

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HUMBERTO ELICKER HAGEMANN

**REDE NEURAL PARA CORREÇÃO DE SINAIS DISTORCIDOS PELA
SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

**ALEGRETE
2013**

HUMBERTO ELICKER HAGEMANN

REDE NEURAL PARA CORREÇÃO DE SINAIS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do curso de Engenharia Elétrica da Fundação Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof. Eduardo Machado dos Santos

**ALEGRETE
2013**

Autoria: Humberto Elicker Hagemann

Título: Rede Neural para Correção de Sinais Distorcidos pela Saturação de Transformadores de Corrente

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Assinatura	Instituição
1	Eduardo Machado dos Santos	Prof. Me.	<i>Eduardo M. dos Santos</i>	unipampa
2	Lucas Santos Pereira	Prof.	<i>Lucas S. Pereira</i>	unipampa
3	Jumar Luis Russi	Prof. Dr.	<i>Jumar Luis Russi</i>	unipampa

Data da aprovação: 11 de outubro de 2013.

*“Dedico este trabalho à minha família,
que sempre me apoiou em busca deste so-
nho. De uma forma muito especial ao meu
avô Benó, que partiu antes de me ver for-
mado.”*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve a colaboração de diversas pessoas a quem gostaria de agradecer mesmo correndo o risco de esquecer algumas delas.

Agradeço primeiramente ao meu pai e minha mãe, por me ensinarem a ter força e garra, mesmo quando nada funciona, por sempre me instigarem a ir além e acreditar em mim, por todo o carinho e por estarem ao meu lado quando mais precisei.

Obrigado à minha irmã, que em muitos momentos foi pai, mãe, irmã e amiga, por sempre ser um exemplo a ser seguido, tanto como pessoa como profissional.

Um agradecimento ao professor Eduardo Machado dos Santos, por todo o apoio, dedicação e aprendizado durante a realização desse trabalho e por também ser um exemplo de profissional e educador a ser seguido.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas, que por mais de cinco anos foram minha segunda família e me deram verdadeiros exemplos de amizade e companheirismo, entre eles devo ressaltar Alam Cancian, Breno Barrera, Bruno Fiorenza, Cassiano Freo, Guilherme Domeneghi, Jeferson Miranda e Luiz Roberto Pavanatto.

Por fim deixo um agradecimento especial ao amigo Sirnei Nunes da Silva por me dar uma oportunidade de estágio, e pelos inúmeros conhecimentos passados, apesar do pouco tempo de convivência.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar um algoritmo que visa reduzir os efeitos da saturação de transformadores de corrente (TC's), sendo esse um dos fatores que afetam o desempenho de um sistema de proteção em sistemas de potência. Para isto, o trabalho propõe a utilização de uma metodologia de correção dos sinais distorcidos por saturação fundamentada no uso de redes neurais artificiais (RNA).

Tal técnica utiliza apenas um neurônio para determinar parâmetros característicos do sinal de corrente de curto-circuito, para então aplicá-los na correção dos trechos distorcidos dos sinais de corrente secundária, provenientes de TCs com núcleos saturados.

Foram simulados casos de curto-circuito em uma Linha de Transmissão, onde os TC's operam em diferentes cenários previamente definidos, para os quais, dependendo dos níveis das correntes de falta, ocorre a saturação de seu núcleo. Tais simulações foram feitas para gerar os sinais a serem processados pela metodologia proposta, considerando diferentes cenários de falta. Essas simulações foram feitas a partir do software *ATP*.

Os sinais saturados foram corrigidos pelo algoritmo desenvolvido, o qual foi implementado em MATLAB[®], utilizando função apropriada. A partir do processamento dos sinais gerados, pode-se verificar o bom desempenho da metodologia proposta, tendo em vista a precisão da correção e a facilidade de implementação da mesma.

Com essa proposta, espera-se prover uma alternativa aos esquemas de proteção frente à situações que envolvam a saturação de transformadores de corrente, garantindo atuação seletiva e coordenada da proteção, aumentando a confiabilidade dos sistemas elétricos de potência.

Palavras-chave: Correção, Distorção, Processamento de Sinais, Proteção, Redes Neurais Artificiais, Saturação, Transformadores de Corrente.

ABSTRACT

This work presents an algorithm that aims to reduce the effects of saturation of current transformers (CTs), being one of the factors that affect the performance of protection systems in the electric power systems. For this end, the paper proposes the use of a methodology to correct the distorted portions of secondary current signals, provided by saturated CTs, based on the use of Artificial Neural Networks (ANN).

This technique uses only one neuron to determine the characteristic parameters of the short-circuit current signal, and then apply them to correct the distorted ranges present in the referred signal waveform.

Cases of short-circuits on a transmission line were simulated, where the CTs operate on different scenarios previously defined, for which, depending on the levels of fault currents, saturation occurs in its core. These simulations were performed to generate signals to be processed by the proposed method, considering different fault conditions. These simulations were performed using the software EMTP-ATP.

Saturated signals were corrected by the algorithm developed, which was implemented in MATLAB®, using proper function. From the generated signals processing by the proposed technique, one can verify the good performance of the proposed methodology, considering the correction accuracy and the ease of implementation of the referred methodology.

With this proposal, it is expected to provide an alternative to protection schemes against the situations involving the saturation of current transformers, ensuring selective and coordinated protective relaying, increasing the reliability of the electric power systems.

Keywords: Artificial Neural Networks, Correction, Distortion, Current Transformers, Protection, Saturation, Signal Processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Circuito Equivalente, Transformador de Corrente.	19
FIGURA 2 –Curva B x H de Materiais Ferromagnéticos	21
FIGURA 3 –Circuito Simplificado de um TC	24
FIGURA 4 –Sinais de Corrente, Ideal e Saturada, Secundarias de um TC.....	24
FIGURA 5 –Neurônio Biológico.	31
FIGURA 6 –Neurônio de McCulloch & Pitts.....	32
FIGURA 7 –Modelo Geral do Neurônio.....	33
FIGURA 8 –Função de limiar	35
FIGURA 9 –Função Linear	35
FIGURA 10 –Função Linear por Partes.....	36
FIGURA 11 –Função sigmóide.....	36
FIGURA 12 –Função Tangente Hiperbólica.....	37
FIGURA 13 –Rede Feedforward de Camada Unica.	38
FIGURA 14 –Rede Feedforward com Múltiplas Camadas.....	39
FIGURA 15 –Rede Neural Recorrente.....	39
FIGURA 16 – Exemplo de sinal de corrente saturado e ideal.	43
FIGURA 17 – Representação do funcionamento do neurônio.....	46
FIGURA 18 – Sistema Teste.....	47
FIGURA 19 - Circuito para faltas entre fases e terra.	48
FIGURA 20 - Circuito para falta entre fases.....	48
FIGURA 21 - Sinais de corrente para um curto trifásico-terra. (a) Sinal no Primário do TC. (b) Sinal no Secundário do TC	51
FIGURA 22 - Sinais de corrente para um curto bifásico. (a) Sinal no Primário do TC. (b) Sinal no Secundário do TC.....	53

FIGURA 23 - Resultados Falta Trifásica: 5% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 60°.....	56
FIGURA 24 - Valores RMS para uma Falta Trifásica: 5% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 60.....	56
FIGURA 25 - Resultado Falta Bifásica: 5% da Linha, 25% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 50°	57
FIGURA 26 - Valores RMS Falta Bifásica: 5% da Linha, 25% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 50	57
FIGURA 27 - Resultado Falta Bifásica-Terra: 5% da Linha, 50% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 45°	58
FIGURA 28 - Valores RMS Falta Bifásica-Terra: 5% da Linha, 50% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 45°	58
FIGURA 29 – Resultado Falta Monofásica-Terra: 5% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°	59
FIGURA 30 – Valores RMS Falta Monofásica-Terra: 25% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°	59
FIGURA 31 – Resultado Falta Bifásica : 15% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°	60
FIGURA 32 – Valores RMS Bifásica: 25% da Linha, 15% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 –Relação de Impedancias	49
TABELA 3.2 – Relação de Fluxo Residual	50
TABELA 3.3 –Relação entre Ângulo de Falta e Instante no Tempo.....	50
TABELA 3.4 –Relação de Número de Casos Simulados	51

SUMÁRIO

Agradecimentos	5
RESUMO	6
Abstract	7
Lista de ilustrações	8
Lista de tabelas	10
Sumário	11
1 Introdução	13
1.1 <i>Considerações Iniciais</i>	13
1.2 <i>Organização do Trabalho</i>	15
2 Transformadores de Corrente (tc's)	17
2.1 <i>Considerações Gerais</i>	17
2.2 <i>Introdução</i>	17
2.3 <i>Transformadores de Corrente (TC's)</i>	17
2.3.1 <i>Circuito Equivalente de um Transformador de Corrente</i>	19
2.3.2 <i>O Fator de Sobrecorrente do TC</i>	20
2.3.3 <i>Curva de Magnetização do núcleo do TC</i>	20
2.3.4 <i>Classe de Exatidão do TC</i>	22
2.3.5 <i>Tipo de Transformadores de Corrente</i>	23
2.3.6 <i>Saturação de TC</i>	23
2.3.6.1 Causas da Saturação	25
2.3.7 <i>O Fluxo Remanescente e seus Efeitos</i>	26
2.3.8 <i>Efeitos da Saturação nos Principais Tipos de Proteção</i>	26
2.3.8.1 Efeitos da Saturação em Relés de Distância	26
2.3.8.2 Efeitos da Saturação em Relés de Sobrecorrente	26
2.3.8.3 Efeitos da Saturação em Relés Diferenciais	27
2.4 <i>Considerações Finais</i>	27
3 Redes Neurais Artificiais	28
3.1 <i>Considerações Gerais</i>	28
3.2 <i>Introdução</i>	28
3.3 <i>Vantagens das RNA's</i>	29
3.4 <i>O Neurônio Biológico</i>	30
3.4.1 <i>Atividade Nervosa de um Neurônio Biológico</i>	31

3.5 O Neurônio Artificial	32
3.6 Tipos de Função de Ativação (HAYKIN, 2001):	34
3.7 Arquitetura de Redes Neurais Artificiais	37
3.7.1 Rede Feedforward de Camada Única.....	37
3.7.2 Redes Feedforward com Múltiplas Camadas	38
3.7.3 Redes Recorrentes	39
3.8 Aprendizagem de Uma Rede Neural Artificial	40
3.8.1 Aprendizado com o Professor	40
3.8.2 Aprendizado sem Professor	40
3.9 Considerações Finais	41
4 Algoritmo proposto para a correção dos Sinais Distorcidos por saturação ..	42
4.1 Considerações Gerais	42
4.2 Detecção dos Intervalos de Saturação.....	42
4.3 Correção dos Intervalos de Saturação.....	43
4.4 Considerações Finais	46
5 O Sistema Teste.....	47
5.1 Considerações Gerais	47
5.2 Histórico do Programa ATP.....	47
5.3 Sistema Elétrico Estudado.	48
5.4 Exemplos de Curtos Simulados	52
5.5 Considerações Finais	54
6 Simulações e Análises dos resultados	55
6.1 Considerações Gerais	55
6.2 Resultados Obtidos.....	55
6.2.1 Falta Trifásica-Terra: 5% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 60°:	55
6.2.2 Falta Bifásica-Terra: 5% da Linha, 25% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 50°:	56
6.3 Falta Bifásica-Terra: 5% da Linha, 50% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 45°:	57
6.4 Falta Monofásica-Terra: 25% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°:	58
6.5 Falta Bifásica: 15% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°:	59
6.6 Considerações Finais	61
7 Considerações finais	62
7.1 Sugestão para trabalhos futuros	63
Referências bibliográficas.....	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Um sistema elétrico de potência tem como função realizar a conexão entre a sua carga e sua geração, de modo contínuo e balanceado, com o menor número possível de interrupções durante sua operação. Para isso, são necessários estudos de planejamento que visem à previsão do crescimento da carga, a constituição de interconexões apropriadas, a elaboração de planos otimizados de geração e, principalmente, a utilização de um conjunto de proteções eficientes.

Com o passar dos anos, juntamente com a elevação da carga a ser alimentada, os sistemas de potência crescem tanto em complexidade, quanto em tamanho, o que acarreta em correntes de curto-circuito cada vez maiores. Diretamente ligado a isso está à necessidade do desenvolvimento de melhores sistemas de proteção, que devem minimizar ou, até mesmo, evitar os efeitos de possíveis falhas nos sistemas de potência, exigindo também um maior grau de rapidez e confiabilidade dessa proteção.

Visando uma maior segurança do sistema elétrico, tem-se a necessidade de se obter níveis de correntes limitados juntamente com a elaboração de disjuntores com uma maior capacidade de interrupção. Portanto, verifica-se a necessidade da utilização de diferentes dispositivos de proteção para situações anormais de funcionamento do conjunto interligado e para o isolamento de elementos da rede.

A disposição estratégica de diversos dispositivos de proteção ajuda a compor um sistema elétrico. Esses equipamentos não atuam de forma independente, pelo contrário, sua função é fazer com que uma eventual anormalidade possa ser isolada e removida sem afetar as demais partes do sistema elétrico. Portanto, uma operação seletiva, através da coordenação dos equipamentos de proteção, se faz necessária, com o intuito de isolar do sistema as partes que contenham algum tipo de defeito. Esse isolamento deve ocorrer de modo que o dispositivo de

proteção mais próximo da falta atue primeiro, evitando-se assim o desligamento desnecessário de áreas não atingidas, além de atuar no menor tempo possível, reduzindo assim os danos no sistema.

O Sistema Interligado Nacional (SIN) opera de forma em que, caso ocorra algum defeito em um setor e tenha-se a necessidade de isolar a parte afetada, existam caminhos alternativos para fornecer a continuidade do fornecimento de energia, a fim de evitar uma possível sobrecarga do sistema. É o funcionamento correto dos dispositivos de proteção que garante a continuidade no fornecimento de energia após a ocorrência de um defeito.

Já os sistemas de distribuição, utilizam uma lógica diferente, caso uma falha ocorra, e a mesma permaneça, o sistema de proteção retira o alimentador de operação, seja uma parte ou por completo. O restabelecimento da operação fica a cargo da equipe de manutenção, que somente será realizado após a correção das falhas existentes. Novamente, são utilizadas mais de uma forma de proteção a fim de garantir o sistema e fornecer a segurança às pessoas.

