

**Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos**

**Matheus Galvão Martins Souza**

**Um método alternativo embarcado para  
a estimação de componentes harmônicos  
via a aplicação de redes neurais  
artificiais em tempo real**

São Carlos

2014



**Matheus Galvão Martins Souza**

**Um método alternativo embarcado para  
a estimação de componentes harmônicos  
via a aplicação de redes neurais  
artificiais em tempo real**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em  
Sistemas de Energia e Automação

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G719u Galvão Martins Souza, Matheus  
Um método alternativo embarcado para a estimação de  
componentes harmônicos via a aplicação de redes neurais  
artificiais em tempo real / Matheus Galvão Martins  
Souza; orientador Mário Oleskovicz. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2014.

1. Qualidade da energia elétrica. 2. Redes neurais  
artificiais. 3. Distorção harmônica. 4. Desenvolvimento  
em tempo real. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Matheus Galvão Martins Souza

Título: “Um método alternativo embarcado para a estimação de componentes harmônicos via a aplicação de redes neurais artificiais em tempo real”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 27 / 06 / 2014,

com NOTA 9,0 (nove, zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Dr. Mário Oleskovicz - (Orientador - SEL/EESC/USP)*

*Prof. Dr. Renato Machado Monaro - (EP/USP)*

*Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes - (DEE/CCET/UFSscar)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel



## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus, por me conceder forças, condições, oportunidades e o aprendizado durante este período de minha vida.

Agradeço ao meu avô Adilson Martins Souza, por me dar apoio e força durante esta etapa de minha vida. Se não fosse por toda a fé que ele depositou em mim, eu não escolheria o curso que escolhi, não faria graduação, e nem mesmo vivenciaria o que vivenciei estes cinco anos.

Agradeço a minha mãe Alessandra Galvão, por me dar apoio nos momentos difíceis que enfrentei durante o curso, por me consolar, orientar e guiar com toda a sua sabedoria.

Agradeço a Isabella, por me apoiar e me incentivar a crescer cada dia mais em minha vida.

Aos amigos que fiz em São Carlos, Murilo Leonardo, Douglas Henrique (Doug), Marcus Reis (Marquin), Marcelo (Marça), Guilherme Roza, Rachid, Vitor (Sid), Guilherme (Mega) e Luís Octávio (Bob), pois, estudamos juntos, rimos, sofremos juntos e vivenciamos inúmeros momentos de alegria. Obrigado pela amizade e companhia de vocês. A presença de vocês foi fundamental durante a graduação

Ao professor Mário Oleskovicz, que na figura de orientador teve total atenção durante meu trabalho, depositou grande confiança em mim e norteou os passos para que este trabalho pudesse ser realizado.

Ao professor Renato Machado Monaro, que me ajudou e contribuiu em grande parte da realização deste trabalho.

Aos meus colegas do LSEE, Athila, Rafael Marsolla, Ricardo Scarcelli e Jáder, que muito colaboraram comigo durante o período que estive ligado ao laboratório, desde a iniciação científica até o fim deste trabalho de conclusão de curso.

E, finalmente, agradeço a todos aqueles que contribuíram para que eu realizasse este sonho, de me formar como engenheiro.





*Deus não escolhe os capacitados, mas capacita seus escolhidos.*  
*Albert Einstein*



## Resumo

SOUZA, M.G.M. (2014). *Um método alternativo embarcado para a estimação de componentes harmônicos via a aplicação de redes neurais artificiais em tempo real*. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Como proposta de trabalho, esta pesquisa teve como objetivo inicial modelar computacionalmente formas de ondas representativas e indicativas da presença de cargas não lineares em um sistema elétrico de potência. Já como objetivo principal, buscou-se estimar os componentes harmônicos em tempo real via a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) através da utilização de um conjunto de hardware e software dedicados. Inicialmente, fez-se a estimação dos componentes harmônicos via a utilização da Transformada Discreta de Fourier e, em seguida, via a utilização de RNA. Os resultados obtidos via a aplicação de RNA foram avaliados em duas etapas distintas. A primeira etapa baseada em simulações *off-line*, e por uma segunda etapa executada em tempo real (*on-line*). Buscou-se por esta comparação, validar a utilização de RNA como um método alternativo e preciso para a obtenção dos componentes harmônicos atualmente presentes e não desprezíveis nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Os resultados encontrados evidenciaram a aplicabilidade da ferramenta neural para estimação dos componentes harmônicos em tempo real e serão apresentados e discutidos no decorrer deste documento.

**Palavras-chave:** Qualidade da energia, componentes harmônicos, transformada de Fourier, tempo real, redes neurais artificiais.



## **Abstract**

SOUZA, M.G.M. (2014). *An alternative boarded method for estimating harmonic components by the application of artificial neural network in real time*. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

As a work proposal, this work had as an initial objective modeling, computationally, representative and indicative waveforms of the presence of non-linear load in a power system. As a main objective, it was sought to estimate harmonic components in real time by the use of Artificial Neural Network (ANN) through the utilization of a set of hardware and software dedicated. Initially, the harmonics was estimated by the use of the Discrete Fourier Transform (DFT) and then, by the usage of ANN. The obtained results by the application of ANN was evaluated in two different steps. The first step was based in off-line simulations, and the second step executed in real time (on-line). By these comparisons, was sought to validate the use of ANN as an alternative and precise methodology to the obtainment of harmonic components actually present and not paltry in the power distribution system. The results found showed the applicability of the neural tool to the estimation of harmonics components in real time and it will be presented and discussed throughout this document.

**Keywords:** Power quality, harmonic components, Fourier transform, real time, artificial neural network.



## Lista de figuras

Figura 1: Modelo esquemático de um neurônio artificial.....	17
Figura 2: Representação esquemática de uma rede MLP.....	18
Figura 3: Representação de uma rede RBF.....	20
Figura 4: Organização da biblioteca.....	24
Figura 5: Representação esquemática da plataforma.....	27
Figura 6: Imagem representativa do algoritmo – Parte 1.....	35
Figura 7: Imagem representativa do algoritmo – Parte 2.....	35
Figura 8: Imagem representativa do algoritmo – Parte 3.....	36
Figura 9: Imagem representativa do algoritmo – Parte 4.....	36
Figura 10: Pontos de início da análise do sinal.....	37





## Lista de siglas e abreviaturas

AG – Algoritmos genéticos

DHI<sub>C</sub> – Distorção harmônica individual de corrente

DHI<sub>T</sub> – Distorção harmônica individual de tensão

DHT<sub>C</sub> – Distorção harmônica total de corrente

DHT<sub>T</sub> – Distorção harmônica total de tensão

FC – Fator de crista

MLP – *Multilayer perceptron*

PAC – Ponto de acoplamento comum

PAD – Placa de aquisição de dados

QEE – Qualidade da energia elétrica

RBF – *Radial basis function*

RNA – Rede neural artificial

RTAI – Real-time application interface

RTC – Reator de tiristor compensado

RTDS – Real time digital simulator

SEP – Sistema elétrico de potência

TDF – Transformada discreta de Fourier

TF – Transformada de Fourier

TIF – Transformada inversa de Fourier

TRF – Transformada rápida de Fourier



## Sumário

1	Introdução .....	1
1.1	Objetivo do trabalho .....	2
1.2	Organização do trabalho .....	3
2	Qualidade da energia elétrica .....	5
2.1	Distorção da forma de onda .....	6
2.1.1	Nível CC .....	6
2.1.2	Notching .....	6
2.1.3	Ruído .....	7
2.1.4	Inter-harmônicas .....	7
2.2	Componentes harmônicos .....	7
2.2.1	Cargas não lineares .....	7
2.2.2	Assinatura harmônica .....	8
2.2.3	Quantização das distorções harmônicas .....	9
3	Transformada de Fourier e suas aplicações .....	13
3.1	As derivações de Fourier aplicadas ao problema .....	13
3.2	A Transformada Rápida de Fourier (TRF) .....	13
3.3	A Transformada Inversa de Fourier (TIF) .....	14
3.4	A Transformada de Janela de Fourier (TJF) .....	15
4	Redes Neurais Artificiais .....	17
4.1	RNA de múltiplas camadas .....	18
4.2	RNA de função de base radial .....	19
5	O sistema em tempo real .....	23
5.1	A biblioteca OpenRelay .....	23
5.2	Organização da biblioteca .....	23
5.2.1	Classe Relay .....	24
5.2.2	Classe <i>Channel</i> .....	24
5.2.3	Classe <i>Acquisition</i> .....	25
5.2.4	Classe <i>Oscilography</i> .....	26
5.2.5	Classe <i>Measure</i> .....	26
5.3	O cubo PC104 .....	27
5.4	O RTDS .....	28
5.5	Comunicação RTDS e PC104 .....	28
6	Procedimento experimental .....	29
6.1	Experimentos off-line .....	29

6.1.1	Metodologia de treinamento .....	30
6.1.2	Transcrição do algoritmo e validação final da rede.....	33
6.2	Experimentos on-line.....	34
6.2.1	A subclasse RBF e as adaptações de código .....	34
6.2.2	Simulação via <i>FileAcquisition</i> .....	37
6.2.3	Simulação via <i>HardwareAcquisition</i> .....	37
7	Resultados experimentais .....	39
7.1	Simulações off-line.....	39
7.2	Simulações on-line .....	44
7.3	Comentários gerais sobre os resultados obtidos .....	46
7.4	A Transformada de Fourier versus Redes Neurais Artificiais.....	46
8	Conclusões.....	49
9	Referências bibliográficas .....	51

## 1 Introdução

---

Nos dias atuais, a evolução da sociedade humana moderna tem sido cada vez mais intensa e radical. No que diz respeito à intensidade, esta evolução tem sido cada vez mais recorrente e veloz. Este fato pode ser verificado no desenvolvimento da tecnologia no mundo, pois a quantidade de avanços tecnológicos significativos no século passado foi maior e mais frequente, se comparada aos séculos passados. Já no que diz respeito ao radicalismo, a população tem sofrido mudanças cada vez mais notáveis. Uma prova disto é o uso dos computadores nos últimos anos, pois depois de seu surgimento, a população mudou radicalmente sua maneira de viver. Independentemente do cunho de tais mudanças, o fato é que as mesmas continuarão a acontecer, sendo cada vez mais velozes e radicais.

Um dos fatores que impulsionou grande parte dessas mudanças foi o desenvolvimento da tecnologia nos últimos anos. Tal desenvolvimento tecnológico motivou a crescente busca por energia elétrica, pois toda esta tecnologia ascendente depende de energia elétrica para o seu funcionamento. Assim, à medida que a tecnologia disponibilizada apresenta uma inserção (penetração) significativa no Sistema Elétrico de Potência (SEP), a demanda por energia elétrica com qualidade também fica evidente e cada vez mais indispensável. Desta forma, cada vez mais cargas eletroeletrônicas, são e estarão sendo integradas à rede. Dentre estas cargas estão presentes as que manifestam características não lineares entre a tensão e a corrente observada em seus terminais de alimentação.

Como fato, sabe-se que a presença de cargas não lineares no SEP causa um alto índice de distorção harmônica na forma de onda do sinal (principalmente na corrente), o que leva a um aumento da amplitude da corrente eficaz absorvida pela rede, com a consequente redução do fator de potência original da carga. Além destes pontos, a interação da corrente distorcida com a impedância do sistema, provocará distorção harmônica também na tensão, podendo esta se propagar para as demais cargas (lineares e não lineares) conectadas no mesmo Ponto de Acomplamento Comum (PAC) (IEEE-519-1992).

Neste contexto, para a identificação e classificação dos componentes harmônicos, que caracterizarão a distorção harmônica, tanto nas formas de onda da tensão, quanto da corrente, usualmente, dispõe-se da Transformada Discreta de Fourier (TDF) (Lai *et al*, 1999). Contudo, há indícios na literatura correlata da possibilidade de analisar a distorção harmônica presente em um determinado sinal dispondo de técnicas inteligentes, como, por exemplo, por Redes Neurais Artificiais (RNA) (Ferreira, 2009), Algoritmos Genéticos (AG) (Souza, Oleskovicz e Coury 2007), dentre outras.

Vale frisar que a busca e o uso de metodologias alternativas para estimar os componentes harmônicos pode vir a permitir uma melhor exploração dos sinais, e, em consequência, suprir

algumas limitações dos métodos usualmente e amplamente empregados, como é o caso da TDF nas análises dos SEP (Machado, 2009).

## 1.1 Objetivo do trabalho

Conforme descrito no anteriormente, o problema dos componentes harmônicos tem sido cada vez ocorrente nos SEP, pois a presença destes componentes distorce a forma de onda da corrente, e caso tais harmônicas tenham amplitudes significativas, estas podem também distorcer a forma de onda da tensão. Desta forma, é necessário que estes componentes harmônicos possam ser devidamente mensurados e analisados.

O método mais utilizado para a estimação de tais componentes é a utilização da Transformada Discreta de Fourier (TDF) e a Transformada Rápida de Fourier (TRF), que consistem na obtenção da forma de onda do sinal, discretização do sinal e por fim, a passagem do sinal para o domínio da frequência. Obviamente, o processo de transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência via a utilização da Transformada de Fourier requer alguns apontamentos e cuidados, pois o método é eficiente para formas de ondas que possuem um número de ciclos acima de um (Kanegae, 2011). É importante ressaltar também que caso o sinal contenha inter-harmônicas (sinal com frequência distinta e não inteira quando comparada a frequência fundamental) a utilização deste método fica limitada, pois tal metodologia não consegue distinguir fielmente a presença de tais harmônicas.

Visto parte das limitações dos métodos anteriormente citados, este trabalho vem a propor uma metodologia alternativa que possa ser aplicada a estimação de tais componentes harmônicos em tempo real. Tal metodologia propõe o uso de Redes Neurais Artificiais (RNA) como forma de realizar a estimação dos componentes harmônicos do sinal em questão, através da utilização de softwares e hardwares que possibilitem a realização da simulação em tempo real. Adianta-se que o uso de RNA como um estimador de harmônicos pode ser aplicado a um número qualquer de ciclos, o que é uma vantagem de tal metodologia quando comparada a Transformada de Fourier (TF).

Outro objetivo que este trabalho possui é de realizar tal estimação em tempo real. Isto é, inicialmente treinar-se-á a RNA; em seguida, utilizam-se das suas matrizes de pesos e limiares de ativação para que a rede possa ser embarcada em um sistema que seja capaz de simular a rede em tempo real, fazendo com que o sinal distorcido possa ter seu espectro de frequência calculado ao mesmo tempo em que ele é interpretado pelo hardware.

