



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

FERRAMENTAS INTELIGENTES APLICADAS À PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

CRISTIANO TEXEIRA VIEIRA

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira,
D.Sc.

Rio de Janeiro

Agosto de 2013

**FERRAMENTAS INTELIGENTES APLICADAS À PROTEÇÃO
DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

CRISTIANO TEIXEIRA VIEIRA

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.
(Orientador)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.
(Examinador)

Francis de Abreu Oliveira, Engenheiro.
(Examinador)

Raphael Lorena Pinto, Engenheiro.
(Examinador)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Agosto de 2013

Vieira, Cristiano Teixeira

Ferramentas Inteligentes Aplicadas à Proteção Diferencial de Transformadores de Potência / Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica/ Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

XIII, 91 p.: il. 29,7 cm.

Orientador: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 87 - 91.

1. Proteção Diferencial. 2. Transformadores de Potência. 3. Ferramentas Inteligentes.

I. de Oliveira, Sebastião Ércules Melo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. III. Escola Politécnica. IV. Departamento de Engenharia Elétrica. V. Título

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

Albert Einstein

Agradecimentos

Antes de tudo quero agradecer a Deus por ter me guiado e dado forças durante toda essa jornada que está chegando ao fim, pois sinto-me muito realizado com os resultados que venho alcançando em minha vida.

Sou um ser iluminado, pois durante a minha trajetória de vida encontrei seres humanos extraordinários que contribuíram para minha formação e sem os quais eu não saberia onde estaria nesse momento.

Durante toda a minha vida acadêmica estive acompanhado da minha namorada Luciana, a qual me apoiou e me deu forças para chegar onde cheguei. Durante muitos finais de semana ela foi compreensível ao respeitar meus momentos de estudo e concentração para as tarefas acadêmicas.

Quero Agradecer ao senhor Bruno e à Dona Cláudia por toda a crença e apoio que depositaram em mim, pois a eles se deve o grande mérito de possibilitar que eu disputasse uma vaga na UFRJ em condições de ser um candidato que esta universidade procura.

Quero agradecer aos meus pais e aos meus irmãos por terem sempre acreditado no meu potencial para vencer qualquer obstáculo.

Tia Mariza e sua família foram pessoas que estiveram ao meu lado durante essa difícil jornada e tiveram uma participação chave em minha vida me dando a educação básica que todo ser humano deve ter.

Às queridas tias Graça e Sônia por terem me guiado e aconselhado quando ainda era criança.

Agradeço também, a professora Glória que conheço há pouco tempo, porém acreditou em mim me apoiando nesse último trabalho da faculdade.

Na faculdade conheci algumas pessoas que me ajudaram muito durante esse período e entre elas está o meu orientador Prof. Sebastião que contribuiu de forma muito positiva para minha formação como Engenheiro. Agradeço a todos os professores da Engenharia Elétrica que contribuíram para minha formação profissional.

Durante o período de iniciação científica fui orientado pelo pesquisador Reinaldo Jospin que contribuiu de maneira positiva com o trabalho desenvolvido durante o período de pesquisa.

Agradeço ao pesquisador Luís Adriano que confiou no meu trabalho e me orientou durante minha jornada de estágio no CEPTEL.

Quero agradecer a empresa Telvent/Schneider Electric, a qual me proporcionou a certeza da profissão que escolhi pra exercer durante a minha vida. Pois, durante o pouco tempo de estágio que tenho, tive a oportunidade de conhecer grandes profissionais que atuam na área de engenharia elétrica.

Na UFRJ tive a oportunidade de compartilhar a sala de aula com futuros grandes profissionais na área de Engenharia Elétrica. Quero agradecer-los pelos momentos de alegria e cumplicidade nos estudos dentro e fora da sala de aula.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

FERRAMENTAS INTELIGENTES APLICADAS À PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

CRISTIANO TEIXEIRA VIEIRA

Agosto/2013

A proposta do presente trabalho é analisar ferramentas alternativas aplicadas à proteção diferencial de transformador, para que a mesma não opere em casos indevidos, isto é, em situações em que o defeito ocorre fora de sua zona de operação. A proteção diferencial só deve atuar quando existe de fato uma falta dentro de sua zona de operação, porém, eventualmente, atua para defeitos fora da sua zona de operação, acarretando o isolamento do transformador desnecessariamente. Esse cenário deve ser evitado, pois pode causar uma interrupção na continuidade do serviço de energia elétrica.

Algoritmos alternativos são estudados para contornar os problemas relacionados à lógica dos relés digitais, sendo analisadas neste texto três ferramentas inteligentes que visam a melhoria dos esquemas tradicionais de proteção diferencial. Na literatura essas ferramentas são conhecidos como Lógica Fuzzy, Transformada Wavelet e Redes Neurais Artificiais.

Palavras-chaves: Proteção diferencial de transformadores, Lógica Fuzzy, Transformada Wavelet, Redes Neurais Artificiais,

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

INTELLIGENT TOOLS APPLIED TO DIFFERENTIAL PROTECTION OF
POWER TRANSFORMERS

CRISTIANO TEIXEIRA VIEIRA

August/2013

The main focus of this work is to analyze the application of alternative tools on differential protection of power transformers, avoiding an inappropriate operation of these devices, as happens when a fault occurs outside of their operating zone. The differential protection should only operate when there is an actual fault within its operating zone, but it, eventually, acts during external faults, causing undue transformer isolation. This scenario should be avoided because it may cause an interruption of the electric power supply.

Alternative algorithms are studied to correct problems related to the logic of digital relays, such as three intelligent tools that promise to overcome the problems of traditional differential protection schemes. In the literature these tools are known as Fuzzy Logic, Wavelet Transform and Neural Networks.

Keywords: Differential protection of power transformers, Fuzzy Logic, Wavelet Transform, Artificial Neural Networks.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract	vii
Índice	viii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura do Trabalho	2
2 Teoria de transformadores	4
2.1 Definições	4
2.2 Modelo de um Transformador ideal	4
2.3 O modelo do transformador real	9
2.3.1 Relação de transformação	9
2.3.2 Perdas no transformador de potência	11
2.3.3 Corrente de excitação	12
2.3.4 Circuito equivalente	15
2.4 Paralelismo de transformadores	18
2.4.1 Introdução	18
2.4.2 Condições para o paralelismo de transformadores	18
2.4.2.1 Relação de transformação	19
2.4.2.2 Defasagem angular	19
2.4.2.3 Mesma sequência de fase	20
2.4.2.4 Tensão de curto-circuito	20
2.4.2.5 Relação X/R	20
3 Proteção de transformadores	21
3.1 Considerações iniciais	22
3.2 Proteção diferencial	23

3.2.1	Proteção diferencial no transformador monofásico.....	24
3.2.2	Proteção diferencial no transformador trifásico.	26
3.3	Ajuste da proteção diferencial	27
3.4	Causas do surgimento de correntes diferenciais indesejadas	30
3.4.1	Corrente de Energização (Inrush).....	30
3.4.2	Saturação dos TCs	31
3.4.3	Sobre-excitação do transformador.....	31
3.4.4	Energização solidária.....	32
3.4.5	Eliminação de faltas próximas ao transformador	33
3.5	Características dos esquemas de proteção diferencial durante a energização de transformadores.....	33
3.5.1	Bloqueio da proteção diferencial.....	34
3.5.2	Proteção diferencial utilizando atenuadores de transitórios	35
3.5.3	Relé diferencial com retenção de harmônicos	35
3.5.4	Relé diferencial com uma unidade de bloqueio de harmônico.....	37
3.5.5	Relé diferencial digital.....	38
4	Ferramentas Inteligentes aplicadas à proteção diferencial	40
4.1	Introdução.....	40
4.2	Transformada Wavelet	41
4.2.1	Antecedentes a Transformada Wavelet	42
4.2.2	Funções Wavelets	46
4.2.3	Transformada Wavelet Contínua.....	48
4.2.4	Transformada Wavelet Discreta	50
4.2.5	Análise Multiresolução.....	52
4.2.6	A Transformada Wavelet Packet.....	55
4.2.7	Transformada Wavelet e a Proteção Diferencial	56
4.3	RNA aplicada à proteção diferencial.....	58
4.3.1	Fundamentos Biológicos	58
4.3.1.1	Organização geral	58
4.3.1.2	Transmissão da Informação entre Neurônios	59
4.3.1.3	Modelo do Neurônio Artificial.....	59
4.3.1.4	Caracterização da RNA	61

4.3.2	Topologias das RNAs	62
4.3.3	Aprendizado.....	63
4.3.4	RNA e a Proteção Diferencial	65
4.3.4.1	Redes de Elman	67
4.4	Lógica Fuzzy aplicada à proteção diferencial	70
4.4.1	Introdução.....	70
4.4.2	A origem da logica Fuzzy.....	71
4.4.3	Lógica Fuzzy	71
4.4.3.1	Operações de conjunto fuzzy	75
4.4.3.2	Funções de Pertinência	77
4.4.4	Raciocínio Fuzzy	79
4.4.5	Lógica Fuzzy e a Proteção Diferencial.....	81
4.5	Comparação das ferramentas Inteligentes	83
5	Conclusões.....	85
5.1	Trabalhos Futuros	85
6	Referências Bibliográficas	87

Lista de Figuras

Figura 2.1: Transformador ideal.....	5
Figura 2.2: Modelo do transformador real	9
Figura 2.3: Corrente de excitação.....	13
Figura 2.4: Transformador real aberto no secundário	13
Figura 2.5: Curvas de excitação do transformador: (a) tensão aplicada no enrolamento, corrente de excitação e fluxo magnético mútuo; (b) laço de histerese correspondente.....	15
Figura 2.6: Circuito equivalente do transformador de potência.....	16
Figura 2.7: Circuito equivalente do transformador de potência: (a) referido ao primário; (b) circuito simplificado referido ao primário.	17
Figura 3.1: Proteção diferencial percentual no transformador monofásico.	25
Figura 3.2: Conexão dos TCs em um transformador Y- Δ	26
Figura 3.3: Modos de operação: Modo normal (esquerda) e situação de falta (direita).	27
Figura 3.4: Ajuste das zonas de operação.	29
Figura 3.5: Forma de onda da corrente de energização.	31
Figura 3.6: Sistema com energização solidária.	32
Figura 3.7: Esquema de proteção diferencial com o uso de atenuadores de transitórios.....	35
Figura 3.8: Relé diferencial com retenção de harmônicos.....	36
Figura 4.1: Função Gaussiana.	43
Figura 4.2: Efeito da Gaussiana nas Funções de base.	44
Figura 4.3: Análise com uma única resolução (a) e análise de multiresolução (b).	45
Figura 4.4: Problema da análise de resolução única.	45
Figura 4.5: Formas básicas de algumas funções wavelets que são dilatadas para serem utilizadas na TW.....	47
Figura 4.6: Dilatação de uma wavelet.	49
Figura 4.7: Translação de uma wavelet.....	49
Figura 4.8: Decomposição de um sinal pela TW.	54
Figura 4.9: Árvore de coeficientes quando da aplicação da TWP até o terceiro nível.	55
Figura 4.10: TWD aplicada a um sinal de corrente distorcido por saturação. (a) Sinal.....	57

Figura 4.11: Estrutura do neurônio.....	59
Figura 4.12: Neurônio artificial	60
Figura 4.13: Rede Neural Artificial.....	62
Figura 4.14: Rede neural de Elman.....	68
Figura 4.15: comparação entre Logica clássica e logica fuzzy	72
Figura 4.16: Exemplo de função de pertinência de variáveis linguísticas	74
Figura 4.17: Exemplo de função de pertinência de variáveis linguísticas	74
Figura 4.18: Funções de pertinência para a variável <i>estatura</i>	77
Figura 4.19: Funções de pertinência.....	78
Figura 4.20: Etapas componentes do raciocínio Fuzzy	79
Figura 4.21: Funções de pertinência: (a) conjunto nebuloso de entrada 2h; (b) conjunto nebuloso de entrada Iop.....	82

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Faixas de frequência da aplicação da TWP ilustrada na Figura 4.9....	56
Tabela 4.2: Resumo das regras de inferência nebulosas adotadas.....	82
Tabela 4.3: Resumo das ferramentas inteligentes.	84

1 Introdução

1.1 Motivação

Os transformadores de potência são elementos de fundamental importância no sistema elétrico, pois a eles se deve o crédito da geração ocorrer longe dos centros consumidores e, mesmo assim, ser possível consumir essa energia com pequenas perdas ao longo da transmissão. A inclusão do transformador no sistema elétrico permitiu a transmissão de potência com baixas correntes. Essa tática nos levou a perdas relativamente reduzidas e, assim, resolveu-se um dos problemas da transmissão de energia a longa distância.

O sistema elétrico sofre perturbações o tempo todo, de forma que todos os equipamentos elétricos devem estar protegidos contra anomalias que podem prejudicar o seu funcionamento. Com esta preocupação, o objetivo desse trabalho se resume à principal proteção de transformadores que, pelas normas pertinentes, tem sua função designada pelo número 87T (Proteção Diferencial de Transformador).

Visto a importância do transformador no sistema elétrico, um estudo do comportamento desta função para alguns cenários do sistema elétrico se faz necessário, pois algumas condições ou estados de operação podem disparar a proteção de maneira ineficiente, prejudicando ocasionalmente, a continuidade do fornecimento de energia elétrica, levando a perdas financeiras para os gerenciadores do sistema.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de analisar ferramentas inteligentes que visam a melhoria da eficiência da proteção diferencial, pois os esquemas de proteção podem operar em situações que não representam defeito dentro da sua zona de proteção, isolando o transformador do sistema elétrico. Isso mostra que pode haver

um erro na sensibilidade da proteção que, por sua vez, provoca um desequilíbrio no sistema e, portanto, merece uma atenção especial. Determinadas operações que podem disparar indevidamente a proteção serão analisadas em detalhe no decorrer desse trabalho.

O inrush na corrente de magnetização, a energização solidária, as faltas externas, a sobre-excitação e a rejeição de carga são as principais operações que podem levar a proteção a operar de maneira errônea, enviando um sinal de *trip* para o disjuntor associado para que o mesmo isole o transformador supostamente com defeito.

O objetivo do engenheiro é garantir a continuidade do serviço de energia elétrica, pois quando esse serviço é interrompido por um motivo qualquer, ocorrem perdas econômicas para os órgãos que gerenciam e controlam o sistema elétrico de potência. Logo, o presente trabalho se justifica, pois assim podemos visualizar soluções para melhoria do desempenho do sistema elétrico e assim garantir a satisfação dos consumidores.

1.3 Estrutura do Trabalho

Alguns fundamentos teóricos se fazem necessários para o entendimento da análise que será desenvolvida, com a apresentação da teoria de alguns assuntos considerados essenciais dando início ao trabalho relatado. Então, para entender melhor a divisão do trabalho, nesta seção estão descritos, de maneira sucinta, os capítulos que compõem esse projeto de fim de curso.

No Capítulo 1 faz-se uma introdução ao trabalho proposto, apresentando ao leitor a motivação que despertou o interesse pela sua realização e os seus objetivos, pelos quais se justifica a realização do mesmo.

O Capítulo 2 apresenta um pouco da teoria de transformadores e seus modelos matemáticos, para que o leitor possa se familiarizar melhor com a análise proposta.

No Capítulo 3 faz-se uma abordagem a respeito da teoria de proteção aplicada aos transformadores de potência, com enfoque na proteção diferencial, apresentando-se a filosofia de proteção e os problemas do esquema típico de proteção dos transformadores de potência.

O Capítulo 4 tem como objetivo apresentar e analisar as três ferramentas que prometem solucionar alguns problemas da proteção diferencial de transformadores de potência, ou seja, ferramentas essas conhecidas como Lógica Fuzzy, Transformada Wavelet e Redes Neurais Artificiais.

No Capítulo 5 estão as conclusões feitas a respeito deste trabalho. Além disso, foram feitas algumas sugestões de trabalhos futuros que poderão complementar esta obra.

Finalmente, no Capítulo 6 estão relacionadas as referências bibliográficas que contribuíram para desenvolvimento deste trabalho de fim de curso.

2 Teoria de transformadores

2.1 Definições

Os transformadores surgiram devido à necessidade de diminuir as perdas elétricas na distribuição e transmissão de energia. Seu princípio básico de operação visa manter a transferência de potência entre enrolamentos, com a possibilidade de se alterar as grandezas corrente e tensão como se verá adiante. Toda a transferência de energia é feita segundo a Lei de Lenz [20], em que há um isolamento elétrico entre os dois lados do sistema conectado, de forma que exista um fluxo magnético comum enlaçando os dois enrolamentos cuja variação no tempo permite a transferência de potência de um lado para o outro.

Sabemos que a perda elétrica por efeito Joule em um condutor é proporcional ao quadrado da corrente elétrica, de forma que para transmitir energia por grandes distâncias é desejável que a perda referida seja a menor possível [41]. Assim, quanto menor for a corrente no condutor, mais reduzida será a perda Joule no mesmo.

Além dos transformadores de potência, existem os transformadores de medição e controle, que são o transformador de corrente (TC) e o transformador de potencial (TP) [37].

O princípio de funcionamento deles é o mesmo do anterior, porém com objetivo diferente. Nesse capítulo será abordada a teoria de transformadores de forma geral permitindo o entendimento do trabalho proposto nesse projeto de fim de curso.

2.2 Modelo de um Transformador ideal

Para melhor entender o princípio de funcionamento de um transformador, considere o transformador ideal, ou seja, despreze todas as suas perdas elétricas e magnéticas.

O transformador de potência pode ser provido de dois ou mais enrolamentos acoplados por um fluxo magnético mútuo. A Figura 2.1 ilustra um transformador

monofásico ideal de dois enrolamentos com o fluxo magnético completamente confinado no núcleo concatenando ambos os enrolamentos, sendo as perdas no núcleo desprezadas e considerando-se a permeabilidade do núcleo infinita [20]. Estas condições aqui consideradas não se aplicam à natureza real de um transformador, tendo como objetivo apenas o caráter didático.

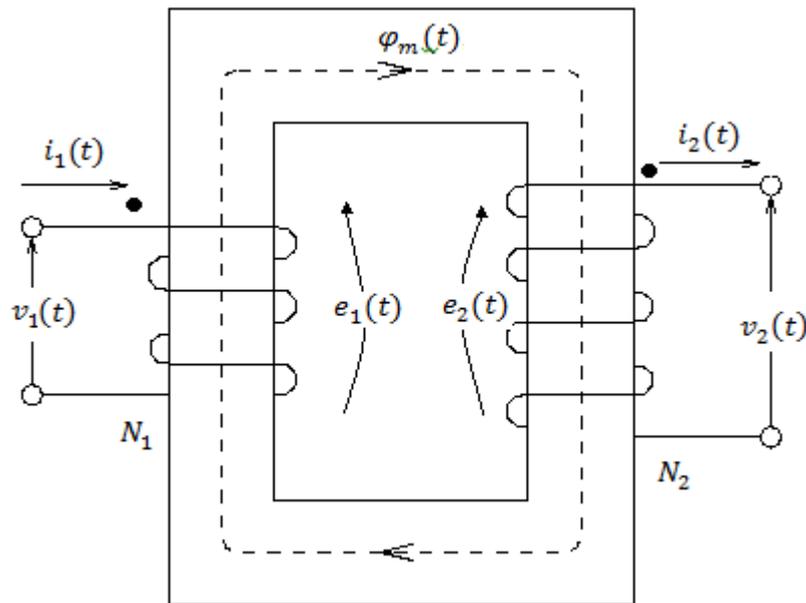


Figura 2.1: Transformador ideal.

O lado ao qual aplicamos a tensão é chamado de primário, e o outro lado que desenvolve tensão induzida é chamado de secundário. Então é aplicada uma tensão variante no tempo $v_1(t) = V_1 \sin(\omega t)$, que por sua vez gera um fluxo magnético mútuo $\varphi_m(t)$, também variante no tempo, que percorre o núcleo do transformador. O valor deste fluxo mútuo é dado pela equação a seguir:

$$\varphi_m(t) = -\frac{V_1}{\omega N_1} \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

Em que V_1 é a amplitude da tensão aplicada, N_1 é o número de espiras do primário e ω é a frequência angular da tensão aplicada, em radianos por segundo. Este fluxo concatena com o próprio primário, causando o surgimento de uma força contra

eletromotriz (f_{cem}), representada por $e_1(t)$ em seus terminais, cuja amplitude depende do número de espiras do primário (N_1), da amplitude do fluxo magnético $\varphi_m(t)$ e da sua frequência [28].

Da mesma forma, o fluxo $\varphi_m(t)$ concatenará com o enrolamento secundário, surgindo nos terminais deste uma f_{em} induzida $e_2(t)$, cuja amplitude depende do número de espiras do secundário (N_2), da amplitude do fluxo magnético $\varphi_m(t)$ e da sua frequência [20].

Segundo a Lei de Faraday, na condição ideal, pode-se escrever que:

$$e_1 = \frac{d\lambda_1(t)}{dt} = N_1 \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Em que $\lambda_1(t)$ é o enlace de fluxo concatenado pelo primário, em weber-espiras. Como no caso ideal desconsidera-se a queda de tensão na impedância de dispersão, concluímos que $v_1 = e_1$. Uma importante relação pode ser obtida da Equação (2.2). Considere uma tensão $e_1(t) = E \sin(\omega t) = \sqrt{2}E^{RMS} \sin(2\pi f t)$ aplicada ao primário [20]. Pode-se escrever:

$$\varphi_m(t) = \frac{1}{N_1} \int e_1(t) dt = \frac{\sqrt{2}E_1^{RMS}}{N_1} \int \text{sen}(2\pi f t) dt \quad (2.3)$$

$$\varphi_m(t) = \frac{\sqrt{2}E_1^{RMS}}{2\pi f N_1} (-\cos(2\pi f t)) dt \quad (2.4)$$

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E_1^{RMS}}{2\pi f N_1} \quad (2.5)$$

Onde Φ_m é a amplitude do fluxo magnético e E_1^{RMS} é o valor eficaz de $e_1(t)$. Da equação (2.5), tem-se que o valor eficaz da tensão $e_1(t)$ é:

$$E_1^{RMS} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \Phi_m = \sqrt{2}\pi f N_1 \Phi_m = 4,44 f N_1 \Phi_m \quad (2.6)$$

A equação fundamental para a tensão induzida é a equação (2.6). Dela conclui-se que a tensão eficaz induzida é diretamente proporcional à amplitude do fluxo magnético mútuo, à quantidade de espiras do enrolamento e à frequência. Outra importante conclusão é que um transformador construído para operar em uma dada frequência não deverá ser operado em outra frequência mais baixa, a não ser que seja feita alteração da tensão aplicada ao primário na mesma relação.

Da Equação (2.2), tem-se que:

$$v_2(t) = e_2(t) = \frac{d\lambda_2(t)}{dt} = N_2 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Da relação entre as Equações (2.2) e (2.7), tem-se que:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.8)$$

Podemos ver que a Equação (2.8) relaciona as tensões de entrada e de saída do transformador com o número de espiras do primário e do secundário. À constante “ α ” dá-se o nome de *relação de transformação*. Em um transformador ideal, a relação de transformação depende apenas da razão entre o número de espiras dos enrolamentos [20]. Assumindo-se que não há quedas de tensão na transformação, e que a corrente de magnetização é desprezível, a potência de entrada deverá ser igual à potência de saída, o que equivale a dizer que:

$$v_1(t)i_1(t) = v_2(t)i_2(t) \quad (2.9)$$

Manipulando as duas equações anteriores, chegamos ao seguinte resultado:

$$\frac{N_1}{N_2} = \alpha = \frac{i_2(t)}{i_1(t)} \quad (2.10)$$

Utilizando a notação de fasor podemos reescrever as Equações (2.8) e (2.10) da seguinte forma:

$$\dot{V}_1 = \frac{N_1}{N_2} \dot{V}_2 \quad e \quad \dot{I}_1 = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \quad (2.11)$$

Dividindo uma equação pela outra e arrumando os termos, temos a seguinte equação:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{\dot{V}_2}{\dot{I}_2} = \alpha^2 Z_2 \quad (2.12)$$

Em que Z_2 é a impedância complexa da carga conectada ao secundário do transformador. Esta carga poderá ser substituída por outra impedância Z_1 conectada ao primário, sem que haja mudança no comportamento do circuito. Este procedimento consiste em *referir a impedância ao outro lado do transformador*, e é muito útil na simplificação e na solução de circuitos envolvendo transformadores [28]. Com essa técnica podemos substituir o elemento transformador por uma simples impedância para manipular as equações matemáticas. Assim, a impedância do lado secundário referida ao primário é calculada da seguinte forma:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\dot{V}_1 \dot{I}_2}{\dot{I}_1 \dot{V}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad \therefore \quad Z_1 = \alpha^2 Z_2 \quad (2.13)$$

A partir das Equações (2.8), (2.10) e (2.13), vê-se que, para um transformador ideal, a transformação da tensão ocorre em razão direta à relação entre o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário; a transformação de corrente ocorre na razão inversa; as impedâncias são referidas ao primário na razão direta ao quadrado, e a potência ativa e aparente se mantém constante. Esse fato é condizente com a lei da conservação de energia que afirma ser impossível criar ou destruir energia, existindo apenas sua transformação em outras formas de energia.