Dentro dos sistemas de proteção, encontram-se os transformadores de instrumentos, os quais são componentes que fornecem o acesso as altas tensões e correntes do sistema de potência. Essa conexão ocorre por meio de réplicas reduzidas dos sinais, permitindo assim a identificação das faltas e distúrbios no sistema por parte dos dispositivos de proteção. O desempenho desses transformadores de instrumentos está diretamente associado à correta operação do sistema de proteção, pois, ao operarem corretamente, realizam a mais exata reprodução possível dos sinais de corrente e tensão durante as falhas. Porém, os transformadores de corrente (TC) possuem a não linearidade de excitação como característica de seus núcleos, podendo assim apresentar um elevado fluxo magnético contido nos mesmos.

Nos sistemas elétricos de potência, os equipamentos de medição, controle e proteção utilizam os sinais de corrente e tensão, porém necessitam de diferentes precisões e magnitudes desses sinais. Portanto, sabe-se que as correntes de excitação de um TC aumentam mais rapidamente para os pontos acima da curva de magnetização, o que caracteriza a saturação do núcleo magnético. Isso resultará numa distorção da corrente secundária em relação a primária, o que pode acarretar em um atraso ou até mesmo na não operação dos relés de proteção do sistema.

O problema da saturação poderia ser resolvido através da utilização de TC's que possuam um elevado volume do núcleo, o que resultaria em um elevado custo de fabricação. Valendo-se do desenvolvimento dos relés digitais, o uso de algoritmos visando corrigir os efeitos da

saturação passa a ser uma alternativa mais viável para contornar os efeitos da saturação. Esses algoritmos têm como objetivo reconstruir, da maneira mais aproximada possível, o sinal original sem os efeitos da saturação. Garantem

As técnicas digitais têm como principal vantagem a capacidade de monitorar falhas em circuitos e de exercer funções de equipamentos específicos a partir dos sinais de alimentação, garantindo assim um pleno funcionamento do sistema de potência e um completo suprimento da carga.

Uma das técnicas que possibilita a correção das correntes saturadas em transformadores de corrente, a qual será objeto de estudo desse trabalho, é a que se utiliza do uso de redes neurais artificiais (RNA). Dado o contexto anterior, estabeleceu-se como objetivo deste trabalho, desenvolver um algoritmo baseado em RNA que apresente como principal característica a capacidade de correção das formas de onda distorcidas devido à saturação dos TC's.

1.2 Organização do Trabalho

Na Introdução, pontua-se a importância dos Sistemas Elétricos de Potência bem como a proteção dos mesmos. Juntamente, encontram-se a motivação e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 tem-se início a revisão bibliográfica com enfoque específico nos Transformadores de Corrente (TC's). São abordados tópicos em relação ao princípio de funcionamento, os tipos de transformadores existentes, a curva de excitação, bem como uma síntese das causas da saturação e seus efeitos sobre os principais equipamentos de proteção.

O Capítulo 3 tem enfoque total baseado nas redes neurais artificiais (RNA's). São discutidas suas principais características, dentre elas a adaptabilidade e generalização, bem como a capacidade que essas redes têm em relação a resolução de problemas relativamente mais complexos. São abordados, também, os principais tipos de arquiteturas usadas, suas funções de ativação e os treinamentos mais utilizados.

O Capítulo 4 descreve as características gerais do sistema analisado e apresenta informações sobre a modelagem de seus componentes. São especificados os diferentes tipos de casos de curto-circuito criados, cujas correntes distorcidas por saturação foram corrigidas através do algoritmo proposto.

O Capítulo 5 descreve a metodologia utilizada a fim de realizar a correção dos sinais distorcidos por saturação, a qual é fundamentada em conceitos das redes neurais artificiais.

No Capítulo 6, são discutidos os resultados obtidos a partir do processamento do algoritmo proposto.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões finais bem como as propostas para trabalhos futuros.

2 TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TC'S)

2.1 Considerações Gerais

O entendimento do fenômeno da saturação em Transformadores de Corrente (TC's) é fundamental no desenvolvimento de metodologias que agem na detecção e correção da distorção de sinais de corrente saturados. Portanto, esse Capítulo tem como objetivo principal apresentar os conceitos fundamentais em relação aos TC's, dentre eles as causas e as consequências de sua saturação e a relação dessa saturação com a proteção de sistemas elétricos de potência.

2.2 Introdução

Basicamente, a proteção de qualquer Sistema Elétrico de Potência é realizada pelos relés. Para que essa proteção seja realizada, os relés são posicionados de maneira estratégica dentro do sistema, de modo que, quando aconteça algum tipo de interferência ou falta, eles consigam captar e interpretar essas anomalias para então atuar, com isso ocorra à isolação do defeito para com o restante do sistema.

Levando em consideração os elevados níveis de tensões e correntes dentro de um sistema elétrico, a energização desses relés é realizada por meio da utilização de transformadores de corrente e de tensão. Portanto os transformadores de potencial e de corrente são destinados somente à alimentação de equipamentos de medição, controle e proteção.

2.3 Transformadores de Corrente (TC's)

Com o propósito de reduzir suas perdas, o sistema elétrico de potência, por possuir grandes extensões, exige o uso de tensões cada vez mais elevadas. A fim de garantir a proteção e

controle desses sistemas, utilizam-se instrumentos de medição e proteção, os quais têm a necessidade de receber informações dessas referidas grandezas. Sendo assim, economicamente, são inviáveis o uso de instrumentos que meçam diretamente as tensões e correntes que circulam pela linha de transmissão. Para isso, utilizam-se os transformadores de instrumentos, dentre os quais encontram-se os transformadores de corrente.

Um transformador de corrente possui basicamente três finalidades:

- Fornecer em seu secundário uma forma de onda de corrente proporcional a do primário;
- Proporcionar o isolamento entre o circuito de alta tensão e os equipamentos conectados em seu secundário;
- Fornecer no secundário uma corrente em níveis aceitáveis aos equipamentos a ele conectados;

O enrolamento primário desses equipamentos deve ser conectado em série com o sistema de potência e as cargas do TC (relés) devem ser conectadas em série com o terminal secundário. Como a corrente de carga passa pela bobina primária do TC, para que não ocorra queda de tensão e o consumo de energia seja o mínimo possível, sua bobina deve possuir fios grossos, a fim de que a resistência elétrica seja a mínima possível, e poucas espiras, para que sua reatância seja a menor possível.

Para padronizar os equipamentos de medição e proteção, o TC fornece em seu secundário uma corrente nominal de 5 A (Padrões ANSI e ABNT). Na Europa a corrente secundária, por norma, é de 1 A

A razão de transformação de um TC (RTC) pode ser definida pela razão entre as espiras dos enrolamentos do secundário e do primário conforme (1.1).

$$RTC = \frac{N_2}{N_1} \quad (1.1)$$

A RTC pode ser expressa, também, em termos das correntes nominais do primário e do secundário do TC, conforme (2.1).

$$RTC = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \times \frac{5}{5} = \frac{I_{1nom}}{5} \quad (1.2)$$

Segundo 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). Pela 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).

2.3.1 Circuito Equivalente de um Transformador de Corrente

A Figura 1 apresenta o circuito equivalente de um TC conectado a uma carga qualquer. (IEEE Std C37.110-2007).

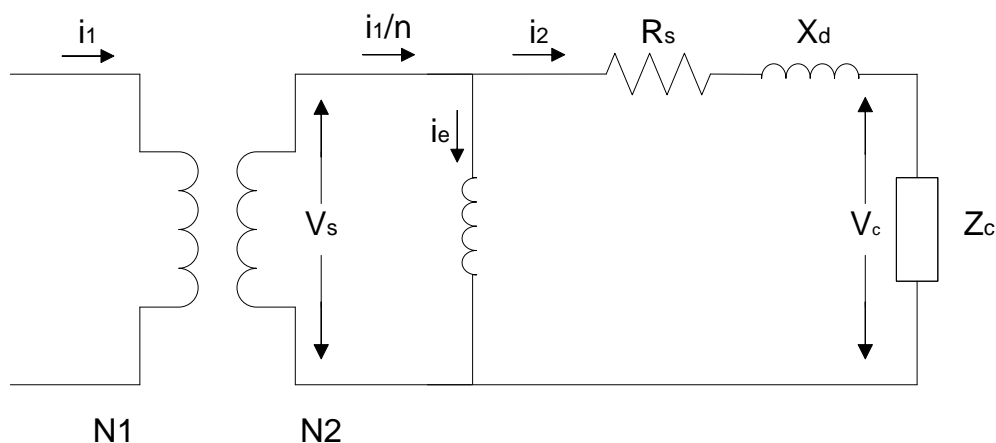


Figura 1 – Circuito Equivalente, Transformador de Corrente.

Na figura 1, i_1 representa a corrente primária, V_s a tensão secundária de excitação, i_e a corrente de excitação, i_1/n a corrente secundária total, Z_e a impedância do ramo de excitação, i_2 a corrente secundária que passa 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, N_1 e N_2 representam o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário e N_2/N_1 a razão de espiras do TC.

Portanto, temos que a corrente de excitação i_e é dada pela equação 1.3, onde i_M representa a corrente de magnetização e i_{Loss} as perdas no núcleo. Em situações normais de operação, o valor de i_e é considerado muito pequeno. Porém em casos como em curtos-circuitos o TC pode passar a atuar em sua faixa não linear de sua curva de excitação, causando erros na

transformação e por consequência aumento de i_e . Os máximos erros admitidos giram em torno de 2,5% a 10%.

$$i_e = i_M + i_{Loss} \quad (1.3)$$

2.3.2 O Fator de Sobrecorrente do TC

O fator de Sobrecorrente (FS) de um transformador de corrente pode ser definido pela relação entre a corrente máxima de curto-circuito e a sua corrente primária nominal para que o erro de sua classe seja mantido.

Cada país estipula valores padrões de F.S. O padrão ABNT estipula como valores de F.S. 5, 10, 15 e 20. O padrão ANSI estipula o valor de Sobrecorrente como 20.

2.3.3 Curva de Magnetização do núcleo do TC

O material utilizado na composição dos núcleos dos TC's possui um diferente comportamento para diferentes situações. Neste tipo de material, a indução magnética (B), permanece praticamente proporcional a intensidade do campo magnético atuante (H), somente até que a maior parte dos dipolos magnéticos fiquem alinhada. A partir daí, ocorre um fenômeno denominado saturação. A saturação faz com que B passe a crescer muito mais lentamente com o crescimento de H. Esse comportamento é mostrado na Figura 2, onde são observadas 3 regiões na curva B x H.

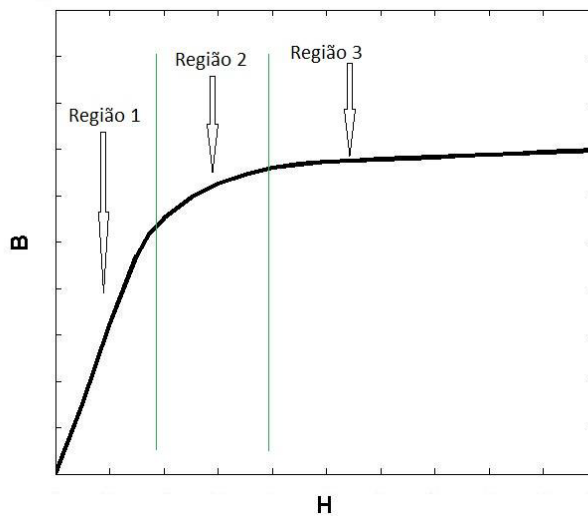


Figura 2 – Curva B x H de materiais ferromagnéticos.

Na primeira região observa-se uma linearidade entre as duas grandezas, ou seja, a taxa de variação de B em função de H, denominada permeabilidade incremental é quase constante.

Na segunda região, denominada região do joelho, há uma forte não linearidade associada às grandezas. É o ponto de máxima permeabilidade magnética do núcleo do transformador. O joelho da curva de excitação é definido como o ponto em que a tangente da curva forma um ângulo de 45° com a abscissa em núcleos sem entreferro. Em núcleos com entreferro esse ângulo é de 30° (IEEE Std C37.110-2007).

Na terceira região, todos os dipolos magnéticos já estão alinhados e a permeabilidade incremental tende à permeabilidade magnética do vácuo.

Outra propriedade encontrada nos materiais ferromagnéticos é a chamada histerese eletromagnética. A histerese ocorre devido ao fato de os dipolos magnéticos não retornarem imediatamente a sua orientação aleatória, com resultante nula, a partir do momento em que o campo magnético (H) atuante no material se torna nulo. Em decorrência disso poderá haver uma densidade de fluxo magnético (B) residual no núcleo do TC, mesmo após a corrente do primário se tornar nula. Esse fluxo remanescente pode influenciar a operação do TC em regime transitório, como por exemplo, quando há um processo de energização do primário logo após o desligamento do circuito. A presença de fluxo remanescente pode levar à saturação precoce do núcleo, induzindo o TC a erros (ZOCHOLL, 2004).

2.3.4 Classe de Exatidão do TC

As normas ABNT e a ANSI definem a classe de exatidão e limites de operação do TC de formas diferentes. A ABNT define a máxima potência aparente (VA) de carga que pode ser ligada ao secundário do TC em regime permanente de forma que, durante o máximo curto-circuito limitado pelo fator de sobrecarga, seu erro não ultrapasse o da classe de exatidão (KINDERMANN, 1999).

Segundo a ABNT, a nomenclatura é definida conforme (1.4).

$$\left. \begin{matrix} \{A\} \\ \{B\} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \{2,5\} \\ \{10\} \end{matrix} \right\} F \left. \begin{matrix} \left(\begin{matrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 20 \end{matrix} \right) \end{matrix} \right\} C \left. \begin{matrix} \left(\begin{matrix} 12,5 \\ 25 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{matrix} \right) \end{matrix} \right\} \quad (1.4)$$

Em (1.4), o primeiro termo indica a classificação do TC quanto a sua reatância, sendo A para alta e B para baixa. O segundo termo indica a classificação quanto ao erro admissível de sua classe de exatidão, em porcentagem. A letra “F” e os termos a seguir referem-se ao Fator de Sobrecorrente e os seus respectivos valores. A letra “C” refere-se à carga no secundário bem como o número seguinte indica o valor em VA da potência aparente em seu secundário.

Segundo ao padrão ANSI, a classe de exatidão é determinada por uma letra e a tensão secundária que indica como será o desempenho do TC durante o regime permanente (IEEE Std C57.13-1993).

Segundo o padrão ANSI a nomenclatura segue o modelo da expressão (1.5)

$$\left. \begin{matrix} \{C\} \\ \{K\} \\ \{T\} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \left(\begin{matrix} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{matrix} \right) \end{matrix} \right\} \quad (1.5)$$

Onde temos que:

- C – O fluxo de dispersão é desprezível, e o desempenho do TC pode ser determinado diretamente pela característica de excitação.
- K – Semelhante à classe C, entretanto a tensão no joelho da curva de excitação deve ser no mínimo 70% do valor nominal da tensão secundária determinada pela nomenclatura.
- T – Apresenta significativo fluxo de dispersão no núcleo, o que favorece a ocorrência de um erro consideravelmente alto.