Assim, os objetivos deste trabalho consistem no estudo, análise, desenvolvimento e validação de uma metodologia alternativa para a estimação de componentes harmônicos via redes neurais artificiais. Em seguida, depois de validada a metodologia de maneira *off-line*, a rede será embarcada em um sistema físico interagindo com um simulador em tempo real

(RTDS<sup>®</sup> – *Real Time Digital Simulator*), procurando validar o método proposto frente a situações práticas.

## **1.2 Organização do trabalho**

Quanto à organização do trabalho, o mesmo foi disposto em 7 capítulos.

O capítulo 1 apresenta a introdução acerca do desenvolvimento do trabalho, bem como os objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta os conceitos e aspectos relacionados à área da qualidade da energia elétrica, destacando os pontos em que esta área do conhecimento dedica estudos e parte do conceito que foi utilizado para esta pesquisa.

O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento teórico sobre a ferramenta mais utilizada hoje para a estimação de componentes harmônicas, que é a Transformada de Fourier. Já o capítulo 4 apresenta os conceitos teóricos acerca de Redes Neurais Artificiais, que é a metodologia proposta para a medição de harmônicos em tempo real.

O capítulo 5 apresenta o sistema físico que foi utilizado para embarcar a RNA em tempo real. São apresentadas as características do sistema e aspectos ao tipo de linguagem de programação utilizada no *hardware*.

O capítulo 6 é direcionado a apresentação da forma em que os procedimentos experimentais foram conduzidos.

No capítulo 7 são apresentados todos os resultados obtidos com o desenvolvimento da pesquisa.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e por fim, apresentam-se as referências bibliográficas.





## 2 Qualidade da energia elétrica

---

Conforme foi apontado anteriormente, à medida que mais cargas são integradas ao SEP, maior é a demanda de energia, e, em consequência, a de uma melhor qualidade do produto “energia” fornecido. Devido a esta expansão de cargas no SEP, um novo ramo na área da engenharia elétrica tem crescido denominado Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Define-se QEE como a área do conhecimento que trata da QEE entregue/fornecida ao consumidor final, seja ao nível de transmissão e/ou de distribuição. Isto é, a área que define índices e parâmetros para que a energia seja entregue aos consumidores dentro de limites pré-estabelecidos e aceitáveis para o padrão nacional.

Dentre os inúmeros motivos para se discutir o tema, destaca-se o fator econômico agregado, devido a sua maior recorrência na prática. Por exemplo, caso uma empresa pare um processo de produção por alguns minutos, devido a qualquer problema manifestado e relacionado à falta de QEE, a volta do próprio processo pode ser extremamente complexa e dispendiosa, o que acarretará em um enorme prejuízo financeiro para a empresa.

Conforme lembrado por Oleskovicz (2007), diz-se que a energia será entregue com qualidade se algumas condições forem satisfeitas, as quais são:

- As formas de ondas das tensões trifásicas devem ser o mais próximo possível de senóides com predominância de uma única frequência (a componente fundamental);
- As magnitudes das tensões trifásicas devem permanecer dentro de limites aceitáveis; e
- A frequência fundamental do sistema, no caso 60 Hz, deve permanecer estável dentro de limites pré-estabelecidos e aceitáveis para a operação do SEP.

Sendo assim, define-se que estes são os padrões básicos para o fornecimento da energia com qualidade. Dizer que a energia fornecida obedece a todos os padrões acima é dizer que a mesma está sendo entregue com devida conformidade, atendimento ao consumidor e continuidade. A conformidade está relacionada à assinatura (padrão) da forma de onda, em específico da tensão. Já o atendimento ao consumidor diz respeito a toda relação entre o consumidor e as concessionárias de energia, e por fim, a continuidade que diz respeito à disponibilidade da energia, o fornecimento ininterrupto do produto energia.

É de consenso comum que todos queiram a energia entregue com qualidade. Contudo, para que a mesma seja entregue da forma apropriada, é preciso analisar e solucionar certos problemas que podem reduzir e influenciar na qualidade da mesma. Há uma série de fenômenos (distúrbios) associados à falta da QEE, entre os quais, citam-se: Transitórios; Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD); Variações de Tensão Longa Duração (VTLD);

Desequilíbrio de tensão; Distorção da forma de onda; Flutuação de tensão e Variação da frequência do sistema (Bollen, 2000).

Conforme anteriormente colocado, o objetivo deste trabalho foi uma análise e caracterização das distorções harmônicas e a apresentação de uma forma alternativa de quantizar estes harmônicos em tempo real. Neste contexto, as distorções da forma de onda são consideradas como subclasses da distorção da forma de onda, que será apresentada no que segue.

## **2.1 Distorção da forma de onda**

Define-se como distorção da forma de onda toda e qualquer diferenciação da forma puramente senoidal, com base na frequência fundamental, caracterizada pelo seu conteúdo espectral. Ou seja, além da componente fundamental, haverá outros componentes de frequências distintas que, sobrepostos ao sinal original (fundamental), irão caracterizar uma forma de onda não desejável para a operação do SEP.

Segundo Dugan *et al* (2003), há cinco tipos de distorção da forma de onda:

1. Nível CC;
2. *Notching*;
3. Ruídos;
4. Inter-harmônicas; e
5. Harmônicos.

No que segue, apresentam-se alguns comentários sobre os mesmos. Com relação ao quinto item, harmônicos, por ser este o principal foco da pesquisa, os apontamentos e as informações necessárias serão apresentados em um item à parte dos demais.

### **2.1.1 Nível CC**

Denomina-se nível CC a distorção da forma de onda originada devido à presença de uma componente CC (corrente contínua) ao sinal de tensão ou corrente em um sistema de energia CA (corrente alternada). Originado de possíveis distúrbios ou a partir operações ideais com circuitos retificadores de meia-onda, sua presença no sistema elétrico de potência pode causar a saturação de transformadores, bem como a corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento (Dugan *et al*, 2003).

### **2.1.2 Notching**

Denomina-se *notching* o distúrbio periódico de tensão que ocorre quando a corrente comuta de uma fase para outra. Originado pela má operação de dispositivos eletrônicos, tal fenômeno

tende a curto-circuitar duas fases momentaneamente, o que pode causar um grande aumento na corrente de fase, acarretando sérios problemas à rede elétrica (Dugan *et al*, 2003).

### **2.1.3 Ruído**

Denomina-se ruído a todo e qualquer sinal elétrico, não desejável com um conteúdo do espectro de frequência abaixo de 200 kHz, superposto aos sinais de corrente e tensão do sistema de energia, seja este presente no condutor de fase, neutro ou nos próprios sinais de linha. Em geral, os ruídos são originados devido a aterramentos impróprios. Contudo, sua causa pode ser devido a equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco e fontes chaveadas. Sua presença no sinal elétrico pode causar o mau funcionamento de máquinas elétricas, a perda de dados e erro de processamento, bem como a recepção distorcida de sinais de áudio e vídeo (Dugan *et al*, 2003).

### **2.1.4 Inter-harmônicas**

Inter-harmônicas são formas de onda de tensão e corrente que apresentam componentes de frequência não múltiplos inteiros da frequência fundamental do sinal do SEP. Encontrados em redes de diferentes classes de tensão, sendo as suas principais fontes os conversores de frequência estáticos, ciclo conversores, motores de indução e equipamentos a arco (Dugan *et al*, 2003).

## **2.2 Componentes harmônicos**

Define-se como harmônico o componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental. Desta forma, define-se como distorção harmônica a distorção causada na onda devido à inserção de componentes harmônicos superpostos a onda original. Dizemos ainda que as distorções harmônicas são uma espécie de energia indesejada (suja) ao sistema elétrico de potência, pois a presença de tais harmônicos macula a forma de onda original, modificando o seu formato e sua frequência. O surgimento dos harmônicos no sistema elétrico de potência se deve em grande parte a crescente quantidade de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e, em geral, pela presença de cargas não lineares integradas a rede (dispositivos eletrônicos). Com o intuito de diminuir a quantidade de harmônicos injetados na rede, utiliza-se de filtros de linha, que podem ser, por exemplo, compostos por um capacitor combinado em série com um indutor (Dugan *et al*, 2003).

### **2.2.1 Cargas não lineares**

Cargas não lineares são todos e quaisquer tipos de cargas que não obedecem a uma relação direta (linear) entre tensão e corrente. Devido a tal característica, estas cargas injetam uma

grande quantidade de harmônicos na rede elétrica, o que gera a distorção harmônica no sinal. Caso uma carga não linear esteja conectada junto a outras cargas em um mesmo PAC no SEP, todas as cargas poderão ser prejudicadas pelo fornecimento de uma tensão distorcida. Esta tensão distorcida resultará da interação entre as cargas e a reatância do sistema, em função da Distorção Harmônica Total de Corrente ( $DHT_C$ ) causada pela carga não linear (Dugan *et al*, 2003).

### 2.2.2 Assinatura harmônica

Como já explicitado, as cargas não lineares injetam uma grande quantidade de componentes harmônicos no sinal da rede, o que é prejudicial aos consumidores que estão conectados, principalmente no PAC desta rede. Contudo, ainda não foram quantizados os componentes harmônicos que as cargas não lineares em geral injetam na rede. Assim, esta seção é direcionada a mostrar a magnitude dos componentes harmônicos das cargas mais usuais que normalmente são evidenciados no SEP.

A Distorção Harmônica Total de Tensão ( $DHT_T$ ) e/ou de Corrente ( $DHT_C$ ) injetada na rede considera a soma de todos os componentes harmônicos inseridos por cada carga em específico. Assim, cada carga em específico possui um potencial harmônico, isto é, é capaz de inserir um determinado número de componentes harmônicos. Espera-se assim, que cada carga possua um determinado comportamento (padrão) em relação aos harmônicos inseridos na rede. A este comportamento, dá-se o nome de assinatura harmônica da carga. Como cada carga apresenta uma assinatura em específico, a quantização dos componentes harmônicos totais inseridos à rede fica mais fácil, pois se as assinaturas das cargas forem previamente conhecidas, o resultado total será previsível.

Assim, apresenta-se no que segue a assinatura harmônica de algumas das cargas usualmente encontradas na prática (em campo). Contudo, deve-se observar e frisar que a assinatura de cada carga foi obtida experimentalmente e de forma isolada (uma carga de cada vez) por diversos ensaios, como mostra a Tabela 1 (Kanegae, 2011).

Tabela 1: Amplitude e ordem harmônica da corrente para algumas cargas residenciais.

Amplitude e ordem harmônica da corrente (A)				
Frequência (Hz)/ Componente harmônico	Lâmpada incandescente 127 (V), 200 (W)	Lâmpada com reator convencional 127 (V), 20 (W)	Lâmpada fluorescente compacta 110/127 (V), 23 (W)	Microcomputador 115/230 (V), 140 (W)
60/1°	1,5	0,35	0,24	0,45
180/3°	0	0,05	0,18	0,4
300/5°	0	0,01	0,1	0,35
420/7°	0	0	0,05	0,3
540/9°	0	0	0,04	0,25
660/11°	0	0	0,035	0,15
780/13°	0	0	0,03	0,1
900/15°	0	0	0,02	0,05

### 2.2.3 Quantização das distorções harmônicas

As consequências que as distorções harmônicas causam para o consumidor variam desde falhas em motores, acionamentos indevidos de disjuntores, à parada total de importantes equipamentos integrados a rede. Devido a motivos como estes, necessita-se de índices que possam mensurar o grau de distorção harmônica.

Inicialmente, é necessário quantizar a amplitude dos componentes harmônicos, e para isto, utiliza-se da série de Fourier (Haykin e Veen, 1999). A vantagem de se utilizar a série de Fourier é que a sua aplicação a sinais distorcidos possibilita encontrar cada componente harmônico analisado separadamente; e como a série de Fourier é uma ferramenta matemática linear, diz-se que a distorção final será a soma de todas as distorções calculadas pela série. Calculados os componentes harmônicos, utiliza-se do cálculo da Distorção Harmônica Total da Tensão (DHT<sub>t</sub>) e/ou Corrente (DHT<sub>c</sub>), definida por (Dugan *et al*, 2003):

$$DHT_t = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{max}} V_n^2}{V_1^2}} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$DHT_c = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{max}} I_n^2}{I_1^2}} \times 100(\%) \quad (2)$$

Em que:

DHT<sub>T</sub> = distorção harmônica total de tensão;

DHT<sub>C</sub> = distorção harmônica total de corrente;

V<sub>n</sub> = n-ésimo harmônico de tensão;

I<sub>n</sub> = n-ésimo harmônico de corrente;

V<sub>1</sub> = valor eficaz da tensão fundamental;

$I_1$  = valor eficaz da corrente fundamental; e

$n$  = ordem do componente harmônico.

Define-se também a Distorção Harmônica Individual (DHI), que possui o intuito de determinar a porcentagem de que cada componente harmônico possui com relação a componente fundamental. A distorção harmônica individual, como apresentada em Dungan *et al* (2003), pode ser definida como:

$$DHI_t = \frac{V_n}{V_1} \times 100(\%) \quad (3)$$

$$DHI_c = \frac{I_n}{I_1} \times 100(\%) \quad (4)$$

Em que:

$DHI_t$  = distorção harmônica individual de tensão; e

$DHI_c$  = distorção harmônica individual de corrente.

Outro índice que pode ser utilizado para mensurar a distorção harmônica do sinal é o fator de crista (FC), que é definido como a razão entre o valor de pico e o valor RMS (*Root Mean Square*) do sinal. Para sinais senoidais este valor deve ser igual a  $\sqrt{2}$ . Portanto, a medida que o FC se distanciar do valor  $\sqrt{2}$ , espera-se que o índice de distorção da onda seja mais elevado.

Conforme apresentado por Kaiser, Marques e Correa (2006), o FC é definido por:

$$FC = \frac{V_p}{V_{ef}} \quad (5)$$

$$FC = \frac{I_p}{I_{ef}} \quad (6)$$

Em que:

FC = Fator de Crista;

$V_p$  = Valor de pico da tensão;

$V_{ef}$  = Valor eficaz da tensão;

$I_p$  = Valor de pico da corrente; e

$I_{ef}$  = Valor eficaz da corrente.