2.3 O modelo do transformador real

Visto que na seção anterior foi apresentado o modelo do transformador ideal, agora serão consideradas as perdas e quedas de tensão no mesmo, ou seja, o modelo real do transformador será apresentado. Lembrando que toda a teoria que será desenvolvida é válida apenas para a operação em regime permanente à frequência constante. Para uma análise dinâmica do transformador, outro modelo mais complexo deve ser considerado, o que foge ao interesse do trabalho que aqui será desenvolvido.

2.3.1 Relação de transformação

Ao levar em consideração as perdas e quedas de tensão no transformador, devemos representar essas grandezas no modelo proposto. Na figura 2.2 tem-se um modelo do transformador real composto por dois enrolamentos. É possível identificar três fluxos magnéticos distintos: $\varphi_m(t)$ que é o fluxo mútuo, responsável pela transferência de energia entre os enrolamentos, e os fluxos $\varphi_{D1}(t)$ e $\varphi_{D2}(t)$ que são chamados de fluxo de dispersão do primário e do secundário, respectivamente [20].

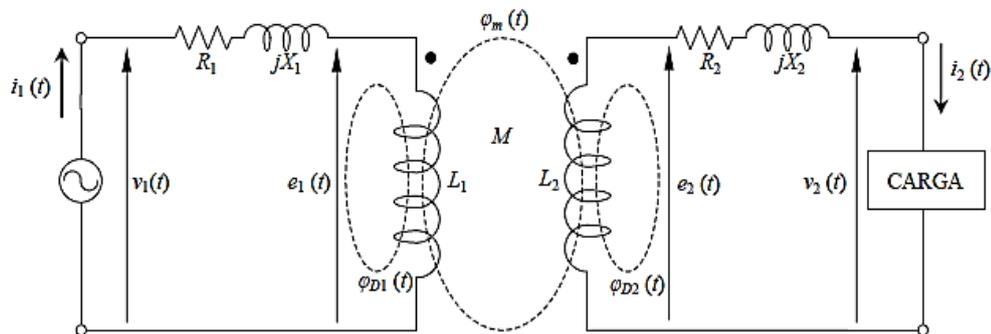


Figura 2.2: Modelo do transformador real

O fluxo total de enlace de cada enrolamento pode ser dividido em duas componentes: o fluxo mútuo $\varphi_m(t)$ confinado no núcleo e o seu fluxo de dispersão que representa a componente $\varphi_{D1}(t)$ que concatena apenas com o enrolamento referido. Assim, o fluxo resultante $\varphi_1(t)$ concatenado com o enrolamento primário pode ser definido como.

$$\varphi_1(t) = \varphi_m(t) + \varphi_{D1}(t) \quad (2.14)$$

Devido ao fluxo total $\varphi_1(t)$ e em obediência à Lei de Lenz, uma tensão $e_1(t)$ será induzida no enrolamento primário. Esta tensão é resultante da combinação da tensão induzida $e_{m1}(t)$ devida ao fluxo mútuo $\varphi_m(t)$ e da tensão induzida $e_{D1}(t)$ devida ao fluxo de dispersão $\varphi_{D1}(t)$, ou seja,

$$e_1(t) = e_{m1}(t) + e_{D1}(t) \quad (2.15)$$

Assim, a partir das Equações (2.2), e (2.15), para o caso real, pode-se escrever que:

$$e_1(t) = \frac{d\lambda_1(t)}{dt} = N_1 \frac{d\varphi_1(t)}{dt} = N_1 \left(\frac{d\varphi_m(t)}{dt} + \frac{d\varphi_{D1}(t)}{dt} \right) \quad (2.16)$$

Todo o raciocínio é aplicável, também, ao enrolamento secundário. Assim, tem-se que:

$$e_2(t) = \frac{d\lambda_2(t)}{dt} = N_2 \frac{d\varphi_2(t)}{dt} = N_2 \left(\frac{d\varphi_m(t)}{dt} + \frac{d\varphi_{D2}(t)}{dt} \right) \quad (2.17)$$

Pela comparação das Equações (2.16) e (2.17) com a Equação (2.15), conclui-se que:

$$e_{m1}(t) = N_1 \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \quad (2.18)$$

$$e_{D1}(t) = N_1 \frac{d\varphi_{D1}(t)}{dt} \quad (2.19)$$

$$e_{m2}(t) = N_2 \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \quad (2.20)$$

$$e_{D2}(t) = N_2 \frac{d\varphi_{D2}(t)}{dt} \quad (2.21)$$

De acordo com as Equações (2.18) e (2.20) verifica-se que as tensões $e_{m1}(t)$ e $e_{m2}(t)$ induzidas nos enrolamentos primário e secundário devido ao fluxo mútuo $\varphi_m(t)$ são diretamente proporcionais ao número de espiras de cada enrolamento, respectivamente. Desta forma, a razão entre a tensão induzida no primário e a tensão

induzida no secundário, ambas devidas ao fluxo mútuo, pode ser calculada como segue abaixo:

$$\frac{e_{m1}(t)}{e_{m2}(t)} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.22)$$

Podendo se concluir que é igual à relação de transformação do transformador ideal. Transformadores de núcleo de ferro bem projetados possuem uma permeabilidade magnética muito elevada, porém, não infinita. Por isso, a queda de tensão por dispersão é relativamente pequena quando comparada à tensão induzida produzida pelo fluxo confinado no núcleo, representando apenas de 2 a 7% desta última. Então, podemos supor que $e_{m1}(t) \gg e_{D1}(t)$, que $e_{m2}(t) \gg e_{D2}(t)$ e que as perdas de tensão resistivas são também pequenas em transformadores de potência. Portanto, a relação de transformação do transformador real pode ser aproximada pela equação 2.23 abaixo:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} \approx \frac{e_{m1}(t)}{e_{m2}(t)} \approx \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.23)$$

De acordo com a Equação (2.23) concluímos que relação de transformação do transformador real é aproximadamente a mesma do transformador considerado ideal.

2.3.2 Perdas no transformador de potência

As perdas são dissipações indesejadas de energia que são perdidas no processo de transferência de potência que fazem com que a potência de saída do transformador seja diferente da potência de entrada, diminuindo o rendimento do mesmo [20]. Basicamente, existem quatro efeitos de perdas ou quedas de tensão importantes nos transformadores de potência, que estão citadas abaixo de maneira sucinta:

- i. Perdas no cobre: são decorrentes do efeito resistivo Joule que ocorre nos condutores dos enrolamentos do transformador ao serem percorridos pela corrente elétrica. São proporcionais ao quadrado da corrente do enrolamento.

Sua redução pode ser conseguida utilizando-se condutores compostos nos enrolamentos;

- ii. Fluxo de dispersão: como já dito anteriormente, os fluxos magnéticos que concatenam com apenas um enrolamento e cujas trajetórias são definidas majoritariamente através do ar são denominados fluxo de dispersão. Estes fluxos traduzem-se em indutância própria para cada uma das bobinas e seus efeitos são representados pela adição de uma reatância indutiva de dispersão em série com cada um dos enrolamentos;
- iii. Correntes de Foucault: são também conhecidas como correntes parasitas. Estas correntes circulam no interior do núcleo do transformador quando este é submetido a um fluxo variante no tempo, provocando perdas por efeito Joule. Estas perdas são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada no transformador e podem ser reduzidas laminando-se o núcleo do transformador;
- iv. Perda por histerese: está associada à reorganização dos momentos magnéticos atômicos do material ferromagnético que constitui o núcleo do transformador. Cada vez que o ciclo de histerese é percorrido, uma parcela de energia é gasta para que estes momentos magnéticos sejam realinhados. Para reduzir este tipo de perda, recomenda-se utilizar materiais com características ferromagnéticas apropriadas, com laços de histerese de áreas reduzidas.

2.3.3 Corrente de excitação

A corrente de excitação é a corrente que surge quando no enrolamento primário do transformador é ligada uma fonte alternada, enquanto os terminais do outro enrolamento (secundário) são mantidos sem carga (em vazio). No transformador ideal a corrente de excitação é considerada nula. Porém, no caso real o estudo desta componente é importante, pois além de ser responsável pelo estabelecimento do fluxo magnético no núcleo do transformador, a corrente de excitação é responsável por suprir as perdas que o transformador apresenta quando operando em vazio, que são: perdas por histerese e perdas oriundas das correntes de Foucault (ou correntes parasitas). Logo,

podemos concluir que a corrente de excitação pode ser subdividida em duas componentes distintas [28]: A componente de magnetização e a componente que supre as perdas em vazio. Na Figura 2.3 está representada graficamente a corrente de excitação em função das suas componentes.

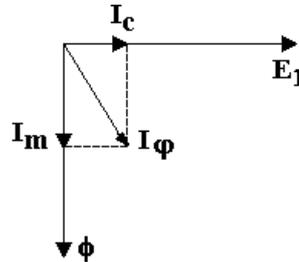


Figura 2.3: Corrente de excitação.

De acordo com o gráfico acima, podemos escrever a seguinte equação:

$$i_{\phi}(t) = i_m(t) + i_c(t) \quad (2.24)$$

Para melhor entender a operação de um transformador operando a vazio pode-se observar as Figuras 2.4 e 2.5. Nota-se que, apesar do secundário estar aberto, circula uma corrente primária $i_1(t)$. Obviamente, esta corrente muda de amplitude quando o secundário do transformador é conectado a uma carga.

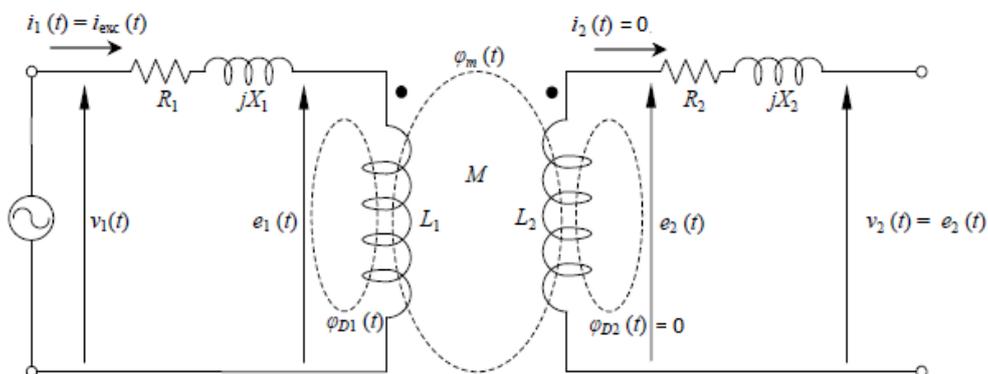


Figura 2.4: Transformador real aberto no secundário

A corrente de magnetização $i_{\phi}(t)$ é responsável por criar o fluxo magnético no núcleo do transformador. Podem-se destacar as principais características da corrente de magnetização:

- ❖ Apesar de periódica, sua forma de onda não é senoidal, devido à introdução de componentes de alta frequência (harmônicas) causadas pela saturação do núcleo do transformador;
- ❖ Quando o núcleo está próximo de atingir a saturação, é necessária uma quantidade de corrente de magnetização cada vez maior para produzir um pequeno aumento no fluxo magnético;
- ❖ A componente fundamental de $i_m(t)$ está atrasada de 90° em relação à tensão aplicada ao enrolamento $e_1(t)$, assim como mostra a Figura 2.4.
- ❖ As componentes harmônicas de alta frequência introduzidas na corrente de magnetização aumentam conforme a saturação do núcleo cresce.

A outra componente da corrente de excitação é a corrente $i_c(t)$, responsável por suprir as perdas por histerese e correntes de Foucault quando o transformador opera em vazio. As principais características desta corrente são:

- ❖ É uma corrente atribuída a perdas que ocorrem exclusivamente no núcleo do transformador;
- ❖ Sua forma de onda é não linear, devido à característica não linear do laço de histerese;
- ❖ A componente fundamental de $i_c(t)$ está em fase com a tensão aplicada ao enrolamento $e(t)$, e adiantada em 90° em relação à $\varphi_m(t)$.

Na Figura 2.5(a), podemos ver a forma de onda característica da corrente de excitação. Pela Figura 2.5(b), é possível notar que, quando o núcleo está próximo da saturação, para se conseguir um pequeno aumento no fluxo $\varphi_m(t)$ é necessária uma quantidade cada vez maior de corrente de magnetização $i_m(t)$ e, conseqüentemente, de corrente de excitação $i_{exc}(t)$.

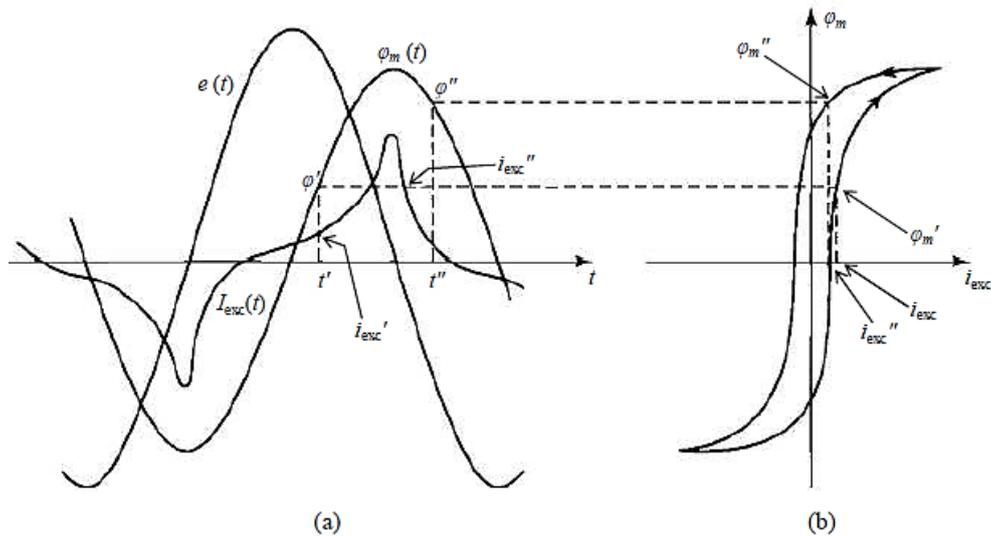


Figura 2.5: Curvas de excitação do transformador: (a) tensão aplicada no enrolamento, corrente de excitação e fluxo magnético mútuo; (b) laço de histerese correspondente.

2.3.4 Circuito equivalente

O circuito equivalente do transformador de potência é útil no estudo do comportamento deste equipamento associado a uma carga ou a um sistema. Para a determinação de um circuito equivalente apropriado faz-se necessário modelar eletricamente os fenômenos e as perdas elétricas decorrentes de sua operação. Assim, o circuito deverá representar todos os efeitos listados na seção 2.3.2, como por exemplo, a corrente de excitação vista na seção 2.3.3.

Depois de descrever sucintamente os efeitos que envolvem um transformador real, agora podemos apresentar um modelo mais apropriado a ser utilizado nos estudos de regime permanente. A Figura 2.6 ilustra o modelo completo do transformador real. O modelo consiste em um núcleo de um transformador ideal, em série com as resistências R_1 e R_2 , representando as perdas no cobre, e com X_1 e X_2 , representando as reatâncias de dispersão do primário e do secundário, respectivamente. No modelo, ainda é possível identificar um ramo shunt, que representa as perdas no núcleo (G_m) e a reatância de magnetização (X_m), que introduz o efeito oriundo da corrente de magnetização necessária para estabelecer o fluxo magnético no núcleo.

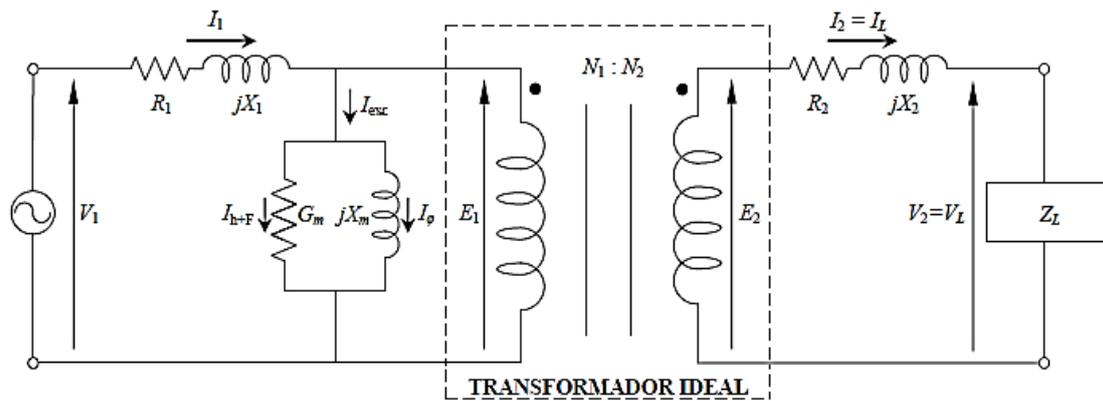
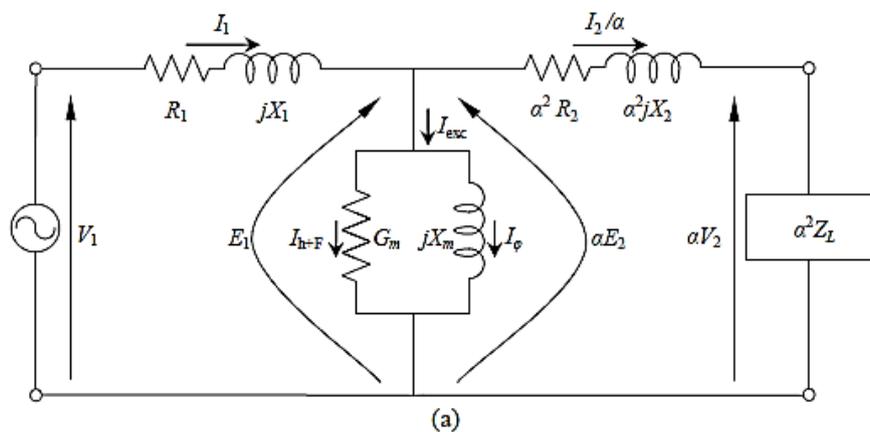


Figura 2.6: Circuito equivalente do transformador de potência

O modelo apresentado na Figura 2.6 representa de maneira bastante satisfatória o transformador real do ponto de vista elétrico, porém é um modelo um pouco complicado para quem quer efetuar alguns cálculos levando em consideração o modelo real. Como desenvolvido em seções anteriores, podemos referir todas as grandezas do secundário ao primário, eliminando assim a parte que chamamos de transformador ideal e obtendo um circuito do tipo mostrado na Figura 2.7(a). Podemos considerar também que, para a maioria das aplicações, a corrente de excitação e seus efeitos podem ser desprezados [20], pois se assume que $X_m \rightarrow \infty$, já que $X_m \gg X_D$ (em que X_D representa a reatância de dispersão) e $G_m = 0$ (já que $G_m = 1/R_m$ e $R_m \gg R_1$). Com estas considerações, o modelo simplificado toma a forma apresentada na Figura 2.7(b).



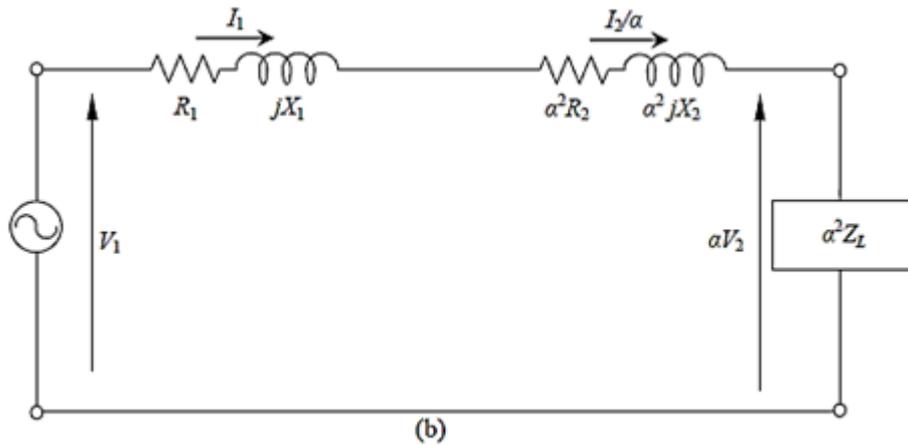


Figura 2.7: Circuito equivalente do transformador de potência: (a) referido ao primário; (b) circuito simplificado referido ao primário.

Os parâmetros do transformador são obtidos em laboratório através do ensaio de curto-circuito e do ensaio em aberto, porém esses ensaios não serão abordados nesse trabalho, pois os mesmos não apresentam importância significativa para o objetivo aqui almejado.

Após ter desenvolvido um modelo para o circuito equivalente e fazendo-se algumas considerações, podemos analisar o efeito de diferentes tipos de carga conectada ao transformador. Considerando-se o circuito equivalente da figura 2.7(b), é fácil calcular a corrente que circula no transformador por meio da aplicação das Leis de Kirchhoff, como segue:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{Z_{eq} + a^2 \dot{Z}_L} = \frac{\dot{V}_1}{(R_{eq} + jX_{eq}) + a^2(R_L + jX_L)} \quad (2.25)$$

Em que:

Z_{eq} : é a impedância equivalente do transformador;

a : representa a relação de transformação do transformador, N_1/N_2 ;

jX_L : representa a reatância da carga, se positiva uma carga indutiva, se negativa uma carga capacitiva e se for igual a zero uma carga puramente resistiva.

As simplificações que foram realizadas não apresentam efeito relevante no objetivo da análise desse trabalho.

2.4 Paralelismo de transformadores

2.4.1 Introdução

O sistema elétrico apresenta um constante crescimento de carga, tornando vantajosa a operação de transformadores em paralelo. No entanto, antes de introduzir um novo transformador em paralelo com o já existente em operação, é necessário atender algumas condições para que a operação desejada ocorra de maneira eficiente, sem prejudicar o bom desempenho do sistema elétrico.

2.4.2 Condições para o paralelismo de transformadores

Uma alternativa bastante viável para reduzir perdas numa transformação e aumentar o índice de continuidade de energia é conectar transformadores de potência em paralelo. No entanto, para esse tipo de operação, algumas condições devem ser satisfeitas [31], evitando a degradação dos mesmos. A seguir estão apresentadas as condições que devem ser obedecidas:

- i. Mesma relação de transformação;
- ii. Mesma defasagem angular entre alta e baixa tensão;
- iii. Mesma sequência de fase;
- iv. Mesma tensão de Curto-circuito.
- v. Mesma impedância percentual e mesma relação X/R;

Essas condições devem ser obedecidas na busca de uma solução técnica econômica para operação em paralelo, pois transformadores operando em paralelo com impedâncias percentuais, relações de transformação e relação X/R diferentes darão origem a uma corrente de circulação entre os enrolamentos. Esta corrente surgirá devido a diferença de tensão no secundário dos transformadores e fará com que a potência fornecida pelos dois transformadores seja menor que a soma das

potências individuais dos mesmos [30], conduzindo a uma solução técnica não recomendável do ponto de vista de consumo de energia.

