RNA ao corrigir todo o trecho saturado de forma eficaz.

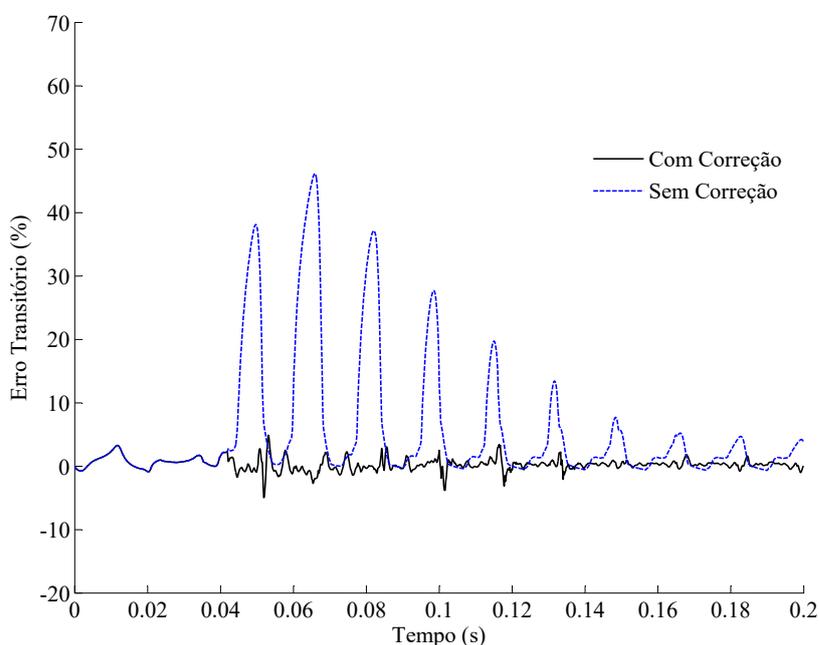
Figura 6.14 – Comparação entre os valores RMS das correntes secundárias corrigida com MMQ e corrigida com o método proposto para o cenário 3.



Fonte: Autora.

No cenário 3, o erro transitório máximo percentual para o método proposto foi de 4,9515% e foi atingido no primeiro ciclo distorcido do sinal, em 0,05185 segundo. A Figura 6.15 apresenta esse resultado, o qual é observado o erro para cada instante de tempo para o sinal de corrente sem correção e para o método proposto com RNA.

Figura 6.15 – Erro transitório percentual para o cenário 3.



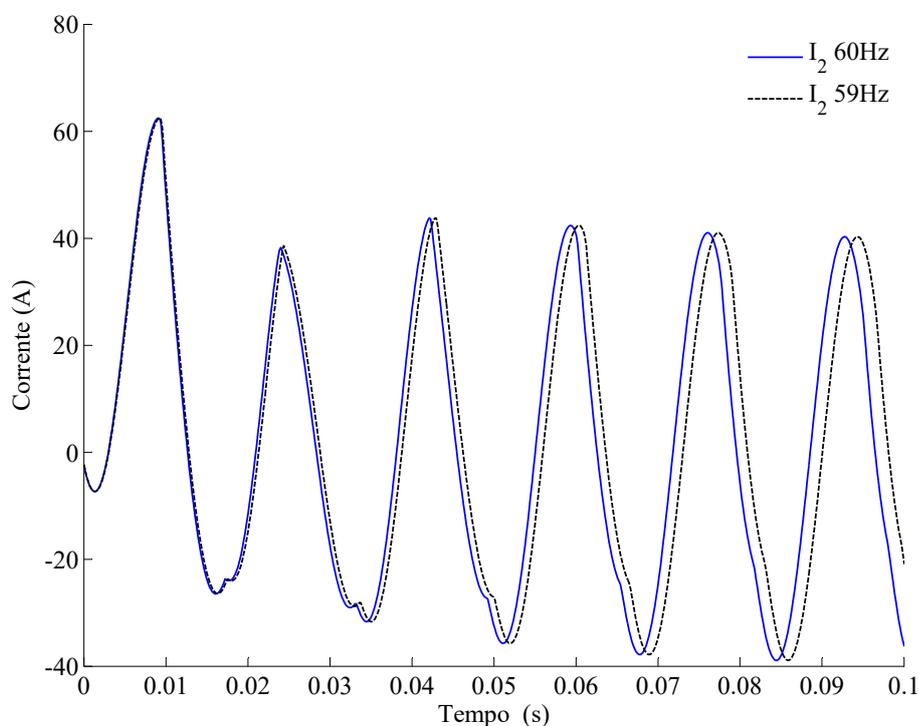
Fonte: Autora.