Calculadas as distorções e o fator de crista, definem-se padrões aceitáveis para os mesmos, de forma que caso ambos estejam dentro de limites pré-estabelecidos, conclui-se que a energia está sendo entregue com qualidade. É importante estabelecer um critério para verificar até que harmônico será estimado. Este em geral, em SEP, é adotado como menor do que 50 (3.000 Hz),

pois os componentes harmônicos para ordens superiores são desprezíveis quando comparados ao componente fundamental. Já no contexto da QEE, conceitualmente, estimam-se os valores até o 25º componente harmônico (1.500 Hz) (Dungan *et al*, 2003).





### 3 Transformada de Fourier e suas aplicações

---

Criada e desenvolvida por Jean Baptiste Fourier, a série de Fourier teve sua formulação baseada na hipótese de que qualquer sinal periódico, representado por uma função periódica não senoidal, é composto por uma soma infinita de sinais senoidais periódicos com frequências múltiplas da frequência fundamental do sinal aperiódico.

Sendo assim, a partir da aplicação da teoria desenvolvida por Fourier, é possível decompor uma forma de onda aperiódica em subsinais periódicos. Esta subdivisão possibilita que o estudo da forma de onda possa ser feito com a análise dos subsinais decompostos, o que vem a ser uma grande vantagem na aplicação desta ferramenta, pois o estudo dos sinais senoidais periódicos é muitas vezes mais fácil e simples do que o estudo da forma de onda aperiódica. Portanto, para fins de estudo para esta pesquisa, o uso da ferramenta desenvolvida por Fourier será estudada e analisada mais a fundo, pois parte da pesquisa faz uso da ferramenta.

#### 3.1 As derivações de Fourier aplicadas ao problema

Para quantizar os índices de distorção de uma determinada forma de onda, é necessário conhecer os valores dos componentes harmônicos que a compõe, uma vez que a forma de onda distorcida é formada pela sobreposição de várias formas de ondas. Necessita-se então de ferramentas que possibilitem realizar tais estimações.

Dentre as aplicações, dispõe-se, usualmente, da Transformada Discreta de Fourier (TDF).

Dado um sinal qualquer, inicialmente o sinal é amostrado, obtendo-se  $n$  pontos distintos. Sendo assim, depois de realizada a amostragem do sinal, é possível descrever os seus componentes harmônicos através da TDF, que é definida como (Haykin e Veen, 1999):

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (7)$$

Em que:

$\omega$  = Frequência angular; e

$x[n]$  =  $n$ -ésimo ponto do sinal.

Como a amostragem do sinal é limitada para  $n$  distintos pontos, aplica-se a TDF aos pontos amostrados, obtendo-se assim, os componentes harmônicos do sinal em questão. Obtidos os componentes harmônicos do sinal, podemos reconstruí-lo através de sua representação por uma série de funções. Reconstruído o sinal, compara-se o mesmo com o sinal de referência e conclui-se acerca da qualidade da estimação.

#### 3.2 A Transformada Rápida de Fourier (TRF)

Apesar de a aplicação da TDF ser uma ferramenta muito útil para a construção do espectro de frequência do sinal em análise, sua utilização é restrita, pois a mesma requer um esforço

computacional muito grande. Para minimizar este esforço, lança-se mão da Transformada Rápida de Fourier (TRF, ou, do inglês, *Fast Fourier Transform* - FFT). A TRF é uma técnica que possibilita aplicar a TDF de forma mais rápida, apresentando os mesmos resultados aos da TDF(Pupin, 2010).

Conforme já mencionado, é importante salientar que a aplicação da utilização da TDF exige um esforço computacional alto, com quantidade de operações da ordem de  $N^2$ . Sendo assim, para elevados valores de  $N$ , este tipo de ferramenta torna-se computacionalmente inviável. Desta forma, lança-se mão da TRF.

Seja a TDF de  $N$  pontos:

$$H_k = \sum_{i=0}^{N-1} h_i \theta^{ik} \quad (8)$$

Em que:

$$\theta = e^{j2\pi/N} \text{ ou } e^{-j2\pi/N};$$

$h_i$  = número complexo; e

$H_k$  = k-ésimo componente da TDF.

Seja  $N$  uma potência de 2, dado por  $N = 2^n$ , em que  $n$  é um número inteiro. Assim, o algoritmo da TRF reduz pela metade a TDF de  $N$  pontos, separando-a em componentes pares e ímpares, em que cada um se transforma em uma TDF de  $N/2$  pontos. Portanto,  $H_k$  fica da seguinte forma:

$$H_k = H_k^{par} + \theta^k H_k^{impar} \quad (9)$$

Em que:

$$H_k^{par} = \sum_{i=0}^{N/2-1} h_{2i} (\theta^2)^{ik} \quad (10)$$

$$H_k^{impar} = \sum_{i=0}^{N/2-1} h_{2i+1} (\theta^2)^{ik} \theta^k \quad (11)$$

Desta forma, divide-se a TDF de  $N$  pontos em duas TDF de  $N/2$  pontos. Portanto, com a aplicação deste algoritmo o esforço computacional decai da ordem de  $N^2$  para  $\frac{N}{2} \log_2 N$ .

### 3.3 A Transformada Inversa de Fourier (TIF)

Aplica-se a TDF em um sinal senoidal distorcido a fim de calcular o valor de seus componentes harmônicos e encontrar os valores dos índices de distorção que o represente adequadamente. Contudo, caso seja desejado representar o sinal a partir de seus conteúdos harmônicos é necessário utilizar outro tipo de ferramenta. Para que o mesmo seja devidamente representado, lança-se mão da Transformada Inversa de Fourier (TIF). A TIF retorna a representação de um sinal no domínio da frequência para o domínio do tempo, conforme (Haykin e Veen,1999):

$$x[n] = IDFT[X(k)] = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{\frac{2\pi k n}{N}} \quad (12)$$

Em que:

$x[n]$  = n-ésimo valor do sinal;

$X(k)$  = Valor do componente harmônico.

Desta forma, conhecido o espectro de frequência de um sinal qualquer, isto é, a amplitude e a ordem de seus componentes harmônicos, bem como o ângulo associado a cada harmônico, pode-se representar o sinal no domínio do tempo através da equação (13). Particularmente, para o caso de uma senoide distorcida, a equação (13) fica:

$$x(n) = \sum_{i=1}^N H_i * \sin(\omega * i * n_i + \varphi_i) \quad (13)$$

Em que:

$H_i$  = i-ésima magnitude do componente harmônico; e

$\varphi_i$  = i-ésimo ângulo do componente harmônico.

### 3.4 A Transformada de Janela de Fourier (TJF)

A Transformada de Fourier (TF) decompõe um sinal variante no tempo em componentes no domínio da frequência, permitindo caracterizá-lo e descrevê-lo no domínio da frequência. Contudo, a TF não é adequada para a análise de sinais não estacionários, isto é, sinais cujas características estatísticas (média e variância, por exemplo) variam ao longo do tempo (Muñoz, 2009). Neste contexto, como um sinal estacionário possui as mesmas características de um sinal periódico, diz-se que ambos são equivalentes. Desta forma, verifica-se que a TDF não é adequada para a análise de sinais periódicos, ou sinais que possuem transitórios, que estão frequentemente presentes no SEP. A fim de contornar essa deficiência que a TDF possui, lança-se mão da Transformada de Fourier Janelada (TFJ), que consiste em dividir o sinal em segmentos fixos e aplicar a TF a estes segmentos. Assim como a TDF, a TJF decompõe um sinal variante no tempo. Contudo a TJF o decompõe em componentes no domínio do tempo e da frequência, caracterizando de forma mais eficiente a evolução no tempo de cada componente do sinal (Coury, Oleskovicz e Souza 2005). A TJF de um sinal  $x[n]$  qualquer é dada por:

$$X_t(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \omega(t - n) x(n) e^{-j\omega n} \quad (14)$$

Em que:

$\omega = \frac{2\pi k}{N}$  é a frequência angular em radianos;

$N$  = é o número de bandas de frequências; e

$\omega(n)$  é a janela simétrica de tamanho  $L$ , sendo  $L \leq N$  se a reconstrução do sinal é requerida.

Verifica-se que  $\omega(t-n)$  é a sequência de janelas que determinam a porção de entrada do sinal em análise para um período  $t$  particular. Pela análise da equação (17), conclui-se que a TJF é uma função de duas variáveis, essas são o tempo ( $t$ ), que é discreto, e a frequência ( $\omega$ ) que é contínua. Quando se fixa um determinado período  $t$  e faz-se  $-\infty \leq n \leq \infty$  para a janela de  $\omega(t-n)x(n)$ , a TJF torna-se uma função de somente uma variável, o tempo ( $t$ ). Ao tornar-se função de uma variável, a transformada fica semelhante àquela aplicada a um sinal periódico, amenizando a deficiência da TF.

Visto as ferramentas e parte do embasamento teórico que é utilizado nesta pesquisa, o próximo capítulo contemplará a apresentação da ferramenta alternativa que é proposta para análise dos sinais em tempo real, que são as Redes Neurais Artificiais (RNA).

## 4 Redes Neurais Artificiais

Redes neurais artificiais (RNA) são técnicas computacionais baseadas na estrutura neurológica do sistema nervoso, e que são capazes de aprender através da experiência (exemplos).

Inicialmente, este modelo computacional fora direcionado à modelagem do neurônio biológico. Contudo, tais modelos são extremamente simplificados se comparados à estrutura neural dos seres vivos, como relata HERTZ , Krough e Palmer (1991). Tal técnica tem sido amplamente usada em várias áreas do conhecimento, devido à capacidade de aprendizado por experiência, generalização e auto-organização, o que torna viável muitas de suas aplicações.

O elemento básico de uma RNA é o neurônio artificial, também denominado elemento de processamento.

Um dos modelos mais utilizados para representá-lo é mostrado na Figura 1, conforme apresenta BERNIERE *et al* (1994), e que é inspirado no modelo proposto por Warren McCulloch & Walter Pitts em 1943.

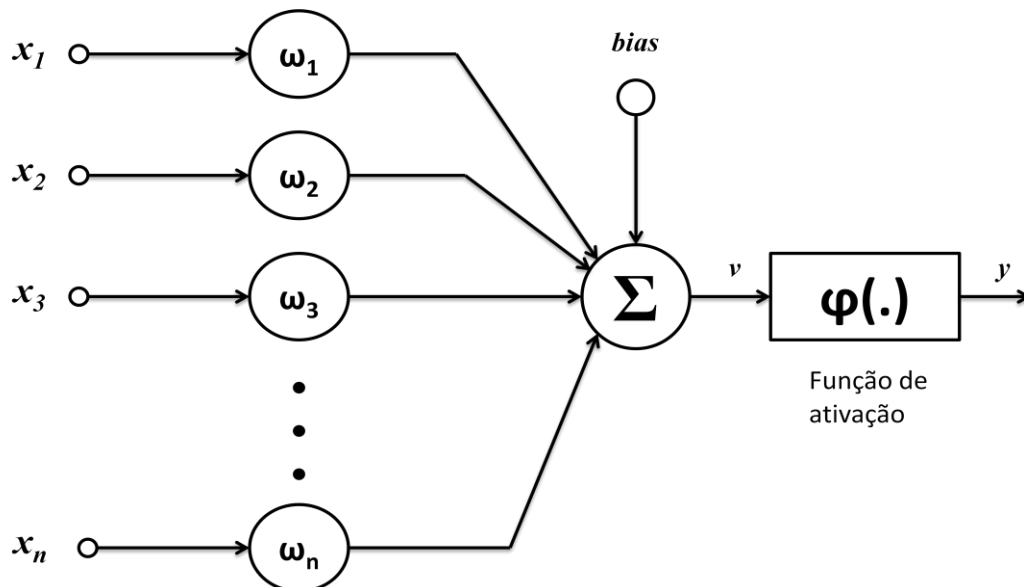


Figura 1: Modelo esquemático de um neurônio artificial.

O processamento do neurônio é em geral um artifício simples, que possui um número de sinais de entrada e saída. A cada sinal entrada ( $x_i$ ), associa-se um peso relativo ( $w_i$ ). Desta forma o sinal de entrada total é a soma de todos os sinais de entrada com seus respectivos pesos. Se a soma de todos os sinais de entrada com os seus respectivos pesos for maior que o que o limiar especificado pelo *bias*, dizemos que o neurônio está ativo e produz um sinal de saída cujo valor

será considerado pela função de ativação ( $\phi$ ), e, caso contrário, dizemos que o neurônio não está ativo e o seu sinal de saída depende da aplicação específica.

Uma das principais características de uma RNA é o fato desta ser capaz de aprender através de experiências. Assim, para que a RNA seja capaz de aprender é necessário que seja apresentado modelos, ou exemplos. Para isto, faz-se uso de algoritmos de treinamento que podem ser: treinamento supervisionado; treinamento não supervisionado; treinamento supervisionado e não supervisionado; e treinamento por reforço (Hertz, Krough e Palmer 1991).

#### 4.1 RNA de múltiplas camadas

A arquitetura deste modelo de RNA de múltiplas camadas (ou, da sigla em inglês MLP – *Multilayer Perceptron*) é composta por neurônios dispostos em camadas, sendo o sentido da propagação da informação da camada de entrada para a camada de saída, sem a realimentação para as camadas anteriores, como mostra a Figura 2. Por este motivo, este tipo de rede neural é também denominado rede de *feedforward*.

Neste tipo de arquitetura, a camada de entrada redistribui os dados associados a respectivos pesos para a camada adjacente. As camadas intermediárias por sua vez produzem novos estágios de ativação que são transmitidos para a camada de saída, que ao receber os dados das camadas intermediárias também produzem estágios de ativação; e estes últimos serão a saída final fornecida pela rede (Oleskovicz, 2001).

