



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

INVESTIGAÇÃO DE METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE CARGAS ELÉTRICAS RESIDENCIAIS

João Pedro Lopes Salvador

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

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Rio de Janeiro
Agosto de 2012

INVESTIGAÇÃO DE METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO
DE CARGAS ELÉTRICAS RESIDENCIAIS

João Pedro Lopes Salvador

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

Aprovado por:

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.
(Orientador)

Prof^a. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D.Sc.

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.

Eng^a. Débora Costa Soares dos Reis, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2012

Salvador, João Pedro Lopes

Investigação de Metodologia para Caracterização de Cargas Elétricas Residenciais – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2012.

XI, 60 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 51.

1. Cargas Residenciais 2. Transformada Rápida de Fourier
3. Transformada Wavelet

I. Lima, Antonio Carlos Siqueira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Título.

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

Investigação de Metodologia para Caracterização de Cargas Elétricas Residenciais

João Pedro Lopes Salvador

Agosto/2012

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Curso: Engenharia Elétrica

O crescimento da absorção de energia elétrica por consumidores residenciais leva a necessidade de um conhecimento aprofundado dos impactos que este montante de equipamentos conectados pode causar à rede de distribuição. Imaginando uma rede inteligente (*Smart Grid*), este conhecimento pode ser importante auxiliando tomadas de decisões no tocante ao corte e ao religamento de cargas numa situação de estresse do sistema.

Ao longo deste trabalho serão aplicadas ferramentas tradicionais de análise de dados, na tentativa de extrair informações que sejam necessárias ou suficientes para caracterizar equipamentos eletrodomésticos e eletro-eletrônicos, agrupando-os através de suas semelhanças. Estas ferramentas são trabalhadas no domínio da Frequência (Transformada Rápida de Fourier) e num domínio híbrido Tempo-Frequência (Transformada Wavelet).

Ao final do trabalho, estão propostas análises que também poderão ser feitas, no intuito de aprimorar e engrandecer a análise aqui desenvolvida.

Palavras-chave: Cargas Residenciais, Transformada Rápida de Fourier, Harmônicos, Transformada Wavelet, Qualidade de energia, Smart Grids.

Dedico este trabalho
aos meus familiares e
aos meus professores.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelos cinco anos que passei estudando em uma das melhores universidades do país e por tornar possível a conclusão do meu curso. Aos meus pais Pedro Paulo e Elaine, e meu irmão Luiz Gustavo pelo grande apoio que me deram durante os períodos de tranquilidade e, principalmente, nos períodos em que eu achava que não era possível continuar. Sua força tornou possível que eu chegasse aonde cheguei.

Aos meus avós Alyrio e Nilda Lopes por aturar minha demora a aparecer, pelo apoio e incentivo, pelo carinho e pela hospitalidade nos dias de jogos do Botafogo. Aos meus avós Jorge e Lydia Salvador, em memória, que apesar de só terem participado do início da graduação, certamente estão muito felizes e satisfeitos, me vendo lá de cima, com mais esta etapa concluída.

Aos meus tios e primos, em especial minhas madrinhas Rosana e Maria José, meu padrinho Paulo e meus primos-irmãos: Luciana, Thiago, Felipe, Raphael, Carolina, Gabriel e Vítor. Aos meus amigos fora da faculdade, que sempre foram compreensivos quando eu não podia aparecer ou tinha que ir embora mais cedo.

Aos meus colegas de turma como um todo, meu muito obrigado pelos anos de ensinamentos e aprendizados. Em especial: Flávio Goulart, Francisco Lancellote, Gustavo Viana, Renan Fernandes, Renato Ferreira, Rodrigo Neves, Beatriz Pamplona, Frederico Lima, Isabela Natal, Leonardo Santos, Márcio Silva, Pedro Lucena, Rafael Mendes e Thiago Dultra.

Ao pessoal do Laboratório de Sistemas de Potência – LASPOT/COPPE: Aline Zimmermann, Prof. Alexandre da Silva, Carolina Calvo, Débora Reis, Diego Nascimento, Elaine Viegas e Rafael Oliveira.

Agradeço finalmente, mas não com menos importância, ao meu orientador professor Antonio Carlos Siqueira de Lima, por ter me ajudado e sido paciente mesmo nas tantas vezes em que eu não sabia o que fazer. Outros professores também têm de ser agradecidos: Carmen Borges, Glauco Taranto, Ivan Herszterg, Robson Dias, Rubens de Andrade, Sebastião Oliveira, Sergio Hazan e Tatiana Assis.

“Se correr, o bicho pega. Se ficar, o bicho come. Se andar, o bicho some!”
(Minha mãe, todas as vezes que eu falo que alguma coisa não vai dar certo.)

SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 2.1 - Forma de onda da função de teste.....	7
Figura 2.2 - Resultado da aplicação da FFT ao caso de exemplo.	8
Figura 2.3 - Obtenção dos coeficientes da Série de Fourier.....	8
Figura 2.4 – Decomposição de um sinal com três níveis de detalhamento.	10
Figura 2.5 – Forma de onda do sinal de exemplo.....	11
Figura 2.6 – Decomposição do sinal de exemplo em três níveis de detalhamento.	12
Figura 2.7 – Tipos mais comuns de Wavelet Mãe.	13
Figura 3.1 - Gráficos de tensão e corrente para a lâmpada incandescente de 100W.....	19
Figura 3.2 - Gráficos de tensão e corrente para a lâmpada LED.....	19
Figura 3.3 - Gráficos de tensão e corrente para a batedeira.	20
Figura 3.4 - Gráficos de tensão e corrente para o espremedor de laranja.....	20
Figura 3.5 - Gráficos de tensão e corrente para a geladeira.	21
Figura 3.6 - Gráficos de tensão e corrente para o ventilador.....	21
Figura 3.7 - Gráficos de tensão e corrente para o desktop.	22
Figura 3.8 - Gráficos de tensão e corrente para o notebook.....	22
Figura 3.9 - Gráficos de tensão e corrente para a cafeteira.	23
Figura 3.10 - Gráficos de tensão e corrente para o chuveiro elétrico.....	23
Figura 3.11 - Gráficos de tensão e corrente para a torradeira.....	24
Figura 3.12 - Gráficos de tensão e corrente para a TV de tubo.	24
Figura 3.13 - Gráficos de tensão e corrente para a TV LCD Full HD.....	25
Figura 3.14 - Gráfico em barras do FP da fundamental dos equipamentos.....	26
Figura 3.15 - Componentes harmônicos para a tensão aplicada ao chuveiro elétrico....	27
Figura 3.16 - Componentes harmônicos para a lâmpada incandescente de 100W.....	28
Figura 3.17 - Componentes harmônicos para a lâmpada de LED.	29
Figura 3.18 - Componentes harmônicos para a batedeira.	30
Figura 3.19 - Componentes harmônicos para o espremedor de laranja.....	30
Figura 3.20 - Componentes harmônicos para a geladeira.	31
Figura 3.21 - Componentes harmônicos para o ventilador.....	31
Figura 3.22 - Componentes harmônicos para o <i>desktop</i>	32
Figura 3.23 - Componentes harmônicos para o <i>notebook</i>	32
Figura 3.24 - Componentes harmônicos para a cafeteira.	33

Figura 3.25 - Componentes harmônicos para o chuveiro elétrico.....	33
Figura 3.26 - Componentes harmônicos para a torradeira.....	34
Figura 3.27 - Componentes harmônicos para a TV de tubo.....	34
Figura 3.28 - Componentes harmônicos para a TV de LCD.....	35
Figura 3.29 - Interface de utilização do <i>wavemenu</i> do <i>Matlab</i>	38
Figura 3.30 - Transformada Wavelet da onda de corrente da cafeteira.....	39
Figura 3.31 - Transformada Wavelet da onda de corrente do chuveiro elétrico.	39
Figura 3.32 - Transformada Wavelet da onda de corrente da lâmpada incandescente. .	40
Figura 3.33 - Transformada Wavelet da onda de corrente da torradeira.	40
Figura 3.34 - Transformada Wavelet da onda de corrente do <i>desktop</i>	41
Figura 3.35 - Transformada Wavelet da onda de corrente do <i>notebook</i>	42
Figura 3.36 - Transformada Wavelet da onda de corrente da TV de tubo.	42
Figura 3.37 - Transformada Wavelet da onda de corrente da TV de LCD.	43
Figura 3.38 - Transformada Wavelet da onda de corrente da bateadeira.....	44
Figura 3.39 - Transformada Wavelet da onda de corrente do espremedor de laranja. ...	44
Figura 3.40 - Transformada Wavelet da onda de corrente da geladeira.....	45
Figura 3.41 - Transformada Wavelet da onda de corrente do ventilador.....	45
Figura 3.42 - Transformada Wavelet da onda de corrente da lâmpada de LED.	46
Figura 4.1 - Contribuição de cada ferramenta.	48
Figura A.0.1 - Interface da ferramenta <i>wavemenu</i> do <i>Matlab</i>	57
Figura B.0.1 - Estrutura do protótipo e foto do front-end de aquisição de dados.	58
Figura B.0.2 - Diagrama geral de operação.....	59
Figura B.0.3 - Arquitetura do Hardware.	60

SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 3.1 - Equipamentos residenciais considerados para análise.	17
Tabela 3.2 - Valores máximos de amplitude de corrente de cada equipamento.	18
Tabela 3.3 - Fator de Potência da fundamental de cada equipamento.	26
Tabela 3.4 - Equipamentos que pouco poluem harmonicamente a rede.	35
Tabela 3.5 - Equipamentos que muito poluem harmonicamente a rede.	36
Tabela 4.1 - Divisão dos equipamentos em grupos.	49

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Descrição do Problema	2
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos.....	3
1.4	Estrutura do documento	4
2	TRANSFORMADAS DE FOURIER E WAVELET	5
2.1	Análise no Domínio da Frequência	5
2.1.1	<i>Harmônicos e Distorção Harmônica Total.....</i>	<i>5</i>
2.1.2	<i>Introdução a Transformada de Fourier</i>	<i>6</i>
2.2	Análise no Domínio Híbrido Tempo-Frequência	9
2.2.1	<i>Análise em Multirresolução</i>	<i>10</i>
2.2.2	<i>Transformada Wavelet Contínua (TWC).....</i>	<i>12</i>
2.2.3	<i>Transformada Wavelet Discreta (TWD)</i>	<i>13</i>
2.2.4	<i>Transformada Wavelet Estacionária (TWE).....</i>	<i>14</i>
3	MEDIDAS E RESULTADOS	16
3.1	Descrição das Cargas Residenciais Consideradas	16
3.2	Gráficos de Tensão e Corrente dos Equipamentos	17
3.3	Análise do Fator de Potência	25
3.4	Aplicação da FFT aos Sinais Medidos	27
3.4.1	<i>Discussão.....</i>	<i>36</i>
3.5	Análise Wavelet dos Equipamentos Residenciais	37
3.5.1	<i>Discussão.....</i>	<i>46</i>
4	CONCLUSÃO	48
4.1	Trabalhos Futuros	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

APÊNDICE A – PARTE COMPUTACIONAL.....	53
APÊNDICE B – HARDWARE DO EQUIPAMENTO	58

1 Introdução

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) toda a regulamentação que deve ser observada na distribuição sob todos os aspectos técnicos, como [1] o planejamento da expansão, os processos operativos, os sistemas de medição, o cálculo de perdas e a qualidade da energia. Em particular, o Módulo 8 se concentra nos indicativos de qualidade da energia elétrica fornecida aos usuários; neste são encontradas as regras e os índices de qualidade que abordam, por exemplo, flutuações de tensão, harmônicos na rede, variação na frequência etc.

Nos últimos anos, com o desenvolvimento das tecnologias envolvendo semicondutores, a indústria de eletro-eletrônicos coloca cada vez mais produtos no mercado, de maneira democraticamente acessível, aumentando o conforto, o lazer e a facilidade de comunicação entre as pessoas, com celulares, computadores, aparelhos de reprodução de filmes, entre outros; equipamentos que têm como característica elétrica em comum ser de natureza não linear. Isto traz à tona uma preocupação com a rede elétrica que no passado era particularidade da indústria: a poluição harmônica da rede elétrica por parte dos equipamentos residenciais [2].

Os equipamentos elétricos residenciais têm considerável parcela na injeção de harmônicos na rede elétrica de distribuição. Isto começa a ganhar importância em um momento que muito se fala em redes inteligentes de controle que no futuro, acredita-se, poderão amenizar os efeitos danosos à rede. Quando são conhecidos os efeitos que cada tipo de carga produz, é possível projetar filtros e/ou equipamentos que façam o monitoramento e o controle destas cargas, solucionando assim o problema dos harmônicos em excesso.

Um dos principais problemas nos estudos com a rede elétrica é exatamente a falta de conhecimento e dificuldade na modelagem da carga alimentada pelas empresas distribuidoras. Alguns pesquisadores têm tentado [2], [3], [4] e [5] estabelecer algum tipo de caracterização e identificação de cargas residenciais. Em [2], Pires (2006) se detém na caracterização dos harmônicos causados pelos equipamentos eletro-eletrônicos; em [3], Prado (2006) apresenta um sistema de monitoração de cargas

residenciais, para diferentes cenários; em [4], Cañón (2009) apresenta um Sistema Neural de monitoração não invasiva das cargas residenciais; e em [5], Rodrigues (2009) realiza um reconhecimento de cargas partindo da utilização da Transformada Wavelet e de Redes Neurais.

1.1 Descrição do Problema

As representações tradicionais da carga nos sistemas elétricos se limitam a descrever as potências ativa e reativa consumidas, geralmente utilizadas no modelo ZIP – com parcelas proporcionais à impedância (Z), à corrente (I) e à potência (P), nos estudos de fluxo de potência e de estabilidade. Contudo, as cargas residenciais atualmente apresentam um elevado conteúdo harmônico e são essencialmente desbalanceadas, i.e., monofásicas ou bifásicas. Portanto, a representação de cargas residenciais empregando modelos simples torna-se insuficiente. Além do mais, os equipamentos eletrodomésticos compõem um grupo muito diverso em características e funcionalidades. Com isso, surge a necessidade de se classificar, agrupar as cargas por alguma característica que possam ter em comum.

A grande dificuldade no decorrer deste tipo de trabalho é a falta de referências na literatura especializada no que diz respeito a um Dicionário de Cargas, que seria um grande banco de dados que contenha características marcantes de cada carga elétrica residencial de forma a possibilitar uma identificação das mesmas.

Uma possível separação seria em função do fator de potência, porém, como será mostrado mais adiante, este não é um agrupamento suficiente para a concreta identificação das cargas.

Vale ressaltar que o problema da classificação das cargas elétricas residenciais passa por minimamente três estágios: Medição, Caracterização e Identificação. No estágio da Medição são adquiridas as curvas para serem atribuídas aos os equipamentos; na Caracterização devem ser investigadas semelhanças entre as medidas feitas de forma a possibilitar algum tipo de separação que influencie no terceiro estágio, a Identificação, em que são quantificadas as avaliações feitas no estágio de caracterização e assim, viabilizando a classificação.

1.2 Motivação

O conhecimento detalhado das formas de onda características de corrente elétrica dos equipamentos elétricos residenciais, incluindo análises como a do espectro harmônico, pode ser uma fonte de dados confiáveis a serem postos em um banco de dados, como um dicionário de cargas. Além disso, é possível vislumbrar uma aplicação deste tipo de dicionário nas redes inteligentes de controle (*Smart Grids*).

Imaginando um futuro, ainda distante, onde as redes inteligentes serão responsáveis pelo desligamento de certas cargas, quando o sistema estiver operando em carga pesada, ou pelo religamento das mesmas quando houver um alívio no carregamento, o conhecimento de um dicionário de cargas pode facilitar as decisões, uma vez que será possível fazer estudos de previsão do comportamento do consumo.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo a aplicação de ferramentas tradicionais de análise de sinais, com a finalidade de estudar e verificar a existência de semelhanças dentre um grupo selecionado de equipamentos, comumente encontrados na maioria das residências, com foco principal na Caracterização de suas curvas de corrente elétrica.

Serão apresentadas duas possibilidades de análises: no domínio da frequência, utilizando a Transformada de Fourier e num domínio híbrido tempo-frequência, utilizando a Transformada Wavelet.

As análises foram feitas baseadas em curvas características de equipamentos eletrodomésticos residenciais, escolhidos de modo que os testes efetuados fossem de fácil realização e pudessem relatar o comportamento de tipos distintos de equipamentos. Através dos procedimentos mencionados acima, busca-se caracterizar os equipamentos testados em função de sua “natureza”, i.e., agrupados em:

- Equipamentos resistivos;
- Equipamentos motorizados;

- Equipamentos com circuitos chaveados ou eletrônicos.

1.4 Estrutura do documento

Este capítulo apresentou uma introdução que contextualiza as motivações e objetivos do presente trabalho.

No capítulo 2 estão abordadas algumas considerações teóricas sobre as ferramentas que serão utilizadas para realizar as análises necessárias para que se cumpram os objetivos. Foram escolhidos dois tipos de análise: uma no Domínio da Frequência, com o auxílio da Transformada de Fourier, e outra num Domínio Híbrido Tempo-Frequência, utilizando a Transformada Wavelet.

O capítulo 3 contém a principal parte do trabalho, contendo as medidas realizadas e a exposição dos resultados encontrados com a aplicação das transformadas. São estabelecidas em cada caso conclusões parciais sobre o que foi obtido.