6.2.4 Teste Complementar I: Falta trifásica-terra com 50% de fluxo remanescente, carga de 10Ω , ângulo de falta de 0° e frequência de 59 Hz

Sabendo que o padrão de uma carga de TC para proteção não excede a resistência de 4Ω , porém querendo causar uma maior severidade na saturação, foi aumentado a carga do TC para 10Ω . Para este caso, será verificado apenas como a topologia da RNA se comporta com uma mudança na frequência do sistema, situação que afeta a qualidade de energia elétrica, assim o banco de dados gerado para treinamento da RNA foi formado apenas pelo Teste complementar I na frequência normal de operação de 60 Hz.

Para teste desse cenário, a frequência do sistema foi fixada em 59 Hz, operando o sistema abaixo do limite de frequência estabelecido adequado. A falta para este cenário ocorreu no tempo de zero segundo representando um ângulo de falta igual a 0° . A falta foi do tipo trifásica e o fluxo residual no TC foi de 50 %. Na Figura 6.16 é mostrado o resultado das simulações para o sistema operando com 59 Hz e 60 Hz, sendo portanto, corrente secundária de 60 Hz usada para treinamento da RNA e I_2 em 59 Hz na validação e teste da RNA.

Figura 6.16 – Corrente secundária saturada em 60 Hz e 59 Hz para o Teste complementar.

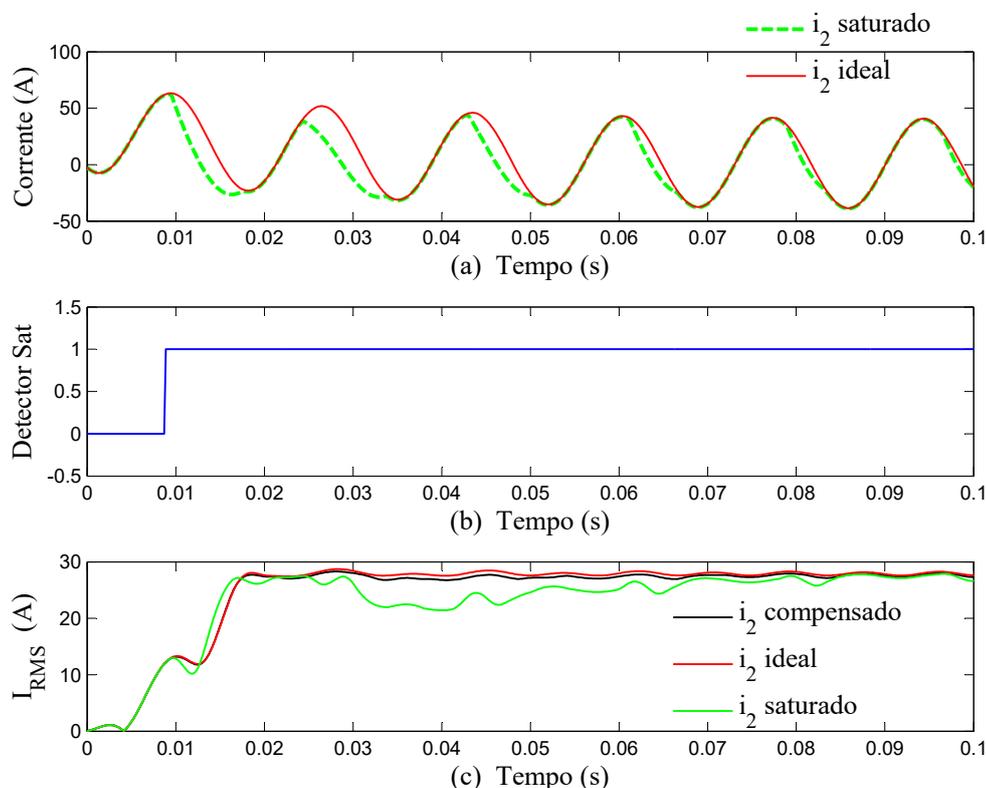


Fonte: Autora.