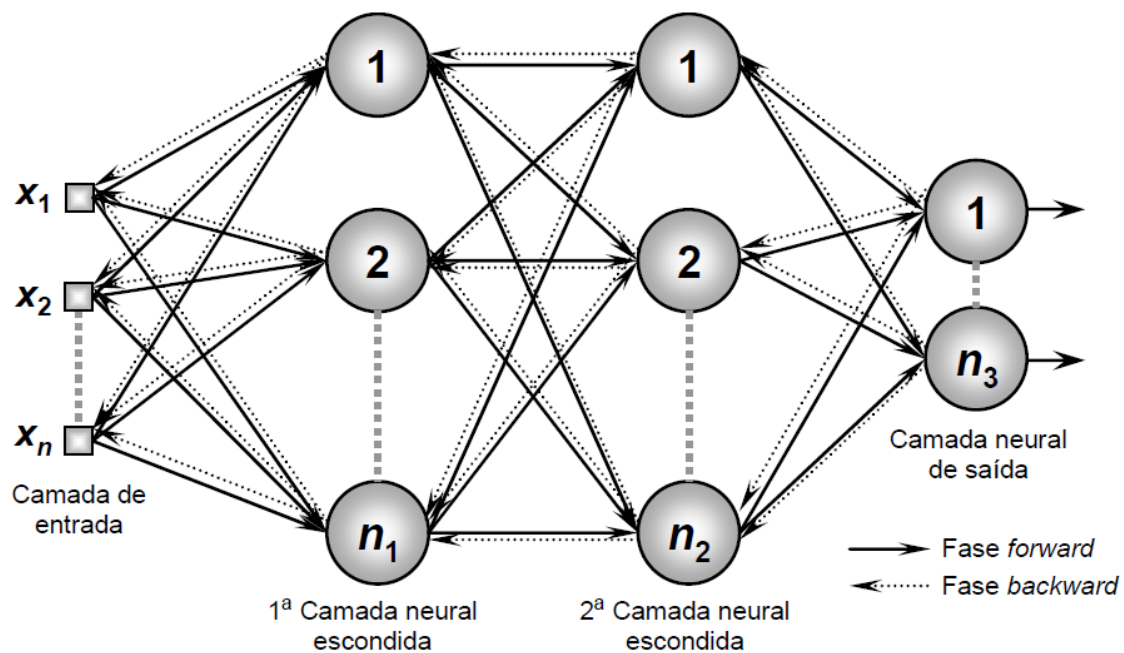


Figura 2: Representação esquemática de uma rede MLP.

Um dos algoritmos de treinamento mais utilizados para o treinamento deste tipo de arquitetura de RNA é conhecido como *backpropagation*, e pode ser aplicado a redes MLP com no mínimo uma camada intermediária. O treinamento da rede por este algoritmo é dividido em dois passos distintos: o de propagação e o de retropropagação da informação.

O passo de propagação consiste em apresentar um padrão conhecido para a rede e deixar que a mesma compute os dados, camada após camada, considerando certas funções de ativação até chegar à saída. Já o passo de retropropagação consiste em computar os dados recebidos na camada de saída e atualizar os pesos associados a todas as conexões da camada de saída para a de entrada Hertz, Krough e Palmer (1991).

## 4.2 RNA de função de base radial

Uma RNA de função de base radial (ou, da sigla em inglês RBF – *Radial Basis Function*) é qualquer rede que possui uma representação interna dos elementos de processamento da camada intermediária que são radialmente simétricos. Este tipo de RNA possui em geral duas camadas (desconsiderando a camada de entrada). A primeira camada, em que os elementos de processamento utilizam funções de bases radiais, agrupa os dados de entrada em *clusters*. O objetivo principal desta camada é separar padrões de entrada não linearmente separáveis em um conjunto de saídas linearmente separáveis. Vale salientar que esta camada utiliza uma função gaussiana como função de ativação, conforme pode ser visto na Figura 3. Já a segunda camada classifica os padrões recebidos da camada anterior. Esta camada normalmente possui como função de ativação, funções lineares (Oleskovicz, 2001).

Na maioria das vezes, para o treinamento das redes RBF é utilizado o treinamento híbrido, que consiste em dois estágios. No primeiro estágio, é determinado o número de funções radiais e seus parâmetros através de métodos não supervisionados. Este primeiro estágio pode ser realizado através de duas abordagens distintas. Na primeira abordagem, os padrões de treinamento são distribuídos de maneira representativa para o problema considerado, de forma que os mesmos sejam capazes de capturar as principais características do problema. Na segunda abordagem são aplicadas técnicas de *clustering*. Como já comentado anteriormente, este tipo de arquitetura de rede é capaz de separar entradas não linearmente separáveis em um conjunto de saídas linearmente separáveis. Devido a este comportamento, para o segundo estágio de treinamento ajusta-se os pesos das unidades de saída através de modelos lineares, uma vez que o problema a ser solucionado reduz-se então a um problema linear. Para o ajuste dos pesos desta camada, diversos métodos têm sido aplicados, como o da Regra Delta e a Decomposição em Valores Singulares (Silva, Spatti e Flauzino 2010).

Para que o treinamento deste tipo de rede neural seja realizado no *software* MATLAB, faz-se necessária a definição de alguns parâmetros, assim como todos os tipo de redes neurais. Como

este tipo de RNA não necessita da definição da quantidade de neurônios na camada intermediária, pois esta arquitetura adiciona um novo neurônio a cada época de treinamento, é preciso que outros parâmetros sejam definidos. O primeiro deles é o critério de convergência do treinamento, que representa um valor de erro, que uma vez atingido, cessará o treinamento. O outro parâmetro é a constante de *spread*, que representa a largura da base da função de base radial, que é utilizada neste tipo de arquitetura de rede.

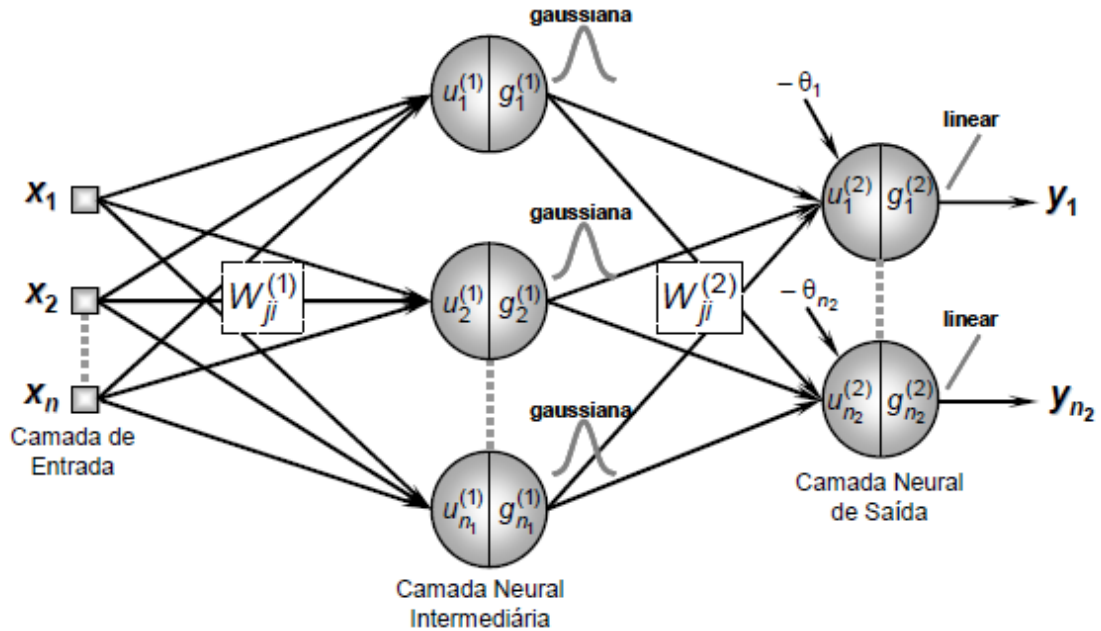


Figura 3: Representação de uma rede RBF.

### As arquiteturas apresentadas

Cada um dos dois tipos de arquitetura apresentados é em geral recomendado para aplicações em específico, buscando os melhores resultados para o problema, e observando as vantagens e desvantagens de cada aplicação. Para a estimação dos componentes harmônicos, ambas as arquiteturas podem ser utilizadas apresentando bons resultados (He *et al*, 2006).

A utilização da arquitetura MLP se mostra muito boa devido a sua habilidade de extrair dados com precisão para a identificação de equipamentos (assinaturas harmônicas), e ao fato de sua utilização não requerer grande esforço computacional. Este tipo de arquitetura foi usado para calcular o conteúdo harmônico apresentando bons resultados, conforme apresentam Kanegae (2010) e He *et al* (2006).

A arquitetura do tipo RBF também pode ser usada para calcular os componentes harmônicos, apresentando resultados tão bons quanto à arquitetura MLP. Alguns destes resultados podem ser encontrados em He *et al* (2006). Devido aos bons resultados observados na literatura correlata, para esta pesquisa, as redes do tipo RBF serão utilizadas para a estimação dos conteúdos harmônicos e comparação com os resultados fornecidos pela TF.



## **A escolha da arquitetura**

As redes RBF muito se assemelham as redes MLP no que diz respeito a dois tipos de aplicações, pois ambas em geral apresentam bons resultados para o problema de classificação (reconhecimento) de padrões e aproximação de funções (Silva, Spatti e Flauzino, 2010).

Uma vez que se deseja calcular o espectro de frequência de um sinal desejado, a aplicação se reduz ao problema de aproximação de função, pois a entrada para a RNA é um sinal qualquer e se aplica uma função que retorna o conteúdo harmônico do sinal em questão.

Apesar de ambas as arquiteturas serem aplicáveis a esta situação, a rede RBF apresenta certa vantagem com relação à MLP, pois a rede RBF é capaz de realizar esta aproximação com um número reduzido de padrões (exemplos) necessários para o processo de treinamento (Silva, Spatti e Flauzino, 2010). Tal característica faz que este tipo de arquitetura seja melhor aplicável quando o banco de dados para a realização do treinamento e do teste apresenta um número reduzido de casos.

No entanto, para o contexto deste trabalho, existem muitas situações que podem gerar e representar as possíveis distorções e combinações harmônicas passíveis de ocorrência em um SEP. Logo, a criação de um banco de dados que represente fielmente todas as situações de interesse em um SEP, pode tornar-se inviável devido à complexidade de obtenção e da quantidade de possíveis casos. Sendo assim, é difícil encontrar um banco de dados representativo que possa ser usado para realizar o devido treinamento da RNA, vindo a garantir uma adequada generalização para todas as situações de interesse.



## 5 O sistema em tempo real

---

Com o intuito de embarcar a RNA avaliada neste trabalho em um sistema que permitisse realizar a estimação dos componentes harmônicos em tempo real, optou-se pela utilização de uma biblioteca e *hardware* conforme encontrados em Monaro (2013). O uso de tais ferramentas possibilitou que a rede neural fosse embarcada em um sistema que faça o seu uso em tempo real. Sendo assim, nas próximas seções deste capítulo, concentram-se explicações da biblioteca e do *hardware* que foram utilizados para as simulações em tempo real.

### 5.1 A biblioteca OpenRelay

Construída e implementada para fins de utilização de algoritmos para relés digitais, a biblioteca *OpenRelay* foi desenvolvida para concentrar todas as funções necessárias para o funcionamento de um relé digital. Devido a grande parte das funções de proteção possuir implementação semelhante, a utilização de programação orientada a objetos foi utilizada na construção da biblioteca, pois este tipo de programação diminui o tempo de desenvolvimento e facilita a manutenção da biblioteca. A biblioteca foi desenvolvida com o objetivo de realização em teste embarcados, que possibilitassem a aplicabilidade em campo das técnicas de proteção desenvolvidas (Monaro, 2013). Como o uso de aplicações em sistemas embarcados necessitam de placas de alto desenvolvimento tecnológico, optou-se em desenvolver tal biblioteca pelo uso de placas de processadores comuns que comportassem a utilização de sistemas operacionais em tempo real. Para que tais requisitos fossem satisfeitos, e para que o tempo de desenvolvimento da biblioteca não fosse muito grande, optou-se em usar o sistema operacional Linux modificado por meio do *Real-Time Application Interface* (RTAI) para funcionar em tempo real (Monaro, 2013).

### 5.2 Organização da biblioteca

Quando construída, a biblioteca *OpenRelay* foi estruturada sobre sete classes distintas. As setes classes distintas são *Relay*, *Acquisition*, *Measure*, *Logic*, *Protection*, *Display* e *SaveData* sendo que cada uma dessas classes é dedicada a uma funcionalidade específica. A Figura 4 mostra as relações entre as classes.

Como o objetivo deste trabalho não está direcionado ao estudo ou aplicações relacionadas à proteção de sistemas elétricos de potência, nem todas as classes foram utilizadas. Sendo assim, esta seção explicará apenas as classes que foram incorporadas nesta pesquisa.

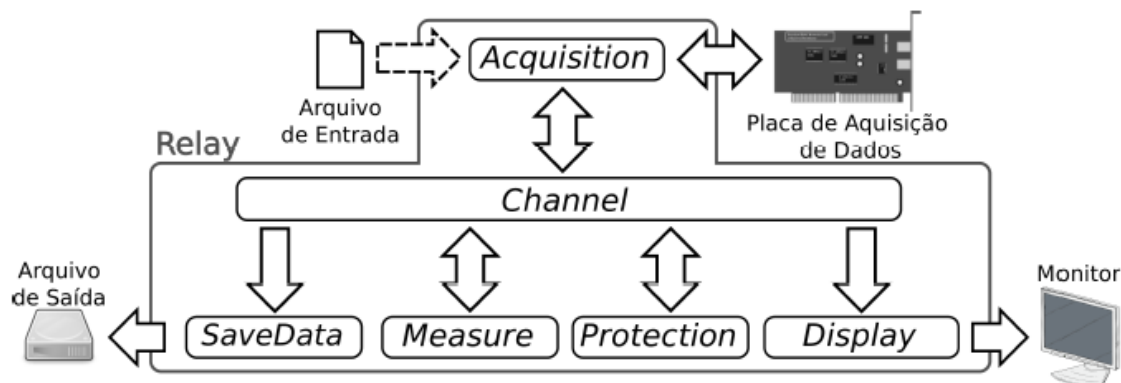


Figura 4: Organização da biblioteca Relay.

### 5.2.1 Classe Relay

O fluxo de execução do programa é controlado pela classe *Relay*. Através do uso desta classe que se define os componentes do relé que se deseja implementar. Inicialmente, define-se o tipo de aquisição dos dados (*Hardware* ou *File*). Em seguida, de acordo com as classes que o usuário deseja executar, povoam-se as listas. Estas listas são:

- *MeasureList*: Lista de execução das instâncias da classe *Measure* e suas subclasses.
- *ProtectionList*: Lista de execução das instâncias da classe *Protection* e suas subclasses.
- *LogicList*: Lista de execução das instâncias da classe *Logic* e suas subclasses.
- *OscillographyList*: Lista de execução das instâncias da classe *Oscillography*.