O capítulo 4 contém a conclusão geral do trabalho e a proposição de trabalhos futuros, que possam complementar a análise aqui realizada. Em seguida estão mostradas as referências bibliográficas e o anexo com a rotina computacional utilizada em *Matlab*.

2 Transformadas de Fourier e Wavelet

2.1 Análise no Domínio da Frequência

Uma maneira de estabelecer alguma caracterização dos equipamentos residenciais é analisando a composição harmônica das curvas de corrente elétrica, que identificam cada equipamento. Uma breve conceituação sobre os harmônicos será dada na subseção 2.1.1 deste capítulo. A determinação do espectro harmônico é feita a partir do cálculo dos coeficientes da Série de Fourier, calculados a partir da Transformada de Fourier, que será brevemente descrita na subseção 2.1.2.

2.1.1 Harmônicos e Distorção Harmônica Total

Nos sistemas elétricos ideais em corrente alternada, as formas de onda da tensão e da corrente são periódicas e com frequência fixa. Quando a forma de onda foge desse padrão, é possível descrevê-la como a soma de senoides de frequências fixas e múltiplas inteiras da frequência da forma de onda que seria a ideal, chamada fundamental. Estas senoides são os chamados harmônicos do sistema. Para o caso do sistema brasileiro, a componente fundamental tem frequência 60 Hz e os harmônicos 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz e assim por diante [2]. Cabe ressaltar que nos sistemas elétricos trifásicos, não é comum a presença dos harmônicos pares mas é possível que existam.

A Distorção Harmônica Total (THD, *Total Harmonic Distortion*) é um índice que permite avaliar quantitativamente a taxa de distorção a qual a onda está submetida. Pode ser calculado pela expressão (2.1).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (I_h)^2}}{I_1} \quad (2.1)$$

onde I_1 é a amplitude da fundamental e I_h são as amplitudes das harmônicas.

2.1.2 Introdução a Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier é provavelmente a ferramenta mais utilizada na análise do domínio da frequência em problemas de processamento de sinais e engenharia. Foi desenvolvida pelo matemático francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) em 1807, em que ele propôs que qualquer sinal periódico pode ser descrito por um somatório de senos e cossenos. Apesar da proposição, a ideia somente foi publicada em 1822, quando Fourier escreveu o livro sobre a teoria do calor.

Existem dois tipos de abordagem quando é necessária a análise do espectro de Fourier: quando a análise é feita de posse da função analítica e contínua e quando somente se dispõe dos dados coletados em medições, i.e., uma função discreta. Para estes casos, pode-se utilizar a Transformada de Fourier Contínua e Discreta, respectivamente.

As expressões (2.2) e (2.3) representam as definições clássicas da Transformada de Fourier Contínua e sua inversa. Já (2.4) e (2.5) representam as definições da Transformada de Fourier Discreta e sua inversa [6]

$$F(j\omega) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.2)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (2.3)$$

$$TFD(f_n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi f_n k \Delta T} \quad (2.4)$$

$$x_k = \frac{1}{\Delta T} \sum_{f_n=0}^{(N-1)/T} TFD(f_n) e^{j2\pi f_n k \Delta T} \quad (2.5)$$

onde ω é a frequência angular, x_k é o sinal discreto, T é o intervalo de tempo total medido, ΔT corresponde aos intervalos discretos de tempo, $N=T/\Delta T$ é o número de amostras e $f_n = n/T$, $n=0,1,2,\dots,N-1$ são as componentes discretas de frequência.

Computacionalmente, o cálculo da série da Transformada Discreta de Fourier é muito lento [7], não atendendo às expectativas quando há a necessidade de obtenção do espectro. Uma rotina bastante utilizada em seu lugar é a Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*). Como o nome sugere, é uma rotina que consegue efetuar os cálculos utilizando um algoritmo mais eficiente, processando os

dados mais velozmente. Esta rotina foi proposta pela primeira vez por Cooley e Tukey (1965) em [8].

Para a realização deste trabalho, foi utilizada a função *fft* do *Matlab*, que calcula a Transformada de Fourier Discreta utilizando o algoritmo da FFT. Esta função, contudo, exige que o número de amostras seja do formato 2^n , podendo gerar alguns problemas. Quando o número de amostras é menor que a potência de 2 mais próxima, a sequência de valores discretos é completada com zeros até que se chegue ao número desejado; em contrapartida, quando o número de amostras é maior que a potência de 2 mais próxima, a sequência é truncada.

No presente trabalho, o problema do número de amostras foi solucionado já na aquisição dos dados, uma vez que a taxa de amostragem das medições foi de 256 amostras por ciclo.

A aplicação da Transformada de Fourier a medidas discretizadas é mais eficiente quando é aplicada a transformada rápida (FFT). O objetivo desse procedimento é obter os coeficientes da Série de Fourier, que estabelecem a composição harmônica de uma determinada forma de onda, a partir da Transformada. Exemplificando, seja uma onda de teste mostrada na Fig. 2.1 que seja representada pela soma de uma função seno e funções que representem o 5º e o 9º harmônico:

$$f(t) = \text{sen}(\omega t) + \frac{1}{5}\text{sen}(5\omega t) + \frac{1}{9}\text{sen}(9\omega t) \quad (2.6)$$

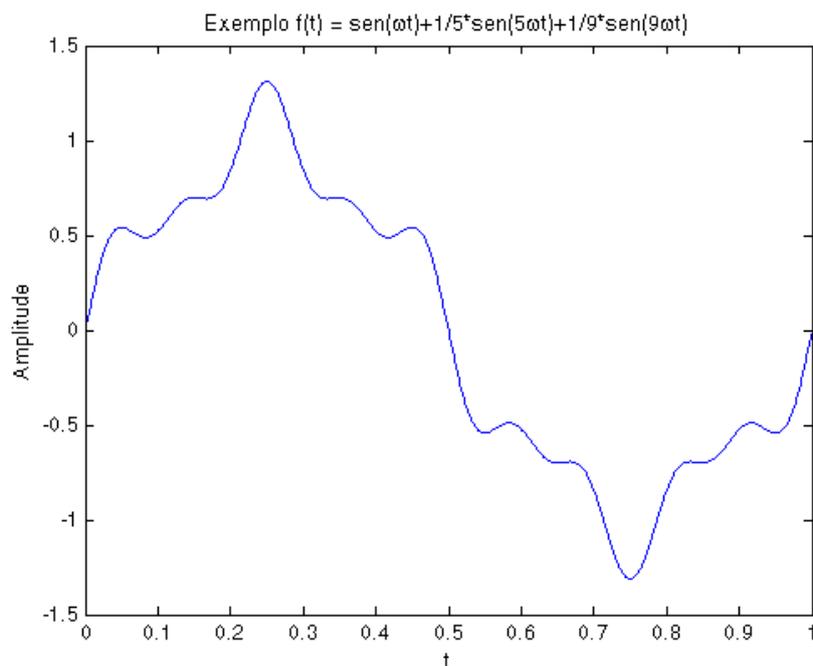


Figura 2.1 - Forma de onda da função de teste.

onde a variável t é uma sequência discreta de valores. Aplicando a função *fft* do *Matlab*, obtém-se o gráfico mostrado na Fig. 2.2.

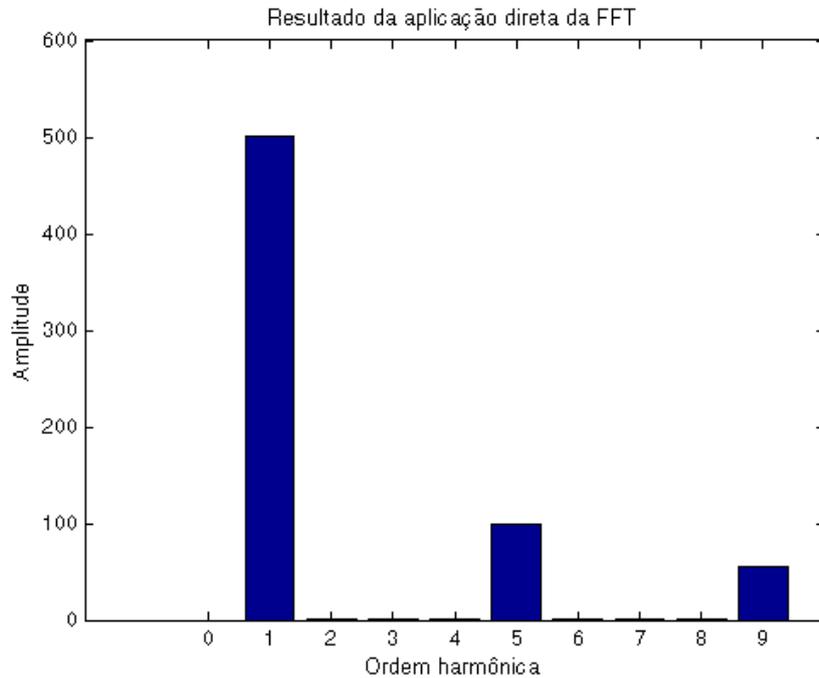


Figura 2.2 - Resultado da aplicação da FFT ao caso de exemplo.

Nota-se que, por causa dos cálculos feitos para a FFT, o valor das amplitudes não reflete o valor exato dos coeficientes da Série de Fourier. Faz-se então uma normalização dividindo-se o valor do resultado da FFT pela metade do número de amostras, obtendo-se os coeficientes da Série, como mostrado na Fig. 2.3.

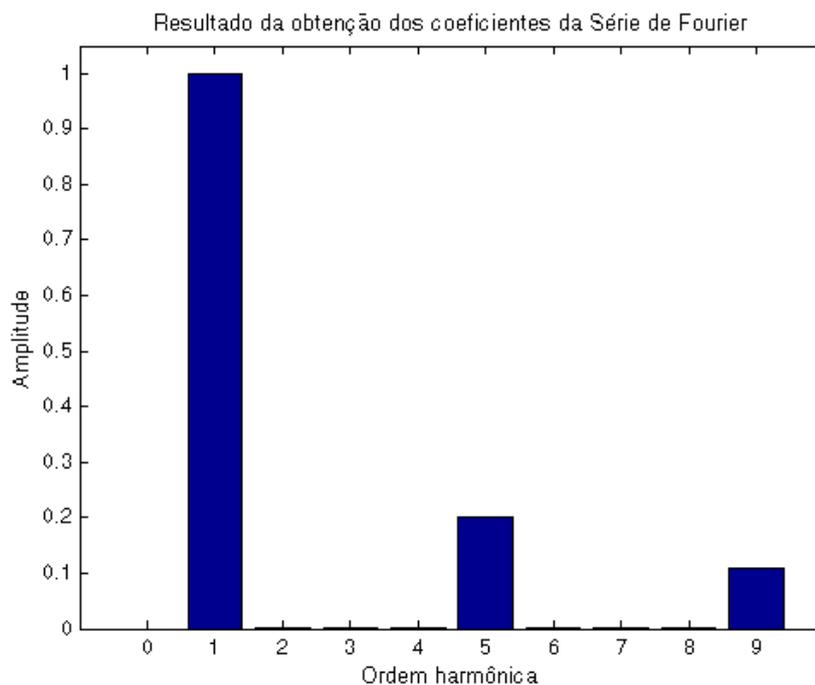


Figura 2.3 - Obtenção dos coeficientes da Série de Fourier.

2.2 Análise no Domínio Híbrido Tempo-Frequência

A Transformada Wavelet (TW) é uma ferramenta matemática que decompõe um sinal de entrada em diferentes níveis de resolução com diferentes escalas. A vantagem de sua utilização é obter a análise de uma projeção local, enquanto a Transformada de Fourier estabelece a análise global do sinal estudado. Esta representação local é dada em ambos os domínios do tempo e da frequência, portanto é razoável que na análise de sinais em que a solução tempo frequência seja necessária, i.e. a caracterização de equipamentos elétricos residenciais, seja aplicável.

De maneira geral, a TW pode ser representada como uma varredura no plano tempo-frequência feita por uma janela de área constante na qual o aumento da escala diminui o suporte no plano de frequências e um aumento no plano de frequências diminui o suporte temporal.

A ideia da TW consiste em separar o sinal original, geralmente muito complexo e de tratamento computacionalmente mais custoso, em vários níveis de detalhamento, sem perda de informação – essa técnica é chamada de análise em multirresolução. Para essa análise são usadas famílias de decomposições, isto é, funções que carregam determinadas características que ao serem aplicadas ao sinal original geram uma nova forma de onda. Esta abordagem confere uma identidade única para cada sinal, através da extração e compactação das características do mesmo.

A propriedade da TW que evidencia seu poder de utilização é a capacidade de manipulação do sinal original de forma a ser transladado, dilatado ou comprimido gerando uma família grande de funções que correspondem aos detalhes. A decomposição nos vários níveis de detalhe conserva a energia do sinal original, assim, o mesmo pode ser reconstruído integralmente somando-se as formas de onda dos detalhes.

2.2.1 Análise em Multirresolução

A Análise em Multirresolução [9] é uma técnica que busca representar sinais através de decomposições em vários níveis de aproximação, i.e. sinais com muitas informações são decompostos em sinais mais simples que contenham características específicas do sinal original e que serão analisadas.

O sinal é decomposto concludindo-se um filtro passa-baixa e outro passa-alta. O resultado da convolução do sinal original com o filtro passa-baixa é chamado Detalhe (indicado por " d "), e o resultado da convolução com o filtro passa-alta é chamado Aproximação (indicado por " a "). O encadeamento de um exemplo de decomposição é mostrado na Fig. 2.4.

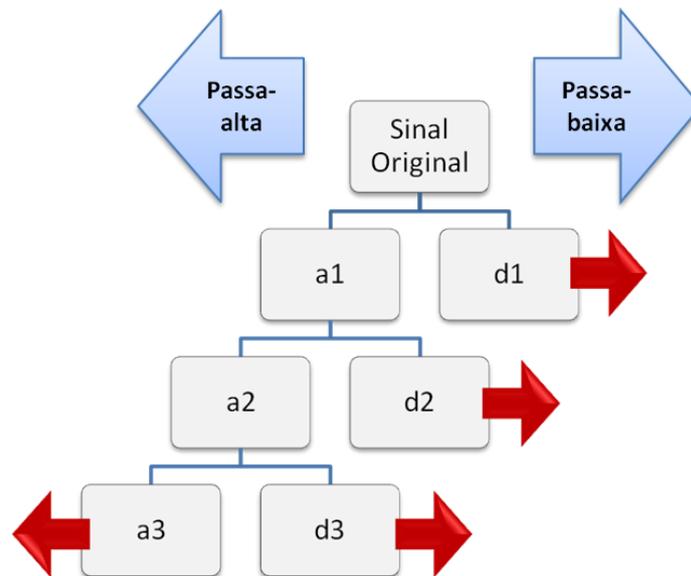


Figura 2.4 – Decomposição de um sinal com três níveis de detalhamento.

As setas vermelhas mostram quais são os coeficientes que são considerados como resultado da aplicação da Transformada Wavelet na Análise em Multirresolução. Conforme um maior número de detalhamento é exigido, o encadeamento continua a partir de a_3 até que se chegue ao nível desejado.

Para melhor compreensão será apresentado a seguir um exemplo. A Fig. 2.5 mostra o gráfico de uma onda que pode ser chamada de onda retangular.

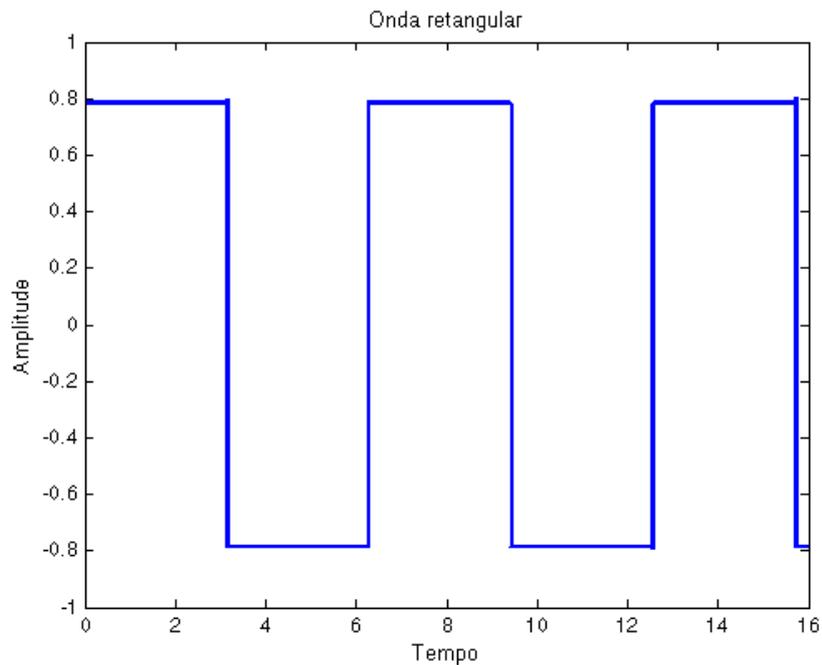


Figura 2.5 – Forma de onda do sinal de exemplo.

Através da Série de Fourier, é possível interpretar esse sinal como uma soma de senos e cossenos e então fazer uma análise criteriosa dos harmônicos que o compõem. Com a Transformada Wavelet é possível analisá-lo estudando, por exemplo, somente o nível de aproximação que é o que carrega mais informação do sinal original.

A Fig. 2.6 mostra a decomposição do sinal em três níveis de detalhamento. Nota-se que o valor máximo da aproximação é comparável com o valor máximo do sinal original, enquanto os dos detalhes são menores. Isto mostra como o nível de aproximação agrega mais informação que os demais níveis.