Apesar das simulações serem em frequências diferentes, nota-se que as formas de onda de corrente secundária apresentam características semelhantes de saturação, o que ajuda a RNA na busca dos quatro coeficientes para cálculo de I_2 corrigida, devendo assim apresentar melhores resultados caso a frequência seja mais próxima de 60 Hz e resultar em maiores erros para frequências mais distante do valor de frequência que a RNA foi treinada.

O Resultado do método de detecção da saturação (Detector Sat.) pode ser visualizado na Figura 6.17, onde mostra que o detector atuou devidamente identificando todo o trecho saturado, desde 0,008874 segundo até o final da simulação em 0,1 segundo. Além disso, nesse gráfico também é mostrado o resultado do valor RMS da corrente secundária produzida através do filtro cosseno, onde mostra uma expressiva aproximação da corrente ideal com a corrente corrigida pela RNA.

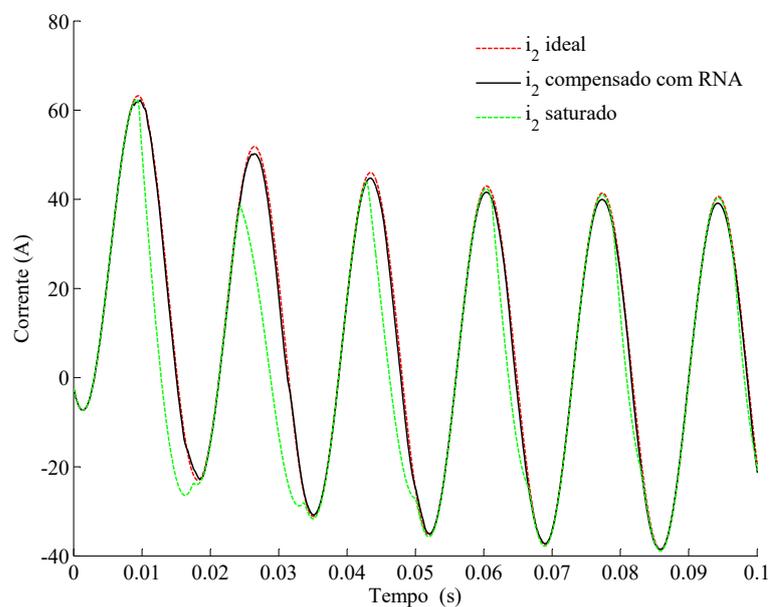
Figura 6.17 – Detecção do intervalo de saturação através da função-diferença para o Teste Complementar I. (a) Sinal de corrente secundária ideal e saturada. (b) Sinal do detector de saturação proposto. (c) Valores RMS das correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida.



Fonte: Autora.

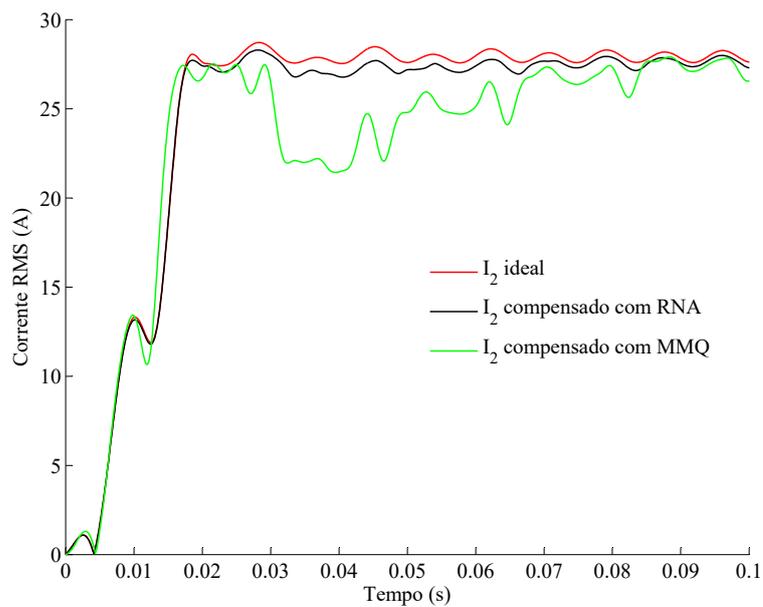
Na Figura 6.18 é mostrado o sinal de corrente secundária corrigida através do método proposto quando o detector de saturação é acionado. Uma comparação entre as correções do sinal de corrente com o método MMQ e o método MMQ utilizando RNA foi realizada e pode ser visualizada na Figura 6.19, mostrando as correntes em valor RMS através do filtro cosseno. Nesse resultado é possível observar que a correção com o método proposto foi muito superior a correção com MMQ, porém ficando sempre abaixo do valor RMS ideal, o que pode ocorrer quando o banco de dados usado no treinamento é muito pequeno, nesse caso de apenas uma amostra no treinamento, deixando a correção com baixo rendimento principalmente nos picos da forma de onda senoidal.