2.4.2.1 Relação de transformação

Por estarem unidos os primários e por estarem unidos os secundários, torna-se lógico que as tensões primárias e secundárias devam ser iguais, pois se assim não fosse um transformador alimentaria o outro. Não basta que a relação de transformação seja igual, as respectivas tensões devem também ser iguais. Por exemplo: um transformador de 10V/1V e outro de 100V/10V têm igual relação mas não é aconselhável ligar um primário de 100V com outro de 10V.

Igualdade de tensões primária e secundária implica igual relação de transformação, mas igual relação não implica tensões primárias e secundárias iguais. Se não for cumprida esta condição, podem aparecer correntes elevadas de circulação entre os transformadores, de forma que não é conveniente que estas correntes atinjam mais do que 10% das correntes nominais. A corrente de circulação dá origem a uma potência circulante, também chamada potência de compensação, cujo principal efeito é o de aumentar a carga no transformador de maior tensão secundária, podendo sobrecarregá-lo.

2.4.2.2 Defasagem angular

A condição fundamental para que os transformadores possam trabalhar em paralelo é que os terminais a serem conectados entre si se encontrem em todos os instantes no mesmo potencial. Portanto, devemos tomar cuidado ao ligarmos em paralelo enrolamento com ligações estrela e delta, pois diferentes defasagens angulares fazem com que apareça diferença de tensão, causando as mesmas dificuldades relatadas no caso da seção anterior. Portanto, as ligações devem ser delta com delta e estrela com estrela.

2.4.2.3 Mesma sequência de fase

Chama-se sequência de fases a ordem de rotação dos vetores de um sistema fasorial, ou seja, a sucessão no tempo dos valores máximos das grandezas elétricas tensão e corrente nas três fases de um sistema elétrico.

Os transformadores cujas sequências de fases sejam opostas, não podem ser ligados em paralelo. De fato, num determinado instante os vetores de tensão secundária vão coincidir, mas no instante seguinte os vetores começam a deslocar-se e aparecem diferenças de potencial entre as fases.

2.4.2.4 Tensão de curto-circuito

Para calcular a impedância do transformador devemos fazer o ensaio de curto-circuito, em que $Z_{cc} = V_{cc}/I_n$. Dois transformadores em paralelo comportam-se como duas impedâncias em paralelo em relação à carga, e a corrente que o receptor solicita distribui-se segundo os valores das impedâncias internas dos transformadores. Logo, se essas impedâncias forem iguais, cada transformador contribui com a mesma potência para a carga, mas se elas forem distintas ocorrerá a passagem de mais corrente pela impedância menor, sobrecarregando este. Isto impõe uma condição para a colocação de transformadores em paralelo, ou seja, é necessário que as tensões de curto-circuito sejam as mais próximas possíveis.

2.4.2.5 Relação X/R.

Quando a relação entre a reatância e a resistência difere de um transformador para outro que se encontra em paralelo surge uma defasagem na corrente de secundário dos transformadores de potência, acarretando, em maior ou menor grau, os mesmos problemas descritos na seção 2.4.2.2.

3 Proteção de transformadores

Os transformadores são equipamentos no sistema elétrico que requerem cuidados especiais tanto de manutenção, quanto de operação, devido à sua importância para o sistema ao qual estão conectados, pois o seu não funcionamento pode causar inúmeros prejuízos. Por isso, existem muitos sistemas de proteção para que o transformador possa estar sempre funcionando de uma forma correta e segura. A proteção é conseguida através da combinação adequada da configuração elétrica do sistema e de equipamentos de proteção convenientes.

A principal proteção do transformador é conhecida como diferencial (função 87T), na qual se realiza a comparação entre a corrente registrada na entrada e na saída do equipamento, a decisão de trip sendo baseada na medição e tratamento dessas grandezas.

Um sistema de proteção é normalmente composto pelo transformador de corrente (TC), transformador de potencial (TP), relé de proteção e disjuntor [25]. O transformador de corrente (TC) é um equipamento que deve transformar a corrente elevada do primário em correntes adequadas no secundário para alimentar instrumentos de medição, controle e proteção. O TC tem a função também de isolar os equipamentos de medição, controle e relés do circuito de alta tensão. Já o transformador de potencial (TP) é um equipamento que deve transformar a alta tensão em tensões adequadas para alimentar instrumentos de medição, controle e proteção, normalmente no nível de 115 V.

O disjuntor pode ser definido como um dispositivo mecânico de manobra capaz de estabelecer, conduzir durante um tempo definido e interromper correntes em condições normais e anormais de um circuito elétrico, tais como nas faltas que ocorrem nos elementos do sistema elétrico.

Os relés são os equipamentos mais importantes de um sistema de proteção, pois são eles que comandam o sistema de proteção. A função de um relé é de identificar o defeito, localizá-lo de maneira exata e provocar o desligamento total do elemento defeituoso, a fim de evitar sua destruição e impedir que o resto do sistema também seja afetado. A atuação destes relés faz com que os disjuntores interrompam as correntes de curto-circuito no elemento protegido.

3.1 Considerações iniciais

A aplicação de esquemas de proteção em equipamentos elétricos de potência é extremamente importante para o aumento dos índices de disponibilidade de energia aos consumidores e para a redução das taxas de incidência de falha no sistema elétrico. Desta maneira, os esquemas de proteção atuam isolando parte do sistema em que ocorre a falta, evitando maiores danos aos equipamentos e riscos à segurança dos operadores destes sistemas.

Os transformadores de potência de grande porte, caso estejam conectados a um grande sistema que transmite energia para muitos consumidores, necessitam de sistemas de proteção com filosofias e equipamentos sofisticados [37]. A localização do transformador também influencia nos tipos de proteção que serão adotados, como, por exemplo, se o transformador está próximo a um gerador, necessita de um sistema de proteção que se adapte a presença das correntes de magnetização de alta magnitude. Outro fator determinante para escolha de um determinado sistema de proteção é o tipo de conexão dos transformadores.

Com o desenvolvimento dos relés digitais, se tornou possível agrupar as muitas funções de proteção em um mesmo equipamento, o que economiza espaço físico na locação dos equipamentos de proteção nas subestações. Permitiu-se criar grupos de ajustes para que em casos de contingência no sistema, o relé de proteção possa adotar outra filosofia de proteção para se adequar à nova configuração do sistema. Esta característica dos relés digitais é uma vantagem nos momentos em que uma contingência fora de sua zona de proteção muda o sistema para um novo ponto de operação, alterando os valores de tensão e corrente de entrada no equipamento protegido [38]. Os relés digitais podem detectar rapidamente faltas em equipamentos, retirando-os de operação em um curto período de tempo e evitando danos extras tanto ao sistema como ao próprio equipamento, melhorando a coordenação de ajustes do sistema de proteção.

Os sistemas de proteção devem ser sempre sensíveis às perturbações do sistema para que possam julgar quando os relés devem atuar ou não para manter a integridade do sistema. Devem ser capazes de selecionar entre condições para as quais uma imediata operação é exigida e aquelas para as quais nenhuma

operação ou operação com retardo é exigida. Os princípios de funcionamento dos relés evoluem, mas a filosofia de proteção é sempre a mesma [25]. Os relés devem atuar segundo os seguintes critérios:

Confiabilidade – todos os fatores que impactam na atuação da proteção devem ser levados em conta, tornando-a confiável. Fatores como falha na elaboração do projeto, instalação, ajustes incorretos e deterioração podem levar a operações indevidas, prejudicando a confiabilidade do esquema de proteção.

Seletividade – a proteção é organizada em zonas de proteção que devem cobrir todo sistema de potência, sem deixar nenhuma parte desprotegida. Na ocorrência de uma falta, a proteção deve selecionar e mandar atuar os disjuntores mais próximos isolando apenas o equipamento com defeito.

Estabilidade – o sistema de proteção deve apresentar a capacidade de permanecer inerte a todas as condições de carga e faltas externas à zona relevante de atuação.

Velocidade – a proteção deve isolar as faltas no sistema de potência no menor tempo possível, evitando a perda por completo do equipamento protegido e o desligamento de todo sistema no seguimento a perdas de sincronismo. Assim, assegura-se a continuidade no fornecimento.

Sensibilidade - o equipamento deve operar com segurança, mesmo no caso de defeitos pequenos que provocam correntes reduzidas de desequilíbrio ou de defeito.

Os relés devem funcionar também segundo outros critérios como robustez, vida útil, operacionalidade e funcionalidade.

3.2 Proteção diferencial

A proteção diferencial tem como objetivo comparar a corrente de entrada e saída da zona protegida [26]. A monitoração das correntes primária e secundária do transformador é realizada pelos transformadores de corrente (TCs) conectados em série, respectivamente, com os ramos primário e secundário do transformador. As correntes passam pela entrada do relé diferencial, que fará a análise da corrente diferencial e, caso

este valor seja maior do que o valor ajustado, o relé é acionado, retirando o transformador defeituoso de funcionamento. O tempo normal de operação do relé diferencial é de 1 a 2 ciclos.

Caso ocorra uma falta interna ao transformador, haverá um desbalanceamento dos sinais de corrente medidos pelos TCs, e a diferença entre esses sinais sensibiliza o relé que, por sua vez, envia um comando de operação ao disjuntor associado [36]. Tem-se que, neste esquema, a zona de proteção é claramente definida pelo posicionamento dos transformadores de corrente de modo que, em virtude da sua atuação rápida e seletiva, ele é utilizado como proteção principal dos transformadores de potência.

O relé diferencial pode ter variações em suas conexões, permitindo desenvolver esquemas de proteção com sensibilidade e seletividade. A proteção diferencial comum deve estar associada a uma proteção de sobrecorrente alimentada, preferencialmente, por transformadores de corrente independentes [26]. Os relés de sobrecorrente são destinados à proteção do transformador para faltas externas à zona de proteção e têm a função de proteção de retaguarda para falhas do relé diferencial. A zona de proteção do transformador está compreendida entre os TCs instalados nos lados primário e secundário do transformador, área onde o relé diferencial deve atuar e eliminar qualquer falta existente.

3.2.1 Proteção diferencial no transformador monofásico.

A figura 3.1 mostra um transformador ideal com o esquema de proteção diferencial percentual. Para que este esquema de proteção seja bem projetado, as correntes secundárias dos TCs que passam pelas bobinas de restrições do relé 87 devem ser iguais em módulo e ângulo, ou seja, $\dot{I}_{ps} = \dot{I}_{ss}$ [12]. Desta maneira, desconsiderando-se os erros de cada TC, na operação normal do transformador e em caso de defeitos fora da zona protegida pelos dois TCs, a corrente que passa na bobina de operação do relé 87 é nula.

- Os TCs devem ser dimensionados de modo que suas correntes secundárias, que passam pela bobina de restrição, sejam iguais tanto em módulo como em ângulo de defasagem.

3.2.2 Proteção diferencial no transformador trifásico.

Do mesmo modo que no transformador monofásico, a proteção diferencial 87 no transformador trifásico é ligada em cada fase do transformador, como se fossem três esquemas de proteção em três transformadores monofásicos. Nos secundários dos TCs podem ser adotados esquemas de ligação em “ Δ ” ou “Y” [26], porém a ligação em “Y” é, geralmente, a mais utilizada em relés digitais, pois este faz a compensação da diferença de corrente via software.

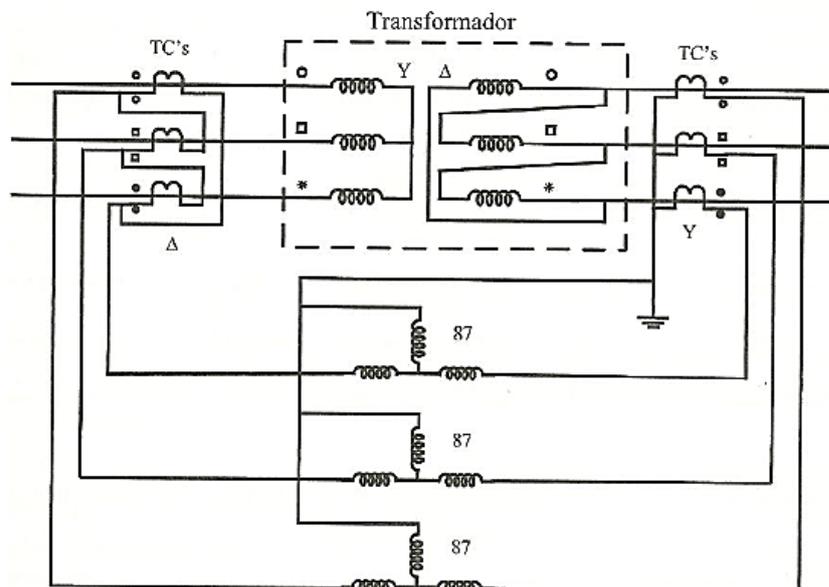


Figura 3.2: Conexão dos TCs em um transformador Y- Δ .

Fonte: [26]

Como o transformador trifásico pode ser constituído em várias formas de conexão (delta, estrela ou zig-zag) em cada lado do enrolamento, a variação destas conexões influencia no deslocamento angular das correntes dos enrolamentos primário e secundário. Caso a conexão dos transformadores de corrente esteja incorreta, o relé diferencial eletromecânico interpretará as correntes de entrada de forma errônea, prejudicando o desempenho do sistema de proteção. A aplicação de relés digitais na proteção diferencial permite compensar a diferença numérica entre

as correntes dos transformadores de corrente no próprio equipamento, dispensando ajustes na conexão dos transformadores de instrumentos do sistema de proteção.

No esquema de proteção diferencial para transformadores trifásicos, a defasagem angular entre as correntes de linha do primário e secundário que aparece depende do tipo de ligação utilizada e deve ser considerada no projeto do esquema de proteção. Essa defasagem angular pode gerar dois tipos de problemas, que são:

- Diferenças nas correntes do relé diferencial 87, o que pode causar a operação deste para as condições normais de carga do transformador.
- Defasagem nas correntes das bobinas de restrição do relé 87, prejudicando sua característica de desempenho.

3.3 Ajuste da proteção diferencial

Nesta seção serão apresentados os ajustes básicos feitos no relé diferencial. A figura 3.3 mostra as duas situações possíveis que são vistas pelo relé, ou seja, operação normal e situação que representa falta [5], em que os fluxos de corrente trifásicos são apresentados para operação normal e para situação de falta interna.

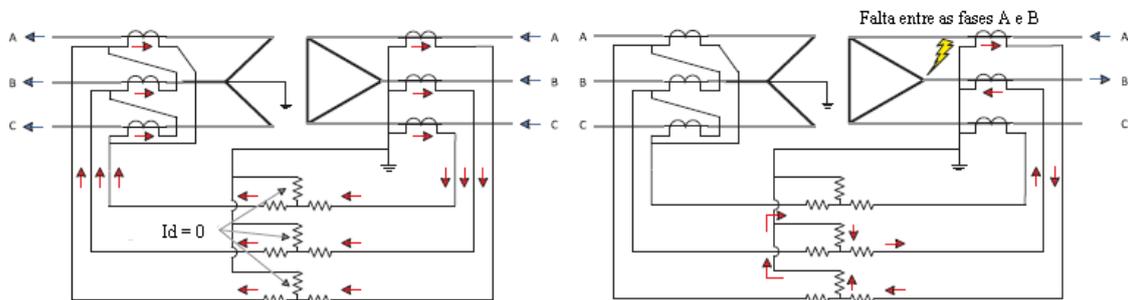


Figura 3.3: Modos de operação: Modo normal (esquerda) e situação de falta (direita).

Na figura 3.3(a) as correntes que entram e saem da zona de operação são iguais, representando uma situação de ausência de falta dentro da zona de operação. Já a Figura 3.3(b) mostra uma situação de falta, na qual as correntes

tendem a alimentar o ponto de defeito criando um desequilíbrio entre a corrente de entrada e de saída da zona. Neste caso, um sinal de *trip* deve ser enviado.

A forma mais utilizada do relé diferencial é o tipo diferencial percentual, que está representado na Figura 3.1, este esquema possui um circuito diferencial que adiciona maior robustez à sensibilização por pequenas correntes diferenciais, uma vez que as bobinas de retenção permitem uma variação nos limiares de atuação. Desta forma, o relé diferencial percentual compara as correntes de restrição com a corrente de operação. Neste caso, a corrente diferencial (ou corrente de operação) pode ser obtida pela Equação 3.1.

De acordo com a lógica do relé diferencial percentual, I_{dif} é proporcional à corrente de falta e aproximadamente zero para operação normal [14]. As Equações (3.2), (3.3) e (3.4) ilustram as diversas alternativas existentes para o cálculo da corrente de restrição.

$$I_{RT} = k(i_{ps} + i_{ss}) \quad (3.2)$$

$$I_{RT} = k(|i_{ps}| - |i_{ss}|) \quad (3.3)$$

$$I_{RT} = \text{Max}(|i_{ps}|, |i_{ss}|) \quad (3.4)$$

Nestas expressões, k é o fator de compensação, geralmente tomado como 1 ou 0,5, e $\text{Max}(\cdot)$ é o maior valor dentre as variáveis apresentadas. A corrente de restrição possui a função de evitar que o relé atue erroneamente devido ao aparecimento de pequenas correntes diferenciais, uma vez que estas podem surgir em condições normais de operação. Tais imprecisões possuem várias e prováveis fontes de erros como os das relações de transformação dos TCs de medição alocados e das mudanças de tapes quando evidenciadas. Os relés de proteção diferencial geram o sinal de disparo ou *trip* quando a equação abaixo é satisfeita.

$$I_{dif} > SLP \cdot I_{RT} \quad (3.5)$$

Sendo que SLP é a inclinação percentual diferencial. Tal parâmetro tem como objetivo fixar uma margem de segurança a partir da qual o relé deverá atuar, uma vez que imprecisões podem ser evidenciadas, conforme citado. A figura 3.4 ilustra uma característica típica de operação do relé diferencial, incluindo as suas zonas de operação e restrição. Alguns ajustes de restrição SLP também são apresentados na figura com o objetivo de acomodar possíveis correntes diferenciais provocadas pelos erros anteriormente citados. A característica consiste de uma linha inclinada (SLP) e uma reta horizontal definindo o limiar mínimo ou de pickup de corrente. A região de operação é localizada acima da característica inclinada, conforme a Equação 3.5, sendo que a região de restrição está localizada abaixo da mesma curva.

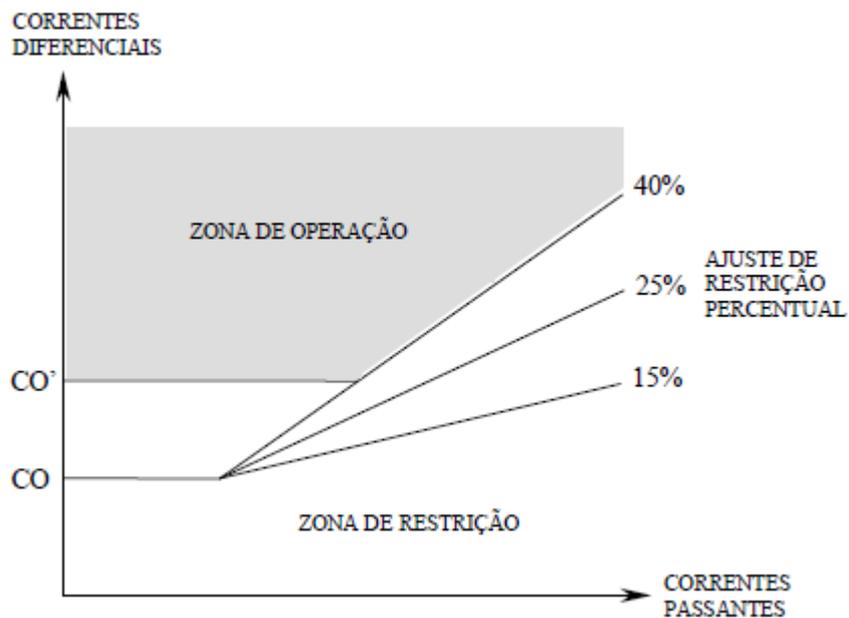


Figura 3.4: Ajuste das zonas de operação.

É importante salientar que o desempenho dos relés diferenciais está vinculado às correntes secundárias dos TCs, uma vez que são estas formas de onda que os dispositivos utilizam para as tomadas de decisão. Assim, quando um TC satura, ou ambos os TCs saturam em níveis diferentes, correntes falsas de operação aparecem no relé diferencial e podem causar a má operação do relé. Imagens precisas das correntes primárias dos TCs eventualmente saturadas podem ser reconstruídas utilizando RNAs.

3.4 Causas do surgimento de correntes diferenciais indesejadas

Uma corrente diferencial pode aparecer algumas vezes devido a manobras operacionais realizadas nos transformadores. Essas correntes não representam defeito, mas podem sensibilizar o esquema de proteção diferencial [42]. Entretanto, em algumas dessas situações não é desejável que o esquema de proteção atue desativando o sistema, pois as mesmas não representam defeitos internos ao transformador. As situações mais evidenciadas na literatura são apresentadas abaixo:

- Corrente transitória de magnetização (*corrente de inrush*);
- Saturação dos TCs devido aos valores elevados de corrente;
- Sobre-excitação do transformador;
- Energização solidária e defeitos internos aos transformadores;
- Eliminação de faltas próximas ao transformador.

3.4.1 Corrente de Energização (Inrush)

A corrente de energização é um fenômeno que tem influência significativa nos ajustes das proteções do transformador e também no sistema a este associado. A corrente de magnetização ocorre no transformador quando a polaridade e a amplitude do fluxo residual não concordam com a polaridade e amplitude do valor instantâneo esperado do fluxo. Sendo assim, se a forma de onda da tensão correspondesse exatamente à do fluxo no núcleo do equipamento no instante do chaveamento, não haveria transitório [45]. A Figura (3.5) ilustra uma forma de onda típica da corrente de energização.

Embora a energização do transformador seja a causa típica das correntes de magnetização, quaisquer transitórios no circuito do transformador de potência podem gerar formas de onda de corrente similares.

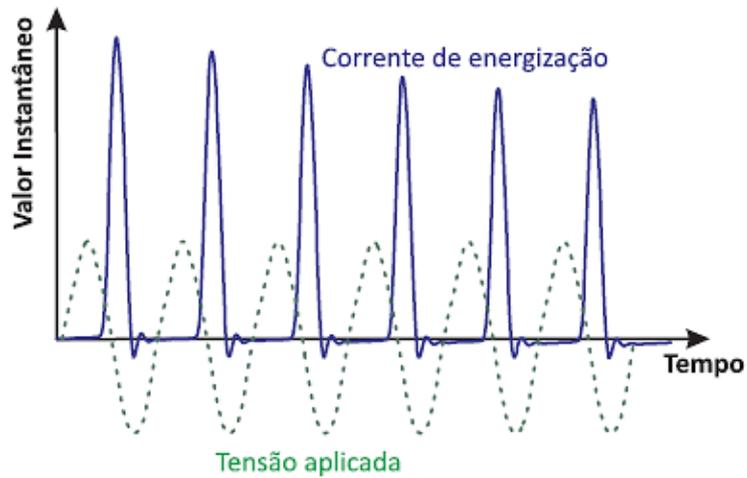


Figura 3.5: Forma de onda da corrente de energização.

Assim, podem-se citar algumas outras causas, como por exemplo, a recuperação da tensão após a eliminação de uma falta externa ou após a energização de um transformador operando em paralelo com outro em serviço.

3.4.2 Saturação dos TCs

Em algumas situações de faltas externas próximas aos TCs, as correntes registradas podem ser elevadas causando distorções na forma de onda da corrente secundária. Dado este fato, o TC alocado junto à ocorrência será levado à condição de saturação, criando mais uma vez uma falsa corrente diferencial que poderá ser mal interpretada pela filosofia de proteção adotada [43]. A saturação dos TCs também pode ser causada pela componente assimétrica da corrente de falta, de forma que, mesmo para baixas correntes de curto-circuito, sejam caracterizadas correntes diferenciais indesejadas e, como consequência, um erro de operação do sistema de proteção.