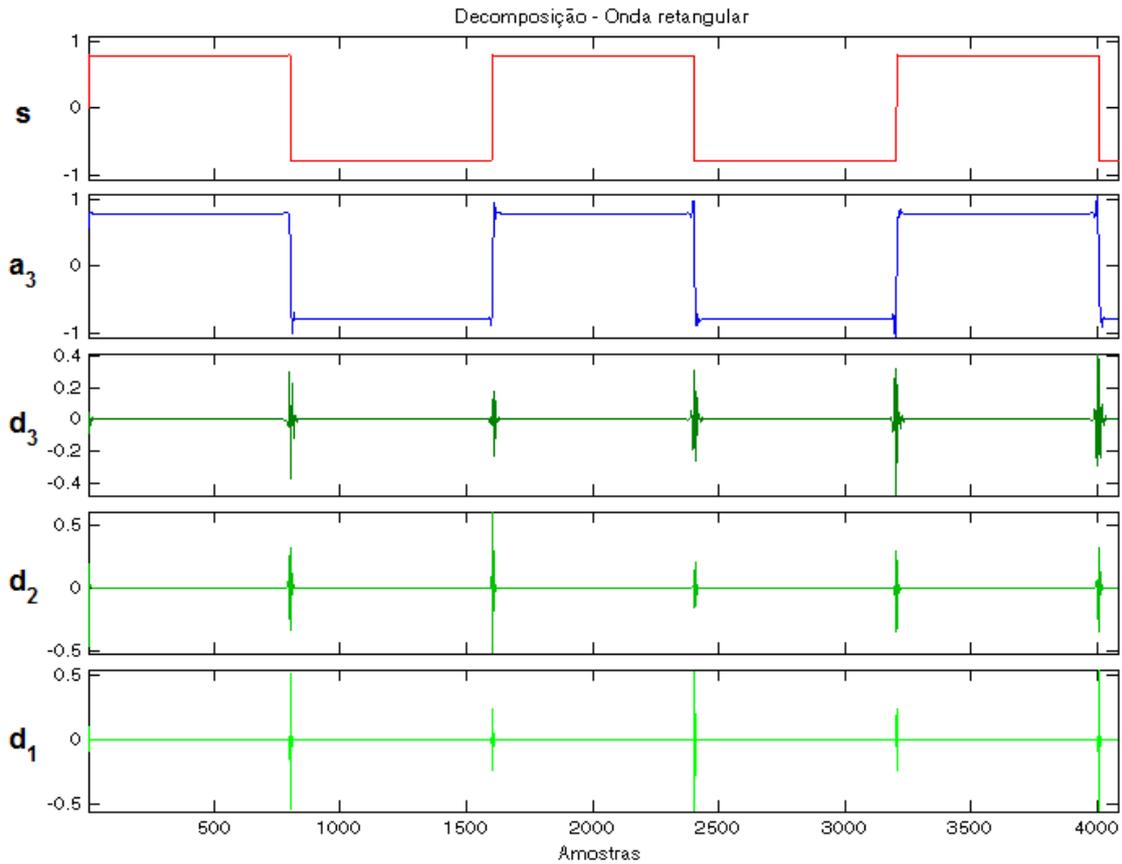


Figura 2.6 – Decomposição do sinal de exemplo em três níveis de detalhamento.

2.2.2 Transformada Wavelet Contínua (TWC)

A integral *TWC* de uma função $f(t)$ é definida [10] pela equação (2.7):

$$TWC_f = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)w_{\alpha,\beta}(t)dt \quad (2.7)$$

em que $w_{\alpha,\beta}(t)$ é a função base conhecida como Wavelet mãe ou função janela. Sua forma é dada na equação (2.8):

$$w_{\alpha,\beta}(t) = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|}}w\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right) \quad (2.8)$$

onde o parâmetro α representa a dilatação no tempo (controla a frequência da Wavelet) e o parâmetro β , a translação no tempo (determina a posição da Wavelet); $\frac{1}{\sqrt{|\alpha|}}$ é o fator de normalização de energia que mantém a energia das Wavelets de escalas modificadas

igual a da Wavelet mãe. A função original $f(t)$ pode ser recuperada utilizando-se a relação (2.9) abaixo descrita.

$$f(t) = \frac{1}{C_w} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} TW_{f w \alpha, \beta}(\alpha) \frac{d\alpha}{\alpha^2} d\beta \quad (2.9)$$

em que $\alpha > 0$ e a constante C_w é dada por (2.10).

$$C_w = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|TW(w)|}{|w|} dw \quad (2.10)$$

A Wavelet mãe determina o formato das componentes do sinal decomposto. As Wavelets devem ser oscilatórias, decair a uma taxa de $\frac{1}{\sqrt{|w|}}$ quando $w \rightarrow \infty$ e ter valor médio igual a zero. Existem vários tipos de Wavelets Mães; os mais comuns são *Daubechies*, *Haar*, *Coiflet* e *Symmlet* [11], mostrados na Fig. 2.7.

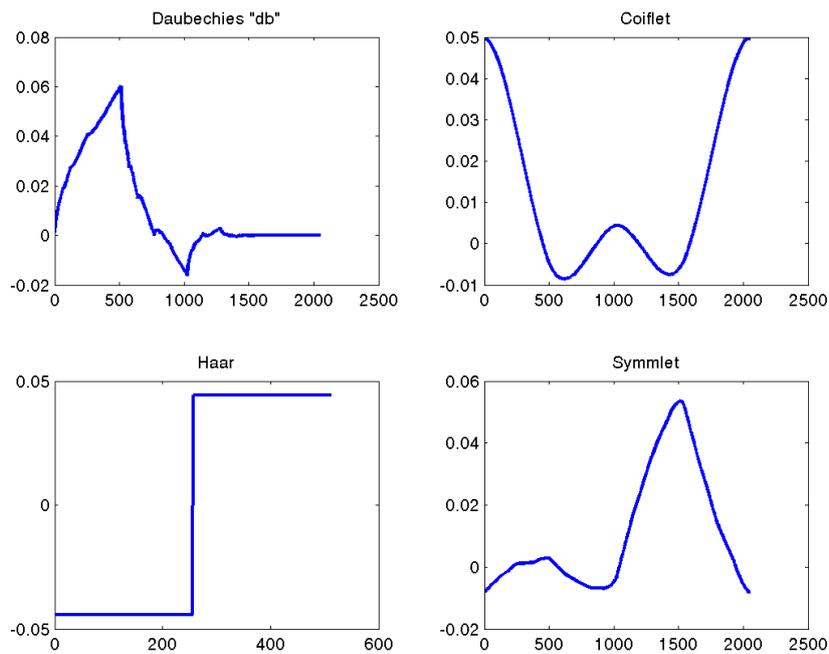


Figura 2.7 – Tipos mais comuns de Wavelet Mãe.

2.2.3 Transformada Wavelet Discreta (TWD)

O deslocamento da Wavelet Mãe continuamente no eixo real faz com que haja redundâncias substanciais de informações [12].

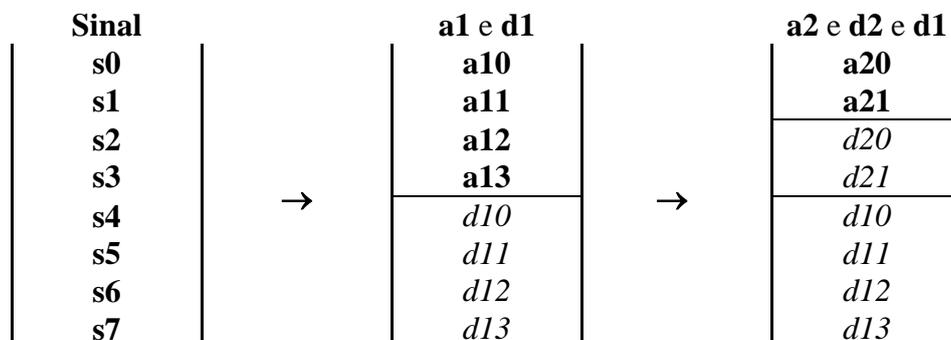
A TWD surge quando o sinal a ser analisado é um sinal discreto, i.e. um vetor de dados, os parâmetros α e β são também discretizados de forma que a reconstrução do sinal possa ser feita sem erros [13]. As principais aplicações são algoritmos de decomposição de sinais, dentre os quais é importante destacar a análise em multirresolução.

2.2.4 Transformada Wavelet Estacionária (TWE)

A TWD apresenta uma limitação importante: ela não é invariante no tempo [14]. Em outras palavras, seja um sinal X e seja a translação no tempo dada pelo operador ψ , de forma que o sinal resultante seja dado por ψX . Se a TWD do sinal original X for denominada U , tem-se que a TWD do sinal transladado será diferente de ψU . Para superar essa limitação foi desenvolvida a Transformada Wavelet Discreta Estacionária, que representa uma média ponderada de algumas transformadas Wavelet discreta com ligeiras alterações chamadas de TWD decimadas. Portanto, para que seja possível a recuperação do sinal original a partir da aproximação e dos detalhes da TWE, é necessário o cálculo da transformada inversa utilizando-se a TWD [15].

Uma diferença importante na decomposição do sinal em aproximação e níveis de detalhe que pode ser observada é que na TWD, quando o sinal é dividido, a aproximação e os detalhes ficam com metade do número de amostras do nível anterior, enquanto que na TWE, o número de amostras se mantém [16]. Os esquemas a seguir ilustram a diferença:

- **TWD de um sinal $s = s_0 \dots s_7$**



em que a_2 , a_1 , d_2 e d_1 são níveis de aproximação e detalhe na decomposição mostrada na Fig. 2.4.

- TWE do mesmo sinal s

Sinal		d1	e	a1		d1	e	d2	e	a2
s0		d10		a10		d10		d20		a20
s1		d11		a11		d11		d21		a21
s2		d12		a12		d12		d22		a22
s3	→	d13	e	a13	→	d13	e	d23	e	a23
s4		d14		a14		d14		d24		a24
s5		d15		a15		d15		d25		a25
s6		d16		a16		d16		d26		a26
s7		d17		a17		d17		d27		a27

No exemplo dado na seção 2.2.1, a decomposição mostrada na Fig. 2.6 foi obtida através da ferramenta *wavemenu.m* do *Matlab*. Deve-se notar que o que está sendo mostrado já é o resultado da normalização da aproximação e dos detalhes para que a recomposição seja feita como:

$$SR = a_n + \sum_i d_i \tag{2.11}$$

onde SR é o sinal recomposto, a_n é a aproximação normalizada no nível n e d_i , $i=1, \dots, n$, são os detalhes do nível 1 até o nível n .

3 Medidas e Resultados

3.1 Descrição das Cargas Residenciais Consideradas

Neste trabalho serão considerados para caracterização alguns equipamentos de teste que, além de comumente encontrados nas residências, apresentam facilidade com testes de bancada. As medições foram realizadas como parte de um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento da COPPE/UFRJ, financiado pela concessionária de distribuição de energia elétrica Ampla Energia SA e intermediado pela Fundação COPPETEC sob o Número de Projeto PEE-13.429.

Para a digitalização dos sinais foi desenvolvido no Projeto, pela empresa TECNOCLADE SA., um *hardware* de aquisição de dados, detalhado no Apêndice B, que realiza medições com a taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo (tempo de amostragem de 65,104 μ s).

Foram selecionados para serem analisados os equipamentos mostrados na Tabela 3.1. Estes equipamentos foram escolhidos, em sua maioria, por representarem algumas cargas massivamente encontradas nas residências. No caso da Lâmpada LED, que talvez seja ainda a menos encontrada, vale como comparação com a Lâmpada Incandescente, uma vez que ambas têm o objetivo de iluminação. Excetuando-se o equipamento Espremedor de Laranja, todos os outros foram medidos a vazio.

Tabela 3.1 - Equipamentos residenciais considerados para análise.

Equipamentos Considerados para caracterização	
Lâmpadas	Lâmpada Incandescente - 100W
	Lâmpada LED
Motorizados	Batedeira
	Espremedor de Laranja
	Geladeira
	Ventilador
PC	<i>Desktop</i>
	<i>Notebook</i>
Resistivos	Cafeteira
	Chuveiro Elétrico
	Torradeira
TV	TV de tubo 14"
	TV LCD Full HD 42"

3.2 Gráficos de Tensão e Corrente dos Equipamentos

Para cada medição realizada foram aquisitados 32 ciclos (ou 0,53 s), num total de 8192 pontos. Os dados coletados foram armazenados em arquivos do tipo Valores Separados por Vírgula (CSV, *Comma Separated Values*), e então processados por uma rotina elaborada no *Matlab* que faz a captação dos dados e as aplicações das ferramentas de análise que serão descritas nos próximos capítulos. Para a análise dos dados serão considerados apenas os dois últimos ciclos, (últimos 512 pontos), admitindo-se que neste caso as cargas já se encontrem em regime permanente. A seguir, serão apresentadas as curvas de tensão e corrente elétricas características de cada equipamento selecionado para a análise.

As medidas das correntes foram efetuadas medindo-se a tensão nos terminais de um resistor de 1Ω ligado em série com o equipamento de interesse. Uma análise prévia das cargas mostrou que esse valor de resistor não causava uma queda significativa de tensão, i.e., a impedância da carga em toda a faixa de frequência considerada é muito superior à do resistor de medição. A tensão foi aquisitada nos terminais do equipamento medido. Dado que há uma diferença de ordem de grandeza entre a tensão terminal na carga e a corrente na mesma, para a visualização gráfica, os dados de corrente e tensão

foram divididos pelos seus respectivos máximos, mostrados na Tabela 3.2. Obtêm-se assim os valores por unidade (pu). Apresenta-se a seguir os diversos gráficos de tensão e corrente para cada carga mostrando-se apenas os dois últimos ciclos da medição.

A Fig. 3.1 mostra as curvas da tensão e corrente para uma lâmpada incandescente de 100 W. As Figs. 3.2 até 3.13 mostram as curvas de tensão e corrente referentes a cada equipamento eletrodoméstico listado na seção 3.1.

Tabela 3.2 - Valores máximos de amplitude de corrente de cada equipamento.

Equipamento	Valor máximo de amplitude de corrente [A]
Chuveiro Elétrico	17,03
Cafeteira	8,182
Torradeira	6,860
Ventilador	2,287
Notebook	2,097
Geladeira	1,685
Desktop	1,3579
Batedeira	1,1989
Lâmpada Incandescente - 100W	1,0911
TV de tubo 14"	0,9958
TV LCD Full HD 42"	0,9202
Espremedor de Laranja	0,5070
Lâmpada LED	0,0489

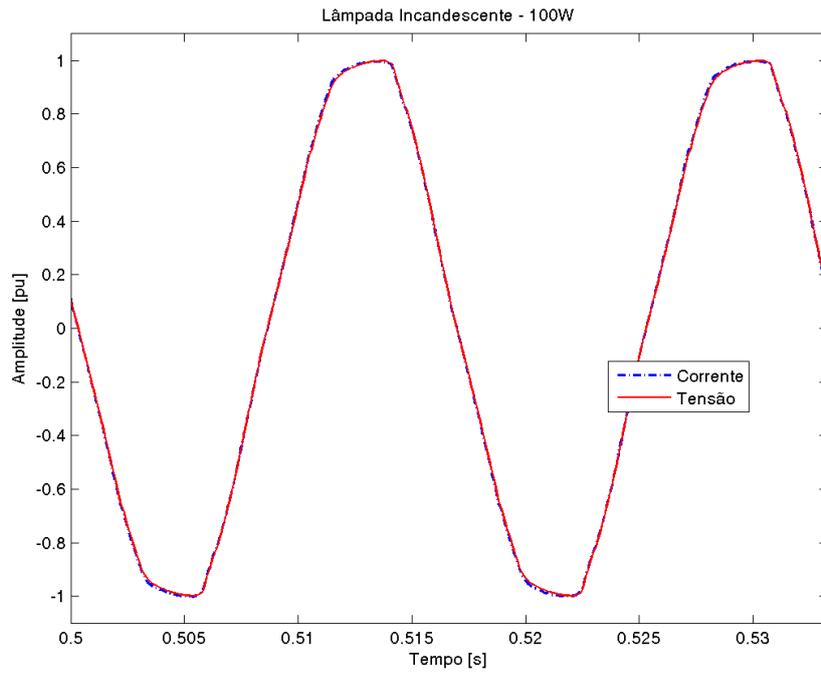


Figura 3.1 - Gráficos de tensão e corrente para a lâmpada incandescente de 100W.

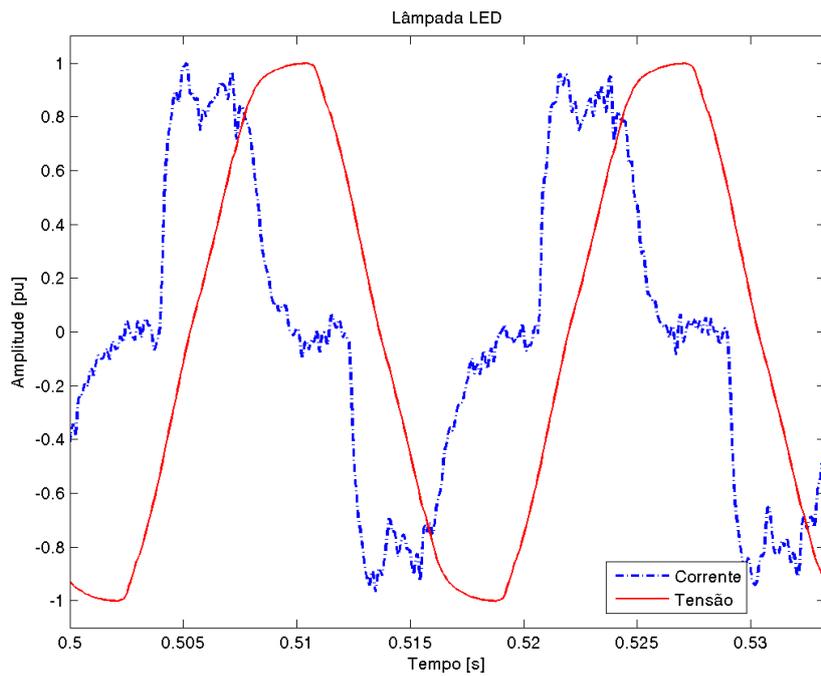


Figura 3.2 - Gráficos de tensão e corrente para a lâmpada LED.