Figura 6.18 – Correntes secundárias ideal, distorcida e corrigida para o Teste complementar



Fonte: Autora.

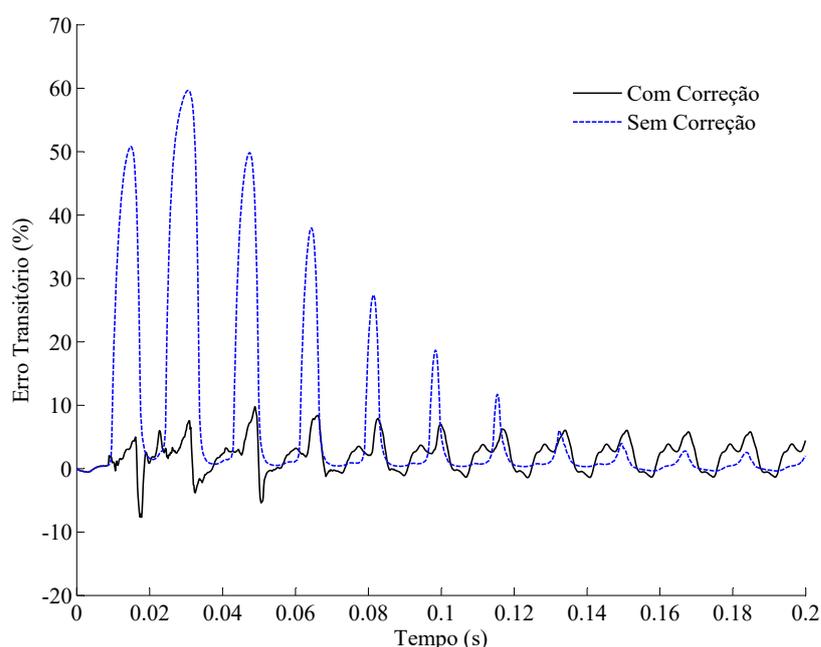
Figura 6.19 – Comparação entre os valores RMS das correntes secundárias corrigida com MMQ e corrigida com o método proposto para o Teste complementar I.



Fonte: Autora.

Os valores de erro transitório percentual podem ser analisados através da Figura 6.20, atingindo o erro máximo absoluto de 9,7579 % para a correção do sinal de corrente secundária através do método proposto. No entanto, apesar da saturação ocorrer até o final da simulação em 0,2 segundo, se for analisado o erro transitório máximo no trecho após 0,13 segundo, nota-se que o erro causado com a RNA é maior se comparado com o erro transitório máximo sem correção do sinal de corrente, porém atingindo este a 6,072 % nesse intervalo de tempo para operação do sistema em uma frequência de 59 Hz.

Figura 6.20 – Erro transitório percentual para o Teste complementar I.



Fonte: Autora.

Nesse caso é possível observar que a RNA pode obter bons resultados com treinamento de apenas um caso por vez, o que oportuniza o desenvolvimento de uma RNA baseada em aprendizagem on-line, favorecendo o aprendizado de novos padrões de forma rápida, já que o sistema elétrico está sujeito a inúmeras situações de distúrbios com diversas variáveis envolvidas.