3.4.3 Sobre-excitação do transformador

Durante a rejeição de carga e outras condições de operação, o transformador pode estar sujeito a sobretensões em regime permanente. Nestas condições, é

observado um alto conteúdo harmônico de ordem ímpar inserido nas formas de onda coletadas, destacando-se as de 3ª e 5ª ordem. Nessa conjuntura, o transformador apresenta características não lineares que causam o aparecimento de correntes diferenciais indesejadas e que podem provocar uma má atuação da proteção diferencial.

3.4.4 Energização solidária

A situação de energização solidária geralmente é tratada pela literatura assumindo que os transformadores estão isolados do sistema elétrico de potência, ou seja, sem que outros tipos de máquinas e/ou componentes elétricos estejam presentes no mesmo circuito. Na prática, porém, os equipamentos são energizados em paralelo com os demais dispositivos, o que pode provocar transitórios e sobretensões apreciáveis nos transformadores próximos, mesmo que estes já estejam em operação normal [5]. Cabe ainda ressaltar que as correntes de energização presentes na energização solidária possuem amplitudes superiores aquelas observadas quando ocorre a energização de um transformador que não opera em paralelo. Para compreender melhor como a energização de um transformador afeta as condições de funcionamento dos demais transformadores ligados na mesma barra, o sistema da Figura 3.6 ilustra a condição descrita.

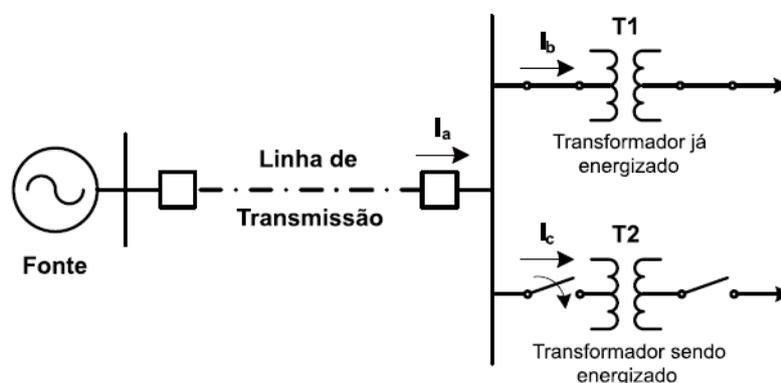


Figura 3.6: Sistema com energização solidária.

Fonte: [1]

Ao conectar o transformador T2 à rede que já alimenta outros transformadores, como o transformador T1, a corrente de energização produzida

nesta conexão estende-se para os demais equipamentos produzindo um fluxo em corrente contínua que se sobrepõe ao fluxo normal de magnetização em corrente alternada. Tal condição de operação aumenta a densidade de fluxo e proporciona altas correntes de magnetização no transformador vizinho T1. Dependendo da amplitude do amortecimento da componente CC, o fenômeno de energização solidária pode elevar o nível de ruído emitido pelos transformadores devido ao aumento da densidade do fluxo no núcleo durante o período transitório. É importante enfatizar que esta condição operativa pode provocar um funcionamento incorreto da proteção diferencial.

3.4.5 Eliminação de faltas próximas ao transformador

Quando uma falta externa próxima ao transformador é removida pelo sistema de proteção, as condições de operação do núcleo do equipamento são similares às situações de energização e também provocam o surgimento de componente adicional na corrente de magnetização. Porém, esta é caracterizada por uma menor amplitude [21], já que não há fluxo remanescente durante o processo.

Como a tensão aplicada aos enrolamentos passa de um valor de pré-falta para um valor de pós-falta, o fluxo concatenado comporta-se do mesmo modo e, dependendo do instante no qual a falta é removida, há o surgimento de uma componente CC no fluxo magnético mútuo e as formas de onda das correntes primárias serão semelhantes às observadas durante a energização.

3.5 Características dos esquemas de proteção diferencial durante a energização de transformadores.

Como foi citado anteriormente, um dos problemas causados pelo aparecimento das correntes de *inrush* é a atuação indevida dos circuitos de proteção, em especial aqueles que operam com relés de operação rápida. Para evitar este comportamento indesejado para o sistema elétrico, os relés diferenciais utilizam-se

do critério de avaliação do conteúdo de harmônicos da corrente, distinguindo uma corrente de *inrush* de uma corrente de curto-circuito [26]. Assim, durante a energização de um transformador em condições normais de operação, os harmônicos são filtrados e analisados com a finalidade de evitar a operação do relé de proteção neste instante.

Para evitar que a proteção diferencial atue no instante da energização do transformador, pode-se:

- i. Bloquear a operação do relé diferencial por 0,1s durante a energização do transformador;
- ii. Usar atenuadores de transitórios;
- iii. Utilizar relés diferenciais com retenção de harmônicos;
- iv. Utilizar relés digitais com lógicas de detenção de harmônicos.

3.5.1 Bloqueio da proteção diferencial

Durante os primeiros seis ciclos (0,1s) após a energização, a corrente de *inrush* apresenta alto conteúdo harmônico, o que a torna bastante distorcida nesse período. Esse fato pode resultar na sensibilização da proteção diferencial instantânea, utilizada geralmente em transformadores de grande porte ou localizados próximos à geração, causando a atuação indevida da mesma. Para evitar este problema, a proteção diferencial instantânea é bloqueada durante o instante de energização do transformador. Entretanto, o recurso de se fazer o bloqueio da atuação da proteção diferencial instantânea é um grande problema caso a energização ocorra em um transformador que apresente um curto-circuito interno, pois, neste caso, a energização ocorrerá simultaneamente com o curto-circuito e o tempo de bloqueio da proteção diferencial instantânea, apesar de ser pequeno, já é o suficiente para produzir danos ao transformador [26]. Assim, outros esquemas de proteção diferencial foram criados para evitar este tipo de problema. Alguns destes esquemas são descritos abaixo.

3.5.2 Proteção diferencial utilizando atenuadores de transitórios

A figura 3.7 mostra um esquema de proteção diferencial com o uso de atenuadores de transitórios.

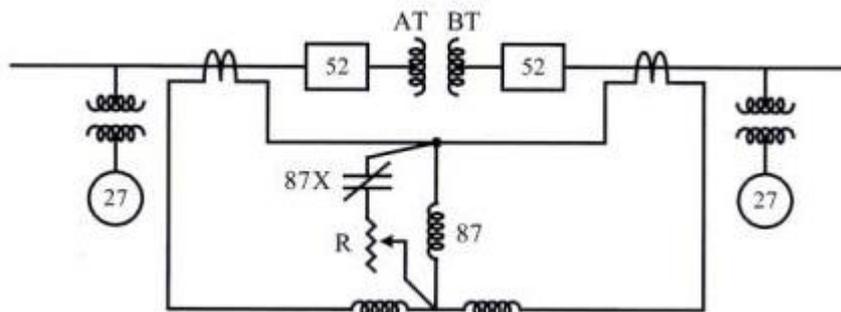


Figura 3.7: Esquema de proteção diferencial com o uso de atenuadores de transitórios.

Fonte: [26]

Neste esquema, o uso de atenuadores de transitórios tem por objetivo derivar a corrente que passa na bobina de operação do relé 87 durante o instante de energização do transformador. Deste modo, a corrente de *inrush* não passa por completo na bobina de operação, evitando a operação do relé 87 temporariamente.

A derivação da corrente de *inrush* no esquema da figura 3.7 é feita através do relé auxiliar temporizado 87X que apresenta seu contato normalmente fechado enquanto este se encontra desativado [26]. Assim, passado o tempo ajustado no relé 87X, ocorre à abertura do seu contato e, então, o ajuste original de sensibilidade do relé 87 é normalizado. Este esquema pode apresentar problemas no caso de uma falta ocorrer junto com a energização.

3.5.3 Relé diferencial com retenção de harmônicos

Existem diferenças básicas entre as correntes de *inrush* e as correntes de curto-circuito. Tais diferenças vêm sendo utilizadas na aplicação de relés diferenciais com retenção de harmônicos em esquemas de proteção de transformadores de potência. As diferenças entre esses dois tipos de corrente são mostradas a seguir:

- A corrente de curto-circuito apresenta harmônicos em pequena amplitude, predominante a componente de frequência fundamental. Nesse caso, o relé diferencial deve operar normalmente.
- A corrente transitória de *inrush* apresenta um grande conteúdo harmônicos, sendo predominante o 2º harmônico. Nesse caso, a proteção diferencial não deverá operar.

A figura 3.8 mostra um esquema de relé diferencial com retenção de harmônicos aplicado na proteção de cada transformador monofásico de um banco trifásico.

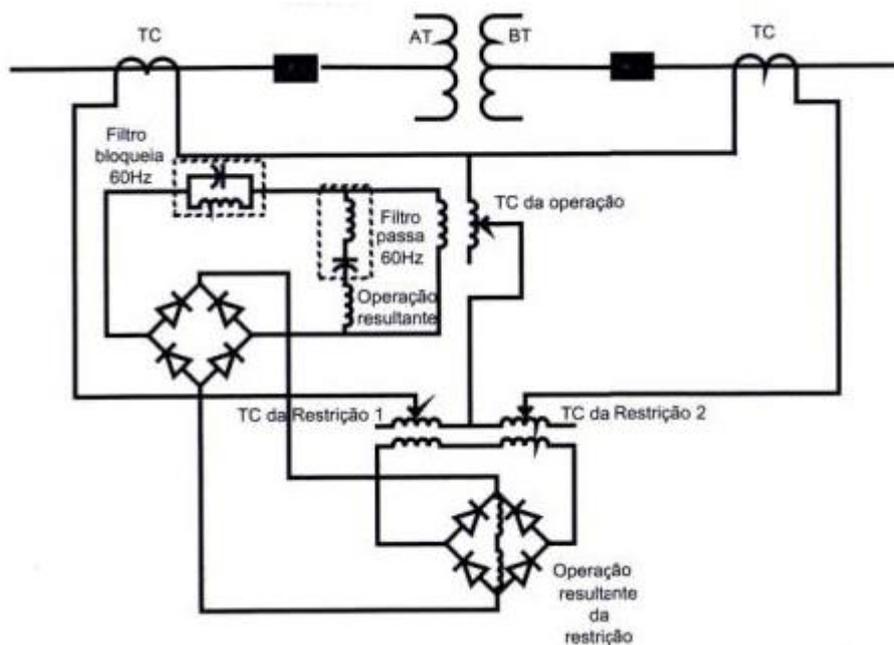


Figura 3.8: Relé diferencial com retenção de harmônicos.

Fonte: [26]

A sequência de operação da proteção diferencial com retenção de harmônicos é mostrada logo a seguir:

- A corrente de *inrush* só aparecerá no lado de AT do transformador, pois, inicialmente, foi considerado que apenas o disjuntor do lado de AT encontrava-se fechado durante a energização;
- A corrente de *inrush* secundária do TC conectado ao lado de AT do transformador passará pela bobina de restrição 1 e pela bobina primária do TC de operação do relé diferencial;

- No secundário da bobina de restrição 1, a corrente de *inrush* será retificada e passará totalmente na bobina de restrição;
- A corrente de *inrush* secundária do TC de operação do relé diferencial terá dois caminhos para seguir:
 - A componente fundamental de 60 Hz passará pelo filtro correspondente alimentando a bobina de operação;
 - O restante da corrente de *inrush*, sem a parcela da componente fundamental de 60 Hz, passará pelo filtro de bloqueio de 60 Hz, sendo retificada na ponte de diodos e logo após passando na bobina de restrição.

Desta maneira, o efeito de restrição é maior que o efeito de operação o que faz com que o relé não opere no instante de energização do transformador.

3.5.4 Relé diferencial com uma unidade de bloqueio de harmônico

O relé diferencial com uma unidade de bloqueio de harmônico é composto de um relé diferencial 87 acoplado a uma unidade de observação do 2º harmônico. Essa unidade de observação bloqueia a operação do esquema de proteção na ocorrência de uma corrente de *inrush*, ou seja, na energização do transformador [26].

A figura 3.8 mostra o esquema de proteção descrito. Vale ressaltar que nesta figura a proteção diferencial é mostrada só para uma fase, enquanto que a unidade de bloqueio de 2º harmônico é trifásica.

O funcionamento do esquema da figura 3.8 ocorre da seguinte forma: quando a corrente presente na bobina de restrição apresentar a componente de 2º harmônico menor ou igual a 15% da componente fundamental ocorre a operação do esquema de proteção. Caso contrário, a unidade de observação de 2º harmônico bloqueia a operação do relé 87, impedindo o desligamento do transformador durante o processo caracterizado como energização.

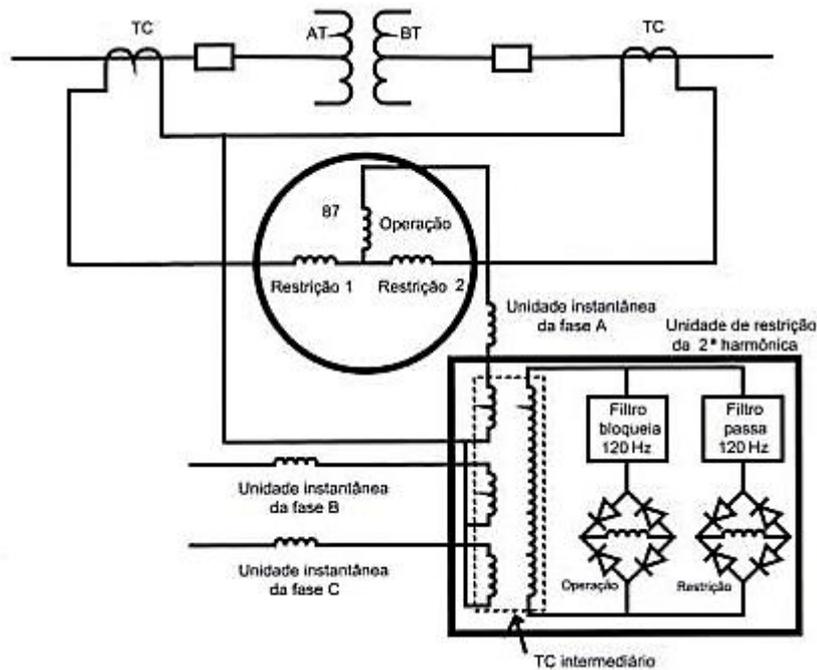


Figura 3.8: Unidade de bloqueio por 2º harmônico acoplado ao relé diferencial (87).

Fonte: (KINDERMANN, 2006)

3.5.5 Relé diferencial digital

Os relés diferenciais digitais para proteção de transformadores trabalham com a utilização dos valores discretos das ondas de corrente analisadas. Desta maneira, estes relés possuem algoritmos internos capazes de distinguir correntes de curto-circuito de correntes de *inrush*. Dentre esses algoritmos de atuação, pode-se destacar:

- A aplicação da transformada de Fourier sobre a corrente diferencial de operação obtendo-se, assim, a componente fundamental e de 2º harmônico desta corrente. Caso o 2º harmônico seja relativamente grande se comparado com o fundamental, o relé não opera.
- A medição do tempo decorrido entre os picos sucessivos da corrente diferencial de operação e, a partir desse dado, o relé decide se deve atuar ou não.

As concessionárias estão instalando os relés digitais nas subestações, em

substituição aos relés eletromecânicos. Os relés digitais tem como vantagens o conjunto de funções de proteção em apenas um equipamento, possibilidade de implementação de variadas lógicas de proteção, maior resolução dos ajustes e, em alguns casos, a possibilidade de que o engenheiro de proteção realize múltiplos grupos de ajustes. O relé digital pode diferenciar uma situação de falta de uma situação normal de operação do transformador com alta sensibilidade e flexibilidade [34], evitando o desligamento desnecessário do equipamento no sistema de potência. As concessionárias devem manter um padrão de qualidade do serviço de transmissão de energia para não sofrerem prejuízos devidos à indisponibilidade do transformador ou de outra função de transmissão.

No entanto, os algoritmos utilizados nos relés digitais são baseados na análise da Transformada de Fourier que possui limitações, fazendo com que a proteção dispare erroneamente e retirando o transformador do sistema elétrico. O presente trabalho apresenta uma análise de outras técnicas alternativas aplicadas aos algoritmos dos relés de proteção, visando contornar as dificuldades impostas pela Transformada de Fourier como o objetivo de melhorar a decisão de trip dos relés comerciais.

4 Ferramentas Inteligentes aplicadas à proteção diferencial

4.1 Introdução

Algoritmos para proteção de transformadores de potência devem ser concebidos para atuar corretamente na presença de correntes de “inrush” e em condições de sobre-excitação ou saturação de TCs. Sendo assim, a proteção diferencial deverá prever sua inibição quando forem identificadas situações semelhantes às descritas na seção anterior. Os algoritmos mais tradicionais utilizam-se do fato de que as correntes de magnetização, de sobre-excitação e provenientes da saturação dos TCs possuem características peculiares que as diferenciam das correntes de faltas normais, sendo estas diferenças baseadas, predominantemente, em componentes harmônicas.

As correntes de falta, em geral, apresentam-se como componentes puras da frequência fundamental (60 Hz), enquanto que as correntes de magnetização apresentam, na maioria das vezes, significativa presença de componentes de 2ª ordem (120 Hz). Já as correntes de sobre-excitação apresentam significativa presença de componentes de 3ª e 5ª harmônicas (180 Hz e 300 Hz, respectivamente). Por sua vez, as correntes procedentes da saturação dos TCs não apresentam conteúdo de componentes harmônicos de ordem par, mas apresentam significativa presença de componentes de 3ª ordem (180 Hz). Vale ressaltar que estas características possuem algumas exceções, pois se observa, em certas situações, a presença de componentes de 2ª ordem nas correntes de falta e ainda reduzida presença de componentes de 2ª ordem nas correntes de “inrush” [5]. Isto se deve ao fato de que nos transformadores mais modernos, novas tecnologias e materiais têm sido utilizados com o objetivo de melhorar o desempenho destes equipamentos em situações de saturação.

A principal tarefa então, além das rotinas normais de proteção diferencial, é fazer a distinção entre as correntes de “inrush” (ou de saturação de TC) e as correntes de falta. Em geral a Transformada Discreta de Fourier, com uma taxa de

amostragem adequada, é utilizada para decompor o sinal de corrente em suas componentes harmônicas e, a partir de certos critérios de restrição, é tomada a decisão de operação ou bloqueio de relé diferencial. A transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) é um algoritmo inteligente que implementa a Transformada Discreta de Fourier (TDF). Ele fornece os mesmos resultados da TDF, porém com uma velocidade bem maior, em virtude da eficiência do algoritmo.

Os relés digitais atuais utilizam a Transformada de Fourier para fazer a decomposição harmônica e, baseados na análise dessas componentes, os relés possuem um algoritmo que faz a decisão entre bloquear a operação da proteção ou disparar um sinal de trip para a abertura do disjuntor correspondente.

No entanto, a transformada de Fourier tem suas limitações que podem até mesmo influenciar de maneira negativa na decisão de operação do esquema de proteção diferencial dos transformadores de potência. Por isso, o presente capítulo tem como objetivo apresentar três técnicas alternativas capazes de substituir o atual algoritmo utilizado pelos relés digitais.

4.2 Transformada Wavelet

A Transformada Wavelet (TW) tem sido aplicada nas mais diversas áreas [16], disponibilizando algoritmos rápidos. Mesmo sendo uma técnica recente, se comparada com outras técnicas de processamento de sinais, a transformada wavelet tem atraído a atenção de muitos Matemáticos, Engenheiros e Cientistas em geral, pois se trata de uma ferramenta muito versátil e de conteúdo matemático muito rico.

Quando um sinal é analisado com a TW são obtidas informações tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, ou seja, esta é uma ferramenta que possibilita saber exatamente quando começa e quando termina determinado evento. Esse é o principal objetivo da transformada wavelet.

4.2.1 Antecedentes a Transformada Wavelet

No início do século XIX Fourier apresentou uma nova formulação matemática capaz de visualizar os sinais no tempo sob uma nova ótica. A análise espectral ampliou as capacidades humanas, e isto não é mera conotação. "Enxergar" no domínio da frequência significou o poder de extrair informações das ondas eletromagnéticas e utilizá-las para explorar o universo. A Transformada de Fourier foi concebida para tratar sinais estacionários, ou seja, funções cujo espectro não varia no decorrer do tempo. Desta forma, a análise de Fourier não tem caráter local e é puramente baseada na frequência, como pode ser explicado pelo Princípio da Incerteza de Gabor-Heisenberg.

O Princípio da Incerteza estabelece que seja possível fazer correspondência entre os intervalos de tempo de uma função e as bandas de frequência presentes. Contudo, afirma que a diminuição do intervalo de tempo (maior exatidão no domínio do tempo) reflete numa maior incerteza no domínio da frequência [15]. Desta forma, a análise sobre um instante de tempo não tem nenhuma exatidão ou, em outras palavras, é impossível saber quais frequências estão presentes num instante de tempo. Por outro lado, se o intervalo de tempo é infinito, é possível identificar cada uma das frequências presentes, mas não dá para se ter nenhuma ideia de localização (incerteza no domínio do tempo). A transformada de Fourier se enquadra neste caso, pois trata todo o sinal sob um único intervalo $[-\infty, +\infty]$, como mostra a Equação 4.1.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.1)$$

Com o objetivo de balancear a análise entre os domínios do tempo e frequência possibilitando o tratamento de sinais não estacionários, Dennis Gabor sugeriu uma modificação na equação da Transformada de Fourier [47].

$$F(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g^*(t - \tau)f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.2)$$

A modificação possibilitou tratar os sinais considerando intervalos, conferindo um caráter de localidade à análise de Fourier. Contudo, observe na Equação 4.2 que Gabor não alterou os limites da integral. Então, os intervalos foram definidos a partir da função gaussiana $g(t)$ no interior da integral. A gaussiana apresenta energia concentrada, como mostra a Figura 4.1. Deste modo, o produto do sinal de entrada $f(t)$ pela gaussiana fica limitado à região onde a energia está concentrada. Para “pular” de um intervalo para outro é necessário mover a região de energia, ou seja, deslocar a função gaussiana. Para isso foi incluído o parâmetro “ τ ”.

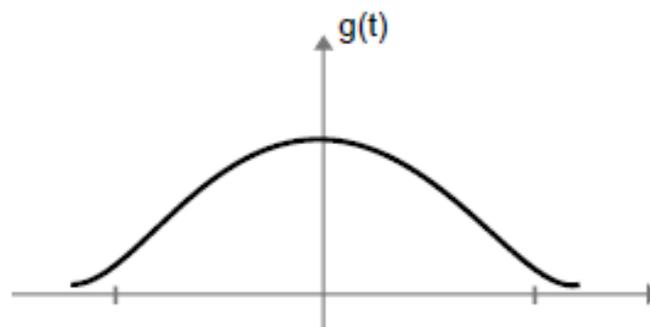


Figura 4.1: Função Gaussiana.

Essa nova formulação ficou conhecida como Transformada de Gabor ou STFT (Short Time Fourier Transform) e pode ser interpretada como uma janela deslizante de tamanho fixo que percorre o sinal, definindo intervalos a serem processados por uma espécie de “Transformada de Fourier Local”. Esta é uma interpretação informal, que considera a ação da gaussiana sobre o sinal de entrada, mas que é bastante interessante para efeito de entendimento.

Uma interpretação mais formal para a Transformada de Gabor pode ser obtida considerando que a gaussiana age diretamente sobre as funções senoidais de base. A figura 4.2(a) mostra uma senóide com frequência w_s e, ao lado, a sua resposta espectral. O produto entre a gaussiana e a senóide funciona como uma modulação, gerando uma onda oscilatória com energia concentrada.

A figura 4.2(b) mostra a onda e a resposta no domínio da frequência. O resultado pode ser encarado como uma consequência direta do princípio da incerteza, pois limitando a senóide no tempo (maior resolução no tempo), temos

uma resposta mais espalhada (menor resolução) no domínio da frequência. Diferentemente da Transformada de Fourier clássica, que responde com um único espectro, que representa uma análise global média do sinal e praticamente desconsidera perturbações esporádicas que alterem momentaneamente as bandas de frequência, a Transformada de Gabor responde com um conjunto de espectros que expressam o comportamento da frequência local. O espectro $F(\omega, \tau_1)$, por exemplo, corresponde ao intervalo delimitado pela função $g(t - \tau_1)$.