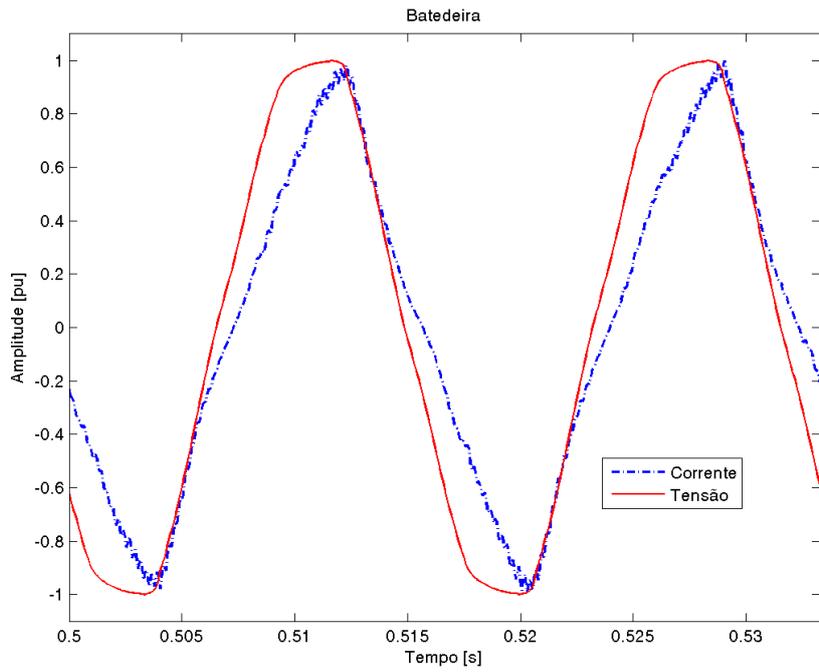


Figura 3.3 - Gráficos de tensão e corrente para a bateadeira.

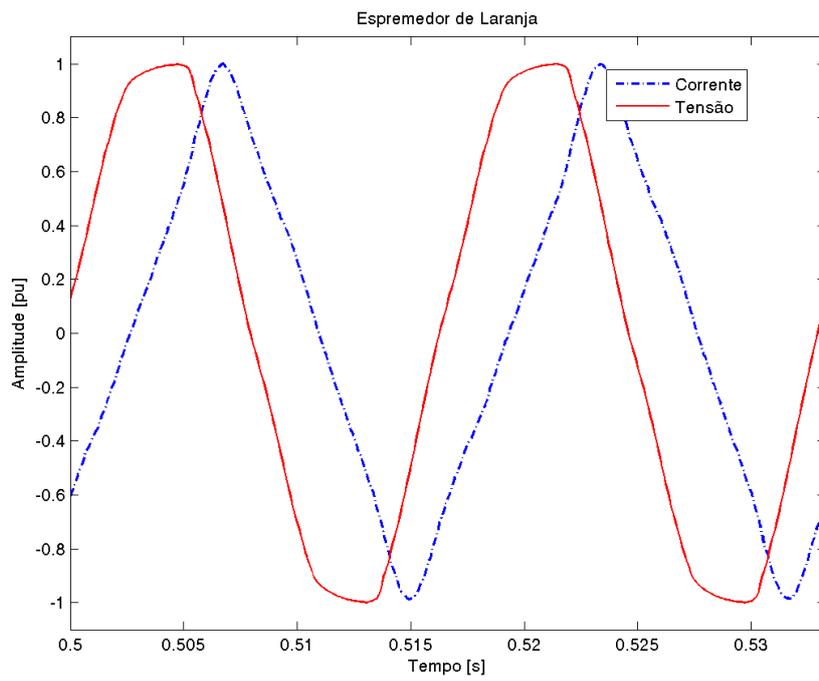


Figura 3.4 - Gráficos de tensão e corrente para o espremedor de laranja.

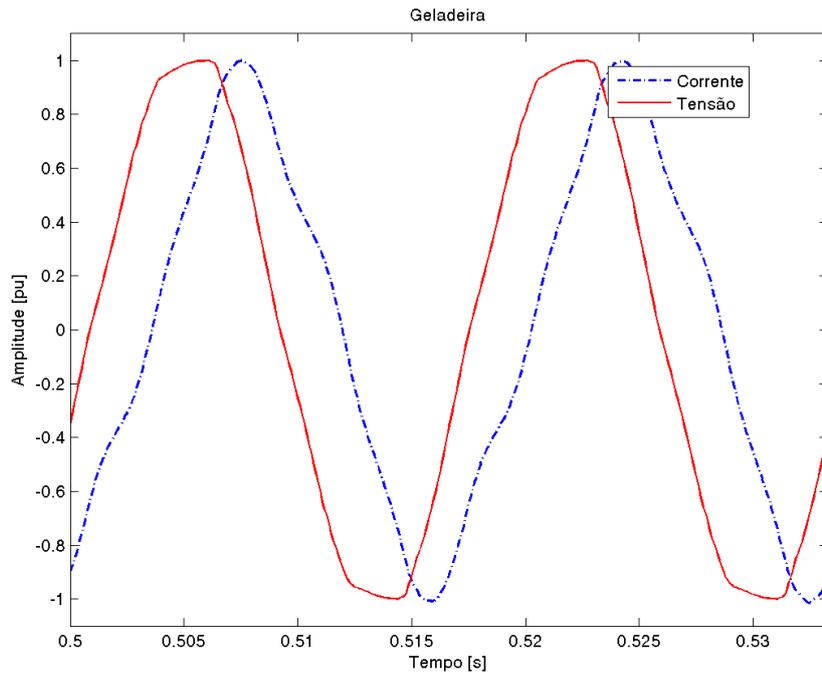


Figura 3.5 - Gráficos de tensão e corrente para a geladeira.

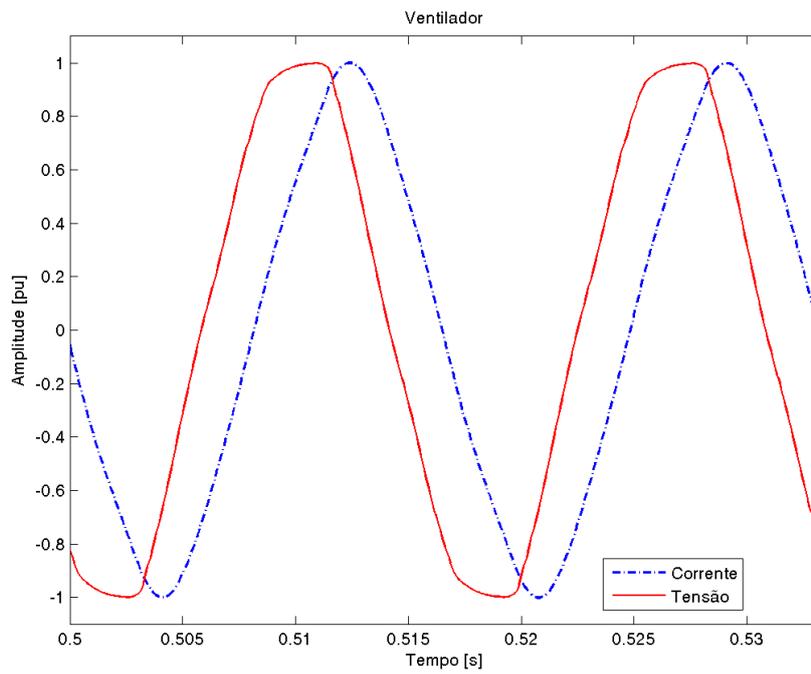


Figura 3.6 - Gráficos de tensão e corrente para o ventilador.

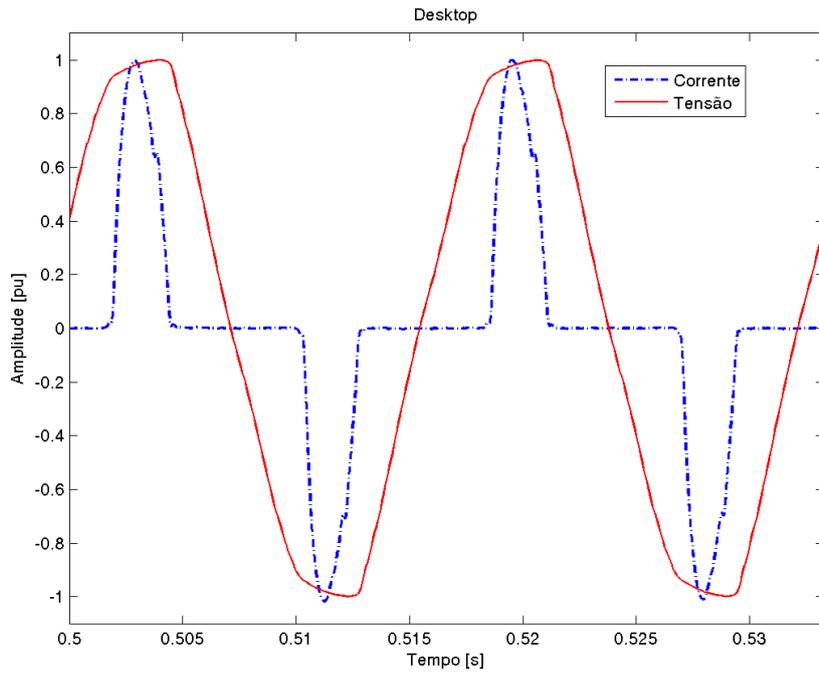


Figura 3.7 - Gráficos de tensão e corrente para o desktop.

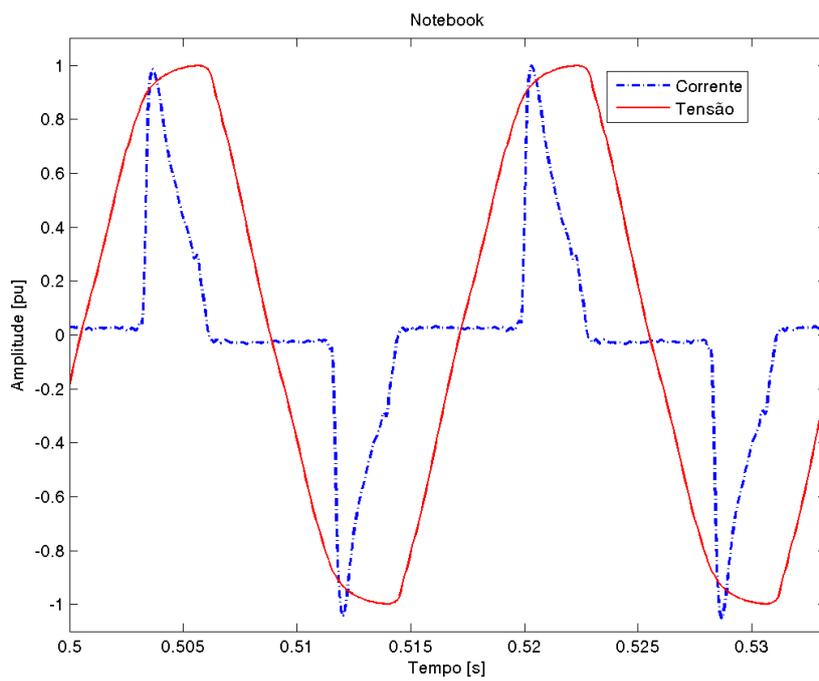


Figura 3.8 - Gráficos de tensão e corrente para o notebook.

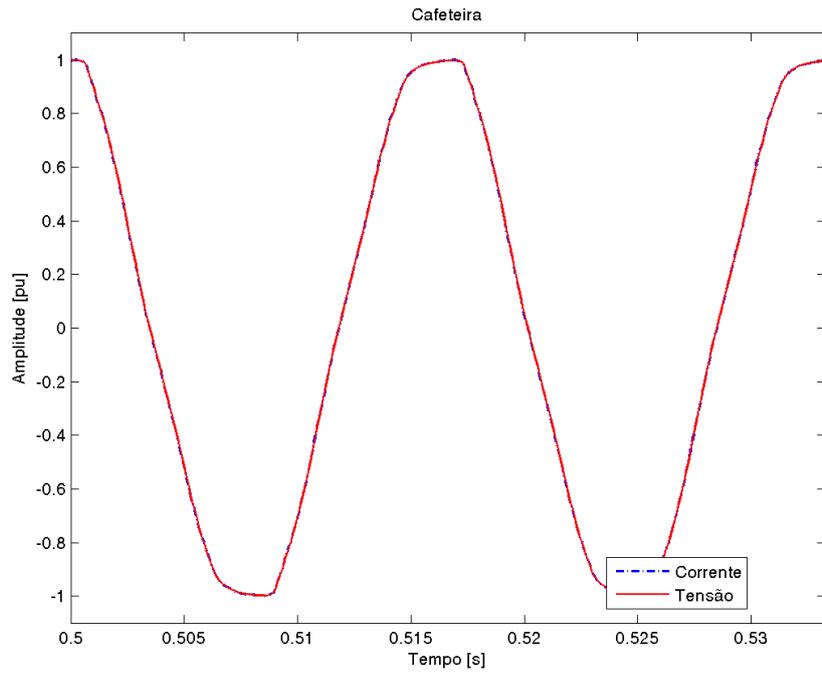


Figura 3.9 - Gráficos de tensão e corrente para a cafeteira.

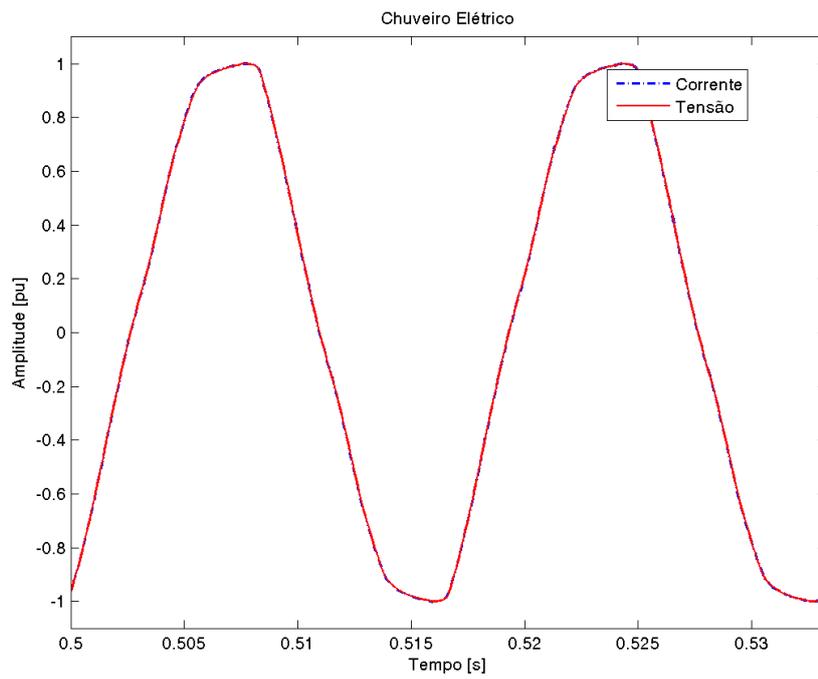


Figura 3.10 - Gráficos de tensão e corrente para o chuveiro elétrico.

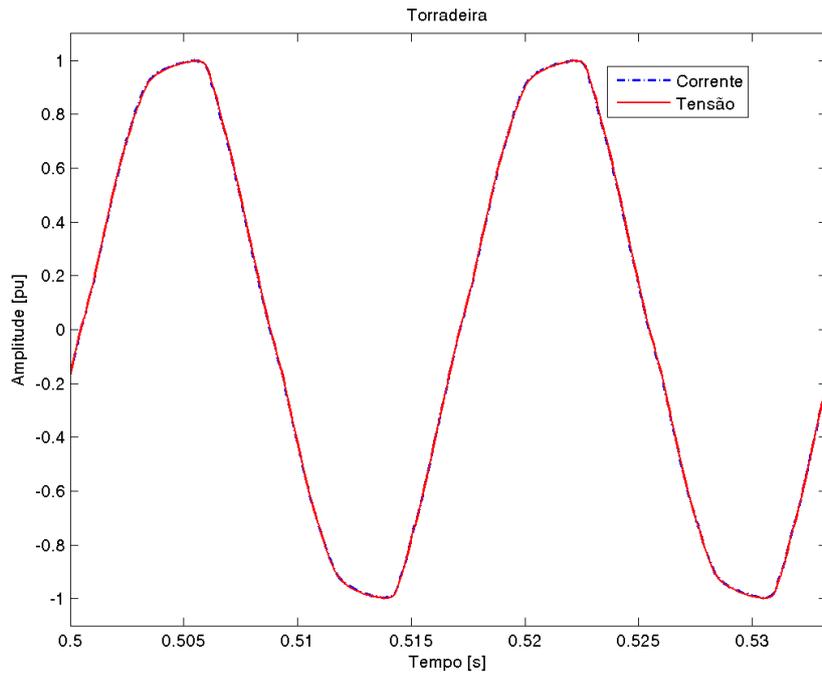


Figura 3.11 - Gráficos de tensão e corrente para a torradeira.