2.3.5 Tipos de Transformadores de Corrente

Basicamente, os transformadores de corrente podem ser classificados quanto ao modelo de enrolamento primário e quanto ao formato do núcleo (IEEE Std C57.13-1993 e IEEE Std C37.110-207). Os principais tipos de TC são:

- Tipo Enrolado: Seu enrolamento primário é constituído por uma ou mais espiras que envolvem o núcleo. Os enrolamentos primários e secundários compõem uma única estrutura e estão isolados entre si.
- Tipo Bucha: Possui um núcleo toroidal, seu enrolamento secundário é acoplado e isolado do núcleo. Seu enrolamento primário é composto por um condutor completamente isolado.
- Tipo Janela: Composto de um enrolamento secundário isolado e acoplado ao núcleo, porém seu enrolamento primário não compõem a mesma estrutura. Seu enrolamento primário é composto por um enrolamento que passa pelo interior do núcleo.

2.3.6 Saturação de TC

O circuito simplificado de um TC é representado pela Figura 3, onde i_1/n é a corrente secundária total (corrente primária dividida pela relação de transformação), i_e é a corrente de excitação do núcleo e i_2 é a corrente disponível no terminal secundário. O valor de i_2 é dado por (1.6). X_m , R_m e Z_m representam a reatância, a resistência e a impedância, respectivamente do ramo de magnetização.

$$i_2 = \frac{i_1}{n} - i_e \quad (2.6)$$

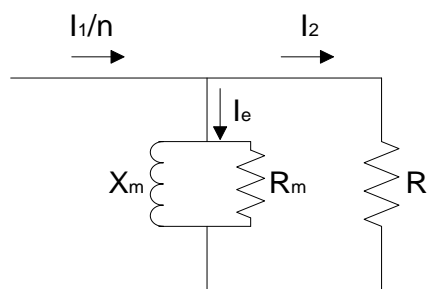


Figura 3 – Circuito simplificado de um TC.

Apesar de a corrente excitação se fazer sempre presente, seu valor é muito pequeno em condições normais. Isso ocorre devido ao fato de a impedância no ramo de magnetização ser muito grande. Portanto, o erro na transformação causado por i_e é muito pequeno. Entretanto, a saturação magnética do núcleo provoca uma queda significativa dessa impedância e grande parte da corrente i_1/n passa pelo ramo de magnetização, resultando em uma distorção na forma de onda do sinal recebido pela carga do TC. Essa distorção pode ser observada na Figura 4 que apresenta a comparação entre um sinal de onda distorcido e um ideal (KOJOVIC, 2002).

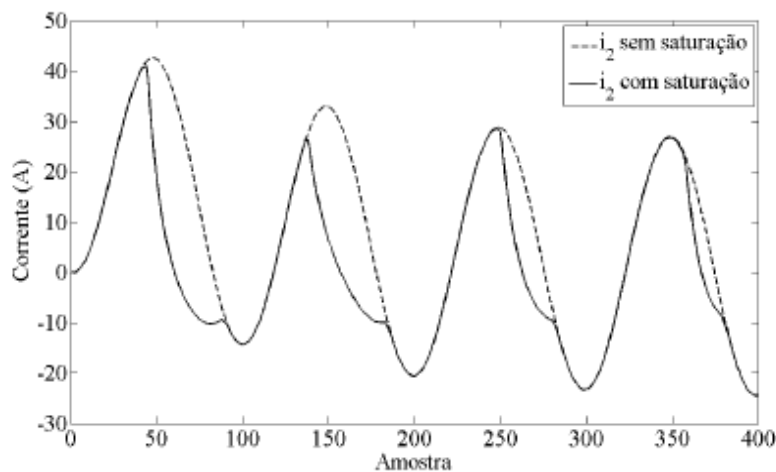


Figura 4 – Sinais de correntes, ideal e saturada, secundárias de um TC.

Durante um intervalo de saturação, essa distorção pode resultar numa variação na impedância, fazendo com que os relés de distância observem um valor menor fictício de impedância, o que resultará em um atraso ou até mesmo na não operação dos mesmos.

As componentes unidirecionais das correntes de curto-circuito podem ser consideradas a principal causa da ocorrência da saturação. Outros motivos que podem ser mencionados são o

fluxo magnético remanescente no núcleo e a carga do TC. Um núcleo maior do TC poderia ser uma solução, porém isso acarretaria em um custo muito elevado (MOONEY, 2008).

Essas consequências da ocorrência de saturação vêm sendo a principal causa da realização de estudos de diferentes métodos que realizem a detecção e a correção dos sinais de corrente distorcidos pela saturação. Essa correção aprimora o funcionamento dos sistemas de proteção frente a situações onde ocorra a saturação dos TC's (IEEE Std C37.110-2007).

2.3.6.1 Causas da Saturação

Os principais parâmetros que determinam o tempo até a saturação do TC são:

1. O grau de Assimetria da Corrente de Falta: O ângulo de incidência da falta e a razão entre X e R influenciam diretamente no grau de assimetria da forma de onda de corrente no primário. A componente unidirecional contribui para um aumento no fluxo. Quanto maior o grau de assimetria, mais rápido ocorrerá a saturação.
2. Magnitude da Corrente de Falta: A magnitude da corrente assimétrica é proporcional à magnitude da componente senoidal da corrente. Quanto maior a intensidade da corrente, mais rápido será o incremento de fluxo até o ponto de saturação.
3. Impedância do Circuito Secundário: Cargas elevadas demandam uma maior tensão para um determinado valor de corrente e o fluxo é proporcional à tensão, portanto, quanto maior a carga conectada ao secundário do TC, mais rápido ele irá saturar. Porém, para duas impedâncias de mesma magnitude, a que possuir um menor fator de potência (maior parcela indutiva) terá uma saturação mais lenta. Isso resulta numa redução na tensão de carga e no fluxo associado, pois a indutância indica uma baixa impedância para componentes contínuas.
4. Razão de Espiras: O aumento entra a razão de espiras do TC, resultará numa diminuição do fluxo, portanto a densidade de fluxo é reduzida (IEEE C37.110-2007).
5. Fluxo Remanescente no Núcleo do TC: Esse fluxo remanescente irá se subtrair ou se somar ao fluxo que foi gerado pelas correntes que circulam pelo terminal do primário, essa soma ou subtração irá depender da polaridade desse fluxo. O tempo de saturação é menor quando a presença de fluxo remanescente resulta num incremento ao fluxo total do núcleo, podendo fazer com que o TC sature logo após o início da falta.

6. Tensão de Saturação: A quantidade de ferro no núcleo influencia diretamente na impedância secundária de excitação de um TC. Para que ocorra um aumento no tempo até a saturação, a área do núcleo terá de ser a maior possível, pois isso acarretará em um aumento no valor da tensão de saturação.

2.3.7 O Fluxo Remanescente e seus Efeitos

Basicamente, o fluxo remanescente que se encontra no núcleo do TC, depende do valor de fluxo no instante antes da interrupção da corrente primária. Seu valor é determinado pelo valor da impedância do circuito, da corrente primária simétrica e da componente unidirecional. Quando a corrente no primário é interrompida enquanto ocorre a saturação, ocorrerá também o máximo fluxo remanescente (IEEE Std C37.110-2007).

A dissipação desse fluxo remanescente ocorre lentamente e ele pode ser controlado de diversas formas, dentre as quais se destacam:

- Núcleos com duas magnetizações;
- Diferentes quantias de aço no núcleo;
- Uso de núcleos com entreferro;

2.3.8 Efeitos da Saturação nos Principais Tipos de Proteção

2.3.8.1 Efeitos da Saturação em Relés de Distância

A saturação do TC resultará em uma redução da magnitude da corrente, ocasionando sua defasagem, em decorrência disso, ocorrerá um aumento considerável na impedância vista pelos relés de distância. O resultado final será o surgimento de problemas de subalcance e atrasos na operação dos relés (MOONEY, 2008).

2.3.8.2 Efeitos da Saturação em Relés de Sobrecorrente

Apesar de TC's saturados não afetarem o desempenho de relés de Sobrecorrente instantâneos, pois estes podem prover corrente suficiente para sua operação, em relação a relés temporizados, estes podem apresentar significativos atrasos de operação. Entretanto, se os relés forem corretamente ajustados, esses atrasos de operação não resultarão em problemas de descoordenação com os demais dispositivos de proteção (EL-AMIN & AL-ABBAS, 2006).

2.3.8.3 Efeitos da Saturação em Relés Diferenciais

O uso de critérios de alta seletividade e sensibilidade podem não considerar a possibilidade da saturação do TC mesmo para faltas externas, o que pode acarretar na operação incorreta do relé, apesar dos mesmos serem considerados confiáveis e robustos. Essa saturação para faltas externas irá gerar correntes diferenciais fictícias, que podem ser maiores que os valores de ajuste de operação do relé. Assim, o relé irá considerar a falta externa como interna e irá operar de forma indevida (REBIZANT *et al.*, 2004).

2.4 Considerações Finais

Neste Capítulo foram apresentados os conceitos fundamentais dos transformadores de corrente e do fenômeno da saturação que ocorre em TC's. Conceitos como construção, funcionamento e classificação desses transformadores, foram abordados. Também, foram abordados os efeitos que a saturação dos TC's pode ocasionar nos principais tipos de proteção.

No Capítulo seguinte, são apresentados os conceitos fundamentais referentes as redes neurais artificiais.

3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

3.1 Considerações Gerais

Neste Capítulo, são apresentados conceitos referentes às redes neurais artificiais. Primeiramente, é descrito o funcionamento de um neurônio biológico, seguido da definição e modelagem dos neurônios artificiais, bem como a formação de redes neurais.

As classificações das arquiteturas de redes neurais existentes, o processo de treinamento dessas redes e algumas considerações importantes em relação ao projeto de uma rede neural também são abordados neste Capítulo.

3.2 Introdução

Nos dias atuais, o desenvolvimento de sistemas computacionais que trabalham com a filosofia clássica, tem sido feito a fim de proporcionar soluções para problemas que fazem parte do cotidiano, de forma semelhante ao executado pelo cérebro humano. Esse órgão possui vantagens que são desejáveis em qualquer sistema digital, principalmente, que àquelas que dizem respeito ao tratamento de informações, dentre as quais citam-se (HAYKIN, 2001):

- Ser robusto e tolerante a falhas, mesmo que perca neurônios diariamente, sem afetar seu desempenho;
- Ter a capacidade de manipular informações difusas, com inconsistências, sem muito contexto ou com ruídos;
- Ser altamente flexível, se ajustando ao ambiente através de aprendizagem, onde o exercício de uma programação se torna dispensável; e
- Ser compacto, pequeno e consumir pouca energia perante o seu desempenho.

Em resumo, o cérebro humano pode ser considerado uma máquina que se destaca em sua capacidade de interpretar informações com imprecisões, fazendo isso de uma maneira extremamente rápida, precisa e sem nenhuma instrução explícita.

Diante disso, o desenvolvimento de estudos voltados à Redes Neurais Artificiais (RNA's) tem se mostrado uma excelente alternativa diante certos casos em que os métodos tradicionais não têm apresentado um desempenho satisfatório. Isso ocorre pelo fato de que os sistemas computacionais tradicionais processam as informações de uma forma sequencial, onde tudo ocorre em uma ordem determinística de operações.

As características do cérebro humano para processar informações têm motivado inúmeras pesquisas que reproduzam sua capacidade de processamento, que é tão diferente de um computador convencional. A partir disso, tem-se tentado obter computadores que executem diversas tarefas de modo semelhante ao cérebro humano, atuando de forma não linear e com diversas operações em paralelo.

O cérebro é constituído, basicamente, de unidades estruturais elementares, que recebem o nome de neurônios. Esses neurônios possuem diversas entradas e uma saída. Essas entradas e saídas estão ligadas entre si formando uma rede neural.

As Redes Neurais Artificiais (RNA's) são uma representação distribuída da informação, por meio de neurônios artificiais, na forma de conexões entre um grande número desses elementos. Além disso, as RNA's são modelos matemáticos dos neurônios biológicos e suas ligações em redes, que, basicamente, realizam a soma ponderada de suas entradas e executam uma transformação, seja ela linear ou não linear, sobre esse valor (BRAGA, A. P.; LUDERMIR T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F., 2000).

3.3 Vantagens das RNA's

As principais vantagens no uso de RNA's para as soluções de problemas são descritas a seguir (HAYKIN, 2001):

- Aprendizagem: a RNA tem a capacidade de absorver informações, por meio de um processo iterativo de ajustes dos seus pesos sinápticos;
- Generalização: as redes apresentam uma saída adequada para uma entrada que não está presente nos processos iterativos de aprendizagem;

- Adaptabilidade: é a capacidade de uma rede neural em adaptar seus pesos sinápticos após modificações em seu meio ambiente, podendo absorver essas modificações perante um novo treinamento;
- Resposta a Evidências: a saída de uma RNA pode além de oferecer o resultado referente à entrada, apresenta também uma informação sobre a confiabilidade deste resultado. Portanto, resultados imprecisos podem ser descartados;
- Não Linearidade: uma vez que os neurônios que compõem uma rede neural forem não-lineares, a mesma terá o mesmo comportamento. 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 seu desempenho. Isso ocorre devido ao fato do conhecimento estar distribuído por toda a RNA.

São essas as características que garantem às redes neurais artificiais a capacidade de resolver problemas de certa complexidade, que de formas tradicionais não poderiam ser resolvidos. A área de engenharia vem apresentando aplicações bem sucedidas do uso das RNA's, onde o uso dessa ferramenta pode ser utilizado na busca de eficiência e precisão na resolução de problemas convencionais.

3.4 O Neurônio Biológico

O neurônio artificial é conhecido como a unidade básica de processamento de uma rede neural artificial, cujo funcionamento é inspirado em um neurônio biológico. As principais partes que constituem um neurônio biológico estão representadas na Figura 5 e são descritas a seguir (KOVÁCS, ZSOLT LÁSZLÓ, 2002):

- Dendritos: são as entradas do neurônio, que executam a recepção das informações. O conjunto de neurônios compõe a árvore receptora da rede neural. São fibras nervosas que carregam os sinais elétricos para o corpo da célula. É o corpo da célula que executa a soma dos sinais recebidos na entrada;
- Axônios: executam o transporte do sinal de saída do neurônio, levando esse sinal desde o corpo da célula até outros neurônios;
- Sinapses: São as regiões onde a entrada (dendrito) de um neurônio e a saída (axônio) de outro entram em contato.