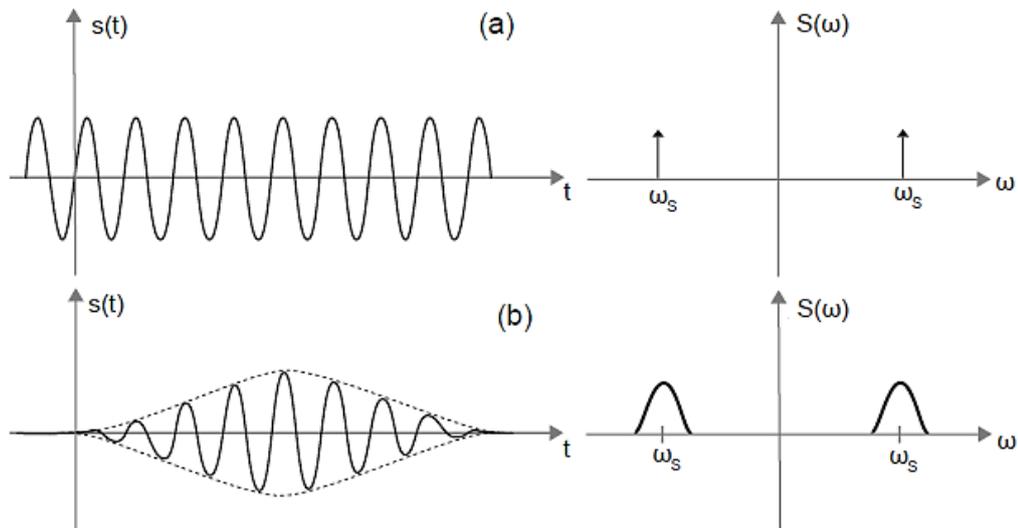


Figura 4.2: Efeito da Gaussiana nas Funções de base.

A STFT resolveu o problema da análise simultânea nos domínios do tempo e frequência. Entretanto, a solução não foi tão abrangente. Uma vez definido o tamanho dos intervalos de processamento (espalhamento da função gaussiana), a relação de incerteza entre os domínios não pode ser alterada. A análise passa a considerar um único ponto de vista, uma única resolução. A análise de resolução única é representada graficamente pela figura 4.3(a).

Avaliar sinais sob uma única resolução é problemático. Se for idealizado um gerador de sinais fornecendo uma senóide de baixa frequência e esta for aumentada gradativamente até que, em certo momento, a forma de onda seja alterada para dente de serra, um osciloscópio regulado para baixas frequências mostrará o sinal da Figura 4.4.

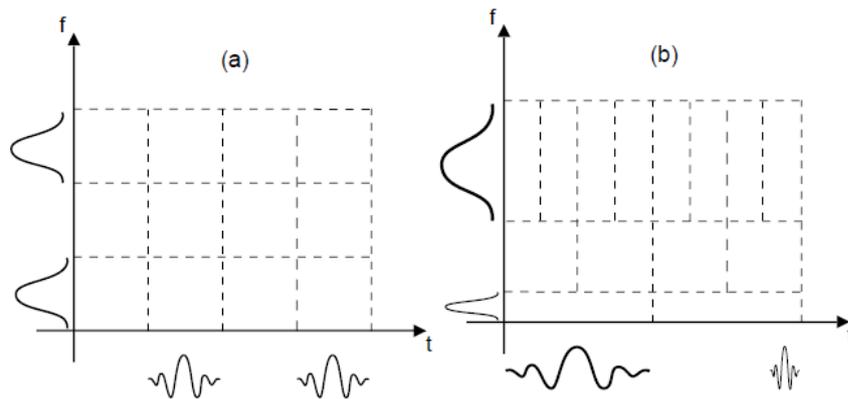


Figura 4.3: Análise com uma única resolução (a) e análise de multiresolução (b).

Observe que a mudança no formato da onda não é percebida. A visualização só é possível por meio de uma ampliação na região de alta frequência. Ampliação esta que consiste num aumento de resolução no domínio do tempo, o que não é possível na análise de Gabor.

De uma forma geral, a dinâmica dos sinais de alta frequência pode ser percebida por meio da observação de um curto intervalo de tempo, enquanto que a dinâmica dos sinais de baixa frequência só é compreendida após a análise de um intervalo relativamente maior.

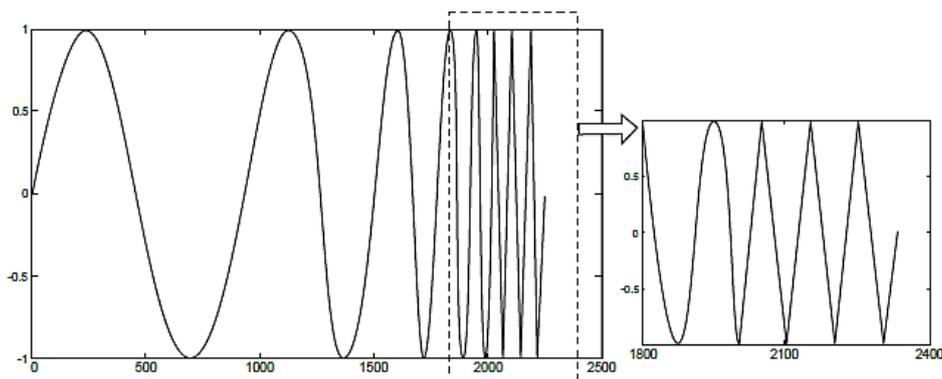


Figura 4.4: Problema da análise de resolução única.

Por isso, se diz que a análise de sinais de alta frequência exige alta resolução no domínio do tempo e os sinais de baixa frequência exigem resolução baixa. Mas, e quando o sinal apresenta trechos de baixas e altas frequências? Como

tratar estes sinais? Na década de 80, o Geofísico Jean Morlet se deparou com este problema no estudo de sísmica aplicado à exploração de petróleo. Os sinais sísmicos são de natureza não estacionária. A componente fundamental é de baixa frequência, mas é comum a ocorrência de variações de alta frequência no decorrer do tempo.

A Transformada de Gabor é ineficiente para o tratamento de tais sinais, pois promove uma análise com uma única resolução. Definir um tamanho para janela gaussiana que se adeque à análise de todas as frequências é impossível. Para resolver o problema, Morlet desenvolveu uma nova técnica que permitia a análise sobre múltiplas resoluções e ficou conhecida como Transformada Wavelet. A expressão Wavelet significa “pequenas ondas”, sendo uma menção às funções de base, pois, assim como Gabor, Morlet utilizou ondas oscilatórias com energia concentrada.

4.2.2 Funções Wavelets

O funcionamento da TW está centrado na utilização de pequenas formas de onda (funções) que são localizadas no tempo. Estas funções são manipuladas através de processos de translações (movimentos sobre o sinal em análise) e de dilatações, ou contrações. Por estas manipulações transforma-se um sinal de entrada em outra forma de onda, com “desdobramentos” no tempo e em escalas (níveis). Existem várias wavelets que podem ser utilizadas para processamento de sinais, todas com o formato de pequenas formas de onda, como ilustra a Figura 4.5. A escolha da melhor Wavelet a ser utilizada em determinada aplicação depende tanto da natureza do sinal quanto dos requisitos de análises que se pretende realizar [1].

Nesse sentido, as funções wavelets têm que satisfazer certas condições matemáticas para que possam originar uma família de wavelets:

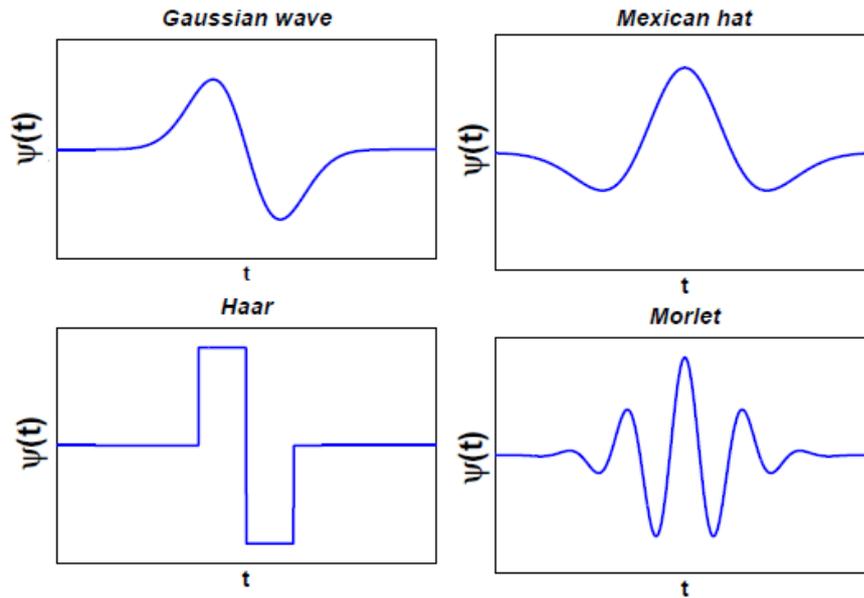


Figura 4.5: Formas básicas de algumas funções wavelets que são dilatadas para serem utilizadas na TW.

Fonte: [1]

- i. A wavelet tem que ser absolutamente integrável:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt < \infty \quad (4.3)$$

- ii. Tem que ter energia finita, a ser preservada pela análise:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (4.4)$$

Na prática, as funções wavelets são normalizadas para que sua energia seja unitária.

- iii. A condição de admissibilidade, dada pela Equação (4.5), deve ser respeitada:

$$C_g = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(F)|^2}{f} df < \infty \quad (4.5)$$

Em que $\psi(F)$ é a Transformada de Fourier de $\psi(t)$.

- iv. As wavelets complexas não possuem componentes de frequência negativa.

4.2.3 Transformada Wavelet Contínua

Uma wavelet mãe é utilizada para análise de sinais por meio de dois procedimentos: o procedimento de dilatação (contraíndo ou dilatando a forma de onda) e o de translação. As dilatações e contrações da wavelet são controladas pelo parâmetro “a”. Já para movimentar a wavelet ao longo do sinal em análise (translação) é utilizado o parâmetro “b”. Assim, a função pode ser escrita, em termos de “a” e “b” da forma como é apresentada na Equação (4.6). Verificando-se essa equação, percebe-se que a wavelet mãe original tem $a = 1$ e $b = 0$.

$$\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.6)$$

Na Figura 4.6, exemplifica-se o procedimento de dilatação aplicado às funções *Wave Gaussiana* e *Mexican Hat*. Nesta figura os valores do parâmetro “a” obedecem às seguintes relações:

$$a_1 = a_2/2 \quad e \quad a_3 = 2 * a_2$$

Em que a_1 , a_2 e a_3 representam os parâmetros de dilatação para o caso mostrado na figura 4.6.

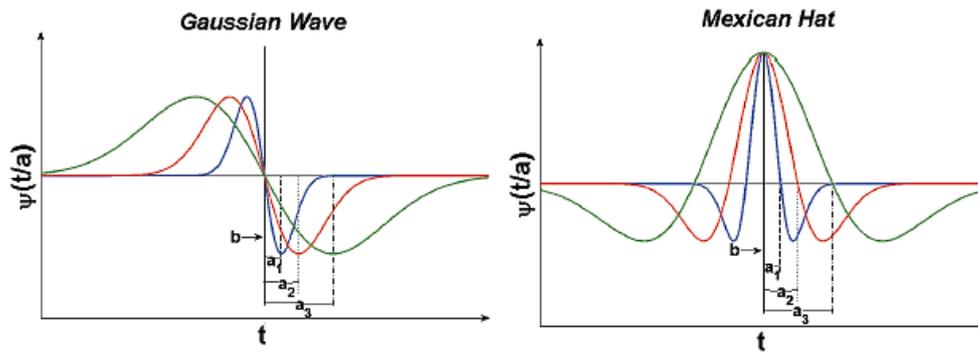


Figura 4.6: Dilatação de uma wavelet.

Fonte: [9]

A Figura 4.7 exemplifica o processo de translação para as funções wavelet *Gaussiana* e *Mexican Hat*, respectivamente, adotando-se as seguintes relações para o valor de “b”:

$$b_2 = 2 * b_1 \text{ e } b_3 = 4 * b_1$$

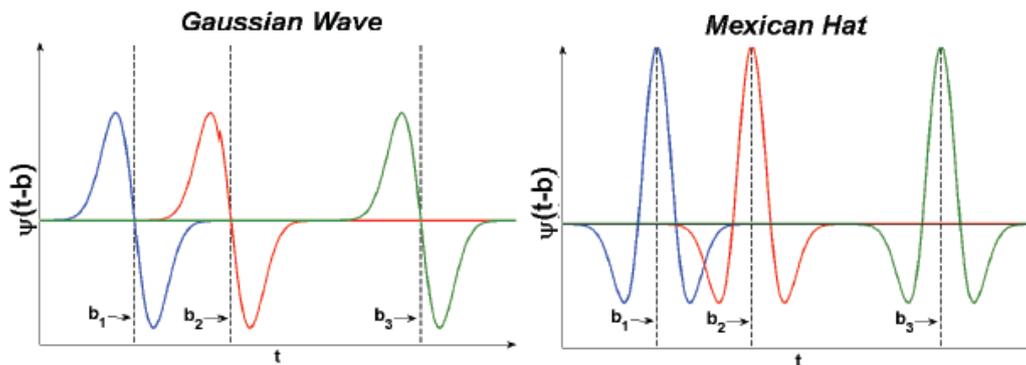


Figura 4.7: Translação de uma wavelet.

Fonte: [9]

A definição da Transformada Wavelet Contínua (TWC) de um sinal para uma faixa de valores de “a” e “b” pode ser representada pela Equação (4.7):

$$T(A, B) = \omega(a) \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (4.7)$$

Em que $w(a)$ é uma função geralmente definida como $1/\sqrt{|a|}$, em razão da conservação da energia do sinal. Portanto, a TWC é a correlação do sinal de entrada com um conjunto de wavelets de várias larguras (dilatadas ou contraídas) transladadas ao longo do sinal. Assim como a TF, a TW tem sua inversa, que está definida na Equação (4.8).

$$x(t) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} T(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{dad b}{a^2} \quad (4.8)$$

O sinal original é reconstruído a partir de sua transformada pela integração desta para todos os valores de escala e localização (parâmetros a e b respectivamente).

4.2.4 Transformada Wavelet Discreta

Assim como a variável temporal t , os parâmetros de translação e escala da Transformada Wavelet Contínua, descrita pela Equação (4.7), variam de forma infinitesimal. Fato este que torna a Transformada não implementável computacionalmente, pois, mesmo dispondo de recursos ilimitados de processamento, o cálculo consumiria um tempo infinito. Uma alteração infinitesimal na função de base reflete de forma praticamente inexpressiva sobre o resultado do produto interno. Assim, os deslocamentos e escalas contínuas acrescentam uma grande carga de informações redundantes. Desta forma, definir variações espaçadas dos parâmetros “a” e “b” não limita a análise.

A discretização, expressa pelas Equações (4.9) e (4.10), serve a este propósito, sendo o primeiro passo para a concepção de uma equação computacionalmente implementável.

$$a = a_0^{-m} \quad (4.9)$$

$$b = nb_0 a_0^{-m} \quad (4.10)$$

Se por um lado a variação contínua dos parâmetros de escala e translação ocasiona a geração de informações redundantes, por outro a variação muito espaçada pode acarretar a perda de informação. Os termos a_0 e b_0 , denominados, respectivamente, de passo de escala e translação, estabelecem unidades bases para a variação de “a” e “b”. Os passos são valores cuidadosamente pré-estabelecidos. A situação mais comum considera $a_0 = 2$ e $b_0 = 1$, sendo denominada de Análise Diádica. As variáveis m e n pertencem ao conjunto dos inteiros positivos e são parâmetros discretos. A Transformada Wavelet é redefinida para considerar parâmetros discretos de translação e escala como mostra a Equação (4.11).

$$W(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^{-m}}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi \left(\frac{t - nb_0 a_0^{-m}}{a_0^{-m}} \right) dt \quad (4.11)$$

A discretização dos parâmetros “a” e “b” não são suficientes para tornar a equação implementável. Observe que a variável independente t não é discreta, ou seja, tanto $f(t)$ como as Wavelets são funções contínuas. Somente com a discretização da variável independente obtém-se a Equação (4.12), que é implementável e expressa a Transformada Wavelet Discreta (TWD).

$$W(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^{-m}}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) \psi \left(\frac{k - nb_0 a_0^{-m}}{a_0^{-m}} \right) \quad (4.12)$$

A Transformada Wavelet Contínua prevê uma análise de multiresolução de difícil representação gráfica, uma vez que os parâmetros de escala e translação se alteram de forma gradual. A representação mostrada na figura 4.3(b) corresponde ao caso diádico da Transformada Discreta. Na análise diádica, expressa pela Equação (4.13), as alterações no espalhamento da função Wavelet respeitam um fator de escala igual a 2, ou seja, à medida que a banda de frequência analisada aumenta, o espalhamento da função Wavelet reduz pela metade.

$$W(m, n) = 2^{m/2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k) \Psi(2^m k - n) \quad (4.13)$$

4.2.5 Análise Multiresolução

A TW é uma técnica que recentemente vem sendo bastante utilizada em SEPs, pois com esta ferramenta é possível precisamente detectar o início de uma descontinuidade no sinal, quando existente, referenciando-o ao domínio do tempo, além de possibilitar uma boa extração das características do mesmo.

Em 1989, o Engenheiro francês Stephane Mallat concebeu um algoritmo eficiente para tratar o caso diádico da Transformada Wavelet Discreta. O algoritmo utiliza bancos de filtros para decompor de forma recursiva os sinais, exigindo menos recursos computacionais, e por isso, tornou-se a maneira mais elegante de implementar a Transformada Wavelet.

A ideia do algoritmo é que a cada iteração sejam criadas duas séries de coeficientes $c(k)$ e $d(k)$. Os coeficientes da série $c(k)$ armazenam apenas informações de baixa frequência e são denominados de coeficientes de aproximação. Já a série $d(k)$ armazena as informações de alta frequência, os chamados coeficientes de detalhe. A decomposição é realizada por meio de duas funções, a função de escala $\varphi(t)$ ou Wavelet-pai e a função de detalhe $\Psi(t)$, também chamada de Wavelet-mãe. A função de escala está associada à geração dos coeficientes $c(k)$, ao passo que a Wavelet-mãe está relacionada à série $d(k)$, como mostra a Equação 4.14.

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c(k)\varphi(t-k) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d(k)\Psi(t-k) \quad (4.14)$$

Observe, entretanto, que a equação 4.14 expressa uma única decomposição, a decomposição realizada sobre o sinal original durante a primeira iteração do algoritmo. As demais decomposições utilizam como base os coeficientes de baixa frequência gerados na decomposição anterior, pois como mencionado anteriormente, a análise das baixas frequências exige baixa resolução no domínio do tempo, o que implica numa alta resolução no domínio da frequência. Assim, à

medida que se aproxima das baixas frequências, deve-se aumentar a resolução, o que é conseguido através das decomposições.

A equação de decomposição recursiva (Equação 4.15) considera uma única série de coeficientes de baixa frequência $c_{j_0}(k)$, que representa a última série de coeficientes não decomposta, e “J” séries de alta frequência, onde “J” é o número de iterações do algoritmo.

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j_0}(k)\varphi_{j_0}(t-k) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=j_0}^{j-1} d_j(k)\Psi_j(t-k) \quad (4.15)$$

Na prática, a Análise de Multiresolução (AMR) não utiliza as funções de escala e detalhe. A implementação é feita por meio de dois filtros ($g(n)$ e $h(n)$). O filtro $g(n)$ é passa-baixa, sendo responsável pela geração dos coeficientes $c(k)$, enquanto que o filtro passa-alta $h(n)$ responde pelos coeficientes $d(k)$. As equações 4.16 e 4.17 mostram como são geradas as séries de coeficientes a partir dos filtros.

$$c_j(k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{j+1}(m)g(m-2k) \quad (4.16)$$

$$d_j(k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{j+1}(m)h(m-2k) \quad (4.17)$$

É importante salientar que, diferentemente da equação 4.15, nas equações 4.16 e 4.17 os índices j das séries $c_j(k)$ e $d_j(k)$ são puramente ilustrativos, servindo apenas para definir que séries c_j e d_j quaisquer são calculadas a partir dos coeficientes de baixa frequência c_{j+1} obtidos na decomposição anterior.

A maneira mais fácil de entender a AMR é através do diagrama de blocos da Figura 4.8. O diagrama mostra três decomposições e os coeficientes da série c_{j+1} correspondem ao sinal original. O símbolo “ $\downarrow 2$ ”, conhecido como operador de decimação por dois, indica que a cada dois valores obtidos na convolução um é descartado. Na realidade, o operador é apenas simbólico. Os valores

“desnecessários” não são calculados, uma vez que calcular coeficientes para descartar em seguida é um desperdício computacional.

A decimação é um procedimento de descarte espaçado de amostras de um sinal discreto, que equivale a reamostrar o sinal contínuo com uma frequência de amostragem menor. No caso da AMR, a decimação minimiza a perda de informação por efeito aliasing.

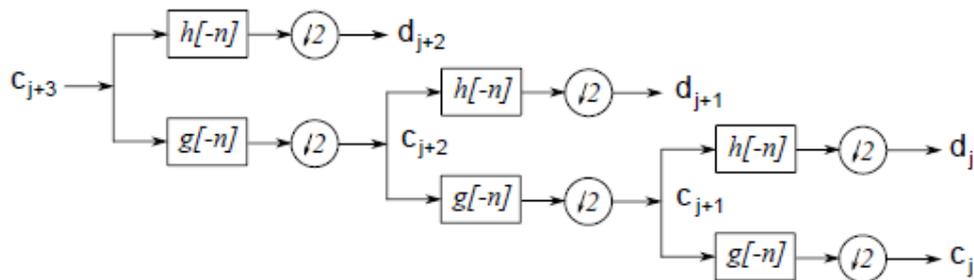


Figura 4.8: Decomposição de um sinal pela TW.

A Transformada Wavelet permite extrair do sinal informações que não são obtidas por meio das Transformadas de Fourier e Gabor. Estas informações tornam as mudanças de frequência mais visíveis, ou seja, dão maior clareza à análise espectral. Cabe frisar que o filtro passa-baixa sempre fornecerá a aproximação do sinal, pois desempenha o papel da função φ , enquanto que o filtro passa-alta tem a mesma função de ψ e, portanto, fornecerá o detalhe do sinal original. O sinal resultante da filtragem é dado pela concatenação da aproximação com os detalhes.

Como apresentado, a TWD de um sinal não é única, uma vez que depende do filtro passa-baixa e do filtro passa-alta utilizado. Sendo assim, um parâmetro chave para trabalhar com a TW é a escolha da wavelet mãe que será empregada. A literatura aponta, por exemplo, que a família Daubechies é uma boa escolha para a maioria das situações presenciadas em um SEP, pois, geralmente, propicia melhor identificação de fenômenos com decaimentos e oscilações rápidas, além de transitórios, que são características típicas destes eventos. Verifica-se também que wavelets com suporte menor (filtros com poucos coeficientes) são ideais para localizar fenômenos no tempo. Já fenômenos com variações mais lentas, como

variação de tensão, podem ser mais bem identificados por wavelets com maior quantidade de coeficientes.

4.2.6 A Transformada Wavelet Packet

A TWP discreta consiste em uma generalização da TW na qual os filtros são aplicados sempre à aproximação do sinal e ao detalhe, resultando no desenvolvimento completo da árvore de coeficientes [24], como pode ser visualizado na Figura 4.9. Tal abordagem resulta em uma melhor resolução no domínio da frequência, possibilitando uma melhor extração das características desejadas nesta aplicação. A Tabela 4.1 exemplifica como ocorre a divisão de frequência na aplicação da TWP.