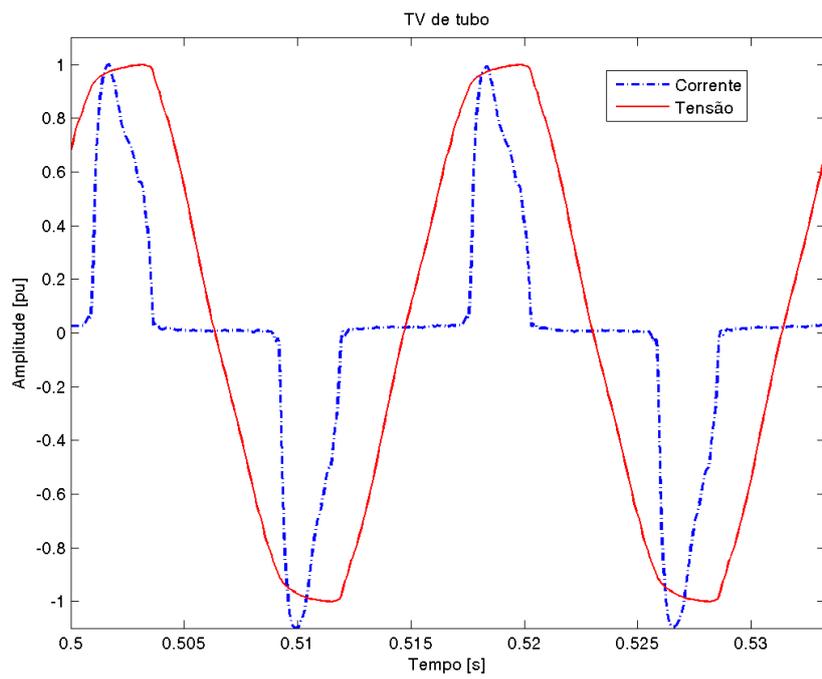


Figura 3.12 - Gráficos de tensão e corrente para a TV de tubo.

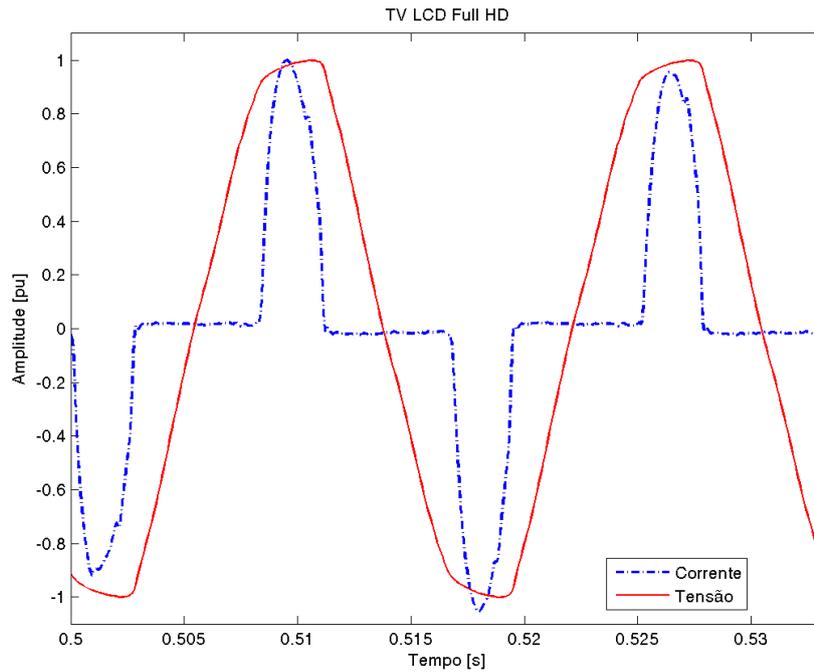


Figura 3.13 - Gráficos de tensão e corrente para a TV LCD Full HD.

A análise puramente visual dessas figuras já permite identificar algumas semelhanças e, também, algumas diferenças bem pronunciadas entre os equipamentos. É possível prever, por exemplo, que um equipamento como o Notebook ou a TV de tubo possui maior participação de componentes harmônicos do que uma cafeteira ou uma lâmpada incandescente. Nas seções subsequentes, serão feitas análises com base nessas diferenças e semelhanças, numa tentativa de quantificá-las.

3.3 Análise do Fator de Potência

Uma primeira abordagem a ser investigada, como proposta na seção 1.1, é a do fator de potência de cada equipamento. A Tabela 3.3 mostra os fatores de potência calculados para cada equipamento, a partir da componente fundamental obtida a partir da Transformada Rápida de Fourier e a Fig. 3.14 mostra um gráfico em barras para facilitar a visualização. Deve-se ressaltar que, conforme mostrado em [17], equipamentos com circuitos chaveados apresentam retificadores na entrada, sendo seu fator de potência próximo ao unitário.

Tabela 3.3 - Fator de Potência da fundamental de cada equipamento.

Equipamento	FP
Batedeira	0,9604
Cafeteira	1,0000
Chuveiro Elétrico	1,0000
Desktop	0,9997
Espremedor de Laranja	0,4494
Geladeira	0,5972
Lâmpada Incandescente de 100 W	1,0000
Lâmpada LED	0,3525
Notebook	0,9691
TV LCD	1,0000
TV de tubo	0,9958
Torradeira	1,0000
Ventilador	0,6544

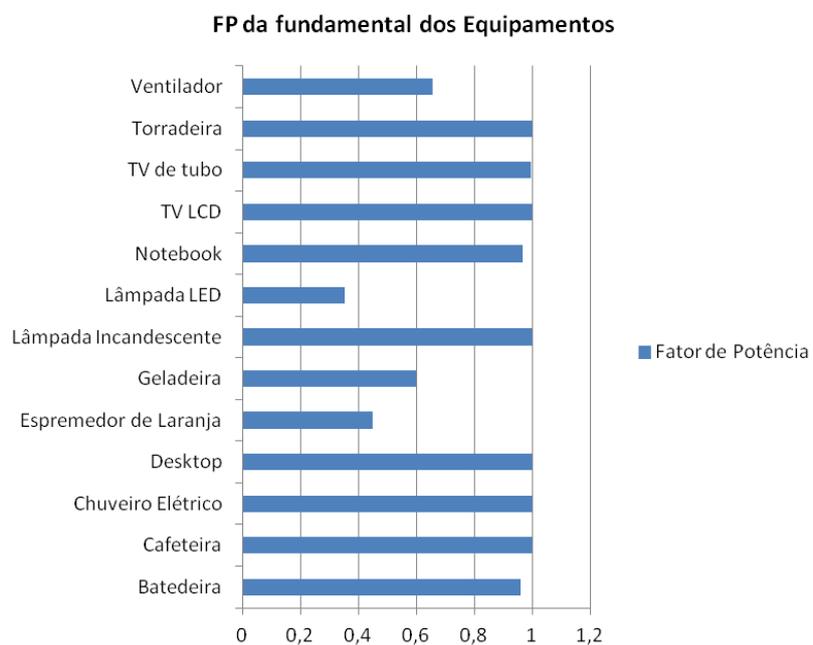


Figura 3.14 - Gráfico em barras do FP da fundamental dos equipamentos.

3.4 Aplicação da FFT aos Sinais Medidos

Utilizando o mesmo procedimento mostrado na seção 2.1.2, as figuras a seguir apresentam os coeficientes das séries de Fourier das medições de corrente elétrica dos equipamentos escolhidos para o trabalho. Todos os resultados mostrados serão normalizados de modo que a componente fundamental seja unitária e as demais componentes sejam frações da primeira.

Antes, porém, a Fig. 3.15 mostra a composição harmônica da curva de tensão da fonte elétrica utilizada para alimentar o chuveiro elétrico. Escolheu-se somente mostrar o gráfico de tensão de um equipamento, pois todos os outros apresentaram o mesmo perfil harmônico. Deve-se ressaltar que a composição harmônica de todas as correntes medidas sofre efeito da composição harmônica da tensão que as causou.

Em seguida, será apresentada uma tabela que faz um resumo das amplitudes encontradas em cada caso para os principais componentes harmônicos, visualizados diretamente nas curvas e calculadas com auxílio de ferramentas gráficas do *Matlab*.

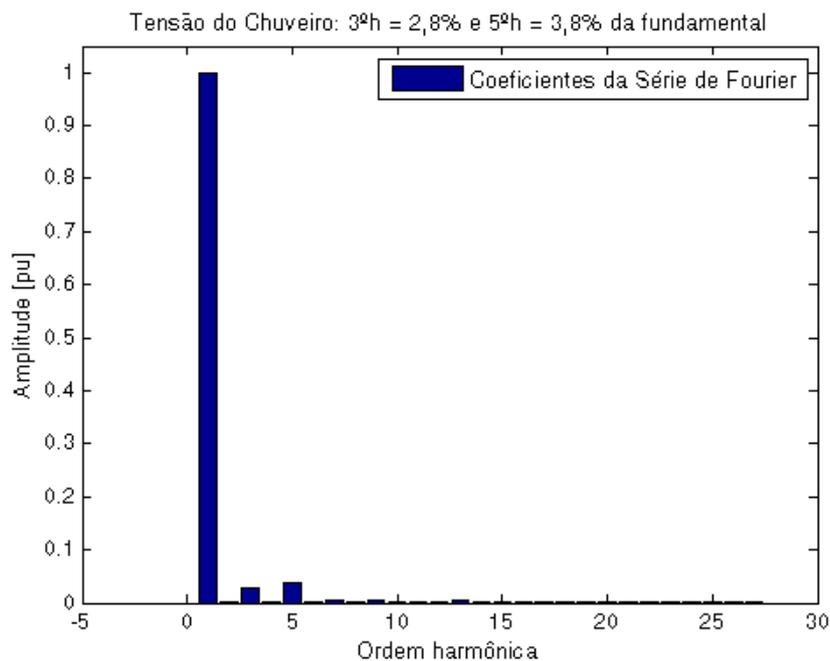


Figura 3.15 - Componentes harmônicos para a tensão aplicada ao chuveiro elétrico.

Nota-se na Fig. 3.15 que a senoide de tensão não é perfeita e há a presença dos harmônicos de 3ª e 5ª ordem. Isto interfere no resultado da decomposição das ondas de corrente, pois estes, mesmo que com amplitude baixa (2,8% e 3,8%, respectivamente),

podem afetar a resposta harmônica da corrente elétrica dos equipamentos, até mesmo com a aparição de harmônicos pares nas medições de corrente.

A seguir, serão mostrados os espectros harmônicos das formas de onda de corrente. Deve-se atentar mais uma vez ao fato dos resultados estarem condicionados a forma de onda da tensão aplicada aos terminais dos equipamentos. Se a tensão aplicada for essencialmente senoidal, os resultados podem ser diferentes.

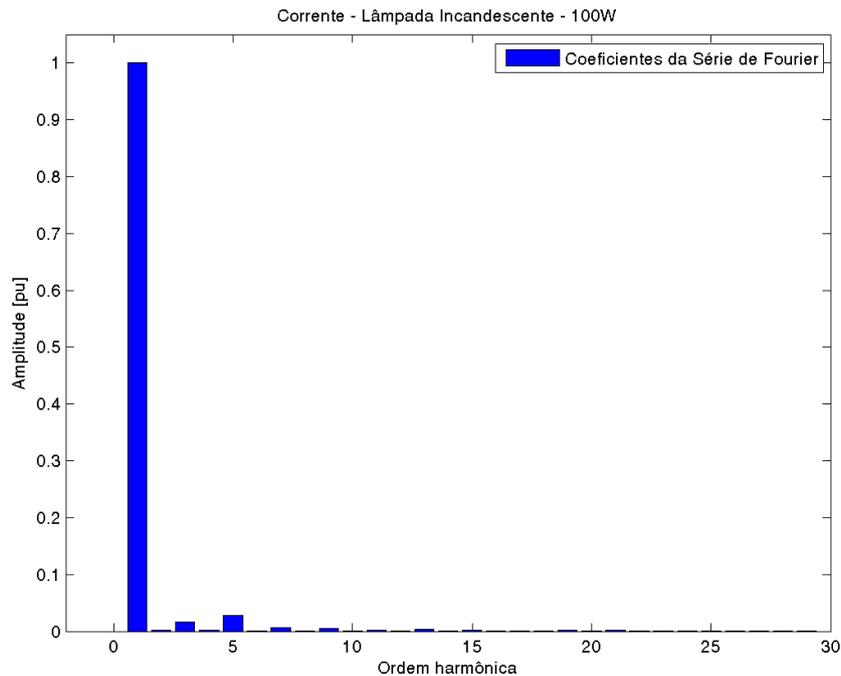


Figura 3.16 - Componentes harmônicos para a lâmpada incandescente de 100W.

O gráfico em barras da Fig. 3.16 mostra uma grande diferença da componente fundamental em relação às outras, o que é razoável visto que uma lâmpada incandescente não é nada mais que uma resistência, i.e., um componente linear. Já o gráfico da Fig. 3.17, que apresenta o espectro harmônico para a Lâmpada de LED, mostra uma influência considerável de alguns componentes harmônicos: de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª principalmente. Isto mostra uma diferença interessante na comparação de equipamentos que possuem a mesma finalidade uma vez que, apesar da lâmpada de LED possuir uma amplitude de corrente muito menor (Tabela 3.2) e, portanto, consumir menos potência que a lâmpada incandescente, ela também pode causar maior poluição harmônica ao sistema, caso seja ligado um número suficiente de lâmpadas deste tipo que consumam a mesma potência da lâmpada incandescente.

Pode-se exemplificar a utilidade desta informação imaginando um ambiente industrial onde toda a iluminação auxiliar é feita com lâmpadas incandescentes e deseja-se fazer uma economia deste consumo. A mudança completa das incandescentes por lâmpadas de LED certamente diminuirá os gastos, porém é possível que uma grande quantidade destas influencie negativamente na qualidade da energia entregue pela rede a este consumidor.

Há ainda a presença de harmônicos de ordem par, que não serão aqui analisados por não serem objetos de estudo do presente trabalho e, provavelmente, serem consequência da distorção apresentada na tensão.

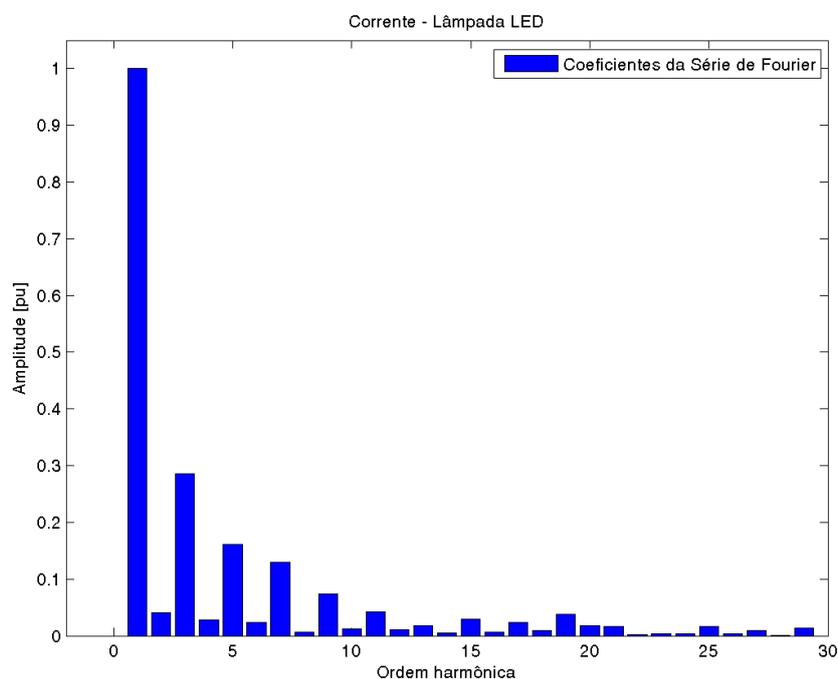


Figura 3.17 - Componentes harmônicos para a lâmpada de LED.

As Figs. 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21 mostram os espectros harmônicos relativos aos equipamentos listados no início deste capítulo como “Motorizados”. Uma primeira análise dos gráficos mostrados nessas figuras destaca o ventilador, Fig. 3.21, dos demais, por apresentar maior diferença de amplitude entre a componente fundamental e as demais componentes, aproximando-se mais do comportamento harmônico da lâmpada incandescente. Isto acontece, pois o ventilador é basicamente uma máquina de indução, que é um componente linear visto pela rede elétrica.