- **Corpo Celular:** realiza o processamento dos sinais de entrada do neurônio. Quando os valores dessas entradas atingem um valor determinado, o neurônio libera um impulso elétrico que se desloca do corpo celular até o axônio, onde o mesmo pode estar conectado a entrada de outro neurônio, executando a passagem de informação.

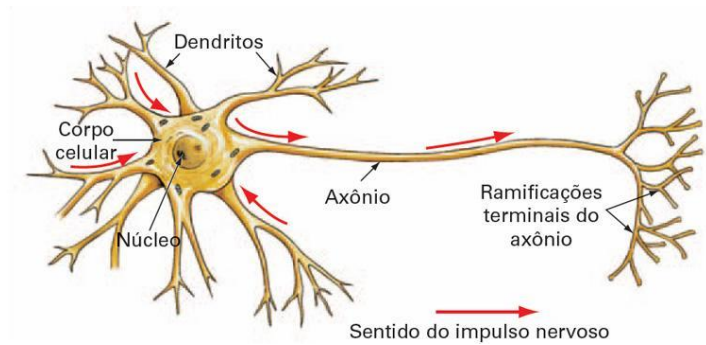


Figura 5 – Neurônio Biológico.

FONTE: Wasserman (1989)

Algumas estruturas neurais são definidas no nascimento, enquanto outras partes são desenvolvidas mediante aprendizagem. Durante esse processo algumas conexões neurais se formam e outras se desfazem. Essas estruturas passam por mudanças durante toda a vida, podendo ser tanto um reforço como uma debilitação entre as conexões sinápticas. Portanto, a mudança de uma informação resultará na mudança da intensidade das sinapses envolvidas no processo (KOVÁCS, ZSOLT LÁSZLÓ, 2002).

3.4.1 Atividade Nervosa de um Neurônio Biológico

As entradas de informações acontecem por meio das conexões sinápticas. Essas conexões ligam os dendritos das células nervosas aos axônios das outras. Os sinais que chegam aos axônios são impulsos elétricos conhecidos como potenciais de ação (HAYKIN, 2001).

As regiões eletroquimicamente ativas são conhecidas como sinapses, as quais se encontram entre a membrana pré-sináptica, onde são recebidos os estímulos que chegam de outro neurônio, e a membrana pós-sináptica localizada no dendrito. As substâncias que transmitem o estímulo são conhecidas como neurotransmissores.

O axônio é um tubo filamentar que é delimitado pela membrana que compõe o neurônio, a qual é chamada membrana celular. Quando não existe a presença de um impulso nervoso,

seu interior possui um potencial eletronegativo de algumas dezenas de milivolts em relação ao seu exterior. Quando o potencial da membrana se encontra menor em relação ao de repouso, significa que a membrana está despolarizada. Já quando esse potencial está mais eletronegativo, ela está hiperpolarizada.

Uma formação de potencial de ação na membrana do axônio ocorrerá quando a membrana sofre uma despolarização suficiente para que o neurônio passe a transmitir as informações a outros neurônios (BRAGA, A. P.; LUDERMIR T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F., 2000).

3.5 O Neurônio Artificial

Com base em neurônios biológicos, foram desenvolvidos modelos para o neurônio artificial. O primeiro neurônio artificial foi proposto pelo neurofisiologista McCulloch e pelo matemático Walter Pitts. Tal neurônio possuía apenas uma saída, que era uma função da soma do valor de suas várias entradas (HAYKIN, 2001). Esse modelo de neurônio está representado na Figura 6.

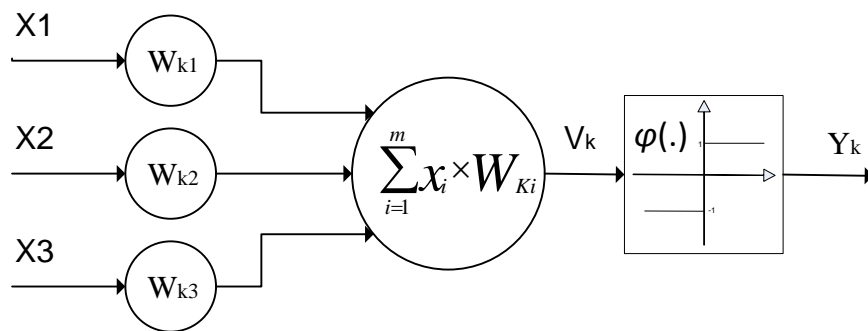


Figura 6 – Neurônio de McCulloch & Pitts.

Sua operação pode ser resumida da seguinte forma:

1. Os sinais são apresentados às entradas x_m ;
2. Cada sinal é multiplicado por um peso W_{km} que indica sua influência na saída do neurônio;
3. É feita a soma ponderada dos sinais V_k , produzindo um nível de atividade;
4. Se esse nível de atividade exceder certo limiar, a unidade ativa a sua saída Y_k .

O modelo apresentado a seguir, não indica somente a função de ativação limiar utilizada no neurônio de McCulloch e Pitts, mas sim uma função de ativação $\varphi(\cdot)$ que pode ser definida de várias formas. Também foi acrescentada uma polarização, ou bias, representada por b_k , que tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada da função de ativação.

O funcionamento deste neurônio tem o mesmo princípio de funcionamento do neurônio anterior e pode ser descrito pelas equações abaixo e pela Figura 7.

$$V_k = \sum_{i=1}^m W_{ki} \cdot x_i + b_k \quad (3.1)$$

$$y_k = \varphi(V_k) \quad (3.2)$$

Nessas equações:

i : é o índice do k -ésimo neurônio;

b_k : é o bias aplicado ao k -ésimo neurônio;

v_k : é à saída do combinador linear do k -ésimo neurônio, chamado de campo local induzido;

x_i : é o i -ésimo sinal de entrada do k -ésimo neurônio;

W_{ki} : é o i -ésimo peso sináptico de neurônio k ;

$\Phi(\cdot)$: é a função de ativação do k -ésimo neurônio.

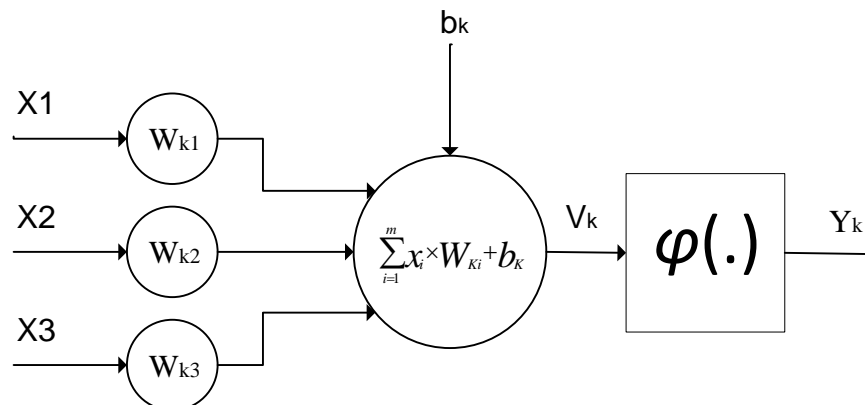


Figura 7 – Modelo geral do Neurônio.

O parâmetro externo bias pode ser incluído na formulação matemática como sendo um peso sináptico associado a uma entrada de valor constante unitário. Portanto, a representação matemática do neurônio pode ser simplificada, conforme a equação a seguir:

$$V_k = \sum_{i=1}^m W_{ki} \cdot x_i \quad (3.3)$$

$$y_k = \varphi(V_k) \quad (3.4)$$

Onde $x_0 = 1$ e $W_{k0} = b_k$.

Em uma notação matricial, pode-se obter a saída de um neurônio a partir da seguinte equação:

$$y_k = \varphi(\overrightarrow{W}_k \times \overrightarrow{x}^T) \quad (3.5)$$

Onde:

$\overrightarrow{W}_k = [W_{k0} \ W_{k1} \ W_{k2} \ \dots \ W_{km}]$ é o vetor de pesos sinápticos, incluindo o bias;

$\overrightarrow{x}^T = [x_0 \ x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]$ é o vetor contendo os sinais de entrada.

Assim, a saída do k-ésimo neurônio pode ser obtida realizando-se o produto interno do vetor de pesos sinápticos (incluindo o bias) pelo vetor de entrada transposto e aplicando esse resultado à função de ativação $\varphi(\cdot)$.

3.6 Tipos de Função de Ativação (HAYKIN, 2001):

(a) Função de Limiar – apresentada na Figura 8, é utilizada no neurônio de McCulloch & Pitts, com a seguinte definição:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & \text{se } v \geq 0 \\ 0, & \text{se } v < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

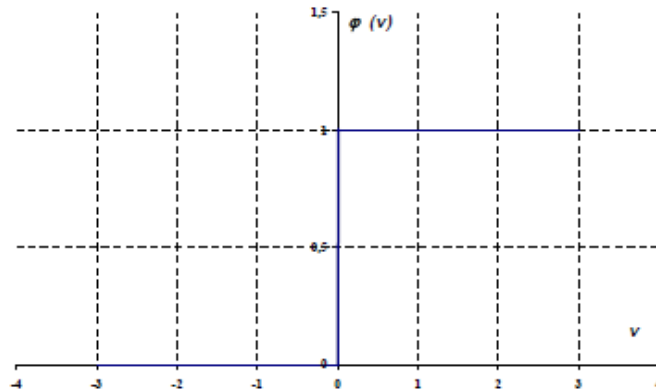


Figura 8 – Função de limiar.

(b) Função linear – apresentada na Figura 9, possui a seguinte definição:

$$\varphi(v) = v \quad (3.7)$$

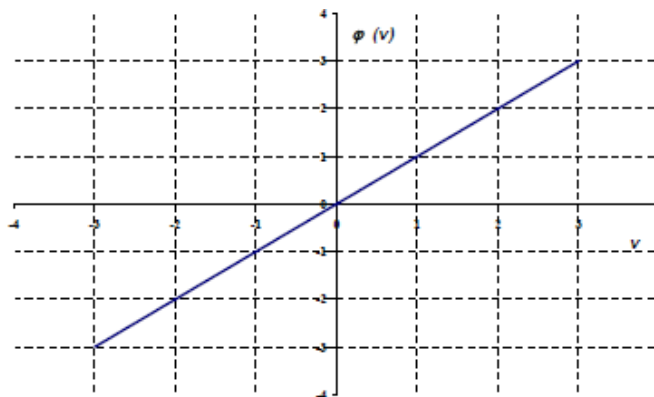


Figura 9 – Função linear.

(c) Função linear por partes – mostrada na Figura 10. Define-se por:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & \text{se } v \geq 1 \\ v, & \text{se } -1 < v < 1 \\ 0, & \text{se } v \leq -1 \end{cases} \quad (3.8)$$

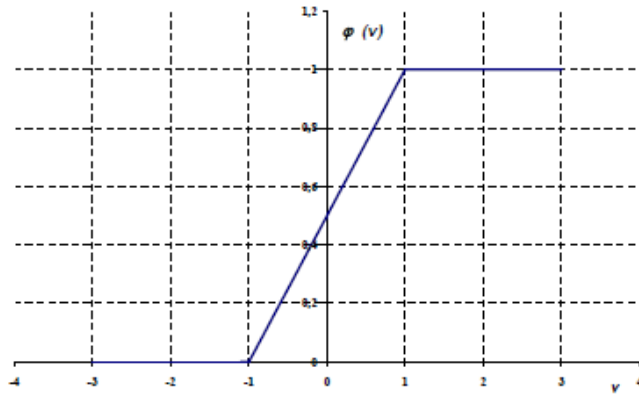


Figura 10 – Função linear por partes.

(d) Função sigmóide – é a função mais utilizada, definida por:

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}} \quad (3.9)$$

Onde a é o parâmetro de inclinação da função, como pode ser observado na Figura 11.

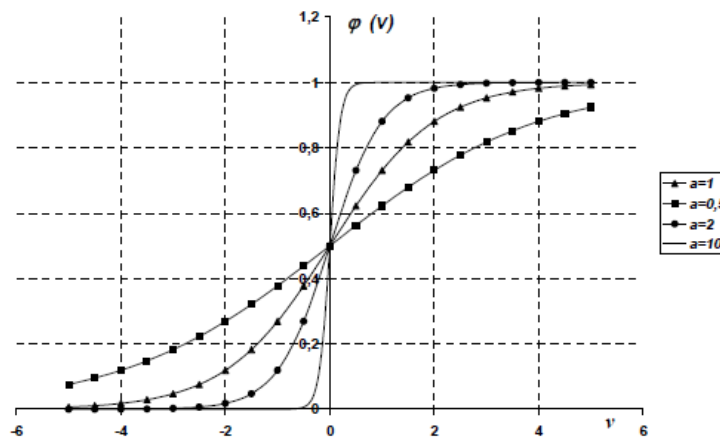


Figura 11 – Função sigmóide.

(e) Função Tangente Hiperbólica - similar à função sigmóide, porém assume valores entre 1 e -1, é representada por:

$$\varphi(v) = \tanh(a \times v) \quad (3.10)$$

Onde:

a é o parâmetro de inclinação da curva, como pode ser observado na Figura 12

v é o valor de ativação da unidade.

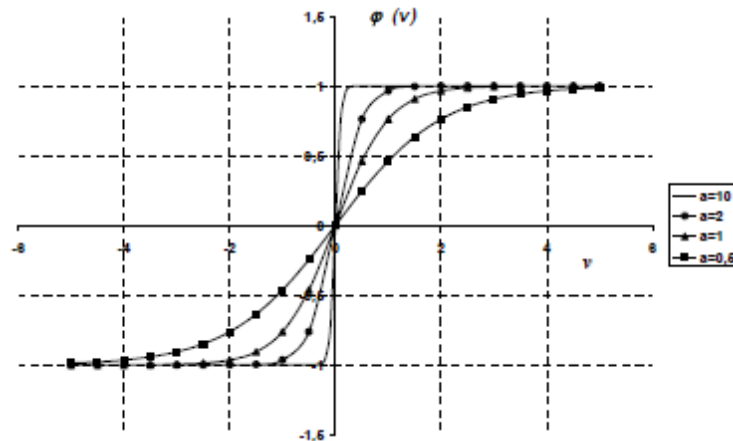


Figura 12 – Função tangente hiperbólica.

3.7 Arquitetura de Redes Neurais Artificiais

Como já mencionado, a rede neural artificial tem sua constituição baseada na interligação de neurônios artificiais. O modo pelo qual esses neurônios estão ligados entre si está diretamente associado ao algoritmo de aprendizagem utilizado no treinamento da rede.