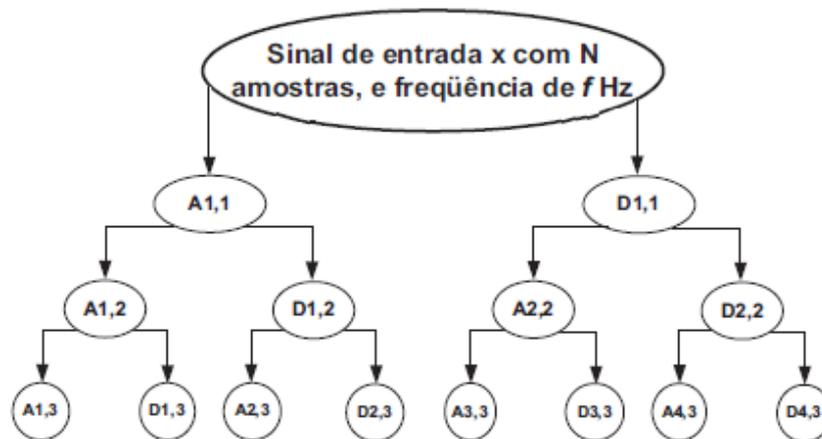


Figura 4.9: Árvore de coeficientes quando da aplicação da TWP até o terceiro nível.

Tabela 4.1: Faixas de frequência da aplicação da TWP ilustrada na Figura 4.9.

Folha	Nº amostras	Faixa de frequência (Hz)
Sinal de entrada	N	0 ~ f
$A_{1,1}$	N/2	0 ~ f/2
$D_{1,1}$	N/2	f/2 ~ f
$A_{1,2}$	N/4	0 ~ f/4
$D_{1,2}$	N/4	f/4 ~ 2f/4
$A_{2,2}$	N/4	2f/4 ~ 3f/4
$D_{2,2}$	N/4	3f/4 ~ f
$A_{1,3}$	N/8	0 ~ f/8
$D_{1,3}$	N/8	f/8 ~ 2f/8
$A_{2,3}$	N/8	2f/8 ~ 3f/8
$D_{2,3}$	N/8	3f/8 ~ 4f/8
$A_{3,3}$	N/8	4f/8 ~ 5f/8
$D_{3,3}$	N/8	5f/8 ~ 6f/8
$A_{4,3}$	N/8	6f/8 ~ 7f/8
$D_{4,3}$	N/8	7f/8 ~ f

A Equação 4.18 mostra como calcular a energia espectral dos detalhes da Transforma Wavelet [8].

$$P_{det_i} = \sum_{k=1}^n I_{det-i}^2(k)\Delta t \quad (4.18)$$

Em que:

P_{det_i} – Energia Espectral de cada detalha “i”.

Δt – Intervalo de tempo de amostragem.

n – Número de amostras na janela.

I – modulo da corrente

4.2.7 Transformada Wavelet e a Proteção Diferencial

As funções Wavelet Daubechies possuem algumas peculiaridades como: detecção de sinais de baixa amplitude, curta duração e rápido decaimento, que são características comuns em alguns sinais de faltas em sistemas elétricos de potência

[12]. Por isso, normalmente, uma wavelet do tipo Daubechies é utilizada para análise de sinais do sistema elétrico.

Os coeficientes de Detalhes são sensíveis a variações dos sinais analisados, então a equação 4.18 pode ser utilizada para calcular os espectros de energia de cada detalhe para ajudar na distinção entre a caracterização de falta e operação normal do transformador de potência.

A TW é muito útil para detectar cenários que representam saturação do transformador de corrente, pois a saturação do núcleo do TC dá origem a descontinuidade na forma de onda de corrente. Essa descontinuidade pode ser facilmente detectada pelos coeficientes da TW. A Figura 4.10 mostra a relação entre a saturação do sinal do TC e o coeficiente de detalhe 1 da Wavelet Daubechies de 4ª ordem.

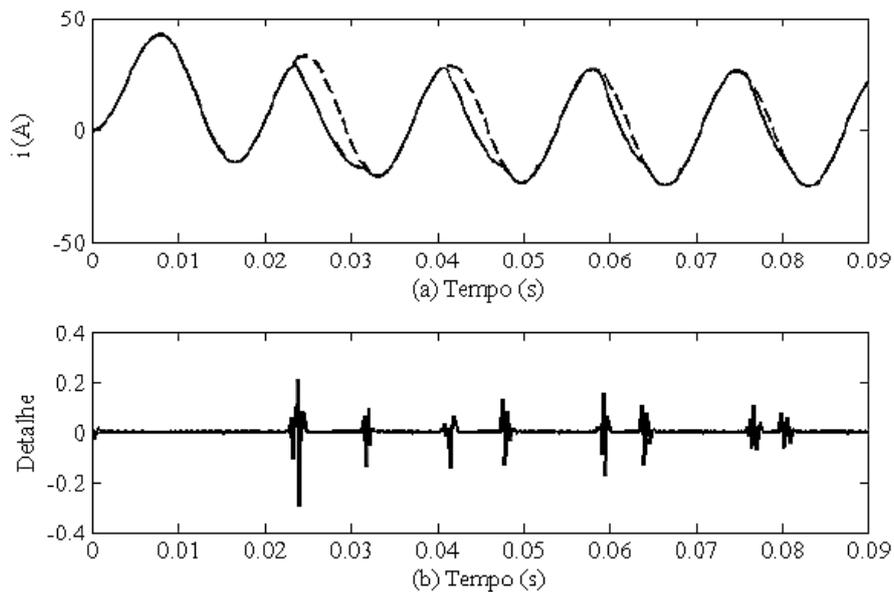


Figura 4.10: TWD aplicada a um sinal de corrente distorcido por saturação. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Detalhe do sinal no primeiro nível de transformada.

Portanto, a TW pode detectar quando uma perturbação começa e termina no sinal de corrente, isso ajuda o relé digital a tratar melhor os sinais que são identificados em tais perturbações, melhorando o desempenho do algoritmo de proteção diferencial.

Na referência [12] é apresentado uma análise entre o desempenho da TDF e a TWD. No trabalho citado podemos concluir que a TWD é mais rápida e apresenta um índice de acertos superior à TDF quando aplicada a proteção diferencial de transformadores para distinção entre situações de falta e situações normais de operação.

4.3 RNA aplicada à proteção diferencial

4.3.1 Fundamentos Biológicos

Como as Redes Neurais Artificiais (RNA) tiveram origem a partir do neurônio humano [17], uma introdução a respeito dos fundamentos biológicos se faz necessária.

4.3.1.1 Organização geral

O sistema nervoso, juntamente com o sistema endócrino, proporciona muitas das funções de controle do corpo. O sistema nervoso, do qual o cérebro faz parte, controla as reações rápidas do corpo, como as contrações musculares (função motora), e também a velocidade e equilíbrio da taxa de secreção de muitas glândulas endócrinas [29]. Partes do corpo que têm as funções controladas pelo sistema nervoso tem tempo de resposta relativamente rápido. O sistema endócrino, por outro lado, controla muitas funções do metabolismo do corpo e sua atuação é mais lenta.

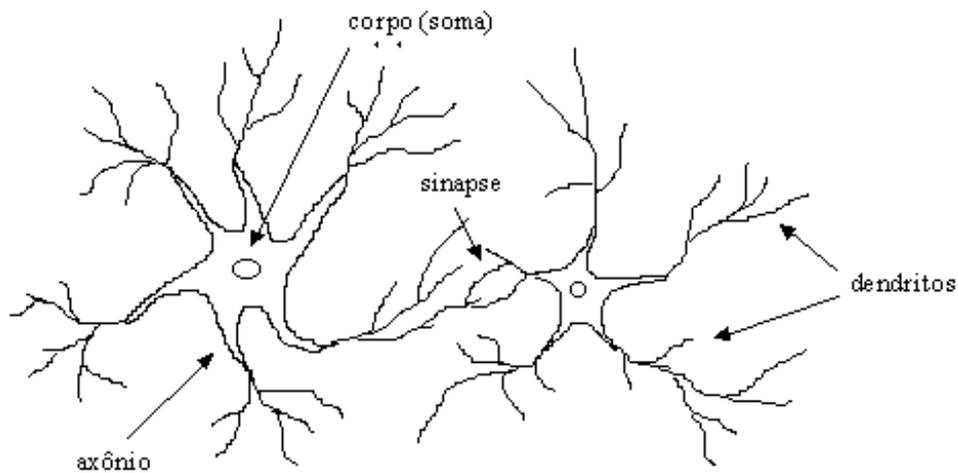


Figura 4.11: Estrutura do neurônio.

Um neurônio típico é apresentado na Figura 4.11. O neurônio tem um corpo celular chamado soma e diversas ramificações, conhecidas como dendritos, que conduzem sinais das extremidades para o corpo celular. Existe também uma ramificação, geralmente única, chamada axônio, que transmite um sinal do corpo celular para suas extremidades. As extremidades do axônio são conectadas com dendritos de outros neurônios pelas sinapses. Em muitos casos, um axônio é diretamente conectado com outros axônios ou com o corpo de outro neurônio.

4.3.1.2 Transmissão da Informação entre Neurônios

Quando o potencial de ação se propaga pelo axônio, chega a uma de suas terminações. Ali ele provoca modificações na membrana destas terminações, as sinapses. Isto permite a liberação de moléculas de vários tipos [39], com o nome genérico de neurotransmissores, que se difundem no espaço entre o terminal do axônio e outro neurônio, geralmente o terminal de um dendrito.

4.3.1.3 Modelo do Neurônio Artificial

A construção de redes neurais artificiais (RNAs) tem inspiração nos neurônios biológicos e nos sistemas nervosos. O primeiro modelo de neurônio foi proposto por McCulloch e Pitts [32]. O modelo geral do neurônio é uma

generalização do modelo proposto por eles. Neste modelo as entradas $w_{ij}x_i$ são combinadas, usando uma função φ , para produzir um estado de ativação do neurônio que, através da função y_i , vai produzir a saída do neurônio (correspondente à frequência de descarga do neurônio biológico). Um valor auxiliar θ_j é geralmente usado para representar uma polarização, valor abaixo do qual a saída é nula.

Geralmente Σ é a soma das entradas, mas algumas vezes representa o produto e, raramente, embora isto seja possível, alguma outra função. A Equação 4.18 representa a entrada efetiva do neurônio.

$$entrada_efetiva = \sum_{i=1}^n w_i u_i \quad (4.18)$$

Costuma-se dar o nome “confluência” à combinação ponderada das entradas de um neurônio. A não linearidade do neurônio frequentemente é introduzida na função tangente hiperbólica.

O resultado na entrada efetiva sofre um retardo D (algumas vezes este retardo é desprezado tendo-se um neurônio estático) e serve de argumento a uma função chamada de função de transferência (neste caso de saída binária {0 1} para dar a resposta do neurônio). A Figura 4.12 mostra o modelo geral do neurônio artificial.

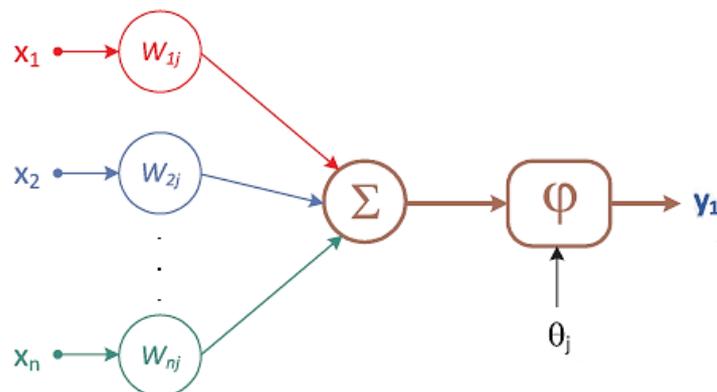


Figura 4.12: Neurônio artificial

O neurônio formal é um sistema dinâmico por ter memória materializada pelo retardo (ou equação diferencial). Um neurônio é estático quando o valor de x e de y se refere ao mesmo instante que as excitações, ou seja, o retardo é nulo [46]. O neurônio é dito dinâmico se para o cálculo de x em um determinado instante é necessário o conhecimento de x em um instante anterior no caso do neurônio ser a tempo discreto.

4.3.1.4 Caracterização da RNA

A rede neural artificial é um sistema composto por vários neurônios. Estes neurônios estão ligados por conexões, chamadas conexões sinápticas. Alguns neurônios recebem excitações do exterior e são chamados neurônios de entrada [42], correspondendo aos neurônios dos órgãos dos sentidos. Outros têm suas respostas usadas para alterar, de alguma forma, o mundo exterior e são chamados neurônios de saída, correspondendo aos motoneurônios que são os neurônios biológicos que excitam os músculos. Os neurônios que não são nem entrada nem saída são conhecidos como neurônios internos. Estes neurônios internos à rede tem grande importância e são conhecidos como *ocultos*.

Para caracterizar uma RNA é importante especificar os seguintes pontos:

- Os componentes da rede: Os neurônios: estáticos ou dinâmicos?
- A resposta de cada neurônio: dicotômica? intervalo dos reais?
- O estado global de ativação da rede: vetor cujas componentes são as ativações dos neurônios.
- A conectividade da rede dada pelos valores de conexões sinápticas: que define a topologia da rede.
- Como se propaga a atividade da rede: síncrona? Assíncrona?
- Como se estabelece a conectividade da rede: aprendizado.
- O ambiente externo à rede: estático? Dinâmico? Aleatório? Determinístico?
- Como o conhecimento é representado na rede: localizado? Distribuído?

4.3.2 Topologias das RNAs

São muitas as variantes de uma RNA. Combinando-as, é possível mudar a arquitetura conforme a necessidade da aplicação. Definir a arquitetura de uma RNA consiste em determinar sua organização estrutural contemplando o número de camadas da rede [45], número de neurônios em cada camada, tipos de conexões entre os neurônios e a topologia da rede. Sua arquitetura é estabelecida conforme a necessidade da aplicação. Basicamente, outros itens que compõem uma RNA e, portanto, sujeitos às modificações são a função de transferência e o algoritmo de aprendizado.

Normalmente, as redes neurais são estruturadas em camadas, contendo um ou mais neurônios. Todas elas possuem camada de entrada, que recebe os sinais de entrada, e camada de saída, que armazena o resultado final da rede (Figura 4.13). A camada intermediária (ou camada oculta) localiza-se entre estas duas. A rede apresentada na figura tem duas camadas, pois a camada de entrada não é contabilizada.

Quanto ao tipo de conexão as redes podem ser feedforward (acíclica) ou recorrentes (cíclica). A recorrente se diferencia da acíclica por possuir pelo menos uma realimentação (feedback), pela qual a saída de um neurônio de uma camada “*i*” é utilizada como entrada de um neurônio da camada de ordem menor ou igual a “*i*”.

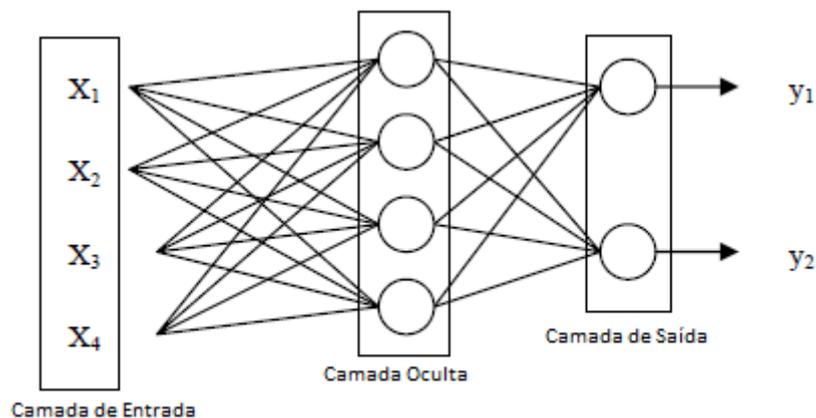


Figura 4.13: Rede Neural Artificial.

As redes podem ser completamente conectadas, quando todos os neurônios estão conectados entre si [5], ou fracamente conectadas, quando pelo menos dois neurônios não apresentam ligações entre si.

4.3.3 Aprendizado

Aprender é o ato que produz um comportamento diferente a um estímulo externo devido a excitações recebidas no passado e é, de certa forma, sinônimo de aquisição de conhecimento. Em inteligência artificial (IA) é comum se falar de aprendizado pela máquina e aprender pode ser considerado como atributo fundamental de um comportamento inteligente. RNAs possuem a capacidade de aprenderem, por exemplo, a fazerem interpolações do que aprenderam. No aprendizado conexionista não se procura obter regras como na abordagem simbólica da IA, mas determinar a intensidade de conexões entre neurônios. Como o conhecimento é armazenado nas conexões, o uso de RNA está intimamente ligado ao que se chama de conexionismo.

Existem diversos tipos de RNA e diferentes maneiras de classificá-las. Talvez a mais importante seja quanto à forma de aprendizado que pode ser supervisionada ou não supervisionada. No aprendizado supervisionado são sucessivamente apresentados à rede conjuntos de padrões de entrada e seus correspondentes padrões de saída. Durante este processo a rede realiza um ajustamento dos pesos das conexões entre os elementos de processamento, segundo uma determinada lei de aprendizagem, até que o erro entre os padrões de saída gerados pela rede alcance um valor mínimo desejado. Por exemplo, perceptron adaline e madaline, backpropagation [17], são algumas dentre as dezenas de leis de aprendizagem supervisionada.

No aprendizado não supervisionado a rede “analisa” os conjuntos de dados apresentados a ela, determina algumas propriedades dos conjuntos de dados e “aprende” a refletir estas propriedades na sua saída. A rede utiliza padrões, regularidades e correlações para agrupar os conjuntos de dados em classes. As propriedades que a rede vai “aprender” sobre os dados podem variar em função do tipo de arquitetura utilizada e da lei de aprendizagem. Por exemplo, Mapa Auto

Organizável de Kohonen, Redes de Hopfield e Memória Associativa Bidirecional, são alguns métodos de aprendizado não supervisionado.

As redes também podem ser classificadas quanto à suas características: contínua, discreta, determinística e estocástica, ou quanto à sua estrutura: redes de múltiplas camadas, multilayer feedforward network, cujo fluxo de dados segue uma única direção, e redes recorrentes, recurrent network.

Conforme descrito, as RNAs caracterizam-se pelo aprendizado por meio de exemplos. Para um determinado conjunto de dados, o algoritmo de aprendizado deve ser responsável pela adaptação dos parâmetros da rede de maneira que, em um número finito de iterações do algoritmo, haja convergência para uma solução. O critério de convergência varia de acordo com o algoritmo e com o paradigma de aprendizado, mas pode envolver, por exemplo, a minimização de uma função-objetivo, a variação do erro de saída ou mesmo a variação das magnitudes dos vetores de peso da rede.

Basicamente, considera-se que o processo de aprendizado tem como característica a ocorrência de estímulo da rede pelo meio externo através da apresentação do conjunto de dados. Como consequência deste estímulo, o algoritmo de aprendizado provoca mudança nos parâmetros da rede e, finalmente, a mudança nos parâmetros acarreta em mudança no comportamento da RNA. Espera-se que a mudança gradual no comportamento da rede resulte em melhoria gradativa do seu desempenho.

O objetivo principal do aprendizado em Redes Neurais é a obtenção de modelos com boa capacidade de generalização tendo como base o conjunto de dados. Em problemas de aproximação, classificação e predição, o conjunto de treinamento é composto por pares de entrada e saída (x, y_d) , sendo caracterizada previamente a saída desejada y_d para um determinado valor de entrada x [23]. O ajuste de pesos deve modificar a saída y de forma que a diferença entre y e y_d , ou seja, o erro diminua a cada iteração. No entanto, a minimização pura e simples do erro pode não levar a resultados satisfatórios. Portanto, é preciso fazer mais do que simplesmente minimizar o erro do conjunto de treinamento para se obter boa resposta de generalização. O objetivo dos algoritmos de treinamento deve ser o de

aproximar funções geradoras f_g dos dados e não simplesmente o de minimizar o erro do conjunto de treinamento.

4.3.4 RNA e a Proteção Diferencial

Na aplicação de redes neurais, a escolha da arquitetura e o processo de treinamento são as etapas mais importantes para implementação dessa ferramenta. Nos trabalhos desenvolvidos na área de análise dos sinais elétricos se destaca o modelo Multilayer Perceptron (MLP) com o método de aprendizagem Backpropagation. Dada a importância desse modelo, algumas características do mesmo são apresentadas abaixo:

- É um modelo com entrada intervalar, aprendizado supervisionado e com alimentação à frente.
- O MLP deriva-se do modelo perceptron/adaline. Seus neurônios são compostos por três ou mais camadas de adalines interconectados. Estes adalines têm uma diferença fundamental: Eles utilizam uma função do tipo sigmoid como função de limiar.
- A função de limiar é do tipo sigmoid uma vez que é necessária uma função não linear para ampliar o potencial de classificação de um modelo. Essa variação foi o que possibilitou a este e outros modelos realizarem representações complexas, como o aprendizado da função lógica XOR. A função sigmoid tem a forma:

$$sgm(S_i) = 1/(1 + e^{-(S_i - \theta)})$$

Onde S é a saída linear resultante da soma ponderada do nó “i” e “ θ ” é o coeficiente de limiar (também conhecido como função de transferência).

- No método de aprendizagem, o erro obtido na saída é transferido para as camadas intermediárias. Daí o nome retropropagação (backpropagation). Isso se dá pela necessidade de ajuste dos neurônios que não têm contato com a saída, necessitando assim, de algum parâmetro para atualização dos pesos.
- O cálculo do erro começa na última camada, ele tem a forma:

$$\varepsilon s_i(t) = S(t)(1 - S(t))(d_i(t) - S(t))$$

em que S é a saída linear, d a saída desejada, e i o nó atual. A partir deste erro são ajustados os pesos da última camada:

$$P_i(t + 1) = P_i(t) + \alpha \varepsilon s_i(t) En(t)$$

na qual P é o vetor de pesos, α é o coeficiente de aprendizado, que determina o intervalo de ajuste dos pesos, En é o vetor resultante da saída da camada anterior.

- O erro das camadas intermediárias é feito a partir do erro da camada de saída:

$$\varepsilon_i(t) = En(t)(1 - En(t)) \sum_k \varepsilon_k p_{ik}(t)$$

onde En é o vetor resultante da saída da camada anterior até esta camada intermediária; k é o número de nós conectados a seguir do atual; ε é o erro do nó k ; p é o peso correspondente à conexão do nó atual com o nó k . A partir deste erro, são calculados os pesos:

$$P_i(t + 1) = P_i(t) + \alpha \varepsilon_i(t) En(t) + \mu (P_i(t) - P_i(t - 1))$$

em que μ é um coeficiente de aceleração de convergência denominado *momentum*.

O algoritmo para treinamento da rede Backpropagation é implementado seguindo os passos abaixo:

- I. Inicializar os pesos e coeficientes de limiar com valores pequenos e aleatórios.
- II. Apresentar o vetor de entrada e a saída desejada.
- III. Calcular a saída:

$$S(t) = \sum_{i=0}^{n-1} P_i(t) E_i(t) - \theta$$

- IV. Aplicar a função sigmoid vista anteriormente.

$$S_q(t) = sgm(S(t))$$

V. Atualizar os pesos da última camada:

$$P_i(t + 1) = P_i(t) + \alpha \varepsilon_i(t) En(t)$$

E o cálculo do erro:

$$\varepsilon_i(t) = S(t)(1 - S(t))(d_i(t) - S(t))$$

VI. Atualizar os pesos da camada intermediária:

$$P_i(t + 1) = P_i(t) + \alpha \varepsilon_i(t) En(t) + \mu(P_i(t) - P_i(t - 1))$$

E o erro:

$$\varepsilon_i(t) = En(t)(1 - En(t)) \sum_k \varepsilon_k p_{ik}(t)$$

VII. Voltar ao passo II até que atinja um valor próximo ao da saída desejada.

O treinamento chegará ao fim quando as saídas desejadas estiverem numa margem segura de proximidade à saída da função sigmoid. Esta aproximação existe devido à dificuldade de se chegar ao valor exato da saída desejada e, então, estima-se uma margem de erro para que se alcance a convergência [23]. Para a maioria das aplicações são necessárias muitas iterações até a convergência. Isso também é dependente de um bom ajuste dos coeficientes envolvidos.