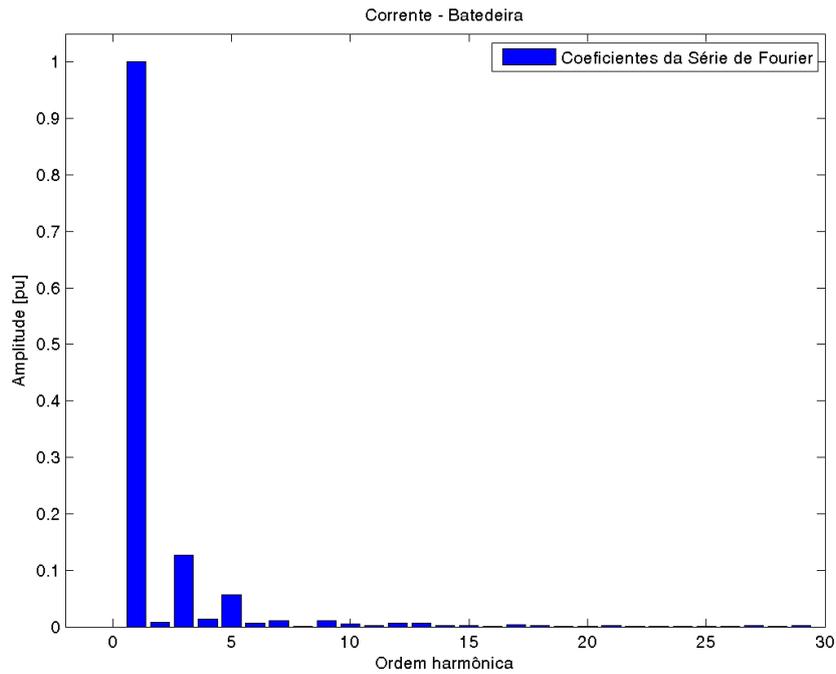


Figura 3.18 - Componentes harmônicos para a bateadeira.

Os outros equipamentos, bateadeira (Fig. 3.18), espremedor de laranja (Fig. 3.19) e geladeira (Fig. 3.20) também têm seus princípios básicos de funcionamento num motor de indução, porém, nos ciclos analisados, seus regimes de operação e seus níveis de potência são diferentes do ventilador.

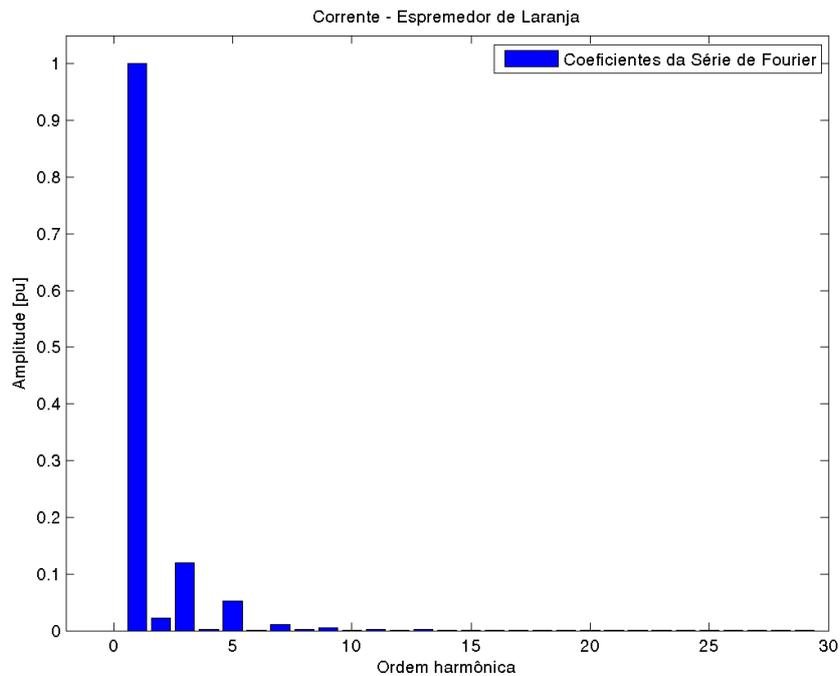


Figura 3.19 - Componentes harmônicos para o espremedor de laranja.

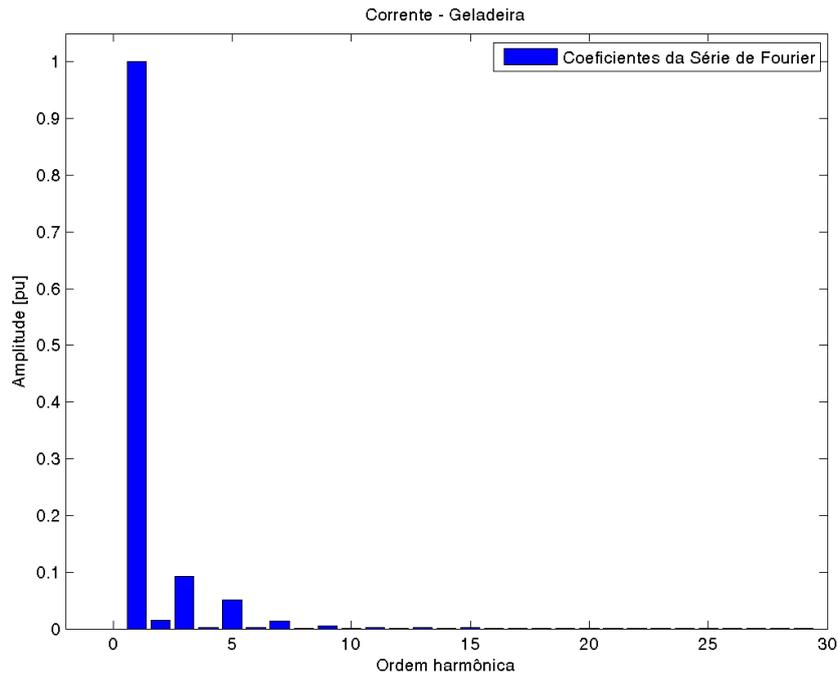


Figura 3.20 - Componentes harmônicos para a geladeira.

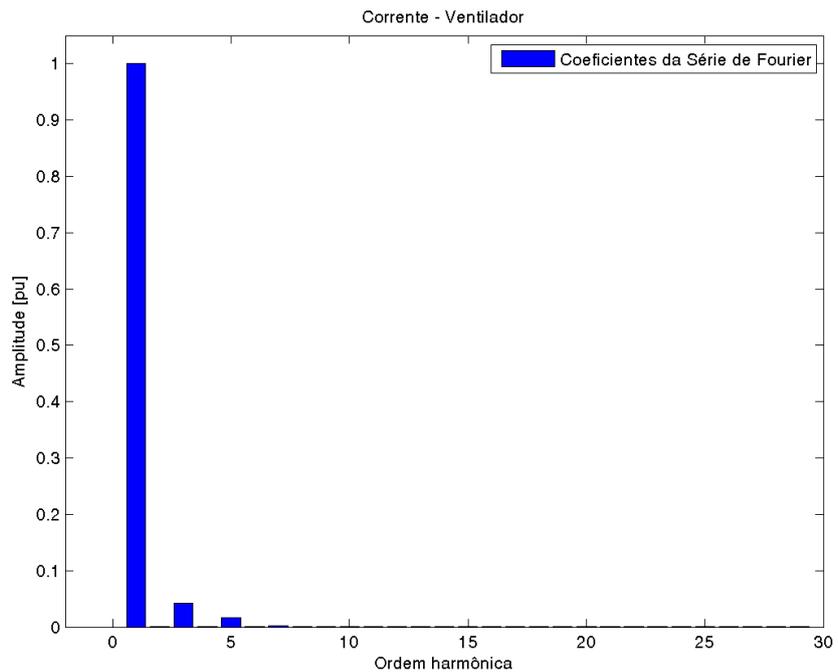


Figura 3.21 - Componentes harmônicos para o ventilador.

As Figs. 3.22 e 3.23 mostram dois dos maiores poluidores harmônicos que a rede elétrica de distribuição tem que atender: o computador de mesa (ou *desktop*) e o computador portátil (ou *laptop*; ou *notebook*). O crescimento da demanda por equipamentos eletrônicos em geral, tanto para o conforto quanto por necessidade para o desenvolvimento tecnológico ou para a eficiência energética leva ao aumento da entrada

destes equipamentos não lineares ligados às redes das concessionárias de energia elétrica [2].

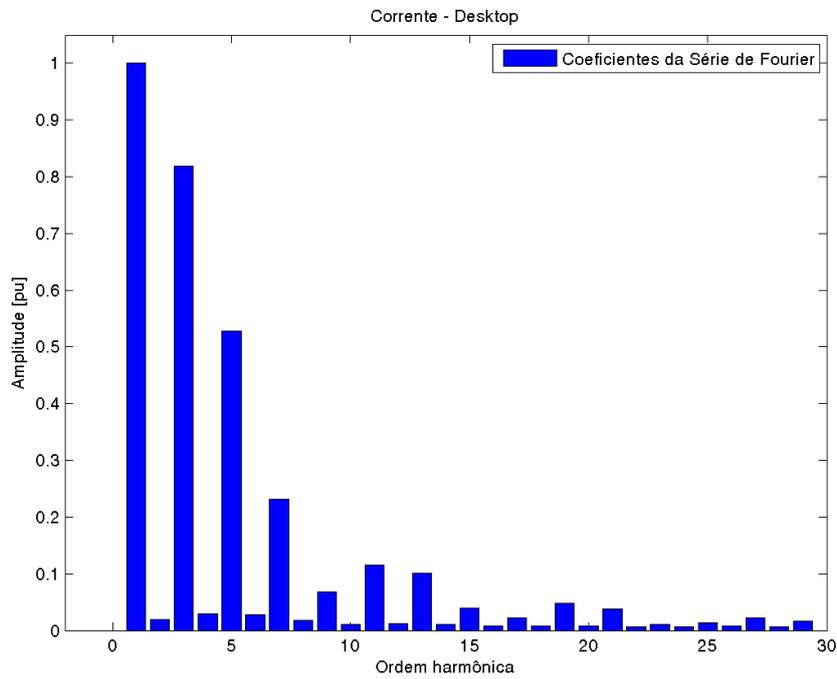


Figura 3.22 - Componentes harmônicos para o *desktop*.

Uma característica comum a estes equipamentos é a presença bastante significativa de componentes harmônicos de baixa ordem com amplitude elevada, comparável à amplitude da componente fundamental.

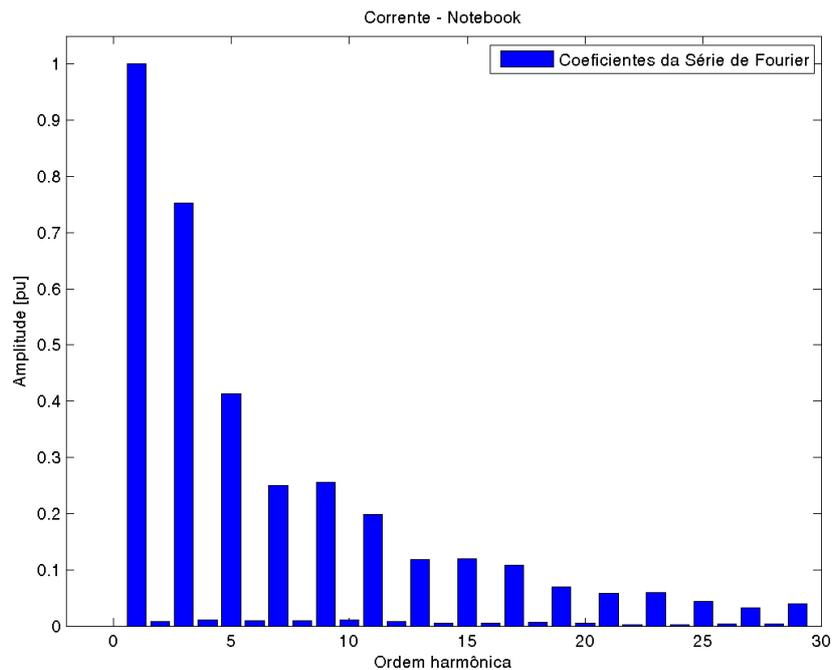


Figura 3.23 - Componentes harmônicos para o *notebook*.

As Figs. 3.24, 3.25 e 3.26 mostram os equipamentos compostos estritamente por resistências elétricas.

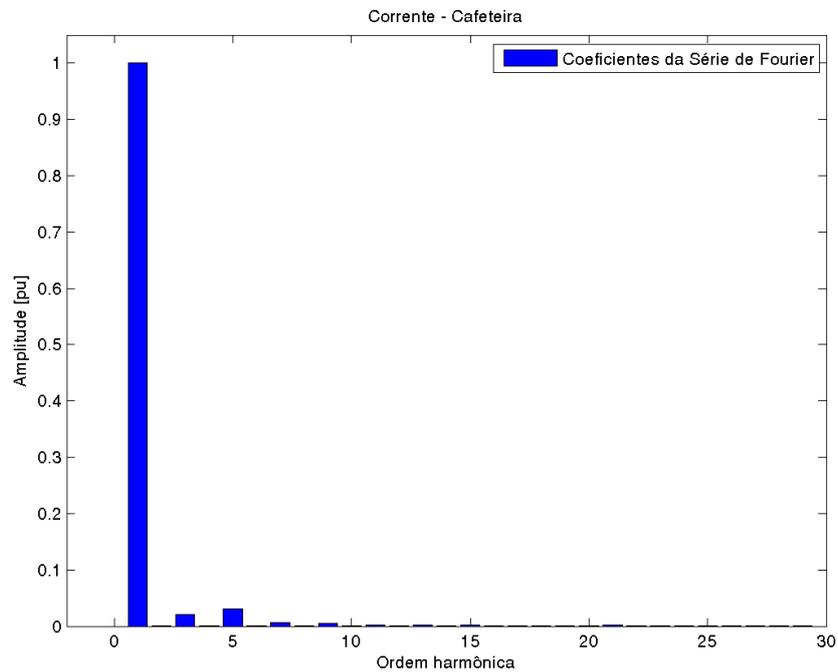


Figura 3.24 - Componentes harmônicos para a cafeteira.

Estes três equipamentos têm seu princípio de funcionamento idêntico, possuindo apenas finalidades diferentes. Todos são ligados à energia elétrica e possuem uma resistência interna que, quando percorrida pela corrente elétrica, produzem calor.

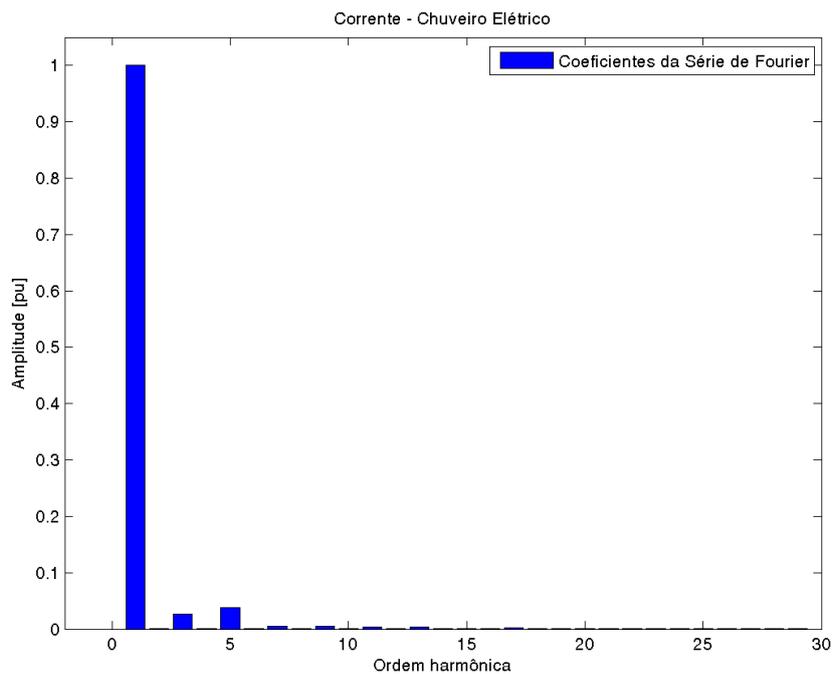


Figura 3.25 - Componentes harmônicos para o chuveiro elétrico.

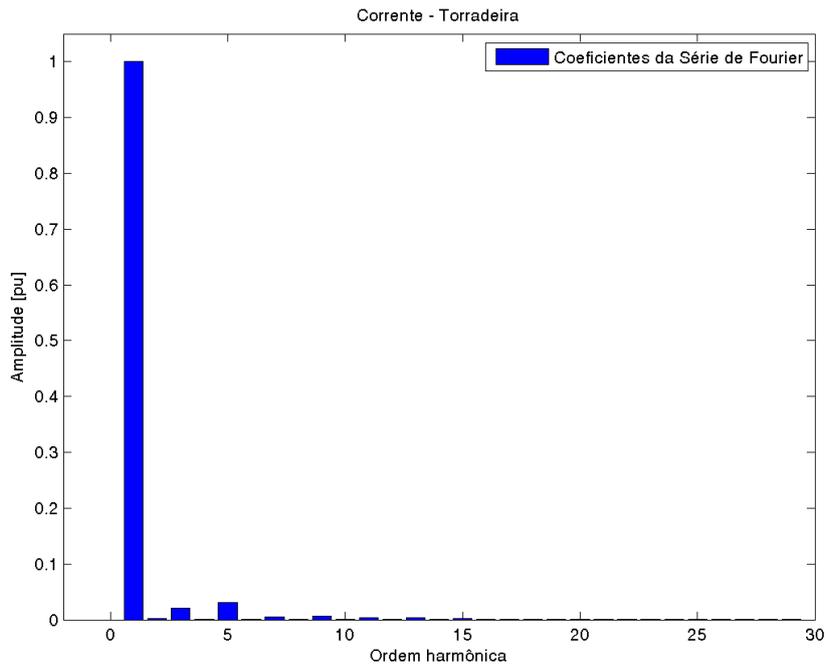


Figura 3.26 - Componentes harmônicos para a torradeira.