Os três itens a seguir descrevem os três principais tipos de arquiteturas existentes. Essa divisão se dá conforme o número de camadas de neurônios e o tipo de ligação que ocorre entre essas camadas (BRAGA, A. P.; LUDERMIR T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F., 2000).

3.7.1 Rede Feedforward de Camada Única

É a forma mais simples de uma rede neural, onde os neurônios estão organizados em uma única camada. A rede recebe esse nome devido ao fato de não haver laços de realimentação. É também chamada de rede alimentada adiante, onde a camada de nós fornece os sinais de entrada para a camada de saída e não o contrário.

A representação desse tipo de arquitetura pode ser vista na Figura 13.

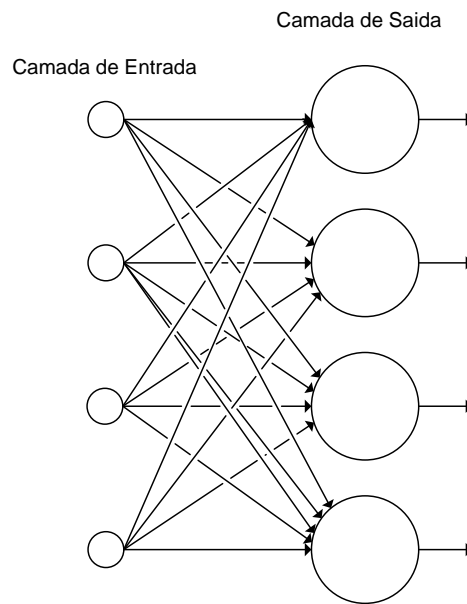


Figura 13 – Rede Feedforward de Camada Única.

O termo de camada única se refere ao fato de existir apenas uma camada de nós computacionais, neste caso, a camada de saída. A camada de entrada não é contada, pois nela não é realizado nenhum tipo de operação computacional.

3.7.2 Redes Feedforward com Múltiplas Camadas

Essa classe possui uma ou mais camadas ocultas, formada por neurônios intermediários. Sua função é intervir entre a entrada externa e a saída da rede. Com o acréscimo dessas camadas ocultas é possível obter informações de maior precisão.

A rede apresentada na Figura 14 é chamada de totalmente conectada, pois cada nó de uma camada está conectado a todos os nós da camada seguinte. Porém, se estiverem faltando algumas conexões, é dito que a rede é parcialmente conectada.

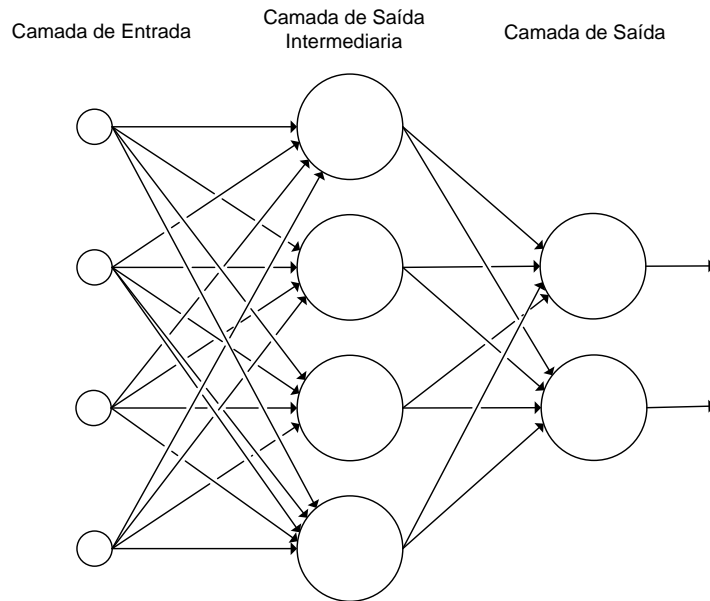


Figura 14 – Rede Feedforward com Múltiplas Camadas.

3.7.3 Redes Recorrentes

A rede neural recorrente se diferencia das demais por apresentar pelo menos um laço de realimentação. Sua representação pode ser vista através da Figura 15.

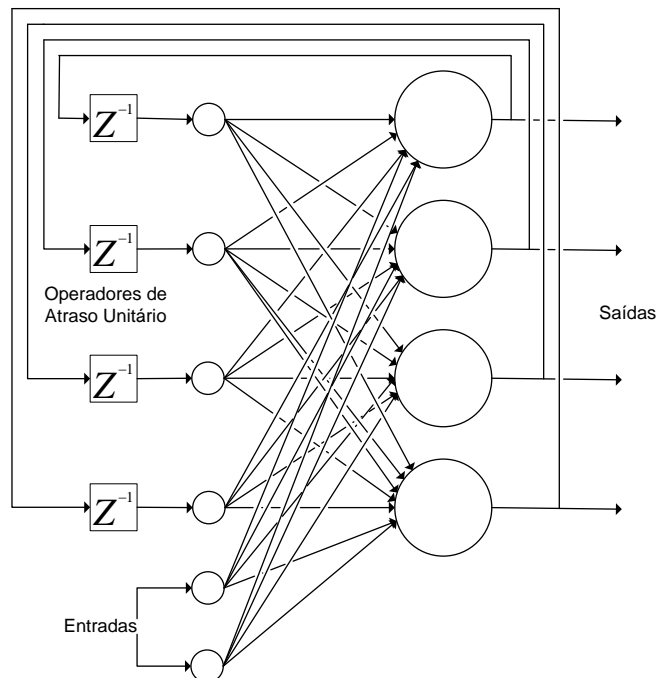


Figura 15 – Rede Neural Recorrente.

O operador Z^{-1} representa o atraso unitário, ou seja, as entradas estarão com um atraso de tempo.

3.8 Aprendizagem de Uma Rede Neural Artificial

A habilidade de aprender conforme variações em seu ambiente em busca de um melhoramento de seu desempenho é a característica mais importante de uma rede neural. O treinamento nada mais é que um processo iterativo de ajustes, aplicados aos pesos sinápticos da RNA. Quando a RNA obtém uma solução geral para uma determinada classe de problemas, dizemos que a aprendizagem ocorreu.

Basicamente a rede realiza seu aprendizado através de exemplos originados de casos reais. Ela extrai as regras básicas a partir dos exemplos, diferente da programação computacional, onde as regras são conhecidas previamente.

A seguir serão apresentadas duas metodologias de aprendizagem usadas mais frequentemente (BRAGA, A. P.; LUDERMIR T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F., 2000).

3.8.1 Aprendizado com o Professor

Também conhecido como treinamento supervisionado, o treinamento com o professor tem como propriedade o conhecimento prévio da informação sobre as classes a que pertence cada um dos padrões na fase de treinamento.

Basicamente, o sistema pode ser exemplificado como o professor que possui o conhecimento sobre o ambiente e esse conhecimento será representado por um conjunto de exemplos de entrada e saídas.

O erro é definido pela diferença do resultado obtido pela rede e o valor desejado. O ajuste é realizado via iterações, com objetivo de obter um professor ótimo em um sentido estatístico. Sendo assim, o conhecimento é transferido do professor para a rede neural através de treinamento. O professor será dispensado quando essa condição for alcançada.

3.8.2 Aprendizado sem Professor

Como o próprio nome sugere, não há professor para supervisionar o processo de aprendizagem, logo não existem exemplos a serem aprendidos pela rede. São identificadas duas subdivisões de aprendizagem, as quais são citadas a seguir:

- Aprendizagem por reforço: o aprendizado é feito por meio de interações com o meio ambiente. A única informação de realimentação fornecida é se uma determinada saída esta correta.

- Aprendizagem não Supervisionada: o sistema tenta se auto-organizar com base nas semelhanças entre os exemplos apresentados. O objetivo é descobrir informações significativas ou características nos dados e realizar essa descoberta sem um professor. A aprendizagem não supervisionada consiste em modificar os pesos sinápticos repetidamente em resposta a padrões de ativação, até que se desenvolva uma configuração final.

Para o treinamento de uma rede não supervisionada utilizam-se apenas valores de entrada, onde os neurônios são usados como classificadores e as entradas são elementos a serem classificados. É esperado que a rede avalie as relações entre os dados de entrada e produza sinais de saída correspondentes às categorias de entrada.

3.9 Considerações Finais

Nesse Capítulo foi realizado um estudo referente às redes neurais artificiais (RNA's).

Numa primeira etapa, fez-se uma breve analogia entre os neurônios biológicos e os artificiais, onde foram comparadas suas características e o princípio de funcionamento de cada um deles.

Em seguida foi discutida a estrutura das RNA's, na qual foram apresentados os tipos de arquiteturas mais utilizadas, bem como uma breve descrição do funcionamento das mesmas.

Por fim, foi realizado um estudo referente aos tipos de aprendizados mais utilizados para a realização de treinamentos de RNA's.

4 ALGORITMO PROPOSTO PARA A CORREÇÃO DOS SINAIS DISTORCIDOS POR SATURAÇÃO

4.1 Considerações Gerais

Neste Capítulo, aborda-se o processo de definição e avaliação das RNA's e o algoritmo proposto para correção dos sinais de correntes distorcidos por saturação.

Como visto no capítulo anterior, as simulações executadas serviram para a obtenção de uma base de dados, a qual foi constituída a partir de simulação de um sistema elétrico de potência (SEP), totalizando 256 casos a serem analisados. Foram variados parâmetros como tipo de curto-circuito, distância até o ponto de falta, ângulo de incidência de falta e o fluxo remanescente no TC.

Para o desenvolvimento dessa metodologia, empregou-se uma RNA que na verdade é constituída por apenas um único neurônio, desenvolvido no software MATLAB[®] através do uso de função apropriada para este fim, pertencente ao grupo específico de funções do *Neural Networks Toolbox*. Esse tipo de arquitetura geralmente é aplicado em tarefas de reconhecimento de padrões, aproximação funcional, identificação e controle. Portanto, tendo em vista a aproximação funcional realizada para a correção da saturação, optou-se pela utilização dessa arquitetura nos estudos realizados.

Os processos de detecção e correção dos sinais são abordados nos tópicos a seguir.

4.2 Detecção dos Intervalos de Saturação

Tendo em vista que o objetivo principal do trabalho proposto era realizar a correção dos sinais distorcidos, a detecção dos trechos distorcidos dos sinais de corrente secundária foi feita a partir da comparação entre o sinal distorcido e o sinal ideal de corrente.

A Figura 16 mostra um sinal de corrente secundária distorcida pelo efeito da saturação (i_{2e}) e a forma de onda de um sinal ideal (i_2). Durante os intervalos não saturados, a forma de onda é preservada. Entretanto, quando a saturação ocorre, o mesmo não é verificado, pois o erro da transformação excede os limites aceitáveis.

A detecção do início e do fim dos intervalos de saturação ocorre quando o valor da diferença entre a amostra atual de corrente secundária e a amostra correspondente do sinal primário, com seu valor dividido pela relação de transformação do TC, excede o valor limite definido para o erro de transformação. Quando a relação entre ambos os sinais for superior a um valor de erro determinado, um início de saturação fica caracterizado, alterando o valor do detector de um para zero, até o momento em que o fim do intervalo de saturação seja detectado.

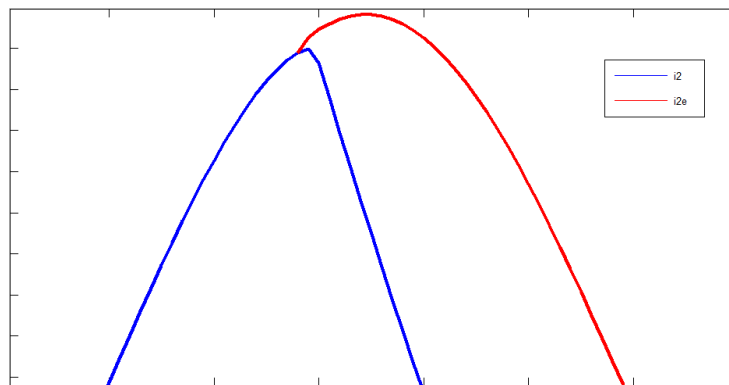


Figura 16 – Exemplo de sinal de corrente saturado e ideal.

A condição que determina a definição dos intervalos saturados é dada pela equação (5.1). Uma vez que esta seja verdadeira, fica caracterizado o início ou fim da saturação.

$$\frac{i_{2e}(n)}{i_2(n)} > \mathcal{E}_{Th} \quad (5.1)$$

Em (5.1), \mathcal{E}_{Th} representa o valor limite para o erro da estimativa, esse valor deve ser escolhido de forma a garantir uma maior precisão ao processo de detecção e pode variar conforme a amostragem do sistema. O valor de n representa o número da amostra atual.

4.3 Correção dos Intervalos de Saturação

Uma vez realizada a detecção dos intervalos saturados, o próximo passo é a correção dos mesmos. A rede neural proposta executa esta tarefa, corrigindo os trechos distorcidos da forma de onda da corrente secundária a partir do cálculo de constantes características desse sinal, dadas pelos pesos encontrados pelo neurônio para aproximação entre a matriz de entrada e o

vetor de saída. A cada ciclo, esses parâmetros são recalculados, permitindo assim a correção de todo o sinal. Uma característica que favorece o uso dessa técnica é a não necessidade de janelas com ciclos completos para a obtenção desses valores, ou seja, são utilizados como referência apenas pontos antes dos intervalos de saturação, tomados a partir de referência a partir de um ponto de referência. Este ponto é definido como a primeira amostra positiva após a passagem do sinal por zero. Essa característica garante uma resposta mais rápida na correção dos sinais saturados.