4.3.4.1 Redes de Elman

Na fase de treinamento da rede, há a determinação e a correção dos pesos e dos bias (θ_j representado na Figura 4.12), para que a mesma responda de uma forma desejada. Alguns algoritmos não são capazes de implementar mapeamentos dinâmicos, isto é, não possuem memória. Então Elman introduziu memória nas RNAs. Podem-se definir redes recorrentes como aquelas que possuem conexões de realimentação que proporcionam comportamento dinâmico.

Após o início do treinamento, as ativações das unidades intermediárias são reintroduzidas através das ligações recorrentes nas unidades de contexto, sendo salvas nestas unidades para o próximo passo do treinamento.

Nas redes de Elman, além das unidades de entrada, intermediárias e de saída, há também unidades de contexto [18], como nas redes parcialmente recorrentes em geral. As unidades de entrada e saída interagem com o ambiente externo, enquanto as unidades intermediárias e de contexto não o fazem. As unidades de entrada são apenas unidades de armazenamento que passam os sinais sem modificá-los. As unidades de saída são unidades lineares que somam os sinais que recebem. As unidades intermediárias podem ter funções de ativação lineares ou não lineares, e as unidades de contexto são usadas apenas para memorizar as ativações anteriores das unidades intermediárias e podem ser consideradas como atraso no tempo em um passo. As conexões feedforward são modificáveis e as conexões recorrentes são fixas, motivo pelo qual a rede de Elman é apenas parcialmente recorrente.

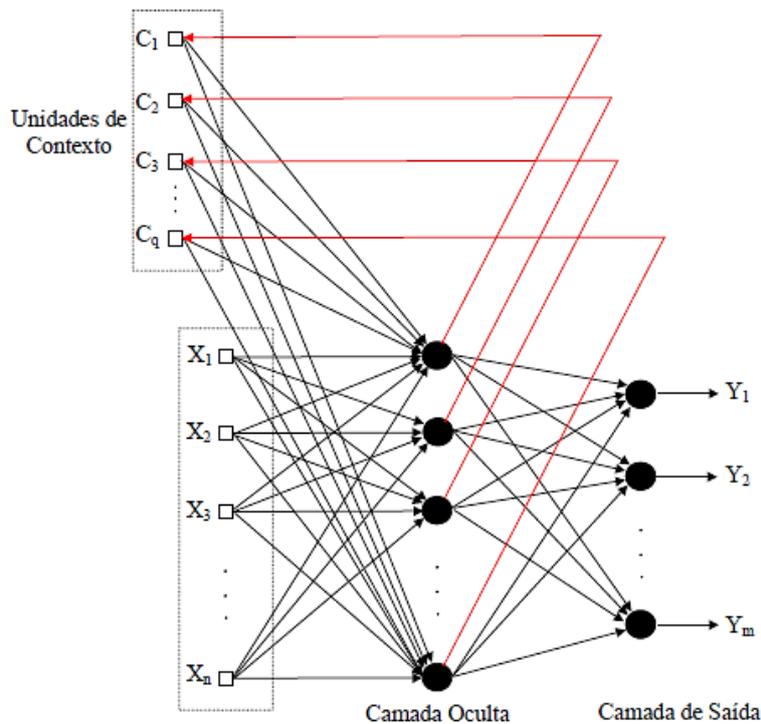


Figura 4.14: Rede neural de Elman.

A Figura 4.14 ilustra a operação de uma rede de Elman. Em um intervalo de tempo específico k as ativações das unidades intermediárias (em $k-1$) e as entradas

correntes (em k) são utilizadas como entradas da rede. Em um primeiro estágio, feedforward, estas entradas são propagadas para frente a fim de produzir as saídas. Posteriormente, a rede é treinada com o algoritmo de aprendizagem de retropropagação padrão. Após este passo de treinamento, as ativações das unidades intermediárias no tempo k são reintroduzidas através das ligações recorrentes nas unidades de contexto, sendo salvas nestas unidades para o próximo passo do treinamento ($k+1$).

No início do treinamento, as ativações das unidades intermediárias são desconhecidas e, geralmente, são inicializadas para a metade do valor máximo que as unidades intermediárias podem ter.

Na rede de Jordan, a saída da rede é copiada para a unidade de contexto [23]. Adicionalmente, as unidades de contexto são localmente recorrentes. A grande diferença em termos de topologia entre as duas redes é que a recorrência na rede de Elman é feita da camada oculta para as entradas, enquanto que na rede de Jordan a recorrência é feita das saídas para as entradas.

As redes que têm a capacidade de memória podem ser usadas para identificar sinais descontínuos que perderam parte de sua informação, como é o caso das correntes oriundas dos TCs saturados.

A RNA quando aplicada à proteção diferencial é utilizada para reconhecimento de padrões. Com o devido treinamento, a RNA pode aprender os padrões e fazer generalizações a respeito dessas características. Como descrito nesse trabalho, a proteção diferencial de transformadores de potência pode disparar em casos que não existe defeito dentro de sua zona de operação. Todas as situações que podem provocar operação indesejada têm suas peculiaridades, tais como a energização, sobre-excitação, faltas externas, entre outras. A RNA pode ser treinada para reconhecer esses padrões e algoritmos baseados nessa técnica alternativa podem ser implementados nos relés digitais para aumentar a confiabilidade deles.

A referência [45] apresenta resultados encorajadores na aplicação de RNAs à proteção diferencial. Uma comparação é feita entre o algoritmo convencional utilizado pelo relé comercial e um algoritmo proposto pelos autores baseado em RNAs.

Nota-se que, enquanto nas aplicações convencionais o índice de precisão permaneceu em 73,76%, nas metodologias que fazem uso das RNAs este índice passou para 98,65% evidenciando a vantagem dessas técnicas alternativas.

4.4 Lógica Fuzzy aplicada à proteção diferencial

4.4.1 Introdução

O termo em inglês “fuzzy”, traduzido, tem o significado como algo vago, indefinido, incerto. Mas em português os termos mais utilizados na área de inteligência artificial são nebuloso ou difuso [27]. A lógica fuzzy trata de um raciocínio que busca classificar em números uma determinada realidade ou situação, que trabalha com muitas variáveis incertas e vagas, a fim de facilitar o trabalho ou manipulação dos computadores. A lógica fuzzy é considerada imprecisa, pois trabalha com aproximações de dados vagos.

Através de uma determinada regra, que varia com a finalidade para qual a lógica fuzzy é utilizada, os dados coletados caracterizados como incertos são analisados de acordo com a regra implementada e aproximados por números para possibilitar a interpretação das máquinas e computadores [14]. Comparada com a lógica clássica, a lógica fuzzy, apesar de ser imprecisa, reporta muito mais informações não estando restrita ao verdadeiro e falso. Isso permite que a lógica fuzzy descreva um determinado fato com muito mais detalhe e gradualmente, reduzindo assim a perda de informações e propiciando a maior coerência possível com a realidade em questão.

O seu desenvolvimento começou na Europa, com a criação de aplicações para esta lógica, e ao longo do tempo a lógica fuzzy foi introduzida no Japão, onde começou a ser utilizada largamente em Engenharia de Controle. A partir desse momento, a Europa e depois Estados Unidos perceberam a eficácia da lógica e começaram a investir mais nessa tecnologia. Hoje a lógica fuzzy se tornou uma tecnologia padrão, que vem sendo aplicada nas áreas de Desenvolvimento Industrial, Ciências Ambientais, Engenharia, e até na área de Negócios e Finanças.

4.4.2 A origem da logica Fuzzy

A ciência lógica foi fundada por Aristóteles (384-322 a.C.), criando a lógica Aristotélica ou Lógica bivalente clássica, que é caracterizada por dois princípios que são a lei da lógica da não contradição e a lei do terceiro excluído [19]. A lei da lógica da não contradição diz que nenhuma afirmação pode ser considerada verdadeira e falsa ao mesmo tempo, enquanto a lei do terceiro excluído diz que uma afirmação tem que ser verdadeira ou falsa.

Em 1847 Boole atribui valores numéricos para as afirmações verdadeiras e falsas, sendo o valor 1 para as afirmações verdadeiras e 0 para as afirmações falsas. Com isso, Boole criou a álgebra booleana, sendo uma grande contribuição na área da computação. Porém, em 1903, Bartrand Russell mostrou que nem todos os problemas poderiam ser resolvidos pela lógica bivalente, através do problema conhecido como “paradoxo de Russell”.

Em torno de 1930, Jan Lukasiewicz (1878 -1956) desenvolveu a lógica multinível em contrapartida à lógica Aristotélica, apresentando a lei da contradição na qual uma determinada afirmação pode ser verdadeira ou não, ao mesmo tempo. Isso se torna possível desde que não apresente apenas dois níveis, verdadeiro e falso, mas sim um grau de verdade, existindo assim vários níveis. Em 1965 é publicado o trabalho de Conjuntos Fuzzy, por Lotfi A. Zadeh, baseado na lógica multinível. Com este trabalho foi possível mostrar de forma matemática o tratamento dos aspectos imprecisos e ambíguos apresentados na lei da contradição [48]. E foi também a partir deste trabalho que surgiu a expressão lógica fuzzy.

4.4.3 Lógica Fuzzy

Segure uma maçã em suas mãos. Isso é uma maçã? Sim. O objeto em sua mão pertence a um determinado tempo-espaco que chamamos de conjunto de

maçãs – todas as maçãs sempre em qualquer lugar. Agora morda a maçã, mastigue-a e engula-a. Deixe que seu trato digestivo pegue uma parte das moléculas da maçã. O objeto em suas mãos ainda é uma maçã? Sim ou não? Dê outra mordida. O novo objeto ainda é uma maçã? [27]. Para ter uma ideia sobre o que é a lógica fuzzy, Kosko apresenta um exemplo sobre a questão da maçã. Se a resposta da pergunta apresentada por Kosko é apenas entre sim ou não, isto representa a lógica clássica onde os valores são apenas representados como verdadeiro ou falso. Porém se a resposta for, por exemplo, “mais ou menos” ou “quase uma maçã”, são respostas que apresentam um meio termo entre ser uma maçã ou não. Essa é a ideia da lógica fuzzy, ela não fica apenas restrita entre verdadeiro e falso, mas sim aceita vários níveis entre o verdadeiro e falso. De modo figurativo enquanto a lógica clássica enxerga apenas o preto e o branco, a lógica fuzzy é capaz de, além do preto e o branco, enxergar vários tons de cinza, como ilustrado na figura 4.14 abaixo.

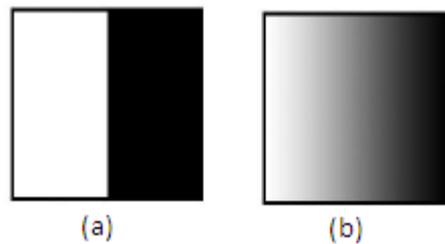


Figura 4.15: comparação entre Logica clássica e logica fuzzy

Existem algumas questões e problemas em que não é possível ou aplicável uma resposta determinística, abrindo espaço então para raciocínios aproximados que levem a um entendimento maior sobre o problema em questão. Este modelo de aproximação não é algo raro, mas sim bastante presente no mundo real, pois grande parte dos eventos de nosso cotidiano pode ser entendido de forma aproximada considerando os termos cabíveis a cada fato.

A lógica fuzzy traz consigo a ideia de medida, ou aplicação de uma métrica onde, aparentemente, a questão parece ser vaga. Essas métricas, quando aplicadas, aproximam a questão de algumas suposições possíveis. [14] apresenta as variáveis linguísticas como sendo o vocabulário da linguagem fuzzy [19], pois são expressões presentes na linguagem humana e que quando traduzidas ou

interpretadas podem levar a conclusões importantes. Considerando o mundo do futebol como exemplo, a afirmação abaixo é algo bastante comum:

“O jogador Antônio está jogando mal, o João está jogando bem, mas o Carlinhos está jogando muito mal!”

Esta frase é uma típica frase que, se analisando através da lógica fuzzy, é possível tomar algumas ações. Colocando-se no lugar do técnico do time em questão ao ter essa frase como matéria-prima para uma tomada de decisão e interferir na forma de jogar do time ele pode levantar a questão:

Tenho somente uma substituição, qual dos jogadores deve sair?

Sem muitos cálculos ou dados exatos como posse de bola, chutes a gol ou algo do tipo o pensamento humano iria conduzir a reflexão de forma semelhante a esta:

“O Antônio é um candidato a sair do time, o João eu não posso tirar de forma alguma, porém o Carlinhos também está jogando muito mal. O Carlinhos está jogando bem menos que o Antônio, então a melhor escolha seria tirar o Carlinhos.”

Nota-se que neste exemplo não existem limites bem definidos quanto ao jogar bem ou mal, porém através de abstrações e analogias é possível concluir algo. Os termos mal, bem e muito mal são as chamadas variáveis linguísticas, pois possibilitam enumerar matematicamente qual a proximidade desses jogadores do jogar totalmente bem e do jogar totalmente mal. Considerando a incerteza presente nesses casos é extremamente válido lembrar que as incertezas somente podem ser levadas em consideração se for possível, diante de uma determinada situação, efetuar aproximações e cálculos que levem a alguma conclusão válida.

Diante deste contexto, na lógica fuzzy existe algo chamado função de pertinência que vem a ser um mapeamento matemático de cada valor numérico possível para as variáveis linguísticas. Nota-se neste momento a importância em aproximar a léxica do modelo matemático para que assim sejam possíveis conclusões válidas sobre o problema. Um exemplo clássico apresentado em grande parte das literaturas sobre lógica fuzzy é o exemplo da temperatura térmica [10].

Para exemplificar as funções de pertinência, considere a Figura 4.16, onde através de alguns gráficos são representadas quatro variáveis térmicas: frio, conforto, relativamente quente e quente. Estas variáveis são relativas a uma análise sobre a temperatura de conforto.

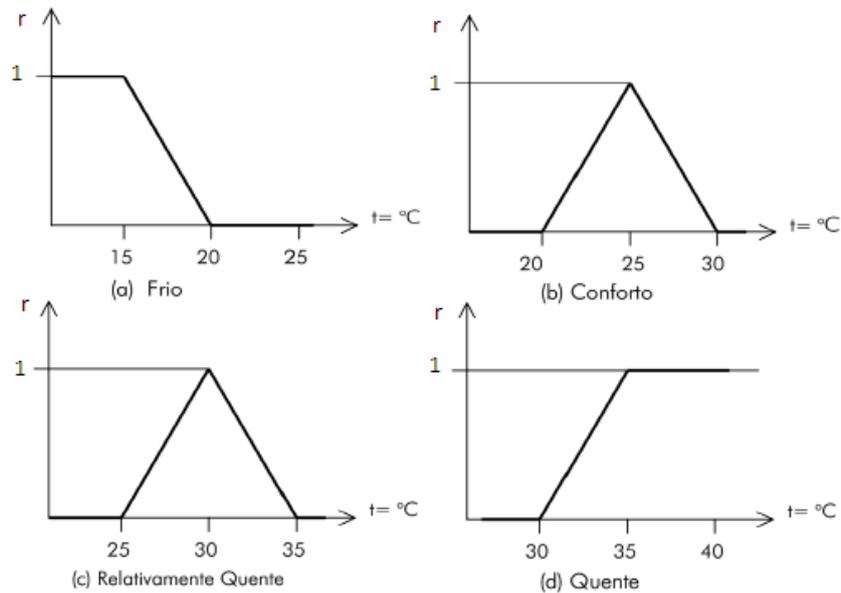


Figura 4.16: Exemplo de função de pertinência de variáveis linguísticas

É bastante comum este tipo de representação ser apresentada em um único gráfico, conforme se pode verificar na Figura 4.17. Nota-se que o nebuloso limite entre as variáveis fica bem claro através deste exemplo.

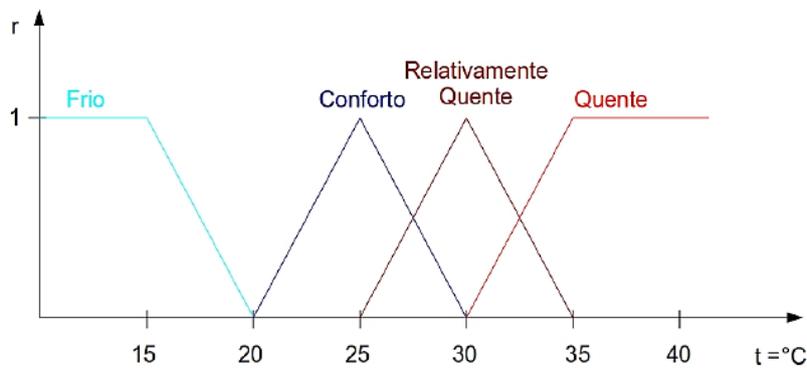


Figura 4.17: Exemplo de função de pertinência de variáveis linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos fuzzy. Por exemplo, a análise da temperatura de conforto pode ser uma variável linguística assumindo valores como frio, conforto, relativamente quente e quente. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos fuzzy, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 4.17.

Generalizando, os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (alto, baixo, pequeno, médio, grande, zero, por exemplo), de conectivos lógicos (negação não, conectivos “e” e “ou”), de modificadores (muito, pouco, levemente, extremamente) e de delimitadores (como parênteses).

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

4.4.3.1 Operações de conjunto fuzzy

Como na teoria clássica, os conjuntos fuzzy obedecem a certas propriedades e podem ser operados de diversas maneiras. As operações entre conjuntos são extremamente importantes para os sistemas que se utilizam dessa lógica, pois os cálculos proposicionais, por exemplo, são baseados nessas operações.

As operações básicas dos conjuntos fuzzy, definidas por Zadeh, estão definidas como segue, considerando A e B dois conjuntos fuzzy num universo U:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\}, \mu_A(x) \in [0,1]$$

$$B = \{(x, \mu_B(x)) \mid x \in U\}, \mu_B(x) \in [0,1]$$

- Igualdade

$$A = B \leftrightarrow (\mu_A(x) = \mu_B(x)), \forall x \in U$$

- Inclusão

$$A \subseteq B \leftrightarrow (\mu_A(x) \leq \mu_B(x)), \forall x \in U$$

- União

$$A \text{ or } B = A \cup B = \{(x, \max(\mu_A(x); \mu_B(x))) / x \in U\}$$

Essa definição para a união foi proposta por Zadeh na década de 1960. A maneira atualmente utilizada de definir essa operação é através de uma *norma S*, ou seja, uma família de funções que obedecem às seguintes propriedades:

- Comutatividade $\rightarrow S(a, b) = S(b, a)$
- Associatividade $\rightarrow S(a, S(b, c)) = S(S(a, b), c)$
- Monotonicidade \rightarrow se $a \leq b$ e $c \leq d$, então $S(a, c) \leq S(b, d)$
- Coerência nos contornos $\rightarrow S(a, 0) = a$ e $S(a, 1) = 1$

Assim, as funções que obedecem a S podem ser utilizadas como um operador de união entre conjuntos fuzzy. A união representa o operador OR.

- Interseção

$$A \text{ and } B = A \cap B = \{(x, \min(\mu_A(x); \mu_B(x))) \mid x \in U\}$$

Essa definição também é do trabalho original, proposto por Zadeh. A definição mais utilizada atualmente é a das *normas T*, que obedecem às seguintes propriedades:

- Comutatividade $\rightarrow T(a, b) = T(b, a)$
- Associatividade $\rightarrow T(a, S(b, c)) = T(S(a, b), c)$
- Monotonicidade \rightarrow se $a \leq b$ e $c \leq d$, então $T(a, c) \leq T(b, d)$
- Coerência nos contornos $\rightarrow T(a, 0) = a$ e $T(a, 1) = 1$

As funções que obedecem a T podem ser utilizadas como operador de interseção entre os conjuntos fuzzy. A interseção equivale ao operador AND. O operador AND nada mais é que um teste se o elemento está ou não na interseção de dois conjuntos [27].

- Complemento

O complemento de um conjunto *fuzzy* A pode ser denotado por \bar{A} e é expresso da seguinte forma:

$$NOT A = \bar{A} = \{(x, \mu_{\bar{A}}(x)) \mid x \in U \text{ e } \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)\}$$

- Diferença

A diferença entre dois conjuntos é o que sobra da interseção desses conjuntos e pode ser representada da seguinte maneira:

$$A - B = (x, (\mu_A \cap \mu_{\bar{B}}(x)) \mid x \in U)$$

4.4.3.2 Funções de Pertinência

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas. Para exemplificar o quanto o contexto é relevante na definição de funções de pertinência e de sua distribuição ao longo de um dado universo, considere-se a variável linguística estatura (de pessoas), constituída dos seguintes termos: $E(\text{estatura}) = \{\text{baixa, média, alta}\}$. A esses termos faz-se corresponder conjuntos fuzzy A , B e C , respectivamente, definidos por suas funções de pertinência. Uma escolha possível de funções de pertinência seria a mostrada na Figura 4.18:

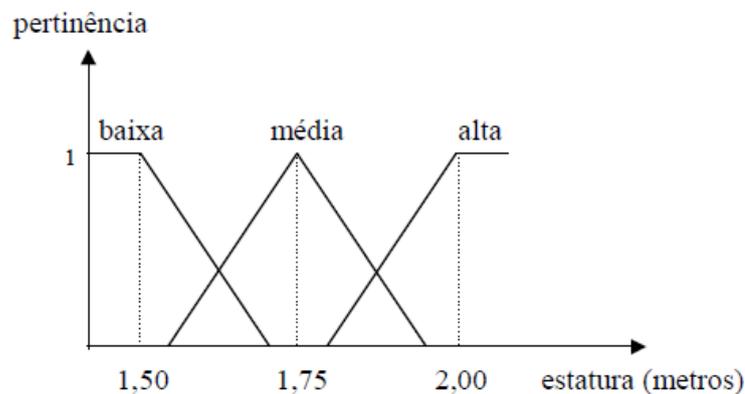


Figura 4.18: Funções de pertinência para a variável *estatura*.

Na definição acima, estaturas de até 1,5m apresentam grau de pertinência igual a 1 no conjunto A; o grau de pertinência neste conjunto decresce à medida que a estatura aumenta. Considera-se que uma estatura de 1,75m é "totalmente compatível" com o conjunto B, ao passo que estaturas acima de 1,8m, aproximadamente, apresentam grau de pertinência diferente de zero em C. Pessoas com estatura acima de 2m são "definitivamente" altas. Observa-se que, nesta definição das funções de pertinência, estaturas em torno de 1,75m têm grau de pertinência diferente de zero somente no conjunto B, o que poderia parecer inadequado para alguns observadores. Estes prefeririam que as funções de pertinência de A e B se interceptassem em 1,75m.

Além disso, diferentes pessoas, ou grupos de pessoas, podem ter noções distintas a respeito das estaturas de seus semelhantes. Um escandinavo provavelmente utilizaria funções de pertinência diferentes daquelas escolhidas por um representante de uma tribo de pigmeus, ou as distribuiria de outra forma ao longo do universo [10]. Ou seja, o contexto é particularmente relevante na definição de funções de pertinência.