Finalmente, as Figs. 3.27 e 3.28 mostram os espectros harmônicos relativos aos aparelhos televisores mais usualmente encontrados nas residências. Ambos são grandes e complexos circuitos eletrônicos e por isso, assim como os computadores, possuem grande contribuição para a poluição harmônica na rede.

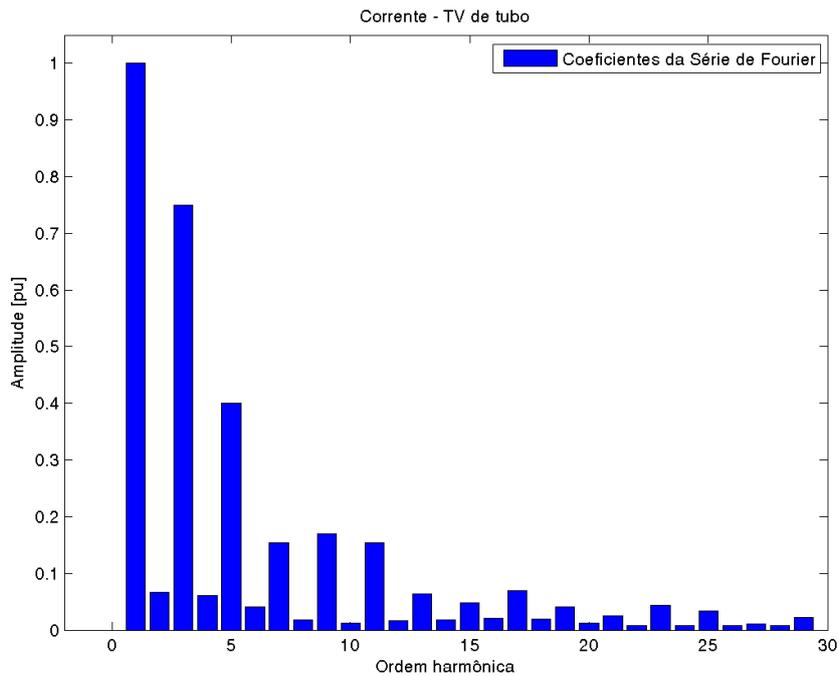


Figura 3.27 - Componentes harmônicos para a TV de tubo.

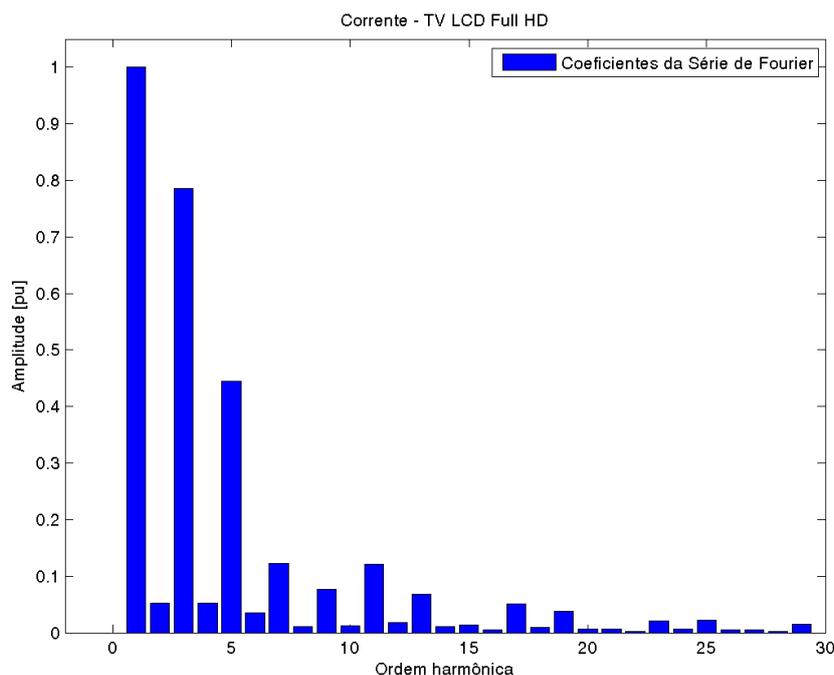


Figura 3.28 - Componentes harmônicos para a TV de LCD.

Com as informações obtidas, são apresentadas duas tabelas a seguir com valores por unidade na base da amplitude da componente fundamental: a Tabela 3.4 mostra um resumo com os equipamentos que apresentaram uma composição harmônica menos impactante a rede, e a Tabela 3.5 mostra o mesmo para os equipamentos que mais poluem harmonicamente a rede de distribuição.

Tabela 3.4 - Equipamentos que pouco poluem harmonicamente a rede.

Equipamento	Fundamental (pu)	3° (pu)	5° (pu)	THD (%)
Lâmpada Incandescente	1,000	0,0163	0,0281	3,25
Batedeira	1,000	0,1270	0,0571	13,9
Espremedor de Laranja	1,000	0,1190	0,0524	13,0
Geladeira	1,000	0,0930	0,0507	10,6
Ventilador	1,000	0,0426	0,0161	4,55
Cafeteira	1,000	0,0208	0,0301	3,67
Chuveiro Elétrico	1,000	0,0267	0,0381	4,65
Torradeira	1,000	0,0203	0,0306	3,67

Tabela 3.5 - Equipamentos que muito poluem harmonicamente a rede.

Equip.	Fund. (pu)	3 ^a (pu)	5 ^a (pu)	7 ^a (pu)	9 ^a (pu)	11 ^a (pu)	13 ^a (pu)	15 ^a (pu)	17 ^a (pu)	19 ^a (pu)	21 ^a (pu)	THD (%)
<i>Desktop</i>	1,000	0,819	0,528	0,231	0,069	0,115	0,102	0,039	0,022	0,048	0,038	102
Lâmpada LED	1,000	0,285	0,162	0,130	0,074	0,043	0,017	0,029	0,023	0,038	0,017	36,7
<i>Notebook</i>	1,000	0,752	0,413	0,249	0,256	0,198	0,119	0,120	0,109	0,069	0,058	97,5
TV LCD	1,000	0,786	0,444	0,122	0,076	0,121	0,068	0,014	0,050	0,039	0,006	92,7
TV de tubo	1,000	0,750	0,400	0,154	0,169	0,154	0,064	0,048	0,070	0,041	0,024	90,1

3.4.1 Discussão

Analisando os espectros harmônicos dos equipamentos e as tabelas com o resumo, verifica-se que é possível agrupar equipamentos a partir de sua concepção básica e não por sua finalidade.

Todos os equipamentos cuja composição básica é um circuito linear – resistências e indutâncias – apresentam uma semelhança: presença de 3^o e 5^o harmônicos, por conta da presença dos mesmos na tensão aplicada. Dentre estes, neste caso, pode-se ainda diferenciar os que têm base no elemento resistivo puro e os que têm base nas máquinas de indução. Os primeiros apresentam THD menor que os segundos.

Os equipamentos sabidamente constituídos por fontes chaveadas apresentam uma grande quantidade de componentes harmônicos cujas amplitudes são bastante comparáveis à componente fundamental, chegando a 82% no caso do computador de mesa (*desktop*). O THD destes equipamentos supera os 90%.

Pode-se dizer que a lâmpada LED apresenta um comportamento destacável dos demais, pois, apesar de apresentar muitos níveis harmônicos assim como os equipamentos eletrônicos, as amplitudes, em ampères, de cada componente harmônica são relativamente muito baixas, i.e. seu THD é baixo se comparado com as demais cargas baseadas em semicondutores. Assim, não é possível nem agrupá-la nem separá-la, com certeza, dos demais equipamentos.

Apesar de ser possível destacar algumas semelhanças, a separação mais efetiva que se mostra possível fazer é entre equipamentos com poucos harmônicos e com muitos harmônicos, como visto nas Tabelas 3.4 e 3.5, i.e., não é possível caracterizá-los pura e simplesmente pela avaliação de sua composição harmônica, exigindo assim o aprofundamento no tratamento desses dados.

3.5 Análise Wavelet dos Equipamentos Residenciais

As Transformadas Wavelet foram desenvolvidas para trabalhar com descontinuidades e transitórios que são características de cargas não lineares. A possibilidade de utilizá-las se dá na tentativa de mostrar que a forma de onda de corrente elétrica de cada equipamento seja característica, e uma aproximação, que conserve seus principais aspectos, seja suficiente para avaliar semelhanças e disparidades [2], [3].

Para a aplicação da Transformada, foi utilizada a ferramenta *wavemenu* do *Matlab*, cuja interface é mostrada na Fig. 3.29. Esta é uma ferramenta prática e de utilização amigável ao usuário, que facilita a realização de estudos rápidos com a Transformada Wavelet, pois não exige conhecimento da sintaxe de programação em *Matlab*, bastando ao usuário importar um vetor de dados para a área de trabalho do *software*. Outra vantagem do *wavemenu* é que os resultados mostrados já estão normalizados de forma que a recomposição do sinal seja igual à soma da aproximação com os detalhes.

Após a realização de alguns testes, optou-se pela utilização da Wavelet mãe da família *Daubechies* de ordem 4, ou simplesmente *db4*, cujo formato foi mostrado na Fig. 2.7.



Figura 3.29 - Interface de utilização do *wavemenu* do *Matlab*.

As Figs. 3.30 a 3.42 dispostas a seguir mostram o resultado da aplicação da TW para os equipamentos eletrodomésticos. Observou-se após alguns testes que uma quantidade não muito grande de níveis de detalhamento (como no esquema da Fig. 2.4) é suficiente para obter aproximações dos sinais satisfatórias para diferenciar ou agrupar os equipamentos.

As Figs. 3.30 (cafeteira), 3.31 (chuveiro elétrico), 3.32 (lâmpada incandescente) e 3.33 (torradeira) mostram as decomposições relativas aos equipamentos essencialmente resistivos. Nota-se uma grande semelhança visual em todos os níveis de detalhe e, também, na aproximação do sinal. As características únicas de cada equipamento, dentre as decomposições, dificilmente serão reconhecidas com precisão se uma quantidade grande de testes for realizada, portanto, neste caso é improvável que alguma ferramenta computacional seja capaz de diferenciá-los.

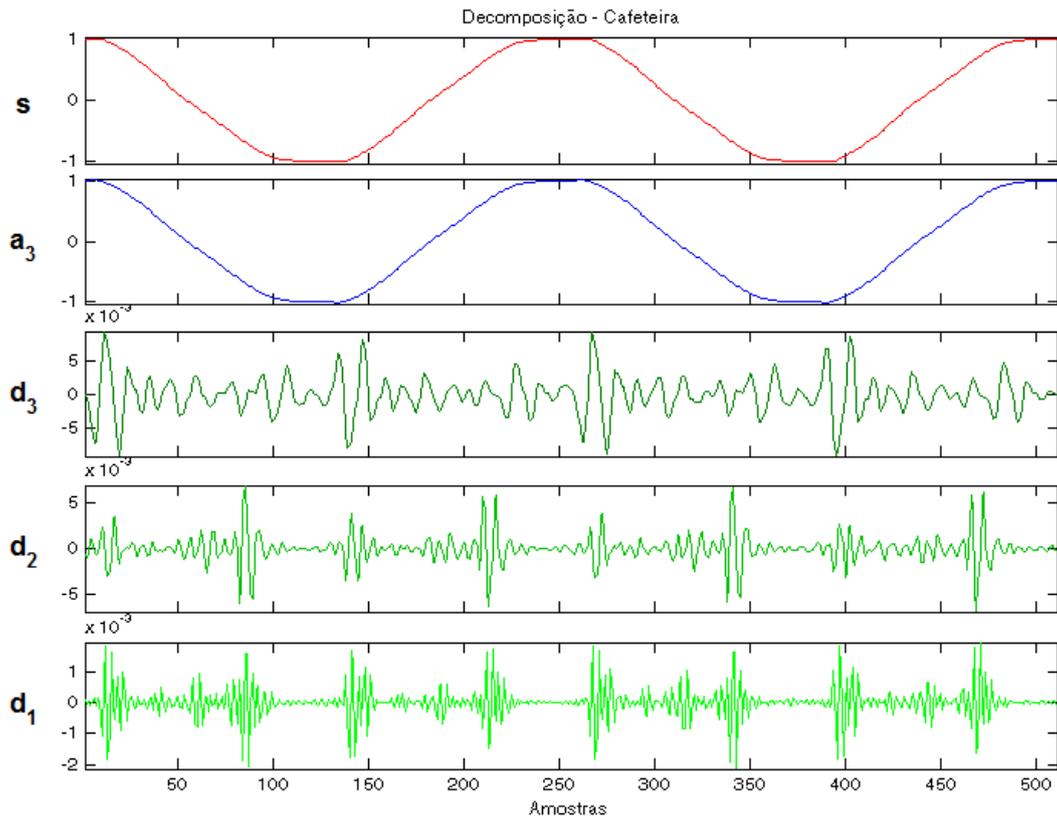


Figura 3.30 - Transformada Wavelet da onda de corrente da cafeteira.

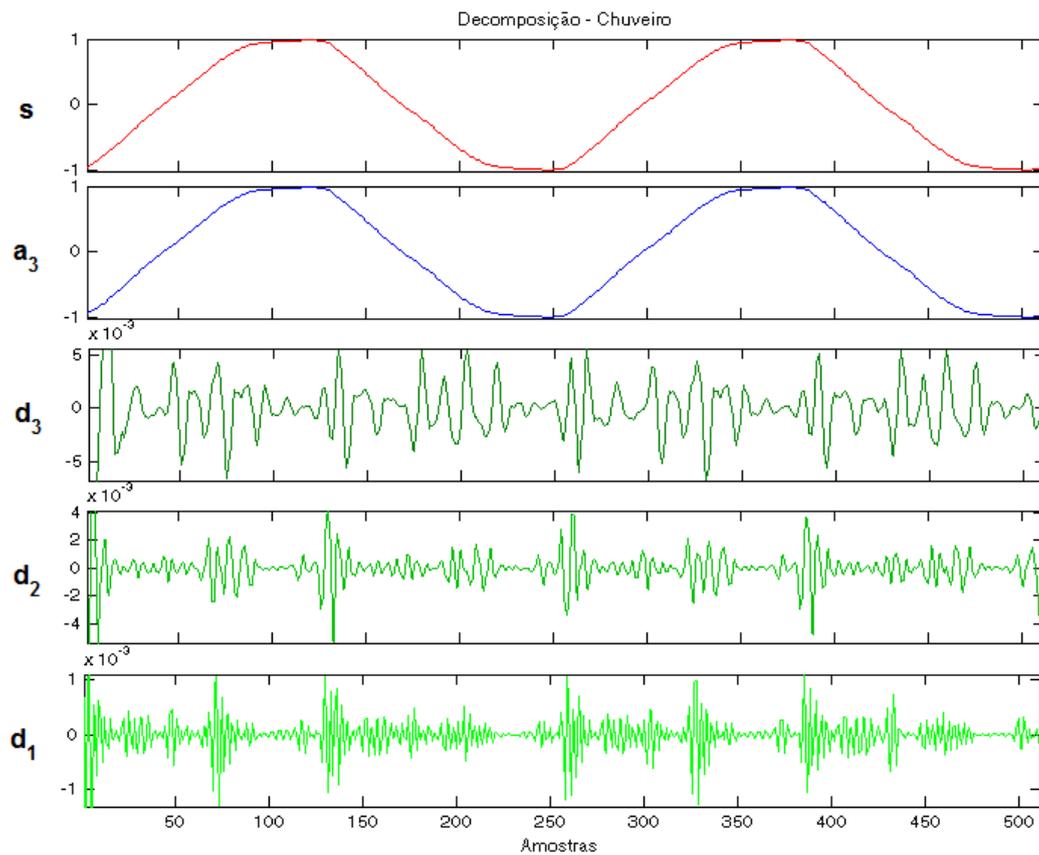


Figura 3.31 - Transformada Wavelet da onda de corrente do chuveiro elétrico.

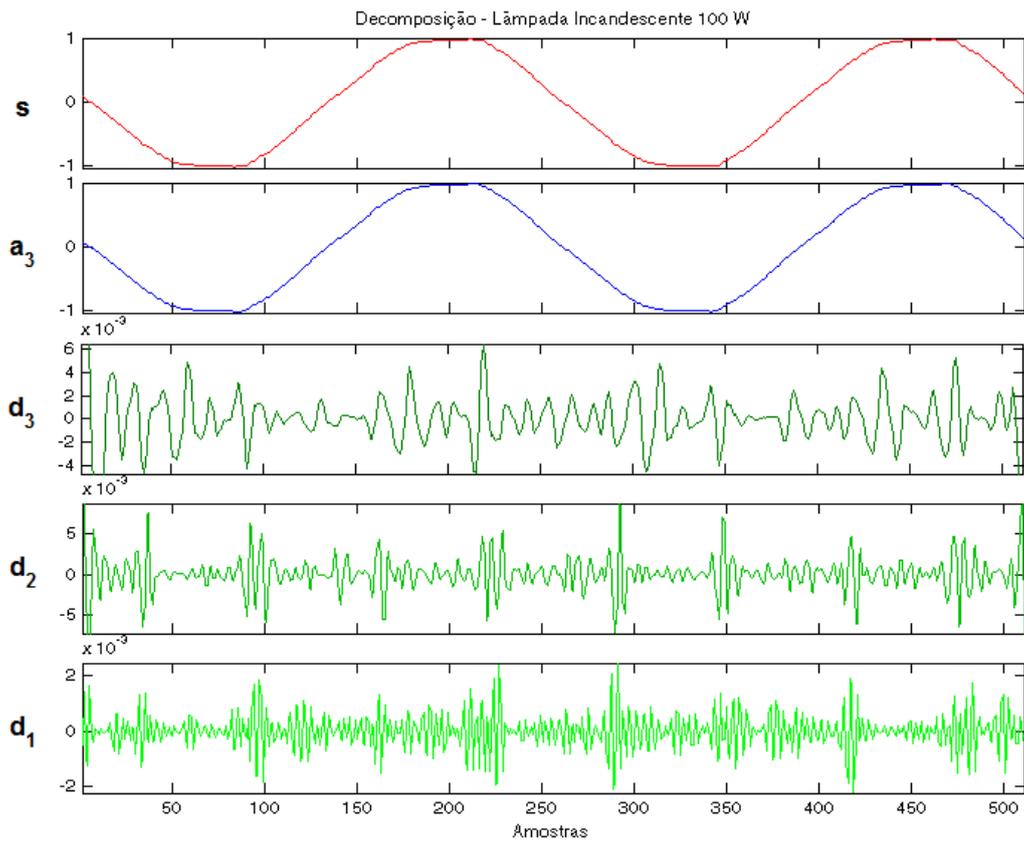


Figura 3.32 - Transformada Wavelet da onda de corrente da lâmpada incandescente.