Assim, a ampliação da base de dados com novos casos em uma maior faixa de atuação para se utilizar no treinamento supervisionado da RNA proposta resultaria em uma maior complexidade na estrutura da RNA, como um aumento no número de neurônios e no número de camadas, para manter uma resposta adequada na saída, o que conseqüentemente apresentaria um aumento no número de operações, levando mais tempo de processamento.

Por fim, os erros transitórios máximos que ocorrem durante o processo de correção

do sinal de corrente para os três cenários e para o Teste complementar I, aqui chamado de Teste I, são mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Erros Transitórios Máximos.

Casos	Erro (%)		
	Sinal Saturado	Corrigido com MMQ	Corrigido com RNA
Cenário 1	47,9850	68,5989	3,0083
Cenário 2	40,0103	68,2688	2,4662
Cenário 3	46,1406	89,5616	4,9515
Teste I	59,6476	61,0292	9,7579

6.3 Considerações Finais

Uma observação importante é que o desempenho dos métodos de correção torna-se extremamente dependente da precisão do sinal do detector o qual foi associado. Contudo, os resultados do método de detecção proposto mostraram-se bastante satisfatórios para o teste complementar e os três cenários analisados, sendo bastante preciso na detecção da primeira amostra saturada, podendo ser mantido em estado lógico igual a 1 até o final da simulação, mesmo sem um significativo nível de saturação, pois o método de correção é bastante eficaz na correção do sinal secundário do TC, assim, podendo ser mantido o detector acionado até a atuação do relé.

Além disso, foi verificado que o erro máximo encontrado para o método MMQ foi extremamente elevado. Quanto ao método proposto, este apresentou baixo erro, sendo capaz de reconstruir a forma de onda da corrente secundária, mesmo com as mudanças nos parâmetros do sistema de proteção, corrigindo até as distorções mais elevadas.

O Capítulo seguinte apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões

Neste trabalho, foi apresentado um método utilizando RNA capaz de corrigir a forma de onda distorcida proveniente de TCs saturados. Para análise do método, um sistema teste foi implementado em ambiente ATPDraw, onde foram gerados um total de 224 casos usados para o treinamento da RNA. Na verificação da melhor estrutura da RNA para tal sistema, foram estudadas diferentes topologias com o objetivo de se obter um menor erro no treinamento.

Ainda, verificou-se que para uma boa implementação do método de correção com RNA, alguns aspectos precisaram ser respeitados, como a escolha de uma janela de dados de tamanho menor que um ciclo para reduzir a discordância dos sinais que existe no início da falta gerado pelo método MMQ. Outro ponto foi a taxa de amostragem, que não deve ser muito pequena principalmente para detecção e correção de uma elevada saturação.

Por fim, nos casos analisados, verificou-se que essa combinação dos métodos de detecção e correção da saturação de TCs baseado em RNA foram capazes de detectar e reconstruir os sinais distorcidos com boa precisão, o que melhorará a proteção de sistemas.

7.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Em continuação do trabalho aqui desenvolvido, são sugeridos os seguintes temas para futuros trabalhos:

- Estudo dos métodos para situações com alto nível de ruído e conteúdo harmônico;
- Testar os métodos incluindo outras variáveis como mudanças na carga e na localização da falta;
- Comparação dos algoritmos com outras metodologias existentes;
- Avaliar o desempenho das técnicas com a implementação em *Hardware*;
- Avaliar as metodologias propostas em campo.

REFERÊNCIAS

- COELHO, A. L. M., **Análise da resposta transitória de transformadores de corrente de proteção e o impacto em relés de sobrecorrente numéricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.
- DA SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais Para Engenharia e Ciências Aplicadas**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2010.
- DE CARVALHO, T. S. **Análise comparativa de modelos computacionais de transformadores de corrente via medições e simulações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- EL-AMIN, I. M. & AL-ABBAS, N. H., **Saturation of current transformers and its impact on digital overcurrent relays**. Proceedings of the IEEE/PES transmission distribution conference and exposition: Latin America, p. 1-6, Caracas, Venezuela, Agosto 2006.
- FARIA, W. A. **Estudo do sombreamento parcial em módulos fotovoltaicos através da resistência série e das redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- HAGEMANN, H. E., **Rede neural para correção de sinais distorcidos pela saturação de transformadores de corrente**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.
- HAGHJOO, F. & PAK, M. H., **Compensation of CT Distorted Secondary Current Waveform in Online Conditions**. IEEE Transactions on Power delivery. Vol. 31, n. 2, Abril 2016.
- HARGRAVE, A.; THOMPSON, M. J.; HEILMAN, B., **Beyond the Knee Point: A Practical Guide to CT Saturation**. 44th Annual Western Protective Relay Conference, Outubro 2017.
- HAYKIN, S. **Redes Neurais - Princípios e Prática**. Bookman, 2001.
- HONG, C. *et al.*, **A Scheme for Detection and Assessment of Current Transformer Saturation**. 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2017
- IEEE Power System Relaying Committee. **Gapped core current characteristics and performance**. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990.