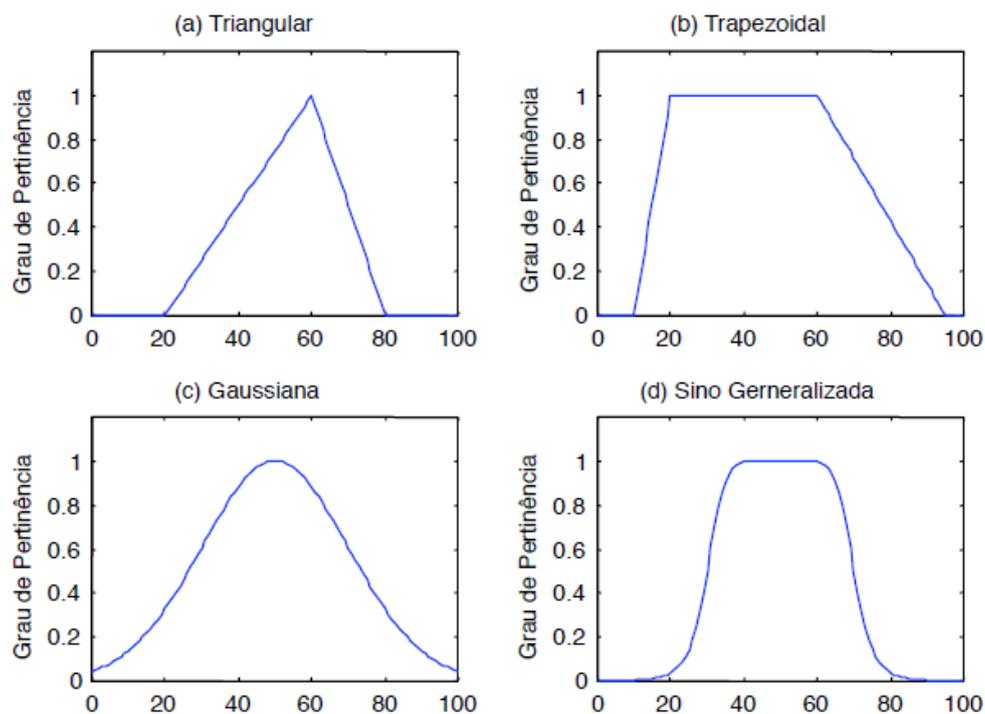


Figura 4.19: Funções de pertinência

Funções de pertinência podem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, mas é comum fazer-se uso de funções de pertinência padrão, como, por exemplo, as de forma triangular, trapezoidal, Gaussiana e Sino Generalizada.

A Figura 4.19 mostra algumas formas das funções de pertinência citadas acima. Em aplicações práticas as formas escolhidas inicialmente podem sofrer ajustes em função dos resultados observados.

4.4.4 Raciocínio Fuzzy

O raciocínio fuzzy é composto por três etapas que são a fuzzificação, a inferência e a defuzzificação. Estas três etapas fecham um ciclo que permite a resolução de muitos problemas e que é bastante utilizado em sistemas de controle.

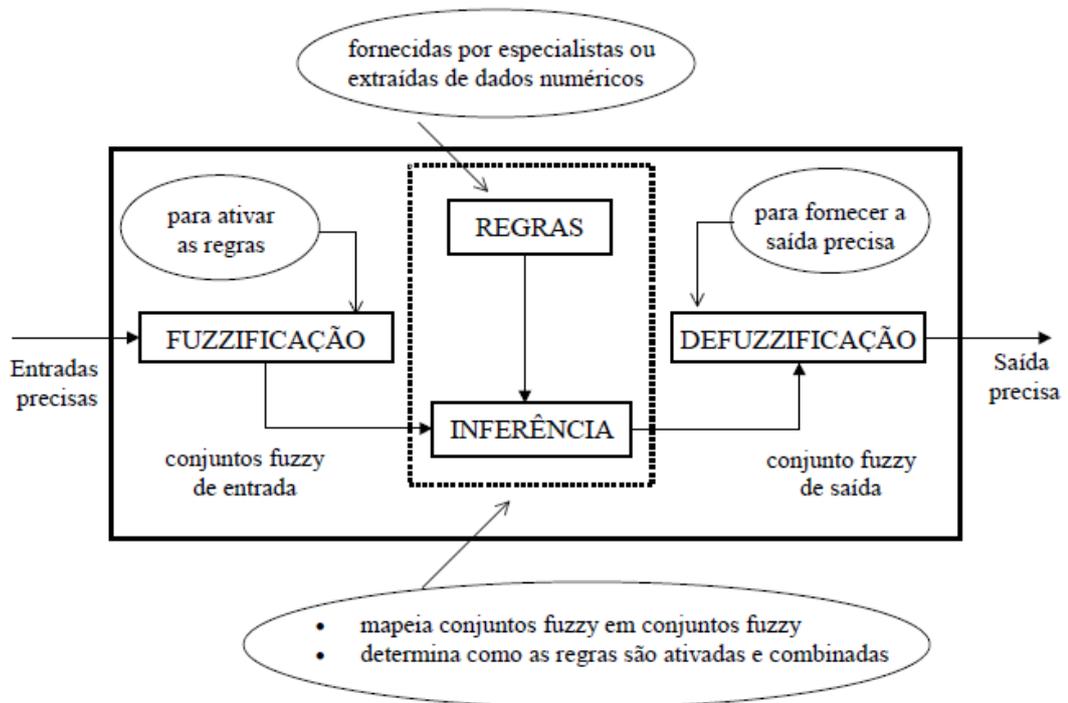


Figura 4.20: Etapas componentes do raciocínio Fuzzy

Neste Sistema de Inferência Fuzzy, consideram-se entradas não-fuzzy, ou precisas, resultantes de medições ou observações (conjuntos de dados, por

exemplo), que é o caso da grande maioria das aplicações práticas. Em virtude disto, é necessário efetuar-se um mapeamento destes dados precisos para os conjuntos fuzzy (de entrada) relevantes, o que é realizado no estágio de fuzzificação. Neste estágio ocorre também a ativação das regras relevantes para uma dada situação.

Uma vez obtido o conjunto fuzzy de saída através do processo de inferência, o próximo passo é o estágio de defuzzificação que é a interpretação dessa informação. Isto se faz necessário, pois em aplicações práticas, geralmente, são requeridas saídas precisas. No caso do relé digital, por exemplo, em que a decisão de *trip* seria tomada baseada no sistema de inferência fuzzy, este deve fornecer sinais precisos, já que a "apresentação" de um conjunto fuzzy à saída do relé não teria significado algum. Existem vários métodos de defuzzificação na literatura; dois dos mais empregados são o centro de gravidade e a média dos máximos. Neste último, a saída precisa é obtida tomando-se a média entre os dois elementos extremos no universo que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do consequente. Já no centro de gravidade, a saída é o valor no universo que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais.

As regras podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e constituem um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência fuzzy. Novamente tomando o exemplo do relé de proteção, este só terá um bom desempenho se as regras que definem a estratégia de controle forem consistentes. Extrair regras de especialistas na forma de sentenças do tipo “se – então” pode não ser uma tarefa fácil, por mais conhecedores que eles sejam do problema em questão [10]. Alternativamente ao uso de especialistas para a definição da base de regras, existem métodos de extração de regras de dados numéricos. Estes métodos são particularmente úteis em problemas de classificação e previsão de séries temporais.

No estágio de inferência ocorrem as operações com conjuntos fuzzy propriamente ditas: combinação dos antecedentes das regras e implicações. Os conjuntos fuzzy de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída, referente ao consequente, podem ser definidos previamente ou, alternativamente,

gerados automaticamente a partir dos dados. Um aspecto importante é a definição dos conjuntos fuzzy correspondentes às variáveis de entrada (antecedentes) e às de saída (consequentes), pois o desempenho do sistema de inferência dependerá do número de conjuntos e de sua forma. Pode-se efetuar uma sintonia "manual" das funções de pertinência dos conjuntos, mas é mais comum empregarem-se métodos automáticos. A integração entre sistemas de inferência fuzzy e redes neurais originando os sistemas neuro-fuzzy ou algoritmos genéticos tem se mostrado adequada para a sintonia de funções de pertinência, assim como para a geração automática de regras.

4.4.5 Lógica Fuzzy e a Proteção Diferencial

A lógica fuzzy é aplicada em várias áreas da ciência, sendo pesquisada atualmente por grandes pesquisadores. Nesse trabalho daremos uma atenção especial às aplicações realizadas com o objetivo de melhorar o esquema de proteção diferencial de um transformador.

Na aplicação relacionada à proteção diferencial, o primeiro passo é definir as variáveis de entradas. Com o objetivo de evitar os problemas descritos no capítulo 2, podemos escolher as seguintes variáveis:

- i. Amplitude das componentes de 2° e 5° harmônico das correntes de primário e secundário.
- ii. I_{op} – Corrente de operação.
- iii. Amplitude estimada do fluxo magnético.

Então, essas variáveis passam pelo processo de fuzzificação, que consiste em transformar as variáveis de entrada em linguísticas de modo a serem tratadas pelo sistema nebuloso. Nessa etapa, é necessário definir as funções de pertinências para cada variável de entrada. A Figura 4.21 mostra, por exemplo, uma função de pertinência para a componente de 2° harmônico e para corrente de operação.

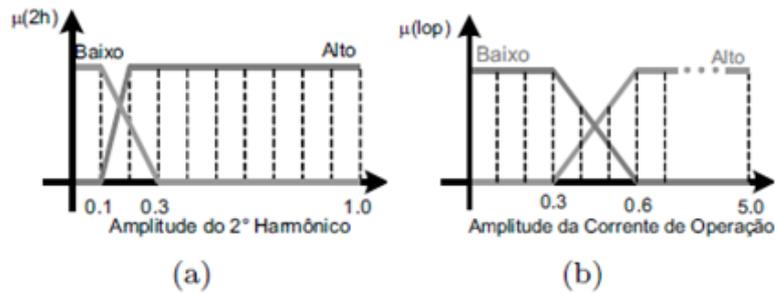


Figura 4.21: Funções de pertinência: (a) conjunto nebuloso de entrada 2h; (b) conjunto nebuloso de entrada Iop.

Apesar da incerteza sobre o conteúdo harmônico refletido nas correntes, as entradas apresentadas exprimem as características básicas para a solução do problema. Vale enfatizar que, em situações de correntes diferenciais indesejadas e de defeito, as formas de onda distorcidas podem provocar erros na análise de Fourier utilizada, acarretando em erros na determinação dos parâmetros de entrada. Portanto, a fuzzificação desses componentes permite uma melhor análise do fenômeno que está sendo observado.

Uma alternativa à análise de Fourier é utilizar a Transforma Wavelet para fazer a decomposição harmônica para as variáveis de entrada do sistema Fuzzy.

Depois da fuzzificação vem o processo de inferência, que consiste em mapear o conhecimento entre as entradas do sistema inteligente e sua respectiva saída por meio de um conjunto nebuloso de regras do tipo “se – então”. Essa etapa é baseada na experiência de vários Engenheiros, pois é necessário conhecer as várias combinações entre as variáveis de entrada que levam ao desligamento do sistema ou não.

Tabela 4.2: Resumo das regras de inferência nebulosas adotadas.

Regra	2h	5h	Iop	Flx	Saída
1	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Op Normal
2	Baixo	Baixo	Alto	Baixo	Defeito
3	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Defeito
4	Baixo	Alto	Baixo	Baixo	Op Normal
5	Baixo	Alto	Alto	Alto	Defeito
6	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Op Normal
7	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Op Normal
8	Alto	Baixo	Alto	Alto	Defeito
9	Alto	Alto	Baixo	Baixo	Op Normal
10	Alto	Alto	Baixo	Baixo	Op Normal

A Tabela 4.2 mostra um conjunto de regras definido por conhecimento de um especialista.

As variáveis de entrada são relacionadas através do operador de implicação “min”, que é equivalente ao operador “and” da lógica clássica.

Depois de analisar toda a informação no domínio da lógica fuzzy temos que converter essas informações para uma grandeza numérica, sendo a etapa de defuzzificação responsável por essa conversão. Assim, esse processo informa o valor numérico de saída do sistema nebuloso, o qual será utilizado para determinar o sinal de trip (abertura) ou bloqueio do disjuntor. Para extrair a saída pode-se utilizar, por exemplo, a técnica do centro de área, que é dada por:

$$CDA = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_c(V_k) V_k}{\sum_{k=1}^N \mu_c(V_k)} \quad (4.19)$$

Em que N é o número de regras ativas e μ_c é o valor da função de pertinência no ponto desejado (V_k). Depois da análise feita pelo sistema Fuzzy, o algoritmo implementado tomará a decisão de abrir o sistema elétrico, situação que caracteriza um defeito dentro da zona de proteção, ou então, mantém o transformador operando normalmente, situação que pode caracterizar uma situação de energização solidária.

A referência [6] simula um esquema de proteção diferencial de transformadores, no qual os autores comparam o algoritmo de um relé comercial com um algoritmo nebuloso implementado por eles. O resultado é surpreendente, pois o algoritmo baseado na lógica fuzzy tem um índice de 100% de acertos contra 80% de acertos da lógica convencional.

4.5 Comparação das ferramentas Inteligentes

Como descrito ao decorrer deste capítulo, as três ferramentas inteligentes apresentam resultados muito satisfatório quando comparados aos algoritmos convencionais dos relés digitais. Com o objetivo de resumir suas principais

vantagens e desvantagens, a tabela 4.3 mostra uma análise sucinta das três técnicas abordada durante esse trabalho.

Tabela 4.3: Resumo das ferramentas inteligentes.

RNA	<ul style="list-style-type: none"> - É capaz de aprender qualquer padrão e fazer generalizações para analisar dados inéditos apresentados a rede; - Possui alta capacidade de adaptação aos problemas apresentados a rede; - Deve ser treinada para diferentes níveis de potência do transformador, pois algumas características variam com a potência do transformador; - Dentre os três métodos, esse parece ser o mais robusto quando treinado de maneira eficiente; - Exige um tempo dispendioso para o treinamento da rede.
Fuzzy	<ul style="list-style-type: none"> - Não requer grandes esforços computacionais, visto a simplicidade de implementação; - Capacidade de tomar decisão a partir de dados imprecisos, pois o modelo tende a modelar o pensamento humano; - A lógica pode ser aplicada a qualquer equipamento, visto que não é necessário conhecer as características construtivas dos equipamentos; - Entre os métodos apresentados, esse é o mais simples, porém tão eficiente quanto os outros dois; - Sua implementação requer o conhecimento e experiência de engenheiros que atuam na área de proteção, visto que um conjunto de regras a respeito dos parâmetros de entrada se faz necessário.
TW	<ul style="list-style-type: none"> - Apresenta a capacidade de analisar em multiresolução, possibilitando uma decomposição em frequência e escala; - Pode relacionar os sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência; - Resposta mais rápida que a Transformada de Fourier, pois pode fornecer uma resposta com apenas $\frac{1}{4}$ de ciclo do sinal; - Capaz de analisar altas e baixas frequências simultaneamente com tamanho da janela de dados de acordo com cada frequência; - É sensível a variação do sinal analisado, com essa característica sabe-se exatamente quando um evento começa e termina no tempo.

5 Conclusões

As ferramentas inteligentes indicadas nesse trabalho apresentam resultados muito melhores que a lógica convencional implementada nos relés digitais comerciais, pois apresentam um índice de confiabilidade superior.

É notada a maneira como a Transformada Wavelet faz o tratamento de sinais sem as limitações que são impostas pela Transformada de Fourier, além da maior velocidade de resposta do método, pois a transformada de Fourier exige pelo menos um ciclo de amostras completas.

As Redes Neurais tem a desvantagem do processo de aprendizagem que pode demandar um pouco mais de tempo, porém é um método robusto que vale o esforço. É uma técnica que visa substituir a lógica convencional, visto que sua maneira de reconhecer padrões é impressionante.

A Lógica Fuzzy é simples de ser implementada, já que a configuração é única, não necessitando de ajustes adicionais e conhecimento das demais funções do relé, como no caso do relé 87T utilizado pelos esquemas convencionais de proteção diferencial. No entanto é uma ferramenta bem robusta e confiável, não exigindo análises matemáticas complexas, como solução de equações diferenciais ou integrais.

O sistema nebuloso pode ser aplicado às diversas situações e equipamentos, uma vez que as regras de inferência e as entradas do processo de fuzzificação são flexíveis e independem das características construtivas dos transformadores, além de não necessitar de informações precisas como a lógica convencional.

5.1 Trabalhos Futuros

- i. Aplicação dessas ferramentas inteligentes às outras funções de proteção como, por exemplo, na proteção a distância de linhas de transmissão para localização de faltas.

- ii. Aplicação combinada das ferramentas na análise da proteção diferencial, como, por exemplo, utilizar a Transformada Wavelet para treinamento da RNA.
- iii. Explorar as dificuldades que existem na implementação dos algoritmos inteligentes.
- iv. Implementar essas ferramentas inteligentes e fazer simulações para confirmar a eficiência dos métodos não só na proteção diferencial de transformadores, mas também para outras funções de proteção.

6 Referências Bibliográficas

- [1] ADDISON, P. (2002). *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*. Institute of Physics Publishing.
- [2] AGUIAR, HIME; JUNIOR, OLIVEIRA. *Inteligência Computacional Aplicada à Administração*, Economia e Engenharia Matlab. Thomson Learning, 2007.
- [3] AQUINO, A.F.; SILVA, B.A.S.; MASSAUD, A.G.; OLIVEIRA, S.E.M. *Um Critério para Estudos de Estabilidade Transitória frente a Curtos Monofásicos, na Ausência de Informações sobre a Rede de Sequência Zero*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2010, Belém, Pará. III SBSE, 2010
- [4] BARBOSA, D. (2007). *Estimação da Frequência em Sistemas Elétricos de Potência Através de Filtragem Adaptativa*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [5] BARBOSA, D. (2010). *Sistema Híbrido Inteligente para o Monitoramento e Proteção de Transformadores de Potência*, PhD thesis, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.
- [6] BARBOSA, D.; COURY, D.C; NETTO, U.C. E OLESKOVICZ, M. *Lógica nebulosa aplicada à proteção diferencial de transformadores de potência*. Revista Controle & Automação/Vol.22 no.5/Setembro e Outubro 2011
- [7] BARRETO, J. M. & PROYCHEV, T. *Control of the standing position. Relatório técnico*, Projeto MUCOM (Multisensory Control of Movement) do Programa ESPRIT de Pesquisa Básica, da CEE (Comissão Econômica Europeia), Lab. of Neurophysiology, UCL, Bruxelas, May 1994.
- [8] BARROS, J. E R. DIEGO. *Application of the wavelet-packet transform to the estimation of harmonic groups in current and voltage waveforms*. *Power Delivery*, IEEE Transactions on 2006.
- [9] BRANCO, H.M.G.C.; BARBOSA, D.; OLESKOVICZ, M.; E COURY, D.V. *A Transformada Wavelet Packet e a Lógica Fuzzy Aplicadas à Classificação de Transitórios em Transformadores de Potência*. Congresso CBQEE VIII, UFSC, 2009.

- [10] CAVALCANTI, J.H.F.; MELO, H.; SOUTO, C.R.; CAVALCANTI, M.T. *Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias*. João Pessoa PB, 2012.
- [11] CHAPMAN, Stephen J. *Electric Machinery Fundamentals*. 2nd ed., Nova Iorque, McGraw Hill, 2001.
- [12] COURY, D.V.; JORGE, D.C. *Um Algoritmo Para Proteção Diferencial De Transformadores De Potência Utilizando Transformadas Wavelet*. Paper, Congresso CLAGTEE, USP, 2003.
- [13] COURY, D.V.; TAVARES, M.C.; CAMPOS, P.E.G. E SEGATTO, Ê.C. *Alto desempenho na proteção diferencial de transformadores de potência com a utilização de redes neurais artificiais*. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo.
- [14] DA SILVA, M *at al*. *Lógica Fuzzy aplicada à proteção de transformadores*. Congresso SBSE, UFSC, 2006.
- [15] DAUBECHIES, I. *The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis*. *Information Theory*, IEEE Transactions on, v. 36, n. 5, p. 961–1005, Sep 1990.
- [16] DAUBECHIES, Ingrid. *Ten Lectures on Wavelets*. [S.l.]: SIAM Books, 1992.
- [17] DE PÁDUA BRAGA, A.; LUDERMIR, T. B. & DE LEON FERREIRA DE CARVALHO, A.C.P. *Redes neurais artificiais: teoria e aplicações*. Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000.
- [18] ELMAN, J.L. (1990). *Finding Structure in Time*. *Cognitive Science*, n.14, pp.179-211.
- [19] FILHO, P.C. *Método para apoio à decisão na verificação da sustentabilidade de uma unidade de conservação, usando lógica Fuzzy*. Tese de doutorado, UFSC, Florianópolis, 2004.
- [20] FITZGERALD, A. E.; Kingsley Jr., C.; Umans, S. D. *Máquinas Elétricas*. 6ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2006.
- [21] FLACH, E. *Desempenho da Proteção Diferencial de Transformadores em Sistemas de Potência*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 2008.

- [22] GUARINI, M.C. *Análise de Segurança de Esquemas de Proteção para Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 2009.
- [23] HAYKIN, S. *Redes Neurais: Princípios e práticas*. 2ª Ed. Editora Bookman, 1999.
- [24] JEMSE, A. E A. C. HARB. *A Ripples in Mathematics: The Discrete Wavelet Transform*. New York: Springer-Verlag, 2000.
- [25] KINDERMANN, Geraldo, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, 1. Ed. Do Autor, 1999. 1v.
- [26] KINDERMANN, Geraldo, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, 1ª ed. Do Autor, 2006. 2v.
- [27] KOHAGURA, T. *Lógica fuzzy e suas aplicações*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.
- [28] KOSOW, I.L. *Máquinas Elétricas e Transformadores*, 4ª Ed. Porto Alegre, Globo, 1982. Vol 1.
- [29] KOVÁCS, ZSOLT L. (1996). *Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e aplicações*. São Paulo, SP – Livraria da Física Editora.
- [30] KULKARNI, S. V. E S. A. KHAPARDE. *Transformer Engineering: Design and Practice*. New York: Marcel Dekker, 2005.
- [31] MARTIGNOLI, Alfonso. *Transformadores*. Porto Alegre, Editora Globo, 1971.
- [32] McCulloch, W. S. & Pitts, W. *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*. Bulletin of Mathematical Biophysics 5 (1943), 115–133.
- [33] McCulloch, W. S. *Embodiments of Mind*. The MIT press, Cambridge, Massachusetts, 1965.
- [34] MELLO, N.F. *Proteção de Distância com Utilização de Relés Digitais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 2010.

- [35] OLIVEIRA JUNIOR, G.R. *Coordenação de relés de sobrecorrente em Sistemas radiais utilizando algoritmo genético*. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola Politécnica, UFRJ, 2008.
- [36] OLIVEIRA, J.J. *Proteção de Distância em Linhas de Transmissão com Compensação Série*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Julho/2005.
- [37] OLIVEIRA, S.E.M, 2012. *Notas de aula de proteção de sistemas elétricos*. Escola Politécnica – UFRJ.
- [38] PEREIRA, J.S.D. *Proteção de Distância para Linhas Paralelas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 2010.
- [39] RAYBOLT, A.M. *Aplicação de Redes Neurais à Proteção de Linhas Paralelas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 2010.
- [40] REZENDE, SOLANGE O. (2003). *Sistemas Inteligentes – Fundamentos e aplicações*. Barueri, SP. Editora Manole.
- [41] RIBEIRO, C.F. *Correntes Transitórias de Energização dos Transformadores, ser. Curso Especial de Distribuição de Energia Elétrica*. Recife: Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Setembro 1982.
- [42] ROSELLI, M.A. *Correção de Saturação de Transformadores de Corrente via Redes Neurais Artificiais e seus Efeitos na Proteção de Distância*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 2007.
- [43] ROSELLI, M.A.; OLIVEIRA, S.E.M. *Correção da Saturação de Transformadores de Corrente utilizando Redes Neurais Artificiais e seus Efeitos na Proteção de Distância*. In: XII Encontro Regional Íbero-Americano da Cigré, 2007, Foz do Iguaçu. XII ERIAC, 2007.
- [44] SANTOS, R.C. *Proteção Diferencial de Transformadores Baseada em Redes Neurais Artificiais*. São Paulo, 1999. 118p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [45] SEGATTO, E.C.; COURY D.V. *Redes Neurais Aplicadas a Relés Diferenciais para Transformadores de Potência*. Revista Controle & Automação/Vol.19

nº1/Janeiro 2008. Departamento de Engenharia Elétrica, EESC – Escola de Engenharia São Carlos.

- [46] TAFNER, M.A.; DE XEREZ, M. & FILHO, I.W.R. *Redes neurais artificiais: introdução e princípios de neurocomputação*. Editoras ECO e Editora da FURB, Blumenau, 1996.

- [47] TOSTES, R.C. *Utilização de Algoritmos Genéticos na Avaliação dos Limites de Estabilidade dos Sistemas Elétricos com Estabilização Suplementar*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 2008.

- [48] ZADEH, LOTFI A.; FU, KING-SUN; TANAKA, KOKICHI, SHIMURA, MASAMICHI. *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*. Academic Press, Inc. New York San Francisco London ,1975.