É importante frisar que todas as classes mães possuem um método chamado *Run()*, sendo que este método contém o algoritmo de execução de cada classe. Portanto, a cada passo de execução a classe *Relay* executa o método *Run()* da classe *Acquisition* e depois os métodos *Run()* de cada instância armazenada nas listas de execução (instância citadas anteriormente). Quando todos os itens das listas forem varridos, o programa aguarda uma interrupção de tempo para recomençar o processo. A geração de tal interrupção é feita por uma função específica do RTAI. Por fim, vale salientar que esta classe pode ser executada como dois tipos de *threads*, de alta e baixa prioridade. A execução como *thread* de alta prioridade é para aplicações que exijam a execução da biblioteca em tempo real, enquanto a execução de baixa prioridade é para execuções que demandem operações que sejam inviáveis para aplicações em tempo real.

### 5.2.2 Classe Channel

Esta classe foi implementada com o intuito de realizar a troca de informações no relé, isto é, a recepção e transmissão de informações a respeito de sinais. Para esta troca de informações, criou-se um *buffer* (região temporária da memória para leitura e escrita de dados) circular. Esta

denominação se deve ao fato de que o preenchimento deste *buffer* é feito de forma circular, isto é, um círculo em que depois de preenchido uma vez, preenche-se os mesmos com novos dados nas mesmas posições de memórias. Como uma forma de entender tal *buffer*, vejamos um exemplo. Seja um *buffer* de tamanho  $N$ . Suponhamos então que o *buffer* esteja com todas as suas posições completas. Assim, quando uma nova amostra for adquirida, a amostra que ocupava a posição 1 passará a ocupar a posição 2, a que ocupava a posição 2 passa a ocupar a posição 3 e assim por diante. A antiga amostra da posição  $N$  é descartada e uma nova amostra é inserida na posição 1. Os tipos de sinais armazenados nesta classe podem ser analógicos, complexos ou digitais. Os canais de informação podem ser do tipo entrada, nos quais seu conteúdo provém de um arquivo, ou do tipo pacote de dados recebido via placa de rede, ou saída, atribuindo os seus conteúdos a um arquivo ou pacote de dados. Existem também os canais internos, que servem para o armazenamento de informações utilizadas internamente pelas outras classes, sem comunicações externas.

### 5.2.3 Classe *Acquisition*

Esta classe foi criada com o propósito de se realizar a aquisição dos valores de corrente e tensão necessários para as funções de monitoramento e proteção às quais o relé foi programado. Desta forma, na *OpenRelay*, a aquisição de dados foi dividida em dois grandes grupos: aquisição por arquivo (*FileAcquisition*) e PAD (*Hardware Acquisition*). Depois da aquisição, os dados serão tratados sempre da mesma forma, seja a aquisição feita por arquivo ou por *hardware*. A taxa de amostragem é escolhida pelo usuário, para ambos os métodos.

#### 5.2.3.1 *FileAcquisition*

Este tipo de aquisição de dados é feita através de arquivo. Para isso, a rotina realiza a abertura do arquivo e verifica se o arquivo está no formato correto. Em seguida, a rotina verifica a taxa de amostragem do arquivo de entrada e realiza a amostragem. Após a reamostragem é aplicada uma filtragem por meio de um filtro *Butterworth* de segunda ordem, com frequência de corte igual à metade da frequência de amostragem. Depois de amostrado o sinal, a rotina armazena os dados em um *buffer*. É importante salientar que nesta classe cada canal do tipo externo de entrada é associado a uma coluna do arquivo de entrada. O programa é encerrado quando a última posição do *buffer* é lida.

#### 5.2.3.2 *HardwareAcquisition*

Neste tipo de aquisição de dados as etapas de condicionamento dos sinais e filtragem *anti-aliasing* são realizados pelos filtros analógicos do sistema de condicionamento pré-existente. Nesta classe, o método acessa a PAD e realiza a leitura das entradas associadas aos canais

externos de entrada e depois escreve na saída da PAD o valor contido nos canais externos de saída. Os canais associados à aquisição estão agrupados em quatro conjuntos:

- Entrada e saída analógica; e
- Entrada e saída digital.

Um fator importante a ser destacado neste tipo de aquisição é o atraso intrínseco ao tempo de conversão do Conversor Analógico Digital (CAD) e do Conversor Digital Analógico (CDA) da PAD. Este atraso causa uma defasagem angular entre os valores lidos. Entretanto, como o tempo de conversão dos conversores é pequeno, esta compensação de defasagem angular não é realizada. Neste tipo de aquisição de dados o programa é executado até que o usuário decida encerrá-lo.

#### 5.2.4 Classe *Oscilography*

A classe oscilografia é uma classe que tem o objetivo de registrar e realizar a medição de grandezas elétrica ao longo do tempo. Uma vez que é adotada a uma taxa adequada de amostragem, esta classe permite a biblioteca registrar fenômenos de origem eletromagnética. A oscilografia consiste em realizar o registro dos sinais envolvidos no processo, isto é, gravar os sinais de entrada e/ou saída em arquivo.

Como a gravação de dados em arquivo é uma etapa de demanda muito tempo de execução, a classe *Oscilography* é executada em duas etapas distintas:

A primeira, que possui alta prioridade, trata do monitoramento do canal digital e dispara o início da oscilografia. A segunda etapa consiste na criação de um *thread* de baixa prioridade que tem como objetivo transferir os dados em memória para o disco de armazenamento.

#### 5.2.5 Classe *Measure*

Esta classe foi criada para a realização de cálculos de medidas derivadas a partir dos valores instantâneos de tensão e/ou corrente. Dentre estas medidas derivadas, ressalta-se: potência, frequência e fasor. Alguns dos tipos de medições que esta classe é capaz de realizar são: Valor eficaz, transformada discreta de Fourier, soma, subtração, derivada, integral, etc.

##### 5.2.5.1 Subclasse *RBF*

Esta subclasse foi uma classe criada para atender a necessidade deste trabalho, enquanto todas as outras subclasses já estavam previamente disponíveis para uso. Como esta é uma subclasse da classe *Measure*, o objetivo principal da subclasse é realizar a estimação/medição do conteúdo harmônico (DHIs) de um sinal previamente obtido pelo uso dos métodos *FileAcquisition* ou *HardwareAcquisition*. Para o cálculo das DHIs do sinal em questão, esta subclasse faz o uso das matrizes de pesos e bias da rede neural previamente treinada com os

métodos de treinamento que serão descritos no próximo capítulo. O algoritmo presente na RBF prepara o sinal de entrada devidamente, e em seguida, realiza as operações pertinentes com o sinal e as matrizes da rede, com o intuito de gerar a saída da rede neural. Maiores explicações sobre o algoritmo desta classe serão abordadas no próximo capítulo.

É importante salientar que o uso da biblioteca *OpenRelay* se deu através do uso das classes que compõe esta biblioteca, isto é, utilizando-se as classes *Relay*, *Channel*, *Acquisition*, *Oscilography* e *Measure*.

### 5.3 O cubo PC104

Uma vez explicada a biblioteca *OpenRelay*, será apresentada a plataforma em que a biblioteca foi embarcada. O cubo PC104 é uma plataforma desenvolvida com o intuito de avaliar o algoritmo de proteção proposto no trabalho realizado por Monaro (2013). Conforme anteriormente colocado, o conjunto de *hardware* é capaz de executar, com baixa latência, algoritmos de proteção.

PC104 ou PC/104 é um padrão de placa para computadores industriais controlados pelo PC104 Embedded Consortium (*PC/104 Consortium*) que define um padrão de formato e de barramento. PC/104 é destinado para aplicações de computação embarcada em que se depende de uma aquisição de dados confiáveis em ambientes externos. A Figura 5 representa uma visão esquemática do Cubo PC104.

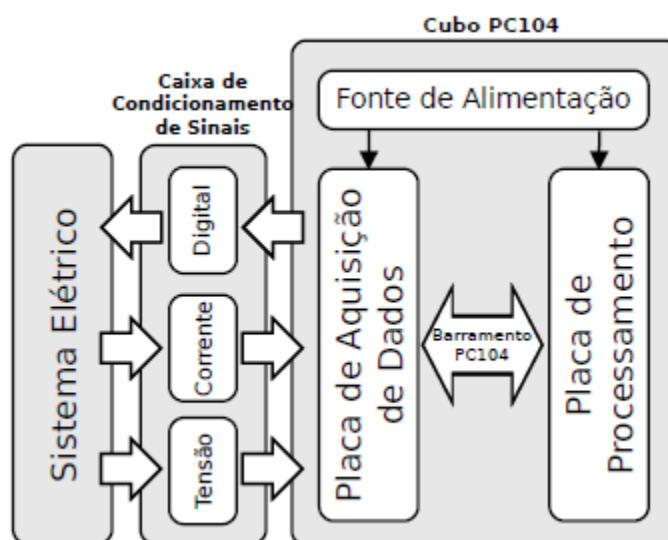


Figura 5: Representação esquemática da plataforma PC104.

## 5.4 O RTDS

O RTDS<sup>®</sup> é uma espécie de plataforma computacional que combina *hardware* e *software* especializados (dedicados) á propiciar simulações em tempo real. O RTDS é um simulador de sistemas elétricos de potência digital capaz de funcionar continuamente em tempo real. Este realiza simulações de transitórios eletromagnéticos de SEP com passo de integração de 50 $\mu$ s. Devido a tal velocidade de processamento e *hardware* dedicado, é possível obter e reproduzir com fidelidade as condições reais de um sistema elétrico de potência. Em consequência de tais características, o RTDS foi utilizado para os fins desta pesquisa (Monaro, 2013).

O RTDS é capaz de executar simulações em laço fechado, o que possibilita que o mesmo seja utilizado para o teste e avaliação de algoritmos de proteção e qualidade da energia elétrica, que é o caso deste trabalho. É importante frisar que o RTDS envia sinais elétricos entre  $\pm 10V$  em suas saídas analógicas, que representam as grandezas elétricas do SEP que está sendo simulado. Desta forma, pode ser necessário amplificar ou atenuar o sinal caso seja necessário se trabalhar em faixas diferentes da oriunda do RTDS.

## 5.5 Comunicação RTDS e PC104

Objetivando realizar o cálculo das distorções harmônicas em tempo real, realizou-se a integração entre os hardwares do PC104 e o RTDS. Para isto, conectou-se uma das saídas analógicas do RTDS no cubo PC104, de forma que o resultado após a simulação realizada no *software* do RTDS fornecesse um sinal analógico entre  $\pm 10V$  para o cubo. Após o sinal ser recebido pelo PC104, o mesmo inicia a sua etapa de execução, isto é, ele é responsável por inicializar as classes utilizadas durante o processamento do sinal e realizar os devidos cálculos dentro de cada classe. Para que o PC104 pudesse estimar os harmônicos corretamente, foi executada a subclasse RBF, citada anteriormente.

Sendo assim, o sinal é recebido pelo PC104, as classes são inicializadas e então a etapa de estimação das distorções harmônicas é iniciada. O sinal recebido pelo cubo, oriundo do RTDS, é processado pelo mesmo, para que as distorções harmônicas sejam estimadas. É válido ressaltar que o sinal analógico é normalizado pelo algoritmo executado pela subclasse RBF do cubo, de forma que o sinal fique entre  $\pm 1V$ , objetivando não saturar as entradas da rede neural.



## 6 Procedimento experimental

---

Uma vez apresentados os conceitos que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, esta seção é destinada a explanação das simulações que foram realizadas para se concluir acerca da utilização de redes neurais artificiais como uma forma eficiente de utilização de medição de distorção harmônica em tempo real.

O procedimento experimental deste trabalho foi dividido em duas partes distintas, para que o desenvolvimento fosse melhor estruturado. Essas fases são:

- **Experimentos off-line:** Experimentos realizados por simulações, isto é, todos os experimentos que não foram executados em tempo real.
- **Experimentos on-line:** Experimentos realizados no cubo, isto é, todos os experimentos que foram realizados em tempo real.

Desta maneira, este capítulo do trabalho se concentrará em explicar ambas as partes, detalhando minuciosamente o procedimento adotado em cada etapa.

### 6.1 Experimentos off-line

Os experimentos que foram realizados off-line refletem todo o embasamento que deu suporte para que os experimentos on-line ocorressem, pois caso as simulações off-line não pudessem ser realizadas, o procedimento on-line também não poderia ser realizado.

O procedimento de simulações off-line se iniciou com a análise e aplicação do conceito da TDF em sinais gerados a partir do *software Aternative Transients Program* (ATP). Para isto, contou-se com 20 formas de ondas distintas geradas via o software ATP, e em seguida, a partir de programação em MATLAB, criou-se um algoritmo que fosse capaz de calcular a TDF dos sinais em questão. Depois de transformado para o domínio da frequência, os índices de distorção harmônica foram quantizados para inicial análise dos sinais em questão.

Em seguida, a partir dos mesmos 20 sinais gerados pelo *software* ATP e pelo conteúdo harmônico de tais sinais, encontrados na etapa anterior, criou-se um algoritmo que fosse capaz de realizar a TIF de um conteúdo espectral qualquer. Assim, as ondas geradas a partir do ATP e as geradas pela aplicação da TIF puderam ser devidamente comparadas para validação das ferramentas da TF. Após tal validação, com base em consulta bibliográfica, encontrou-se conteúdos espectrais de formas de ondas frequentemente encontradas no SEP, como fornos a arcos, residências brasileiras de médio consumo e reatores de tiristor compensado. Assim, a partir destes conteúdos espectrais aplicou-se a TIF, alterando algumas características do sinal, como a quantidade de ciclos do sinal e a taxa de amostragem (quantidade de pontos por ciclo). Com esta alteração das características do sinal, lançou-se mão da TFJ, com o intuito de validar tal ferramenta como eficiente para análise espectral de sinais.

Realizados tais procedimentos com o uso da TF, passa então a etapa de estimação via o uso de redes neurais artificiais. Esta fase do trabalho é iniciada com o treinamento da rede RBF.

### **6.1.1 Metodologia de treinamento**

Para que a RNA-RBF pudesse ser devidamente treinada, foi necessário adotar uma metodologia de treinamento condizente com o tipo de arquitetura utilizada, a fim de se obter resultados coerentes àqueles fornecidos pela aplicação da TDF (via TRF). Como para a estimação dos componentes harmônicos foi utilizada a arquitetura RBF, como já dito anteriormente, o tipo de treinamento deve se adequar a arquitetura deste tipo de rede.