Com base no método de ajuste de curvas proposto por PAN (J. PAN, K. VU e Y. HU, 2004), o algoritmo proposto estima as constantes do sinal, que são dadas pelos pesos calculados pelo neurônio, obtidos a partir do Método de Levenberg-Marquardt, próprio do modelo matemático do neurônio da função utilizada. A equação (5.2) representa a aproximação matemática do comportamento das correntes de curto-circuito nos intervalos sem saturação:

$$I_k = A \cos\left(2\pi k \frac{f}{fsamp} + \varphi\right) + B e^{\lambda k} \quad (5.2)$$

Em (5.2) $fsamp$ representa a frequência de amostragem do sistema, A , B , φ , λ são os parâmetros desconhecidos. A equação pode ser reescrita pela expansão da parcela cossenoidal somada a série de Taylor de primeira ordem da parcela exponencial, conforme (5.3).

$$I_k = (A \cos \varphi) \cos \omega k + (-A \sin \varphi) \sin \omega k + B + \lambda k \quad (5.3)$$

Em (5.3) ω representa $2\pi \times f / fsamp$. Substituindo os termos $(A \cos \varphi)$ e $(-A \sin \varphi)$ por C_1 e C_2 respectivamente, obtém-se (5.4).

$$I_k = C_1 \cos \omega k + C_2 \sin \omega k + B + \lambda k \quad (5.4)$$

Os parâmetros C_1 , C_2 , B e λ podem ser facilmente obtidos a partir do uso de um neurônio artificial, conforme descrito anteriormente. A equação (5.5) é formulada a partir de uma porção não saturada do sinal, equivalente ao trecho não saturado anterior a cada intervalo de saturação. Como já mencionado, esse trecho é tomado a partir do primeiro ponto positivo após a passagem por zero, considerado o ponto de referência (RP), até o ponto anterior a primeira amostra considerada pertencente ao intervalo de saturação. Ao RP, atribui-se $k=1$, o qual é atualizado para cada ciclo do sinal. Quando o valor do detector muda de zero para um, a amostra (primeira da região saturada) recebe o valor de k , contado a partir do RP.

$$\begin{bmatrix} \cos\omega(k_i - m_i) & \text{sen}\omega(k_i - m_i) & k_i - m_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos\omega(k - m) & \text{sen}\omega(k - m) & k - 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \lambda \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_2(k_i - m_i) \\ \vdots \\ i_2(k - 1) \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Em (5.5), m_i representa o número de pontos antes de cada intervalo de saturação a serem utilizados nos cálculos, definido pelo número de amostras consideradas a partir do RP. A Equação (5.5) pode ser representada de uma forma mais simples por (5.6).

$$MP = I \quad (5.6)$$

Os parâmetros do vetor P são dados pelos pesos obtidos pela rede e calculados para cada intervalo de saturação, assim que a matriz M é preenchida. Em seguida, os valores obtidos para os parâmetros são colocados em (5.4) e os valores de cada I_k , pertencentes ao respectivo intervalo de saturação, são calculados. Uma melhor representação do funcionamento do neurônio aplicado pode ser visualizada através da Figura 17.

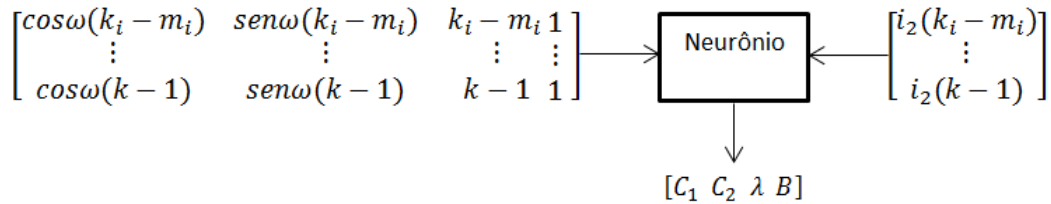


Figura 17 – Representação do funcionamento do neurônio

Fazendo uma relação com a Equação (5.6), tem-se que os parâmetros M e I correspondem às entradas do neurônio e os valores de P correspondem a saída.

O erro transitório foi calculado conforme (5.7), onde n é a relação de transformação, i'_2 é a corrente corrigida, i_1 é a corrente primária e I_1 é o valor RMS da corrente primária.

$$\text{erro}(\%) = \frac{n \cdot i'_2 - i_1}{\sqrt{2} \times I_1} \times 100\% \quad (5.7)$$

Além disso, um filtro de Fourier do ciclo completo foi utilizado para obter os valores RMS dos sinais analisados e validar os resultados da compensação.

4.4 Considerações Finais

Uma nova metodologia, que visa à correção dos sinais distorcidos em virtude da saturação dos TC's foi proposta e discutida neste Capítulo, tendo como base o uso de redes neurais artificiais.

É esperada uma redução do tempo para o cálculo das variáveis desconhecidas, bem como na correção dos sinais, devido ao processo de correção não necessitar de um período de ciclo completo para realizar essa correção.

5 O SISTEMA TESTE

5.1 Considerações Gerais

Este Capítulo tem como objetivo trazer uma breve história sobre o programa *Alternative Transients Program (ATP)*, utilizado para criar os casos de curtos-circuitos analisados. Juntamente, é apresentado o sistema elétrico estudado, bem como suas características e as variações de parâmetros utilizados nas simulações, a fim de se obter diversos casos diferentes, com o objetivo de formar um banco de dados composto pelos sinais a serem corrigidos pelo algoritmo proposto.

Ainda, são apresentados alguns gráficos que ilustram as formas de onda obtidas em algumas situações simuladas.

5.2 Histórico do Programa ATP

A área de transitórios eletromagnéticos envolve uma ampla gama de fenômenos, provocados por variações súbitas de tensão ou corrente nos sistemas elétricos onde, na maioria dos casos, inicialmente o sistema encontra-se operando em regime permanente. Essas variações súbitas podem ser provocadas por operação de disjuntores, descargas atmosféricas, faltas no sistema, entre outros fatores.

Um estudo de transitório pode levar a determinação dos motivos que provocaram a perturbação no sistema, além de permitir a especificação dos dispositivos e equipamentos do sistema elétrico.

O programa *Electro-Magnetic Transients Program (EMTP)*, do qual o ATP é originado, foi desenvolvido na década de 60 por Herman W. Dommel. Inicialmente, simulava circuitos monofásicos mediante modelos de indutância, capacitâncias e resistências em linhas sem per-

das. Com o passar do tempo o programa passou por diversas modificações (COURY, CAMPOS e TAVARES, 1998).

A partir de 1973, Scot Meyer assumiu a coordenação do desenvolvimento do programa, fazendo com que este se tornasse uma poderosa ferramenta em estudos de transitórios de sistemas elétricos. Uma divergência entre Meyer e os investidores do programa resultou na criação de uma nova versão do EMTP. Esta nova versão foi denominada *Alternative Transients Program (ATP)* (COURY, CAMPOS e TAVARES, 1998)..

O ATP é um programa digital que dispõem de versões específicas para diversos tipos de computadores e sistemas operacionais, sendo mais apropriado a microcomputadores e computadores de grande porte.

O programa ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com diferentes configurações, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. Como o programa não permite obter uma solução contínua no tempo são calculados valores para intervalos de tempo discretos.

O programa permite a representação de não-linearidade, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, entre outros equipamentos do sistema elétrico de potência.

De forma geral, são considerados parâmetros em componentes de fase e em sequência zero e positiva, dependendo do modelo.

5.3 Sistema Elétrico Estudado.

Os sinais analisados foram obtidos seguindo o sistema da Figura 16:

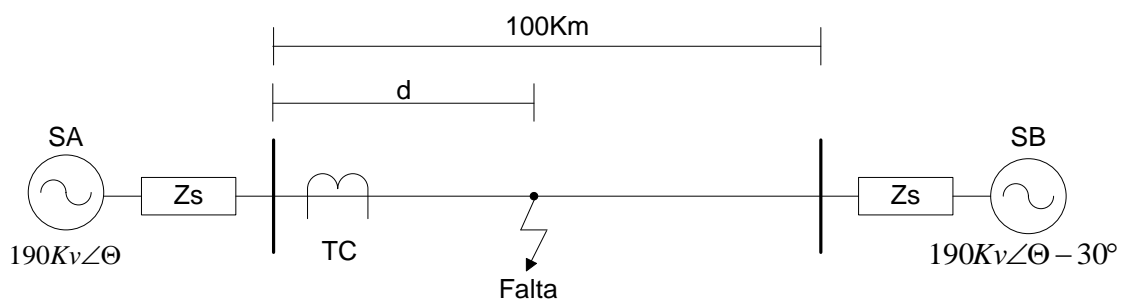


Figura 18 - Sistema Teste.

A Figura 18 nada mais é do que o diagrama unifilar do circuito implementado no software ATP (Figuras 19 e 20). A frequência nominal do sistema é 60 Hz. SA e SB são geradores

equivalentes, cujas impedâncias de sequência zero (Z_{S0}) e de sequência positiva (Z_{S1}) são iguais a $3,681+j24,515\Omega$ e $0,819+j7,757\Omega$, respectivamente. O valor eficaz de tensão nas fontes é de 190 kV e o ângulo de SB esta atrasado 30 graus em relação ao ângulo de SA. O comprimento total da linha de transmissão é de 100 km. A linha possui impedância total de sequência zero $Z_{L0} = 0,1841 + j1,2258 \Omega/\text{km}$ e impedância de sequência positiva $Z_{L1} = 0,041 + j0,3878 \Omega/\text{km}$. A saturação do TC é simulada para faltas localizadas em 5%, 15% e 25% do comprimento da linha de transmissão. A relação de impedâncias utilizadas no ATP, já convertidas de Ω/km para Ω , antes e após o ponto de falta é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Relação de Impedâncias

Impedância da Linha		
% da Linha	Antes do Ponto de Falta	Após o Ponto de Falta
5%	$Z_{L0} = 0,9295 + 6,126 \Omega$ $Z_{L1} = 0,205 + j1,936 \Omega$	$Z_{L0} = 17,4895 + j116,451 \Omega$ $Z_{L1} = 3,485 + j32,963 \Omega$
15%	$Z_{L0} = 2,7615 + j18,387 \Omega$ $Z_{L1} = 0,615 + j5,817 \Omega$	$Z_{L0} = 15,6485 + j104,193 \Omega$ $Z_{L1} = 3,485 + j32,963 \Omega$
25%	$Z_{L0} = 4,6025 + j30,645 \Omega$ $Z_{L1} = 1,025 + j9,695 \Omega$	$Z_{L0} = 13,8075 + j91,935 \Omega$ $Z_{L1} = 3,075 + j29,085 \Omega$

Além da variação do ponto de falta, foram também adotados diferentes valores de frequência de amostragem, os quais foram estipulados em 5760 Hz (96 amostras/ciclo) e 1920 Hz (32 amostras/ciclo).

O modelo do transformador utilizado nas simulações possui uma relação de transformação de 2000:5. A resistência e a indutância do secundário do transformador são respectivamente de $0,5 \Omega$ e $0,3 \text{ mH}$. A carga foi mantida constante durante as simulações, com valor fixado em 4Ω puramente resistivo.

Considerando também uma variação do fluxo remanescente, o ramo de magnetização do TC foi representado por um indutor não linear Tipo-96. A característica de histerese foi gerada usando a função HYSDAT, um programa auxiliar do EMTP, para 2,05 A e 1,5 V como joelho da curva. Para as simulações, foram utilizados valores de 80%, 50%, 25% e 10% do valor integral. A relação do valor percentual com o valor real é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 –Relação de Fluxo Residual

% do Fluxo Máximo	Valor Real Utilizado
80%	1,208 V
50%	0,755V
25%	0,3775
10%	0,151

Outro parâmetro variado foi o ângulo de incidência de falta. Foi verificado que uma passagem por zero da onda de tensão da fase A ocorria exatamente aos 0,33333334 segundos para o sistema simulado. Esse instante foi atribuído para uma falta com ângulo incidência de 0°. Foram utilizados nas simulações valores de 0°, 30°, 45°, 50°, 60° e 90° como ângulos de incidência de falta. Essa variação tem como objetivo observar a relação entre a amplitude da onda de corrente e a saturação resultante.

Vale ressaltar que a variação do ângulo de falta foi realizada apenas para os curtos localizados em 5% da linha de transmissão, visto que esse seria o caso mais grave, pois se trata de uma falta mais próxima ao gerador. Dessa forma, se os resultados forem satisfatórios para estes casos, fica implícito que para os demais casos a resposta será satisfatória.

A relação entre o ângulo de falta utilizado e o instante no tempo em que ele ocorre é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Relação entre Ângulo de falta e Instante no Tempo

Ângulo (°)	Tempo (s)
0°	0,33333334 s
30°	0,334722229 s
45°	0,3354166737 s
50°	0,335648155 s
60°	0,336111118 s
90°	0,3375000075 s

Foram realizadas simulações para curtos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos. A relação de todos os parâmetros variados, os valores utilizados para os mesmos, bem como o número total de casos criados são descritos na tabela abaixo.

Tabela 3.4 – Relação de Número de Casos Simulados

Parâmetro	Valores
Amostras por Ciclo	96, 36
Fluxo Residual	10%, 25%, 50%, 80%
Distância de Falta (% da LT)	5%, 15%, 25%
Ângulo de Falta (para 5% da LT)	0°, 30°, 45°, 50°, 60°, 90°
Tipos de Curto	4
Total de Casos	256

Os circuitos montados no software ATP, a partir dos dados anteriormente descritos, se encontram representados nas Figuras (19) e (20), onde o primeiro foi utilizado para simular faltas à terra e o segundo, para simulação de curtos-circuitos bifásicos que não envolvem a terra.

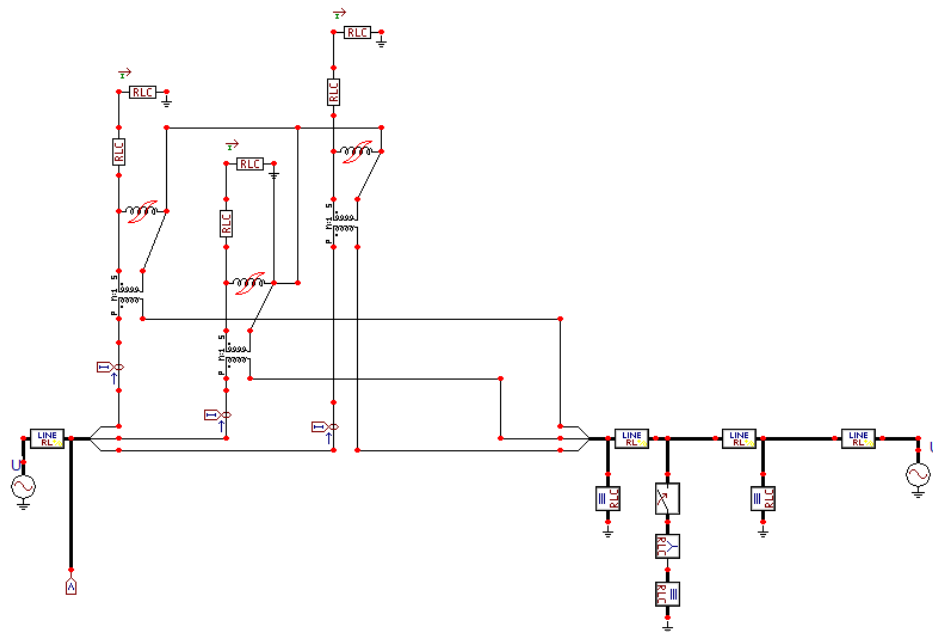


Figura 19 – Circuito para faltas entre fases e terra.