- IEEE Std C37.110-2007. **IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes**. Maio 2008.
- IEEE Std C57.13-1993. **IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers**. Junho 1993.
- KANG, Y.; OK, S. & KANG, S., **A CT Saturation Detection Algorithm**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, n. 1, p. 78-85, 2004.
- KANG, Y. C.; LIM, U. J. & KANG, S. H., **Compensating algorithm suitable for use with measurement-type current transformers for protection**. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, p. 880-890, 2005.
- KINDERMANN, G., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Editora da UFSC, Vol. 1, Primeira Edição, 1999.
- KHORASHADI-ZADEH, H. & SANAYE-PASAND, M., **Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs**. IEEE Transactions on Power delivery. Vol. 21, n. 1, Janeiro 2006.
- KUMAR, K.; KUMBHAR, G. B. & MAHAJAN, S., **A New Efficient Algorithm to Detect Current Transformer Saturation**. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2016.
- LI, F.; LI, Y.; AGGARWAL, R. K., **Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers**. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. Vol. 149, n. 4, p. 497-503, Julho 2002.
- MASSON, L, **Circuit for the dynamic control of magnetic flux in current transformers**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979.
- MOONEY, P. E. J., **Distance element performance under conditions of CT saturation**. Proceedings of the 61 Annual Conference for Protective Relay Engineers, Vol. 1, p. 491-497, College Station, TX, USA, Abril 2008.
- OLIVEIRA, D. S., **Classificação e localização de faltas em sistemas de transmissão com compensação série utilizando redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- ORLHAC, M., **Le transformateur de courant pour La protection en HT**. Cahier Technique Merlin Gerin n. 164, 1992.
- PAN, J.; VU, K. & HU, Y., **An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 19, n. 4, p. 1623-1628, Outubro de 2004.

- PEREIRA, F. A., **Correção em tempo real das correntes distorcidas no enrolamento secundário de TCs com entreferro**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- PHADKE, A. G. & THORP, J. S., **Computer Relaying for Power Systems**. Wiley, p. 189, 2009.
- ROSELLI, M. A., **Correção da saturação de transformadores de corrente via redes neurais artificiais e seus efeitos na proteção de distância**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- SANATI, S. & ALINEJAD-BEROMI, Y., **Avoid Current Transformer Saturation Using Adjustable Switched Resistor Demagnetization Method**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 36, n. 1, Fevereiro 2021.
- SANTOS, E. M. *et al.*, **Deteção do intervalo de saturação de transformadores de corrente através do ângulo entre as diferenças das amostras de corrente secundária**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Setembro 2010.
- SANTOS, E. M., **Métodos para correção das distorções da forma de onda secundária causadas pela saturação de transformadores de corrente para serviço de proteção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- SCHETTINO, B. M., **Uma proposta para deteção e compensação dos efeitos causados pela saturação dos núcleos dos transformadores de corrente utilizados em circuitos de proteção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- SILVA, B. S. S.; DO SANTOS, R. C.; BELATI, E. A., **Um método inteligente para a correção da forma de onda secundária de transformadores de corrente de proteção**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2020.
- SLUIS, L. V. D., **Transients in Power Systems**. KEMA High-Power Laboratory, John Wiley Sons, 2001.
- YU, D. C. *et al.*, **Correction of current transformer distorted secondary due to saturation using artificial neural networks**. IEEE Transactions on Power delivery. Vol. 16, n. 2, p. 189-194, Abril 2001.