#### **6.1.1.1 O banco de dados gerado**

Como é de conhecimento, para que a utilização da RNA seja efetiva, é necessário utilizar um banco de dados que seja representativo do processo em estudo. No entanto, para o contexto desta pesquisa, existem muitas situações que podem gerar e representar as possíveis distorções e combinações harmônicas passíveis de ocorrência em um SEP. Logo, a criação de um banco de dados que represente fielmente todas as situações de interesse em um SEP, pode tornar-se inviável devido à complexidade de obtenção e da quantidade de possíveis casos. Sendo assim, é difícil encontrar um banco de dados representativo que possa ser usado para realizar o devido treinamento da RNA, vindo a garantir uma adequada generalização para todas as situações de interesse. Assim, para o estudo em questão um banco de dados foi gerado baseado nas recomendações do no PRODIST (2012).

De acordo com o PRODIST, o índice de distorção harmônica em um ponto de acoplamento comum (PAC – ponto de ligação do fornecimento da energia da concessionária com um consumidor em específico) deve ser no máximo de 10% para a DHT para níveis de tensão menor que 1 kV, com valores de DHI específicos para cada componente harmônico. Sendo assim, é pertinente realizar o treinamento da rede para que a mesma possa descrever o conteúdo harmônico de sinais que estejam de acordo com as normas do PRODIST, ou que sejam próximos aos valores máximos permitidos para cada ordem harmônica em específico.

Para a criação do banco de dados, foi adotada a seguinte estratégia: Do segundo até o décimo terceiro harmônico, adotou-se a DHI sobre a forma de onda em análise, como sendo 0; 7,5; ou 15% para cada ordem harmônica, realizando-se então todas as combinações possíveis por estes valores. Devido a este tipo de variação, originaram-se  $3^{12}$  combinações distintas para a formação do conjunto de dados, o que tornou este procedimento computacionalmente inviável, devido à explosão (complexidade) combinatória gerada.

Sendo assim, adotou-se uma metodologia alternativa para representar todas as combinações e ainda permitir um rápido e correto aprendizado por parte da RNA-RBF.

Neste sentido, utilizou-se de dois conjuntos de treinamentos distintos: um conjunto de treinamento para uma RNA-RBF responsável pelos harmônicos de ordem par, e outro para a RNA-RBF responsável pelos de ordem ímpar.

Com a adoção deste procedimento, reduziu-se de  $3^{12}$  combinações (padrões) distintas para  $3^6$  (729 combinações) o processo de treinamento da RNA-RBF de ordem par, e outros  $3^6$  padrões (729 combinações) para o treinamento da RNA-RBF de ordem ímpar, resultando no total de 1.458 padrões. Este valor final representa uma redução de 99,73% do número de padrões inicialmente estipulados ( $3^{12}$ ).

Vale ressaltar que este procedimento adotado para o processo de treinamento de duas RNA-RBF, uma para os componentes pares (RNA-RBF par) e outra para os ímpares (RNA-RBF ímpar), é uma das contribuições da metodologia proposta.

#### **6.1.1.2 O processo de treinamento**

Definido o banco de dados para a realização de todo o processo via aplicação de RNA-RBF, tem-se então as etapas de treinamentos das duas arquiteturas.

A primeira rede treinada foi a rede responsável pela estimação dos componentes harmônicos de ordem ímpar (RNA-RBF ímpar), isto é, todos os harmônicos ímpares entre a componente fundamental e a 13ª ordem harmônica.

Para o processo de treinamento da RNA-RBF ímpar, os harmônicos de ordem par foram considerados com amplitude zero, para que as respostas das redes pudessem ser uma simples soma, enquanto que os harmônicos de ordem ímpar foram combinados conforme descrito na seção anterior. Assim, dos 729 padrões compilados, escolheu-se aleatoriamente 511 combinações. Vale frisar que o todo o processo de treinamento foi avaliado mediante as variações no número de amostras consideradas por ciclo (32, 64 e 128), bem como o número de ciclos dos sinais apresentados à RNA (entre 0,8 a 3 ciclos). A cada geração das formas de onda, variando-se o número de amostras por ciclo, e o número de ciclos utilizados, treinou-se uma arquitetura de RNA-RBF, a fim de se encontrar a arquitetura que melhor respondesse aos casos em questão. Por fim, a arquitetura resultante, a qual forneceu as melhores respostas foi a RNA-RBF que utilizou 32 amostras por ciclo dos sinais em análise, e um número de ciclos qualquer entre 0.8 e 3.

Vale adiantar que esta variação do número de ciclos necessários para a metodologia via a aplicação de RNA-RBF também é uma das vantagens desta abordagem quando comparada a TJF.

#### **6.1.1.3 O processo de treinamento da RNA-RBF par**

A metodologia aplicada para treinar a RNA-RBF par foi semelhante àquela aplicada à RNA-RBF ímpar. Contudo, os harmônicos considerados foram os da 2ª até a 12ª ordem. Para este processo de treinamento, todos os harmônicos ímpares foram considerados como zero, e os harmônicos pares com as combinações resultantes das combinações já comentadas.

#### 6.1.1.4 Síntese das fases de treinamentos

De uma forma sucinta, a metodologia de treinamento utilizada para ambas as RNA-RBF (par e ímpar) pode ser descrita como:

- Para cada RNA-RBF foram geradas 511 combinações (padrões) distintas com um número de ciclos variável, contendo 32 amostras por ciclo. Tais formas de ondas foram utilizadas como entrada das RNA-RBF;
- Escolhida uma arquitetura de RNA do tipo RBF, foi definida a constante de *spread* com valor de 1.000, sendo o critério de convergência fixado em  $10^{-6}$ ;
- Deste processo, a rede resultante apresentou um número com diferentes neurônios na camada intermediária, pois de acordo com este tipo de arquitetura, os neurônios da camada intermediária são adicionados à medida que o treinamento da rede é realizado;
- Para a camada de saída resultaram 13 neurônios, cada um fornecendo uma resposta que representa o nível de DHI para cada harmônico considerado, seja este par ou ímpar.

#### 6.1.1.5 O processo de teste e de validação das RNA-RBF par e ímpar

Uma vez treinadas as RNA-RBF, estas foram testadas e validadas. Os testes foram realizados com as amostras não utilizadas na etapa de treinamento (218 distintos padrões restantes para as composições pares e 218 para as ímpares). Vale afirmar que os resultados fornecidos por ambas as redes a partir da aplicação das formas de ondas testadas foram precisos e praticamente iguais aos resultados esperados.

As RNA foram então validadas pelo cálculo do conteúdo harmônico de cargas que foram utilizadas somente na primeira parte da pesquisa, a fim de comparar os resultados apresentados pela RNA com os apresentados pela TF. Ou seja, cargas as quais são totalmente distintas do contexto para as quais as RNA foram treinadas e testadas até o momento. Estes resultados são apresentados no item (a) (Validação: Fase I) que segue.

Ainda como etapa de validação das redes, foi utilizado um banco de dados gerado e baseado no trabalho de Cândido (2008). Os resultados decorrentes de tal validação serão apresentados no item (b) (Validação: Fase II).

**a) Validação: Fase I**

Inicialmente, conforme proposto por esta pesquisa, aplicou-se as redes neurais treinadas as formas de ondas que foram utilizadas na primeira parte desta pesquisa, isto é, para as formas de ondas em que se foi utilizado o método da Transformada de Fourier e Transformada Inversa de Fourier. Para que tal comparação fosse realizada, treinou-se as redes neurais com formas de ondas de 1 ciclo de onda, com taxa de amostragem de 1920Hz. Os resultados encontrados para a aplicação do método serão mostrados na próxima seção.

**b) Validação: Fase II**

Em seguida, gerou-se um banco de dados baseado no trabalho de Cândido (2008) para que mais testes pudessem ser realizados com as redes neurais. Considerando o conteúdo harmônico do forno a arco com valores médios, considerou-se a faixa de variação dos harmônicos da 2ª a 9ª ordem, desconsiderando o componente harmônico de 8ª ordem, pois o trabalho não dispunha de tal dado. Assim, considerou-se que os valores mínimos e os máximos da faixa de valores médios representaria uma variação de 100%. Assim, para todos os componentes harmônicos, aumentou-se a distorção harmônica em 5%, gerando uma nova combinação. É importante frisar que nem todos os harmônicos foram variados em 5% de uma só vez, mas afirma-se que todas sofreram tal variação para a composição final do banco de dados. O procedimento foi repetido até que se chegasse a variação de 100% para os harmônicos, resultando em um total de 100 combinações distintas. É importante ressaltar que esta foi a metodologia adotada para a geração do banco de dados, sendo que os valores das combinações utilizadas podem não representar as reais distorções harmônicas presentes no forno em campo.

Para cada uma das 100 combinações distintas, aplicou-se a Transformada inversa de Fourier ao conteúdo espectral, com o intuito de se obter a forma de onda distorcida. É importante ressaltar que as ondas geradas eram compostas de 1 ciclo de onda com taxa de amostragem de 1.920Hz (32 amostras por ciclo). Dispondo das 100 ondas distintas, as mesmas foram utilizadas como entrada para as duas redes, objetivando o cálculo da distorção harmônica dos sinais em questão. Por fim, aplicaram-se as ondas as redes neurais, para todos os 100 casos distintos, calculando-se o valor de DHI.

**6.1.2 Transcrição do algoritmo e validação final da rede**

Uma vez validada a rede neural, inicia-se então as etapas necessárias para o embarque da rede neural no cubo PC104 para a estimação em tempo real. Como a linguagem de programação que o cubo trabalha é o C++ (orientada a objetos), e o algoritmo desenvolvido foi em linguagem MATLAB, o algoritmo de cálculo de DHI via RNA-RBF teve que ser transcrito para a devida linguagem de programação entendida pelo cubo. É importante salientar que esta transcrição de código requereu uma série de adaptações, pois como o código deve ser executado em tempo real, deve-se fazer com que o código seja o menor possível e que contenha instruções que não demandem muito tempo de execução, pois caso a execução do algoritmo ultrapasse o tempo entre a captação de duas amostras o algoritmo deixa de ser executado em tempo real.

## 6.2 Experimentos on-line

Para que o código pudesse ser executado no cubo, criou-se uma subclasse na biblioteca *OpenRelay* dentro da classe *Measure*. Esta classe foi denominada RBF e contém métodos que permitem o cálculo das distorções harmônicas via redes neurais artificiais.

### 6.2.1 A subclasse RBF e as adaptações de código

Conforme dito anteriormente, a subclasse RBF foi criada para atender os objetivos deste trabalho. Assim, os métodos que compõe tal classe são os métodos necessários para o cálculo de distorções harmônicas via redes neurais artificiais. Tais métodos foram copiados e adaptados do código desenvolvido em MATLAB.

Neste sentido, para que estas modificações e adaptações possam ficar claras, será inicialmente descrito o funcionamento do código em MATLAB e depois comentado sobre as modificações realizadas.

O código desenvolvido em MATLAB foi baseado no uso do toolbox presente no próprio *software* MATLAB, utilizando-se da função *NEWRB*. Depois de realizado o treinamento com o uso desta função, cria-se uma rede neural RBF de duas camadas no *workspace* do MATLAB. Para que a rede possa ser utilizada, basta então aplicar este elemento criado ao sinal de entrada. Ao aplicar este elemento ao sinal de entrada, faz-se o seguinte procedimento:

- Calcula-se a distância euclidiana entre cada ponto do sinal de entrada e cada linha da matriz de peso da camada intermediária da rede, somando-se o valor da distância entre cada ponto.
- Faz o produto da soma da distância euclidiana com a matriz *bias* da camada intermediária, resultando em um vetor que será utilizado como entrada da segunda camada.
- Cada elemento deste vetor é elevado ao quadrado e então se inverte o sinal do número em questão.



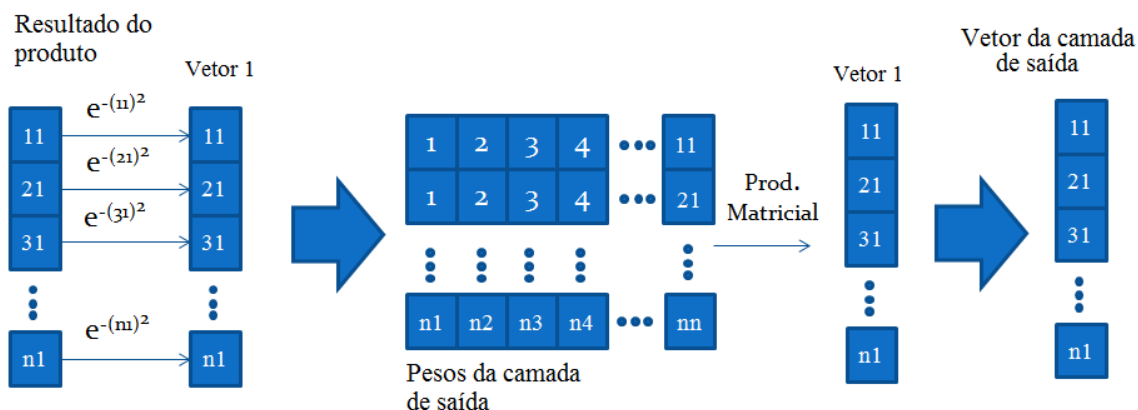


Figura 8: Imagem representativa do algoritmo - Parte 3.

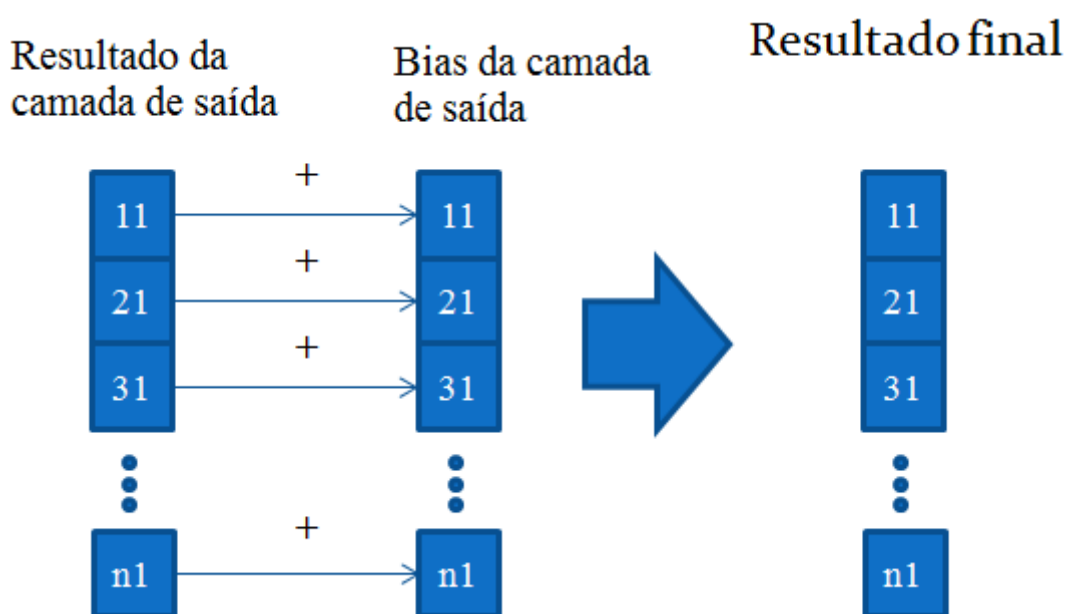


Figura 9: Imagem representativa do algoritmo – Parte 4.