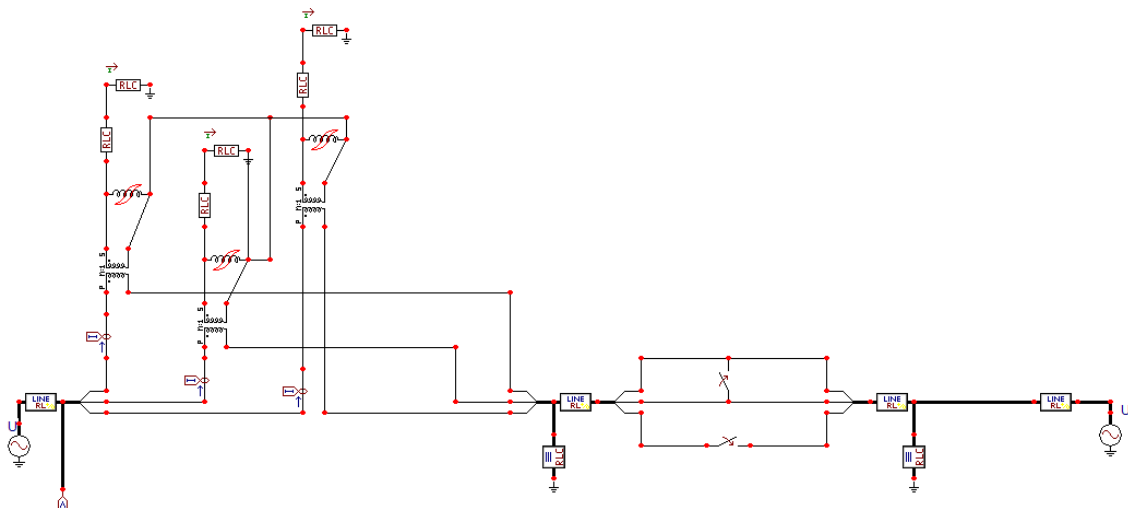


Figura 20 – Circuito para falta entre fases.

Basicamente, uma vez inseridos os valores iniciais de cada componente, o próximo passo é ajustar o tempo de fechamento das chaves entre as fases a fim de simular o curto-circuito desejado. Esse tempo a ser ajustado trata-se da relação entre o instante no tempo e o ângulo de falta desejado.

A Figura 20, como já mencionado anteriormente contém a presença do elemento terra e chave de fechamento para simular o curto, a qual permite a possibilidade do fechamento das chaves nas três fases, sendo necessário somente o ajuste de tempo para as fases que se deseja simular o curto.

5.4 Exemplos de Curtos Simulados

Uma vez inseridos os parâmetros que caracterizam o sistema a ser simulado, o ATP oferece uma gama de sinais de resposta. Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados apenas os sinais de Corrente primária (ideal) e secundária (distorcida), referentes à Fase A do sistema. Como já mencionado, são esses sinais distorcidos gerados que compõem o banco de sinais a serem corrigidos pelo algoritmo desenvolvido.

A Figura 21 é um exemplo do sinal de corrente gerado para um curto trifásico-terra em 5% da linha de transmissão, com 80% de fluxo residual e um ângulo de falta de 90° (no instante de 0,33333334 segundos), tanto no primário, quanto no secundário do TC.

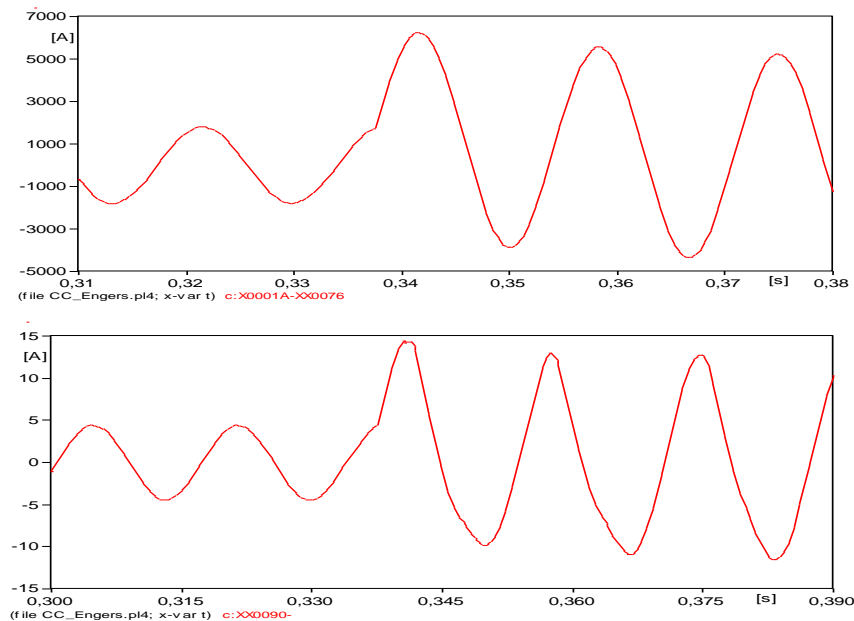


Figura 21 – Sinais de corrente para um curto trifásico-terra. (a) Sinal no Primário do TC. (b) Sinal no Secundário do TC

De modo semelhante, a Figura 22 mostra a forma de onda do sinal de corrente em ambos os lados do TC curto bifásico-terra em 5% da linha de transmissão, com 80% de fluxo residual e um ângulo de falta de 0° (no instante de 0,33333334 segundos).

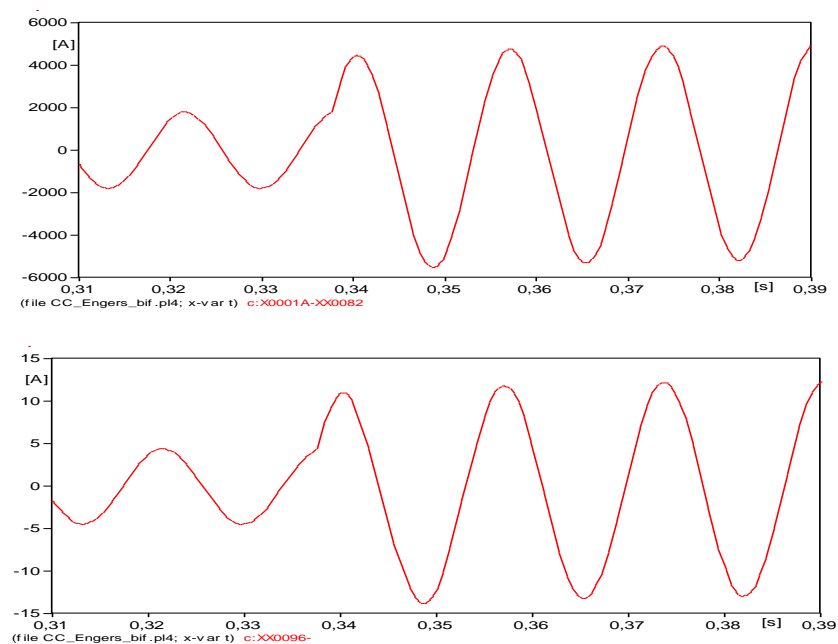


Figura 22 – Sinais de corrente para um curto bifásico. (a) Sinal no Primário do TC. (b) Sinal no Secundário do TC

5.5 Considerações Finais

Neste Capítulo foi realizada uma breve apresentação do software utilizado para realização das simulações de curto-circuito, o EMTP-ATP (*Alternative Transients Program*).

Outro ponto abordado foi à relação de parâmetros utilizados na constituição do sistema elétrico simulado e as variações de parâmetros aplicadas.

Foram apresentados os modelos dos dois circuitos construídos no ATP, sendo estes para simulação de faltas com a presença do elemento terra e para simulação de curtos entre fases. Além disso, foram mostrados dois exemplos de sinais gerados, para diferentes tipos de curto, que fazem parte do banco de sinais.

A partir desses dados, o algoritmo proposto foi testado e os resultados obtidos são mostrados no Capítulo seguinte.

,

6 SIMULAÇÕES E ANÁLISES DOS RESULTADOS

6.1 Considerações Gerais

Uma vez apresentadas as características dos métodos de detecção e compensação dos efeitos da saturação, neste Capítulo, serão apresentados os resultados obtidos pela metodologia proposta.

São apresentados 5 casos de um total de 256 simulações realizadas. Os resultados descritos nesta Seção apresentam diferentes condições de curto-circuito, a fim de observar o funcionamento do algoritmo proposto para diversas situações.

6.2 Resultados Obtidos

6.2.1 Falta Trifásica-Terra: 5% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 60°:

A Figura 23 apresenta o sinal de corrente saturado juntamente com o a sua correção. Um total de 10 ciclos encontram-se distorcidos, sendo que todos foram corrigidos. Observa-se também a atuação do detector bem como o erro transitório em cada ciclo. O valor máximo de erro transitório percentual encontrado não ultrapassou 26,5%, ocorrendo durante o primeiro trecho distorcido da forma de onda.

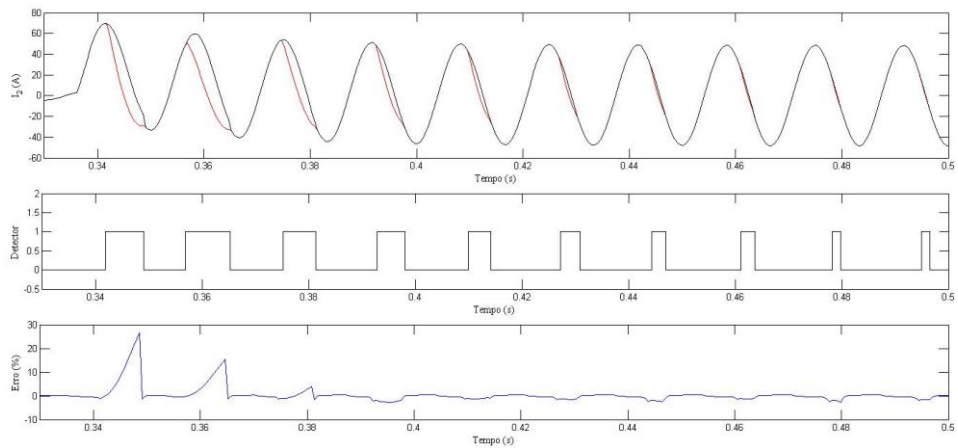


Figura 23 – Resultados Falta Trifásica: 5% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 60°.

O Sinal RMS corrigido aproximou-se significativamente do sinal ideal, apresentando uma excelente melhoria em relação ao sinal distorcido, como pode ser observado na Figura 24.

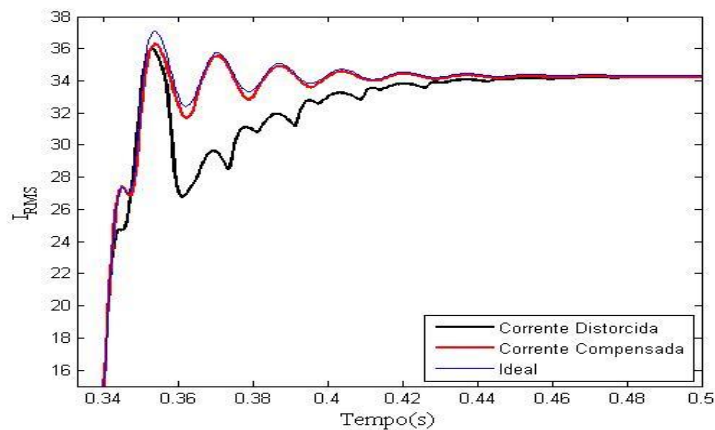


Figura 24 – Valores RMS para uma Falta Trifásica: 5% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 60°.

6.2.2 Falta Bifásica-Terra: 5% da Linha, 25% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 50°:

De modo semelhante ao caso anterior, observam-se trechos distorcidos nos 10 primeiros ciclos após a incidência do curto-circuito. Neste caso, o erro transitório máximo foi de 23%, novamente ocorrido durante o trecho corrigido.

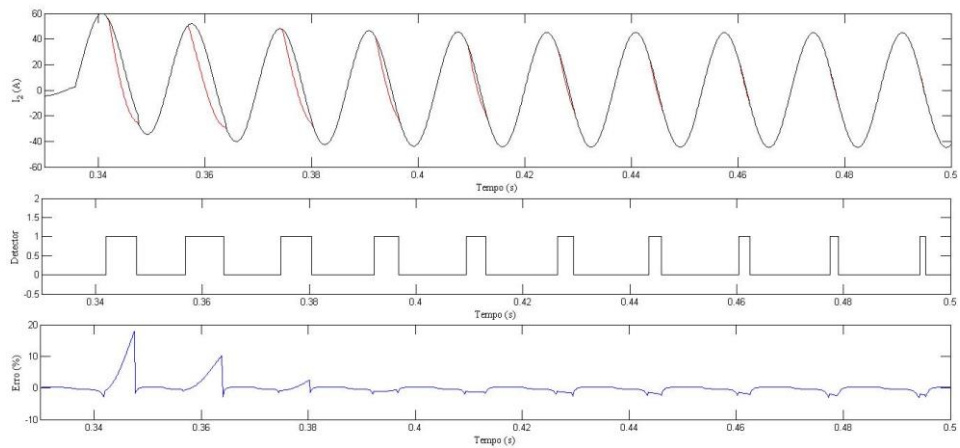


Figura 25 – Resultado Falta Bifásica: 5% da Linha, 25% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 50°.

Novamente, pode-se observar uma significativa aproximação entre os sinais RMS corrigido e ideal a partir da Figura 26, satisfazendo a tarefa da compensação das distorções, uma vez que os relés de proteção baseiam-se em valores RMS para determinação de sua atuação.

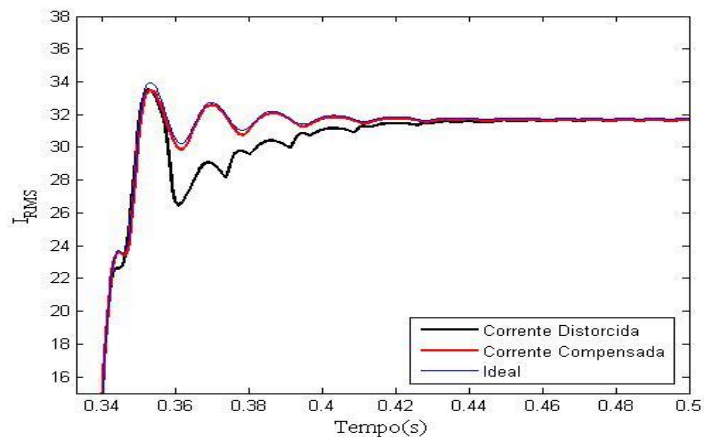


Figura 26 – Valores RMS Falta Bifásica: 5% da Linha, 25% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 50°.