Apesar do fato deste cálculo ser de simples implementação (uma linha de código) no MATLAB, sua transcrição para a linguagem C++ requereu uma série de cuidados especiais, que levaram a adaptações para seu uso em tempo real. É importante salientar que a maior parte destas adaptações foi realizada para garantir que o tempo de execução do algoritmo fosse o menor possível.

A principal adaptação foi no tratamento do sinal em questão, pois a rede só é capaz de realizar os cálculos corretamente se a forma de onda estiver no formato correto ao entrar na rede (esta característica foi conferida a rede devido à forma com que se realizou o treinamento). Assim, como o cubo faz a rotatividade das amostras no uso da classe *Acquisiton*, foi necessário que a forma de onda tivesse seus pontos rotacionados para que a mesma ficasse em uma forma que a rede fosse capaz de entender. Esta rotação foi feita baseada na mudança de sinal da forma de onda. Como o treinamento da rede foi feito com todas as formas de ondas iniciando-se no semi-ciclo positivo, as formas de onda tiveram seus pontos rotacionados para que fossem



apresentadas para o algoritmo corretamente. Assim, a rotação foi feita para que o primeiro ponto da forma de onda fosse positivo e o último ponto fosse negativo. A Figura 10 representa o ponto em que o sinal deve ser captado para inserção no algoritmo, a fim de que o mesmo seja executado corretamente.

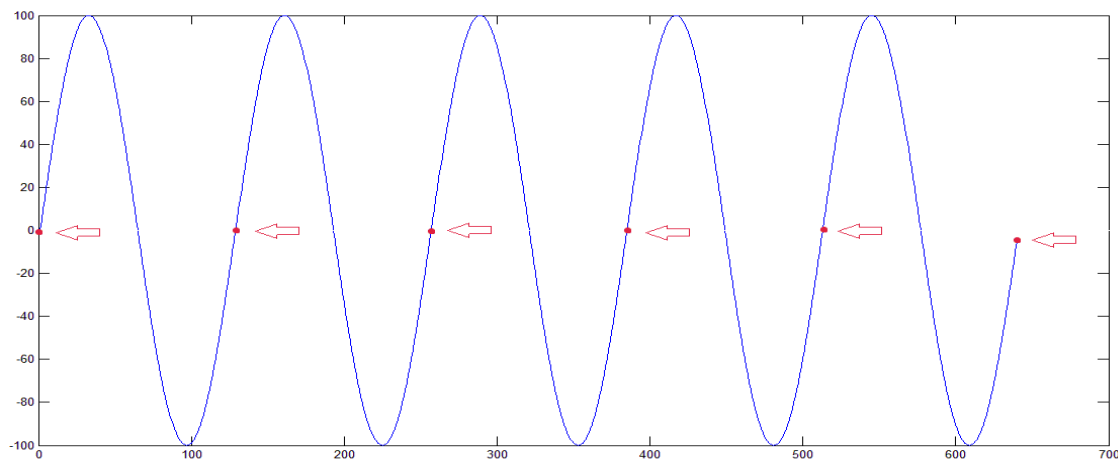


Figura 10: Pontos de início da análise do sinal.

Outra adaptação realizada foi o retreinamento da rede em questão, a fim de que a mesma tivesse as dimensões de suas matrizes de peso reduzidas, pois caso estas dimensões fossem muito grandes o tempo de execução do algoritmo ficaria impróprio para a aplicação em tempo real, inviabilizando o uso do cubo.

### 6.2.2 Simulação via *FileAcquisition*

Depois de inserida a rede neural na plataforma PC104, foram realizados dois tipos de simulações para a validação do método. A primeira delas foi via a utilização do método *FileAcquisition*, e a segunda via *HardwareAcquisition*. A simulação via *FileAcquisition* foi feita com formas de ondas geradas a partir da aplicação da TIF em cargas não lineares frequentemente encontradas no SEP. As formas de onda foram inseridas em um arquivo “.txt” e então carregadas na execução da subclasse RBF. As ondas foram geradas com 32 amostras por ciclo (1.920 Hz de taxa de amostragem), considerando 1 ciclo de forma de onda, conforme realizado no treinamento. Em seguida elas foram carregadas através da utilização do método *FileAcquisition*. Depois de carregadas as formas de onda, o método dentro da classe RBF é executado normalmente.

### 6.2.3 Simulação via *HardwareAcquisition*

A simulação via *HardwareAcquisition* foi realizada de maneira semelhante à feita via *FileAcquisition*, com a única diferença sendo a forma de aquisição de dados. Para a aquisição

destes dados, fez-se uso do conjunto *software* e *hardware* RTDS, presentes no laboratório de sistemas de energia elétrica (LSEE).

Para que os experimentos fossem realizados com sucesso, utilizou-se um sistema simples que representasse as distorções harmônicas do forno a arco. Para isso, conectou-se a um barramento uma fonte de harmônicos, com amplitudes harmônicas iguais às aquelas inseridas em um sistema por um forno a arco. Ligou-se uma carga também a este barramento e se verificou a forma de onda de tensão neste barramento. O sistema foi então simulado no RTDS em conjunto com o cubo, de forma que o cubo fizesse a aquisição desta forma de onda em tempo real. Após a aquisição da forma de onda pelo cubo, utiliza-se esta forma de onda como parâmetro de entrada para a rede e executa-se a classe RBF normalmente, similarmente a simulação via *FileAcquisition*.

Na sequência, têm-se os resultados obtidos após a realização das simulações anteriormente apresentadas.

## 7 Resultados experimentais

---

Apresentadas a maneira dos testes, experimentos e simulações realizadas, esta seção destina-se a apresentação dos resultados que foram obtidos após tais procedimentos.

### 7.1 Simulações off-line

Aplicado o algoritmo da TRF as 20 formas de onda aleatórias geradas através do ATP, é possível encontrar os valores dos componentes harmônicos de cada onda em questão. E ainda com estes dados, pode-se calcular a Distorção Harmônica Total (DHT), Distorção Harmônica Individual (DHI) e o Fator de Crista (FC) através das equações 1, 3 e 5 já apresentadas. Os valores de DHI, DHT e FC para as 20 formas de onda são mostrados na Tabela 2. Os resultados foram obtidos através da aplicação da TRF aos sinais gerados no ATP. Pela tabela, verifica-se que a primeira coluna se refere a qual forma de onda os índices foram calculados; a segunda coluna ao fator de crista; a terceira à distorção harmônica total; e a última coluna, à distorção harmônica individual de cada ordem dos componentes harmônicos.

Tabela 2: Índices de distorção harmônica.

Tabela dos índices de distorção harmônica										
Forma de onda	FC	DHT (%)	DHI (%)							
			Componente harmônico							
			1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º
1	1,32	34,26	100	10	26	6	19	0	1	0
2	1,35	25,81	100	10	16	4	13	5	9	0
3	1,24	33,69	100	6	29	5	12	5	8	0
4	1,28	34,23	100	5	26	6	19	5	7	0
5	1,23	31,10	100	7	24	6	16	1	7	0
6	1,20	25,69	100	5	24	3	5	4	3	0
7	1,21	28,81	100	5	24	5	10	2	10	0
8	1,26	31,64	100	7	25	5	17	3	2	0
9	1,25	30,69	100	8	24	6	16	1	3	0
10	1,30	21,52	100	7	12	5	12	1	10	0
11	1,23	29,48	100	8	25	7	9	5	5	0
12	1,19	23,75	100	6	21	6	7	1	1	0
13	1,21	30,07	100	7	26	4	9	1	9	0
14	1,21	27,55	100	9	22	5	12	3	4	0
15	1,23	32,31	100	9	28	5	9	3	8	0
16	1,27	18,33	100	9	12	7	6	1	5	0
17	1,26	25,81	100	7	21	4	12	4	0	0
18	1,32	22,76	100	8	16	4	13	3	2	0
19	1,21	30,38	100	5	24	4	16	5	5	0
20	1,38	24,41	100	10	13	3	17	2	5	0

Em seguida, aplicou-se a TIF ao conteúdo harmônico de cargas não lineares frequentemente encontradas no SEP e reaplicou-se a TRF, para validar o uso da TF para o cálculo de distorção harmônica. Os valores de distorção calculados são exatamente iguais aos valores esperados, pois as formas de onda foram geradas pela aplicação da TIF. Os resultados para algumas cargas são mostrados nas Tabelas 3,4 e 5.

Tabela 3: Assinatura harmônica máxima de um forno a arco (Cândido, 2008).

Forno a arco – Máximo		
Frequência (Hz)	DHI (%) esperado	DHI (%) calculado
60	100	100
120	30	30
180	20	20
240	15	15
300	12	12
360	10	10
420	8	8
480	0	0
540	7	7

Tabela 4: Assinatura harmônica média de um forno a arco (Cândido, 2008).

Forno a arco - Médio		
Frequência (Hz)	DHI (%) esperado	DHI (%) calculado
60	100	100
120	6,5	6,5
180	9	9
240	4	4
300	6	6
360	2,5	2,5
420	4,5	4,5
480	0	0
540	3,5	3,5

Tabela 5: Assinatura harmônica de um Reator Controlado por Tiristor - TCR  
(Arrillaga e Watson, 2003).

Reator controlado por tiristor		
Frequência (Hz)	DHI (%) esperado	DHI (%) calculado
60	100	100
180	13,78	13,78
300	5,05	5,05
420	2,59	2,59
540	1,57	1,57
660	1,05	1,05

Depois de verificados os resultados via a aplicação da TF, parte-se para a etapa do cálculo de distorções harmônicas via o uso das RNA. Conforme descrito no capítulo anterior, a RNA foi treinada e em seguida realizado a sua validação, que foi dividida em duas fases. A primeira fase foi a validação da rede na Fase I, que consistiu em utilizar as formas de onda geradas pela aplicação da TIF como entrada da RNA para a estimação do conteúdo harmônico da forma de onda. A Tabela 6 mostra um quadro comparativo para a resposta via aplicação da TRF e RNA, para as formas de ondas de 3 cargas, geradas com 1 ciclo de onda e taxa amostral de 1.920 Hz.

Tabela 6: Quadro comparativo entre TF e RNA.

Ordem Harmônica	Transf. de Fourier			Redes neurais		
	DHI(%)			DHI(%)		
	Forno(Máximo)	Forno(Médio)	RTC	Forno(Máximo)	Forno(Médio)	RTC
1	100	100	100	100,00	100,00	100,00
2	30	6,5	0	29,87	6,59	0,35
3	20	9	13,78	19,08	9,11	13,80
4	15	4	0	16,12	3,85	0,00
5	12	6	5,05	12,80	6,08	5,15
6	10	2,5	0	9,30	2,56	0,14
7	8	4,5	2,59	8,60	4,39	2,45
8	0	0	0	0,80	0,00	0,00
9	7	3,5	1,57	6,80	3,54	1,78
10	0	0	0	0,38	0,31	0,33
11	0	0	1,05	0,00	0,00	0,95
12	0	0	0	0,62	0,16	0,53
13	0	0	0	0,24	0	0

Após a primeira etapa de validação, passa-se para a Fase II, que consistiu em realizar a validação da rede para um conjunto de formas de ondas geradas a partir de assinaturas harmônicas geradas baseadas no trabalho de Cândido (2008). Os resultados para 9 dessas formas de onda são apresentados na Tabela 7. Vale frisar que as formas de onda foram geradas com taxa amostral de 1920Hz e 1 ciclo de onda.

Em seguida, foi analisado o erro médio para a estimação de todos os 100 casos. O cálculo foi feito tomando-se o valor absoluto da subtração do valor do componente harmônico estimado pelo valor esperado, e dividido pelo valor esperado. O erro para cada ordem harmônica foi somado e então a média foi calculada. A Tabela 8 e 9 representam os valores de erro médio e erro máximo.

Tabela 7: Aplicação da rede para 3 casos distintos de 1 ciclo de onda.

Ordem Harmônica	Valores esperados			Valores estimados		
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
1	100	100	100	100	100	100
2	4,75	6,25	8,75	4,85	6,38	8,98
3	6,5	7,8	10	6,52	7,88	10,26
4	2,5	3,8	5,9	2,54	3,99	6,42
5	3	5,6	9,9	2,97	5,58	9,88
6	2,1	2,4	3	2,08	2,26	2,62
7	3,3	4,05	5,9	3,13	3,86	5,66
8	0	0	0	0,15	0,01	0,40
9	2,3	3,05	5	2,36	3,11	5,19

Tabela 8: Erro relativo médio dos 100 casos gerados e analisados.

Erro relativo médio (%)							
Ordem Harmônica							
1	2	3	4	5	6	7	9
0	2,27	1,3	5,3	0,4	6,3	4,49	2,7

Tabela 9: Erros relativos máximos dos 100 casos gerados e analisados.

Erro relativo máximo(%)							
Ordem Harmônica							
1	2	3	4	5	6	7	9
0	2,89	2,8	9,1	1,6	13	5,61	4,4

Em seguida, modificou-se a configuração das formas de onda, com o intuito de verificar a potencialidade do método aplicado. Para isto, modificou-se a quantidade de ciclos de onda, transformando as formas de onda de 1 ciclo com taxa de amostragem de 1.920Hz para 0,8 ciclos, mantendo a mesma taxa de amostragem. Portanto, como a configuração da forma de onda foi modificada, foi preciso mudar a configuração das redes neurais, o que, consequentemente, implicou na necessidade de um novo treinamento. Assim, o treinamento foi realizado novamente, seguindo as mesmas etapas de treinamento adotadas anteriormente.

As redes treinadas foram alimentadas pelas formas de ondas geradas pela aplicação da Transformada Inversa de Fourier ao conteúdo espectral do forno a arco na fase de máxima e do reator de tiristor compensado, pois os conteúdos espectrais de tais cargas já eram previamente conhecidos. O resultado da aplicação do sistema neural, já considerando a resposta resultante da composição da RNA-RBF par e da RNA-RBF ímpar, é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10: Resposta das RNA-RBF para 0.8 ciclos de onda.

Ordem Harmônica	Forno - Máximo	RTC
	DHI (%)	DHI (%)
1	100,00	100,00
2	26,79	0,00
3	12,27	13,70
4	8,76	0,00
5	9,38	5,44
6	7,71	0,00
7	6,55	2,48
8	0,00	0,00
9	8,82	1,51
10	0,00	0,00
11	0,00	1,04

## 7.2 Simulações on-line

Após a validação do uso da RNA de maneira *off-line*, embarcaram-se ambas as redes no cubo PC104 para que o cálculo das distorções harmônicas fosse realizado em tempo real. É importante salientar que as redes embarcadas foram as mesmas utilizadas na etapa de simulação *offline*. Inicialmente a simulação foi feita através da utilização da classe *Acquistion*, utilizando-se o método *fileAcquisiton*. Os arquivos que foram utilizados nestas etapas continham as formas de onda do forno a arco (valores máximos e médios) e o reator de tiristor compensado. É importante salientar que outros arquivos sempre estiveram presentes na utilização do método, sendo que tais arquivos contêm as matrizes de peso e bias para ambas as camadas das duas RNAs. Os resultados da utilização deste método são representados na Tabela 11.



Tabela 11: Resposta das redes para as simulações via *FileAcquisition*.

Ordem Harmônica	Forno - Máximo	Forno - Médio	RTC
	DHI (%)	DHI (%)	DHI (%)
1	100	100	100
2	29,87	6,59	0,3
3	19,15	9,18	13,87
4	15,88	3,62	0,2
5	12,92	6,2	5,28
6	9,38	2,62	0,2
7	8,65	4,44	2,5
8	0,8	0,1	0,2
9	6,7	3,52	1,75
10	0,5	0,4	0,4
11	0,4	0,2	0,8
12	0,6	0,2	0,5
13	0,2	0,1	0,1

Por fim, realizou-se a simulação via *HardwareAcquisition* para o sistema descrito no capítulo anterior. A Tabela 12 representa estes resultados para o caso do forno a arco na fase máxima de distorções.

Tabela 12: Resultados para a simulação via *HardwareAcquisition*.

Forno - Máximo		
Ordem Harmônica	DHI (%) calculado	DHI (%) esperado
1	100	100
2	30,39	30
3	19,44	20
4	13,35	15
5	10,85	12
6	8,51	10
7	6,33	8
8	0,08	0
9	3,23	7
10	0,1	0
11	0,1	0
12	0,9	0
13	1,5	0

### 7.3 Comentários gerais sobre os resultados obtidos

Depois de aplicada a metodologia descrita no capítulo 6, obteve-se resultados que evidenciaram a potencialidade da aplicação do método. Inicialmente, as redes foram aplicadas às formas de ondas anteriormente analisadas com a Transformada de Fourier. A Tabela 6 representa um quadro comparativo da resposta da utilização de ambos os métodos propostos por esta pesquisa, ambos realizados *off-line*. Pela comparação dos valores presentes na tabela, é possível averiguar que a resposta fornecida pela rede é muito próxima à resposta fornecida pelo uso da Transformada de Fourier, o que dá indícios da boa aplicação da metodologia.

Em seguida, analisando a Tabela 8, é possível analisar o erro médio da resposta da rede para a sua aplicação em formas de ondas desconhecidas. Os resultados demonstram que o maior dos erros médios foi o de 6,3% para o 6º harmônico, o que reforça e evidencia o sucesso no treinamento na rede. E ainda, a Tabela 8 reforça o potencial que o método possui, pois a rede (par e ímpar) teve a capacidade de encontrar o conteúdo harmônico para formas de ondas que continham menos de 1 ciclo de onda.

Analisando também o resultado obtido através das simulações em tempo real, verifica-se a potencialidade do método, pois os resultados foram muito próximos à resposta via Transformada de Fourier. É possível ainda destacar a potencialidade da rede pelo sua execução em tempo real via *HardwareAcquisition* responder com resultados precisos, o que nos dá indícios para a aplicação da metodologia para a medição de harmônicos em tempo real para grandes sistemas elétricos de potência, desde que a rede seja treinada de forma com um banco de dados representativo.

Realizando ainda, uma última análise de alguns resultados específicos, constata-se o sucesso na metodologia de treinamento adotada, pois a rede foi treinada para valores máximos de DHI de 15%, e foi capaz de estimar valores de DHI próximos a 30%, que é o dobro de distorção para o qual a rede foi inicialmente treinada.

É importante ressaltar que os bons resultados obtidos nesta pesquisa, devem-se basicamente a metodologia de treinamento adotada.

### 7.4 A Transformada de Fourier versus Redes Neurais Artificiais

Visto os resultados obtidos através da aplicação da TF e RNA é possível apresentar um comparativo das vantagens e desvantagens de cada técnica, bem como a qualidade da resposta obtida.

#### **Transformada de Fourier**

**Vantagens:** Baixo esforço computacional, algoritmo de simples implementação, boa qualidade na resposta.

**Desvantagens:** A forma de onda deverá ser periódica (TDF e TRF) e precisa de número de pontos de  $2^N$ .

### **Redes Neurais Artificiais**

**Vantagens:** Boa qualidade de resposta e pode ser aplicada para qualquer número de ciclos de ondas (0,8 a 3 ciclos).

**Desvantagens:** Pode apresentar má resposta se o treinamento não realizado (conduzido) de forma adequada. Para a fase de treinamento, o processo apresenta alto esforço computacional.

A construção de comentários comparativos como estes pode auxiliar o usuário que deseja quantizar os índices da distorção harmônica de um determinado sinal, pois como há mais de uma ferramenta em seu auxílio, o mesmo poderá analisar as condições da aplicação de ambas as técnicas, optando por aquela que melhor se adeque ao seu problema. A validação de uma nova técnica ao problema de quantização de harmônicos, como é o caso de RNA, abre novas frentes de pesquisas no contexto da qualidade de energia, disponibilizando novas ferramentas para monitoramento da mesma.

A possibilidade de realizar a medição de harmônicos por uma técnica distinta da usual (TF) em tempo real abre campos para o desenvolvimento de novas ferramentas na análise de distorções harmônicas da qualidade da energia, pois a partir de novas técnicas pode-se obter métodos que calculam o espectro harmônico do sinal em intervalos de tempo menores.

Por fim, conclui-se que a utilização de RNA é uma boa técnica para realizar a estimação de componentes harmônicos em um SD, pois a resposta fornecida através da utilização desta técnica, até o momento, mostrou-se condizente com o esperado.



## 8 Conclusões

---

Uma vez implementada a técnica alternativa para análise e estimação do conteúdo espectral dos sinais em questão, é possível se tirar conclusões acerca do método. Analisando os resultados verificados na Tabela 6 pode-se verificar que a aplicação da RNA-RBF na estimação da distorção harmônica é extremamente eficaz, pois os resultados fornecidos pelas redes são iguais ou muito próximos às respostas da TFJ. Analisando-se ainda a Tabela 8,9 e 10 enfatiza-se ainda mais a potencialidade do método, pois as redes responderam bem as formas de onda, uma vez que o erro médio máximo foi de 6,3% para o 6º harmônico, enquanto que o erro máximo foi de 13% para o 6º harmônico; e ainda, os valores de distorção harmônica calculadas para formas de onda com 0.8 ciclos são muito próximos aos valores esperados.

A vantagem da utilização do modelo neural está no fato da mesma ser capaz de representar adequadamente o espectro de frequência do sinal, ainda que o sinal não esteja representado por um ciclo completo. A pequena desvantagem do método é que é necessário realizar o treinamento da rede; e ainda, caso o treinamento não seja feito de forma adequada os resultados podem não ser bons. Ainda mais, a utilização desta metodologia se restringe ao tipo de banco de dados utilizado, portanto, a maneira com que o banco de dados é formado influencia diretamente na qualidade da resposta.

Seguindo então para a etapa de estimação *on-line*, pode-se também verificar a potencialidade da metodologia, pois o cálculo das distorções foi feito via a utilização do cubo PC104 com precisão semelhante a da metodologia *off-line*. Esta precisão pode ser verificada nas Tabelas 11 e 12. Através da análise das tabelas, verifica-se que os resultados são muito próximos ou iguais aos resultados esperados, seja via utilização da classe *HardwareAcquisition* ou *FileAcquisition*. A validação desta metodologia como uma forma de analisar distorções harmônicas em tempo real abre frente para o desenvolvimento de novas pesquisas na área, pois ela pode vir a substituir métodos comumente aplicados na prática, e ainda superar algumas limitações de outras metodologias.

Ao término deste trabalho, acredita-se que a metodologia de solução para o problema foi corretamente aplicada, haja vista os bons resultados que foram obtidos na pesquisa. A obtenção de tais resultados é decorrente da metodologia de treinamento na rede. Sendo assim, é plausível de se afirmar que a viabilidade de tal estudo é consequência de tal metodologia de treinamento, de forma que é possível melhorar ainda mais partes dos resultados obtidos, como a obtenção do conteúdo espectral de ordem harmônicas superiores aos analisados nesta pesquisa, a análise de formas de ondas com ângulo de defasagem diferente de zero e a análise de formas de onda com ciclos menores do que 0.5.

De uma maneira geral, os resultados obtidos com o desenvolver desta pesquisa contribuíram para a formação do aluno, pois com a pesquisa algumas habilidades foram necessitadas do mesmo, desenvolvendo característica que contribuem para a sua formação profissional. Alguns temas foram estritamente abordados com o desenvolver da pesquisa. Dentre tais temas destacam-se a programação em Matlab, uso de RNA, aplicação da TF, análise de sinais, qualidade da energia, programação em C++ e utilização de *software* em tempo real.

## 9 Referências bibliográficas

---

- ARRILLAGA, Jos; WATSON, Neville R. Power System Harmonics. 2a Edição. São Francisco: John Wiley Ltd, 2003
- BERNIERE, A., D'APUZZO, M., SANSONE, L., SAVASTANO, M. (1994). A neural network approach for identification and fault diagnosis on dynamic systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.43, n.6, dec.
- BOLLEN, M. H. J. *Understanding power quality problems – Voltage sag and interruptions*. Wiley-Interscience. A John Wiley & Sons, Inc., Publication. 2000.
- CÂNDIDO, M. R. Aplicação da Transformada de *Wavelet* na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco. Dissertação de Doutorado – Escola Politécnica da USP – Universidade de São Paulo, 2008.
- COURY, D. V., OLESKOVICZ, M., SOUZA, S. A. A Transformada de Fourier Janelada Aplicada a Qualidade de Energia Elétrica. VI Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica (VI SBQEE). Belém, Pará, pp. 651-656 ,21 a 24 de agosto de 2005.
- DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill. 2<sup>nd</sup> Edition, 2003.
- FERREIRA, D. D., SEIXAS, J. M., NAZARÉ, F. V. B., CERQUEIRA, A. S., CALÔBA, L. P., MARQUES, C. A. G. Sistema de Detecção de Distúrbios Elétricos Baseado em Redes Neurais, IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais /Inteligência Computacional - CBRN, Ouro Preto, Minas Gerais, outubro 2009.
- HAYKIN, S. e VEEN, B.V. *Sinais e Sistemas*. ARTMED Editora Ltda. 1ª edição, 1999.
- HERTZ, J., KROUGH, A., PALMER, R. G. (1991). *Introduction to the theory of neural computation*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, v.1, Addison-Wesley.
- IEEE *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System*. Project IEEE-519. Outubro 1992.
- KAISER, W., MARQUES, R. P., CORREA, A.F. *Impact of current crest factor at high and low frequency operation on fluorescent lamp electrodes*. Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE. 236-241 (2006).
- KANEGAE, L. R. “Estimação de correntes harmônicas por redes neurais artificiais”. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2011.
- LAI, L.L., CHAN, W.L. TSE, C.T., SO, A.T.P.: *Real-time frequency and harmonic evaluation using artificial neural network*. IEEE Trans. Power Del. 14(1), 52-59 (1999).

- MACHADO, O. F. Estimação e Análise Estatística de Distorções Harmônicas em Usinas Eólicas a Velocidade Variável. 139p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- MONARO, R.M. Lógica fuzzy aplicada na melhoria da proteção digital de geradores síncronos. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2013.
- MUÑOZ, I. S.S. Transformada de *Wavelet* Aplicada a Sinais Eletromiográficos de Músculo Masseter em Contração Isométrica Máxima e Fadiga. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – Universidade do Vale do Paraíba, 2009
- OLESKOVICZ, M. Aplicação de Redes Neurais Artificiais na Proteção a Distância. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2001.
- OLESKOVICZ, M. Apostila: “Qualidade da Energia Elétrica”. Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica - LSEE, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, 2007.
- Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel.  
disponível: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8\\_Revisão\\_4.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_4.pdf)  
Acessado em julho de 2013.
- PUPIN, J. R. Introdução às Séries e Transformadas de Fourier e Aplicações no Processamento de Sinais e Imagens. Trabalho de conclusão de curso – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - Universidade Federal de São Carlos, 2010.
- SILVA, I. N., SPATTI, D. H., FLAUZINO, R. A. Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas. Artliber Editora Ltda., 1ª Edição, 2010.
- HE N.; HUANG L.; WU J. and XU D. (2008). An artificial neural network based method for harmonic detection in power system. Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC, Twenty-Third Annual IEEE, pp.456-461.
- SOUZA, S. A., OLESKOVICZ, M., COURRY, D. V. Caracterização de Componentes Harmônicas em um Sistema Elétrico via Algoritmos Genéticos. In: VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VII CBQEE). 2007 Santos, São Paulo. **Anais eletrônicos...**Santos: USP – ENERQ, 2007. Disponível em: [http://www.s bqee.com.br/cbqee\\_2007\\_pdfs/31502.pdf](http://www.s bqee.com.br/cbqee_2007_pdfs/31502.pdf)  
Acesso em: 19 fev. 2013.