6.3 Falta Bifásica-Terra: 5% da Linha, 50% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 45°:

Neste caso, observou-se um erro máximo transitório de 30%. Este valor é mais elevado em relação aos apresentados anteriormente e se deve, principalmente, ao maior nível de fluxo residual no TC e ao ângulo de incidência de falta, o que implica na utilização de um menor trecho saudável a ser utilizado pelo algoritmo de correção, o que prejudica a estimação de parâmetros. Contudo, a partir do segundo ciclo, observa-se uma significativa redução desse

erro, bem como a qualidade da correção dos demais ciclos que apresentam saturação, conforme a Figura 27, comprovando mais uma vez a eficácia do algoritmo proposto.

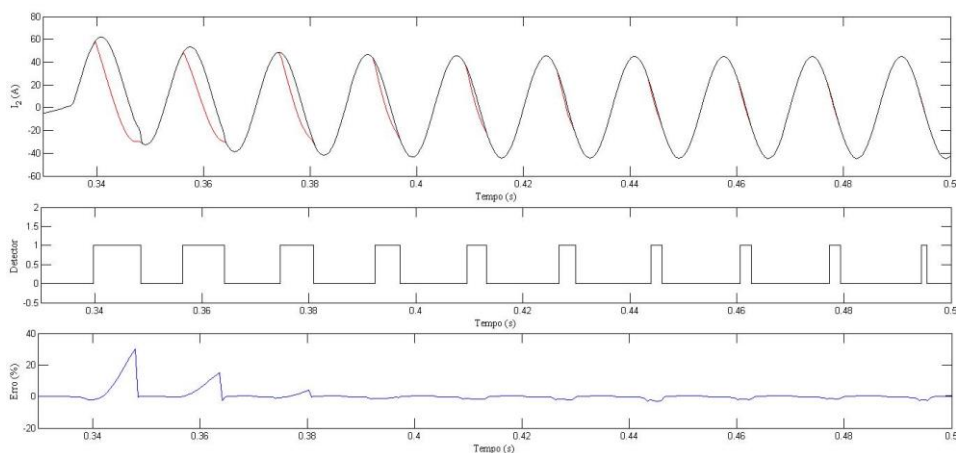


Figura 27 – Resultado Falta Bifásica-Terra: 5% da Linha, 50% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 45°.

O sinal RMS corrigido apresenta uma pequena diferença em relação ao ideal. Porém, quando comparado ao distorcido, a melhoria se torna notória, Esse comportamento é mostrado na Figura 28.

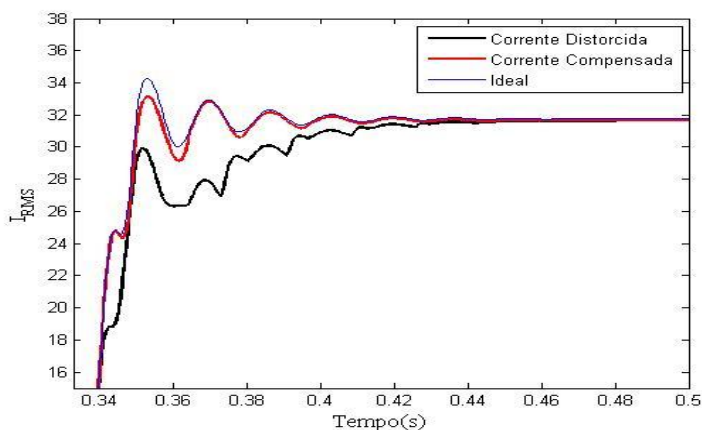


Figura 28 – Valores RMS Falta Bifásica-Terra: 5% da Linha, 50% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 45°

6.4 Falta Monofásica-Terra: 25% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°:

Devido ao fato de neste caso a falta ocorrer a uma maior distância em relação ao TC e existir uma menor presença de fluxo residual no núcleo do mesmo, o erro máximo da correção não ultrapassou 7,5%. Diferentemente dos casos anteriores, apenas 6 ciclos apresentaram-

se distorcidos. Novamente, todos os intervalos de saturação verificados na forma de onda da corrente secundária foram adequadamente compensados pelo algoritmo proposto. Isto pode ser visto na Figura 29.

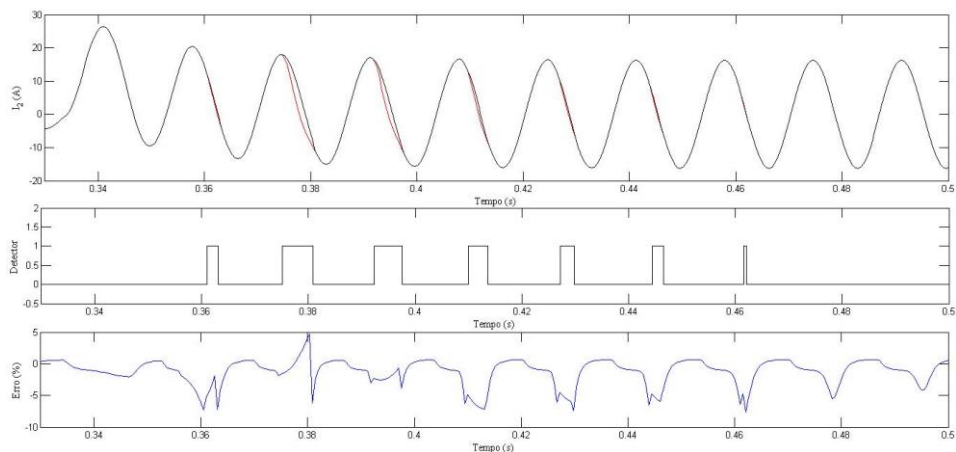


Figura 29 – Resultado Falta Monofásica-Terra: 2 5% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°

De modo semelhante aos casos anteriores, o sinal RMS corrigido apresenta grande melhora em relação aos valores RMS do sinal distorcido, aproximando-se significativamente dos valores ideais. Esse desempenho pode ser observado na Figura 30.

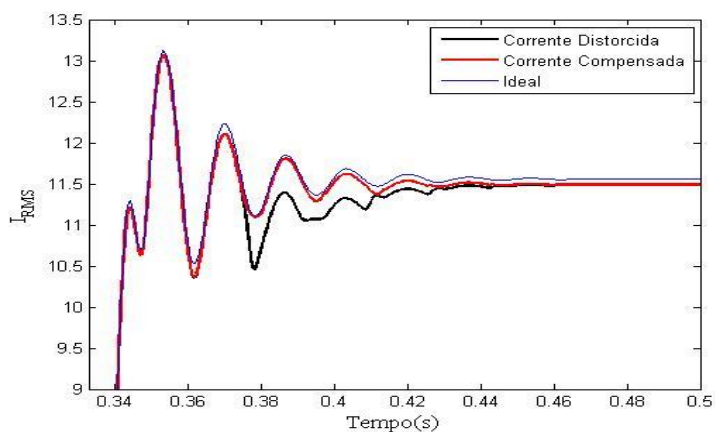


Figura 30 – Valores RMS Falta Monofásica-Terra: 25% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 32 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°.

6.5 Falta Bifásica: 15% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0°:

Nesse caso, o erro máximo produzido pela compensação do sinal distorcido não excedeu 29%. Este erro, mais elevado quando comparado a casos anteriores, ocorre em decorrência do

ângulo de incidência de falta ser de 0° , o que implica em uma corrente de curto-circuito de maior magnitude, o que provoca uma distorção mais severa durante o primeiro ciclo, prejudicando a estimação dos parâmetros por parte do algoritmo proposto. Apesar disso, técnica proposta apresentou um bom desempenho, realizando a correção do sinal distorcido de forma satisfatória em todos os ciclos detectados. Isto pode ser observado através da Figura 31.

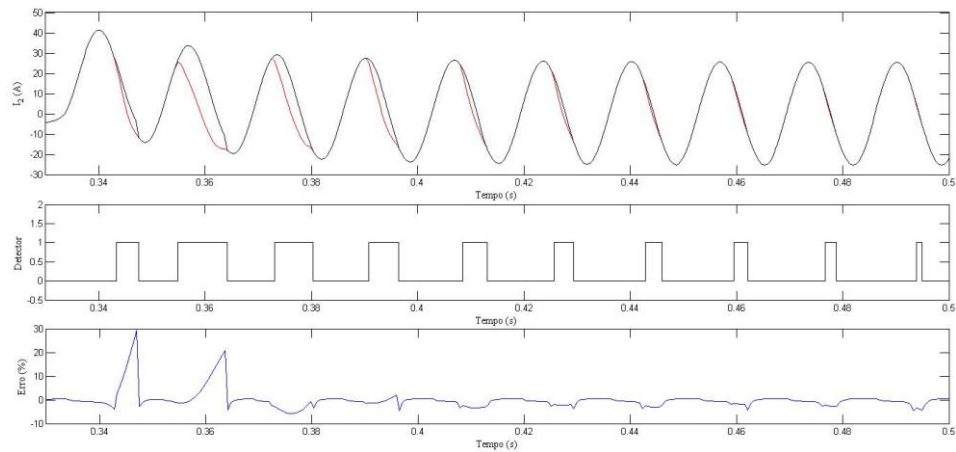


Figura 31 – Resultado Falta Bifásica : 15% da Linha, 10% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0° .

O sinal RMS corrigido, assim como para os casos apresentados anteriormente, aproximou-se significativamente do ideal, comprovando a eficácia da metodologia. Isto pode ser visto na Figura 32.

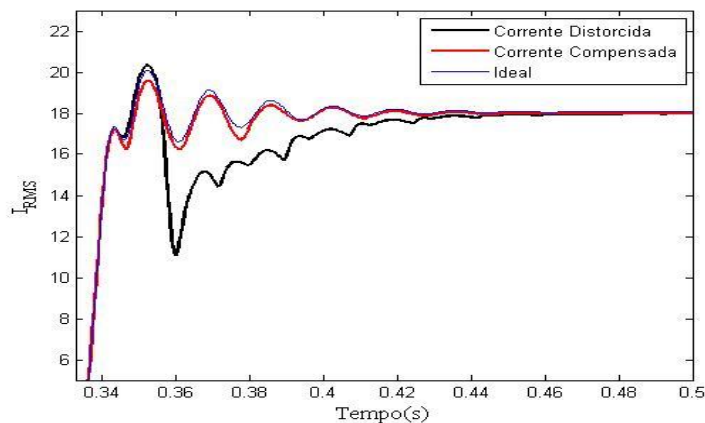


Figura 32 – Valores RMS Bifásica: 25% da Linha, 15% de Fluxo Residual, 96 Amostras por Ciclo e Ângulo de Falta de 0° .

6.6 Considerações Finais

Este capítulo teve como objetivo apresentar parte dos resultados obtidos pela técnica de correção proposta, além de descrever o bom desempenho verificado durante a correção dos sinais distorcidos por saturação.

Os casos apresentados foram escolhidos de forma a conter uma maior gama de parâmetros variados. Observou-se que independente do parâmetro selecionado, o algoritmo obteve uma boa resposta, principalmente para valores RMS, o que comprova a eficácia da metodologia proposta, uma vez que relés de proteção utilizam valores RMS para determinar sua atuação, promovendo a abertura dos disjuntores.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma nova metodologia para correção dos intervalos distorcidos na forma de onda dos sinais de corrente secundária, obtidos a partir de TC's saturados. Tal técnica é fundamentada em Redes Neurais Artificiais, de modo a determinar parâmetros característicos do sinal da corrente de curto-circuito e, a partir desses parâmetros, promover a correção dos trechos distorcidos.

O estudo preliminar sobre o comportamento dos TC's demonstrou quais são os fatores que influenciam na saturação de seu núcleo.

O programa ATP foi utilizado para geração dos casos a serem corrigidos, juntamente do programa MATLAB, usado na construção do algoritmo de correção. Foi criado um total de 256 casos a serem corrigidos

Além disso, a utilização de um neurônio artificial aplicado para este fim constitui-se em uma metodologia inovadora, que se mostra promissora para correção dos efeitos causados pelo fenômeno destacado neste trabalho. Tal técnica pode substituir o uso de algoritmos de correção baseados em processos iterativos e que exigem um grande esforço computacional.

Vale ressaltar que o uso de somente pontos anteriores aos intervalos de saturação promoveu maior velocidade de processamento, além de alta qualidade na correção dos sinais distorcidos, sem grandes esforços computacionais.

Sendo assim, o desempenho da técnica proposta se mostrou satisfatório e condizente com uma possível implementação prática, de modo a aumentar a confiabilidade dos sistemas elétricos de potência, além de garantir maior robustez dos esquemas de proteção frente a situações de saturação dos TC's.

7.1 Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, citam-se:

- * Comparação entre o desempenho da metodologia proposta e de outras técnicas existentes;

- * Possível aprimoramento da técnica proposta, variando as funções de ativação do neurônio ou aplicando um número maior de neurônios; e

- * Avaliação do desempenho de diferentes relés de proteção associados à metodologia proposta, diante de situações que envolvam a saturação dos transformadores de corrente;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, A. P.; LUDERMIR T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. (2000). **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: Editora LTC.

COURY, D. V.; CAMPOS, P. E G.; TAVARES, M. C. (1998). Utilização do ATP-EMTP para Estudo da Proteção Diferencial dos Transformadores de Potencia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 12., 1998, Uberlândia.

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, pp. 1-6, Caracas, Venezuela, Agosto 2006.

HAYKIN, Simon. **Redes Neurais - Princípios e Prática**, Bookman, 2001.

J. Pan, K. Vu e Y. Hu, "An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.19, pp. 1623-1628, Outubro 2004.

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.

KINDERMANN, G., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Editora da UFSC, Volume 1, 1ª Edição, 1999.

KOJOVIC, Lj. A., **Impact of Current Transformer Saturation on Overcurrent Protection Operation**. Proceedings of the 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, pp. 1078-1083, Chicago, IL, USA, Julho 2002.

KOVÁCS, ZSOLT LÁSZLÓ. **Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações**. 3ª d, São Paulo: Livraria da física, 2002.

MOONEY, P. E. J., **Distance Element Performance Under Conditions of CT Saturation**. Proceedings of the 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, Vol. 1, pp. 491-497, College Station, TX, USA, Abril 2008.

REBIZANT, W.; FESER, K.; HAYDER, T. & SCHIEL, L., **Differential Relay with Adaptation During Saturation Period of Current Transformers**. Proceedings of the 14th Power System Protection Conference, pp. 124-129, Bled, Slovenia, Setembro/Outubro 2004.

ZOCHOLL, S. E., **Análise e Aplicação de Transformadores de Corrente**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 2004.