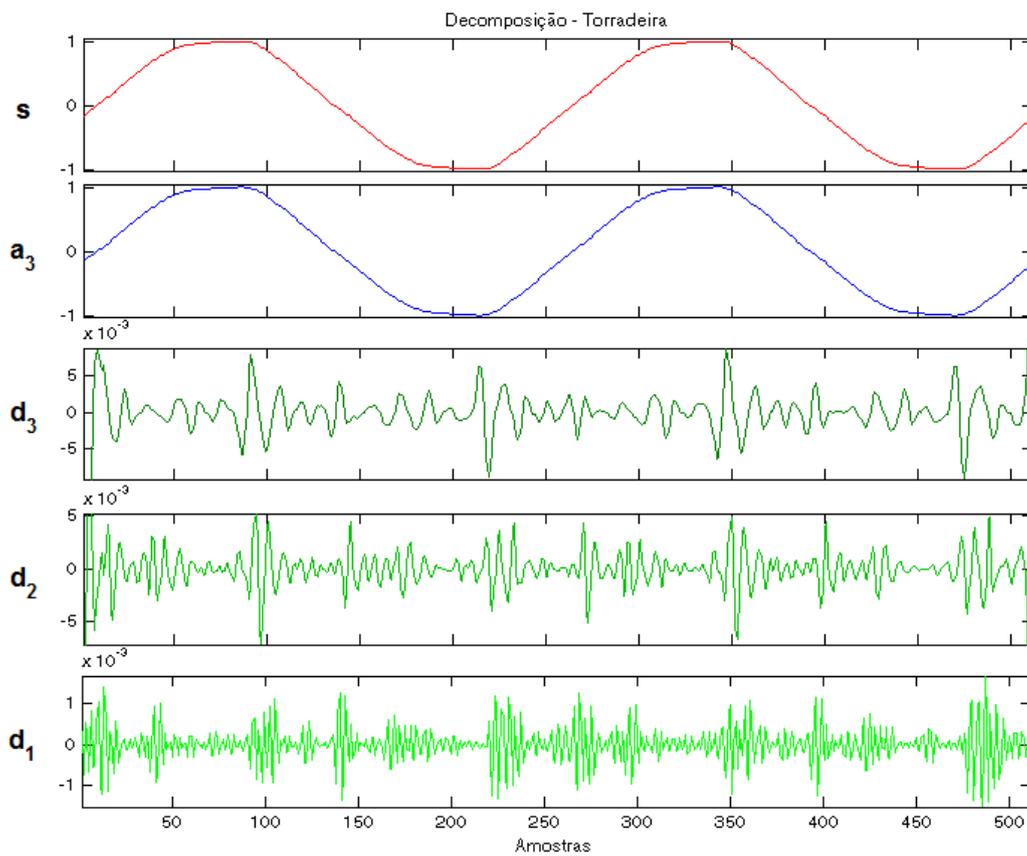


Figura 3.33 - Transformada Wavelet da onda de corrente da torradeira.

As Figs. 3.34 (*desktop*), 3.35 (*notebook*), 3.36 (TV de tubo) e 3.37 (TV de LCD) mostram as decomposições relativas aos equipamentos constituídos por circuitos chaveados. Nota-se um padrão bem definido de ondas pulsantes, nas aproximações e nos detalhes. Apesar disso, o fato das formas de onda de corrente não serem idênticas entre os equipamentos facilita a distinção, considerando somente a aproximação. Nos casos em que são muito parecidos, a análise pode ser feita com base nos níveis de detalhamento, que também conservam diferenças razoáveis.

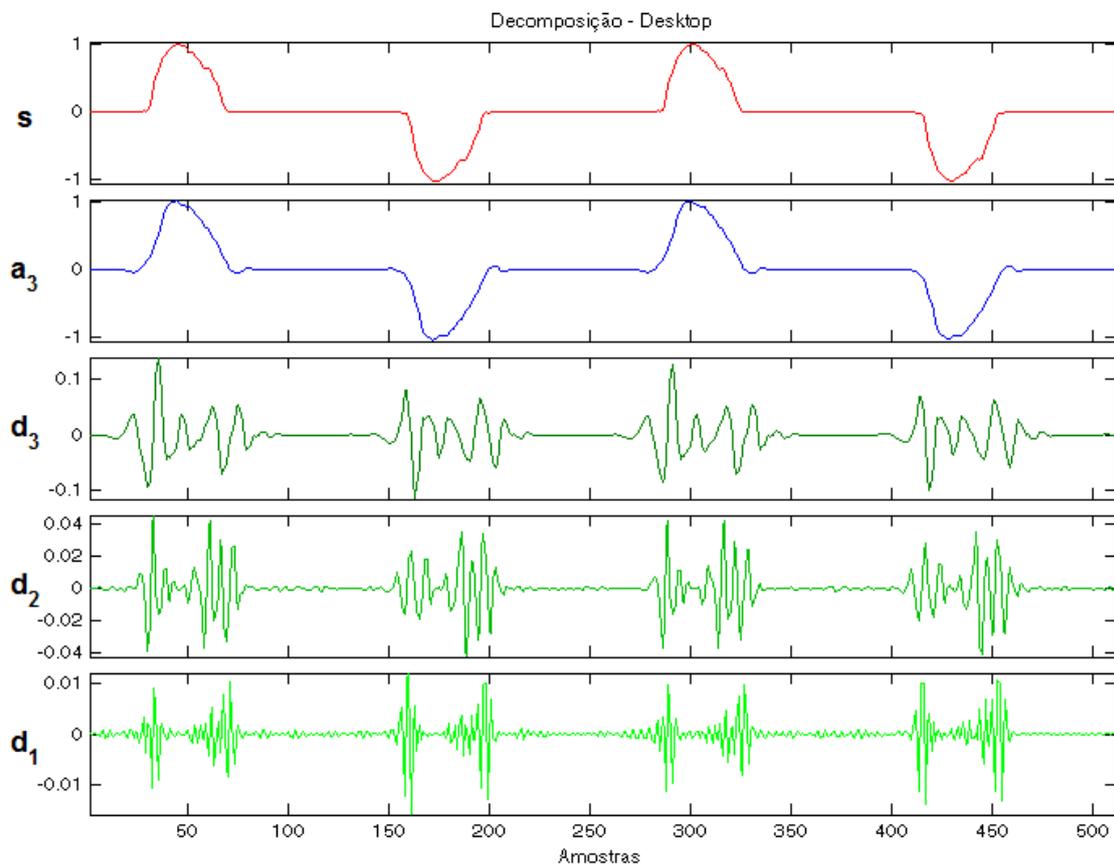


Figura 3.34 - Transformada Wavelet da onda de corrente do *desktop*.

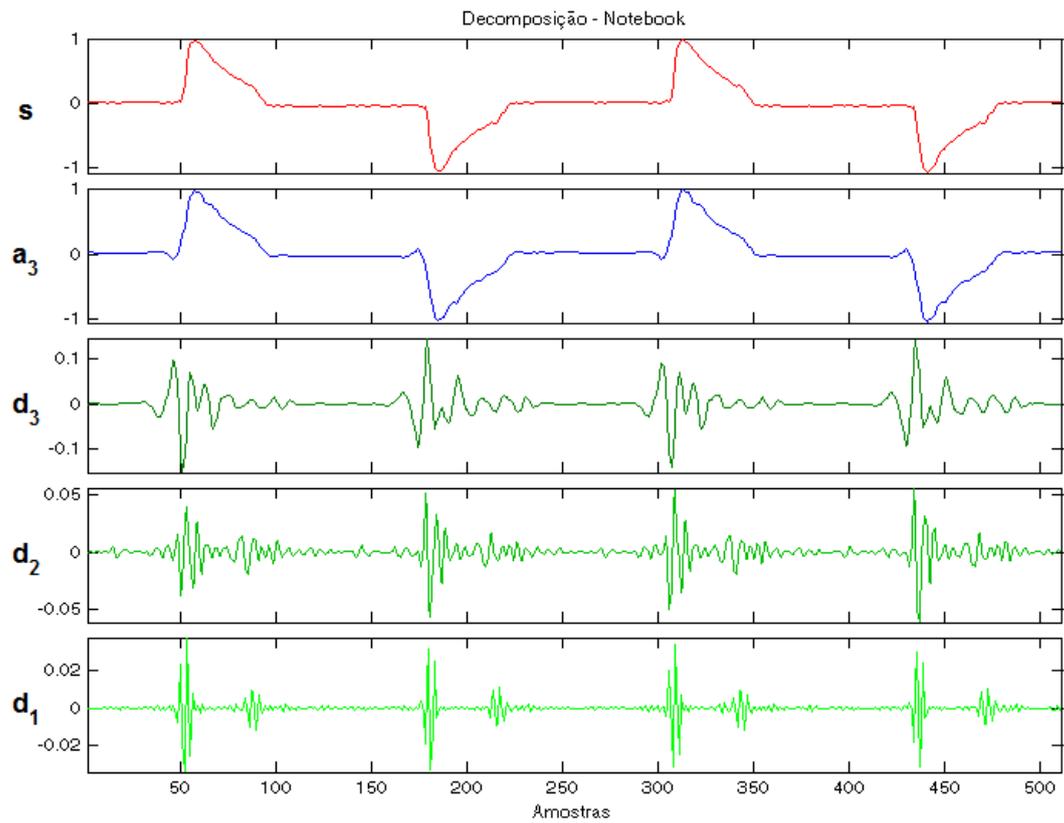


Figura 3.35 - Transformada Wavelet da onda de corrente do *notebook*.

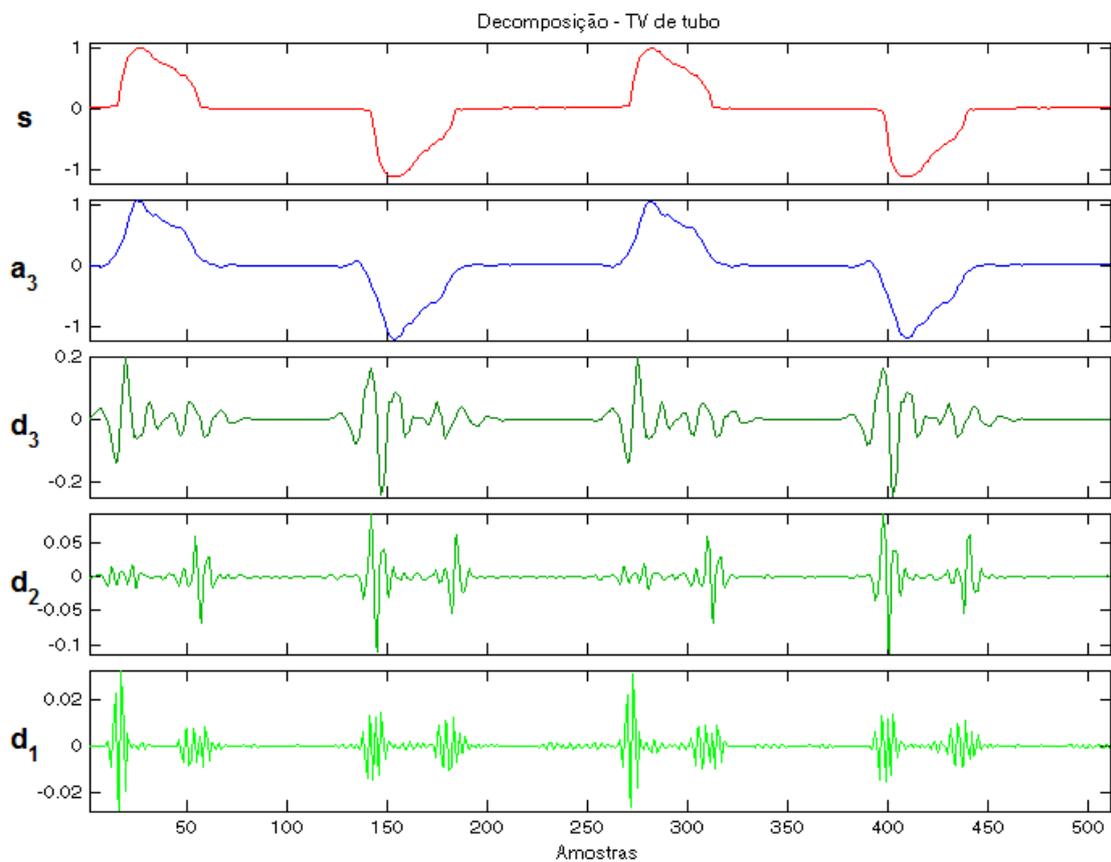


Figura 3.36 - Transformada Wavelet da onda de corrente da TV de tubo.

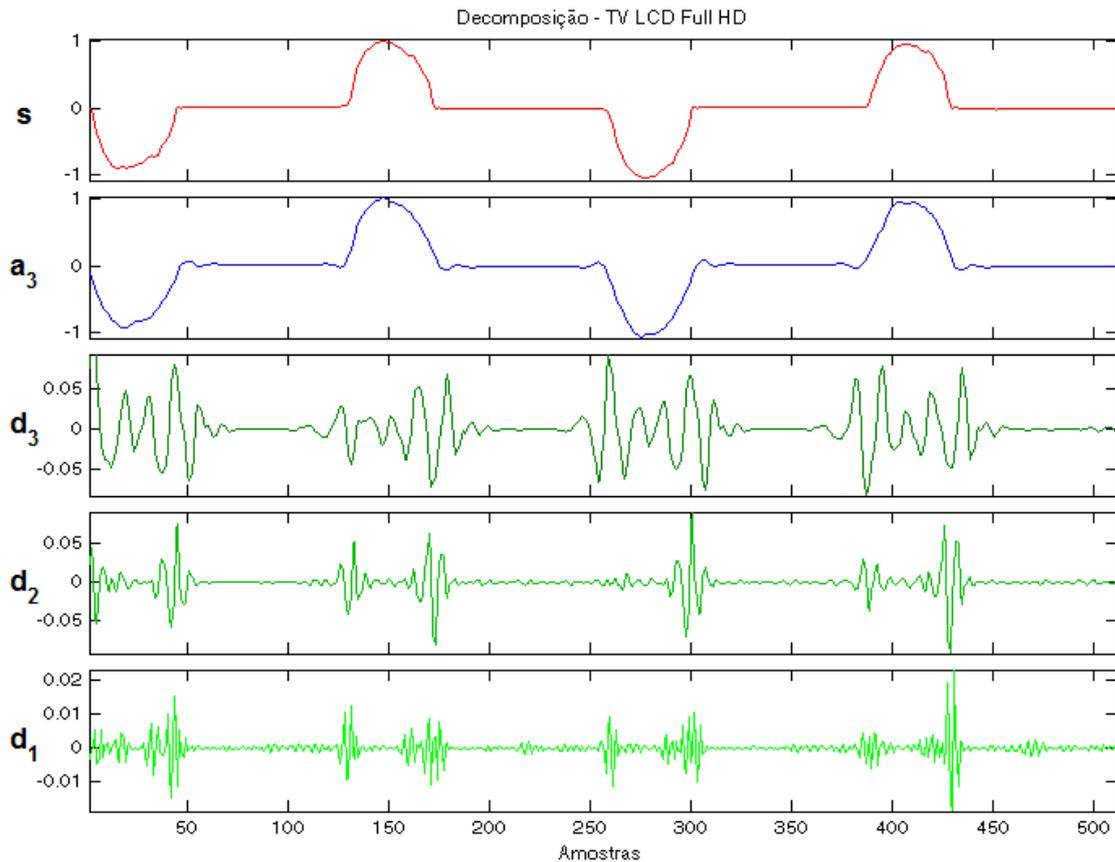


Figura 3.37 - Transformada Wavelet da onda de corrente da TV de LCD.

As Figs. 3.38 (batedeira), 3.39 (espremedor de laranja), 3.40 (geladeira) e 3.41 (ventilador) mostram as decomposições relativas aos equipamentos chamados motorizadas, por se tratarem basicamente de uma máquina de indução. Pode-se dizer que, apesar de apresentarem características harmônicas semelhantes, como visto na seção 3.4, suas formas de onda apresentam diferenças muito interessantes do ponto de vista da proposta de distinção dos equipamentos; desde que a análise seja feita com base no nível de aproximação. Por outro lado, apresentam semelhanças suficientes para serem agrupadas, se a análise for feita com base no nível de detalhe de maior energia (d_3).

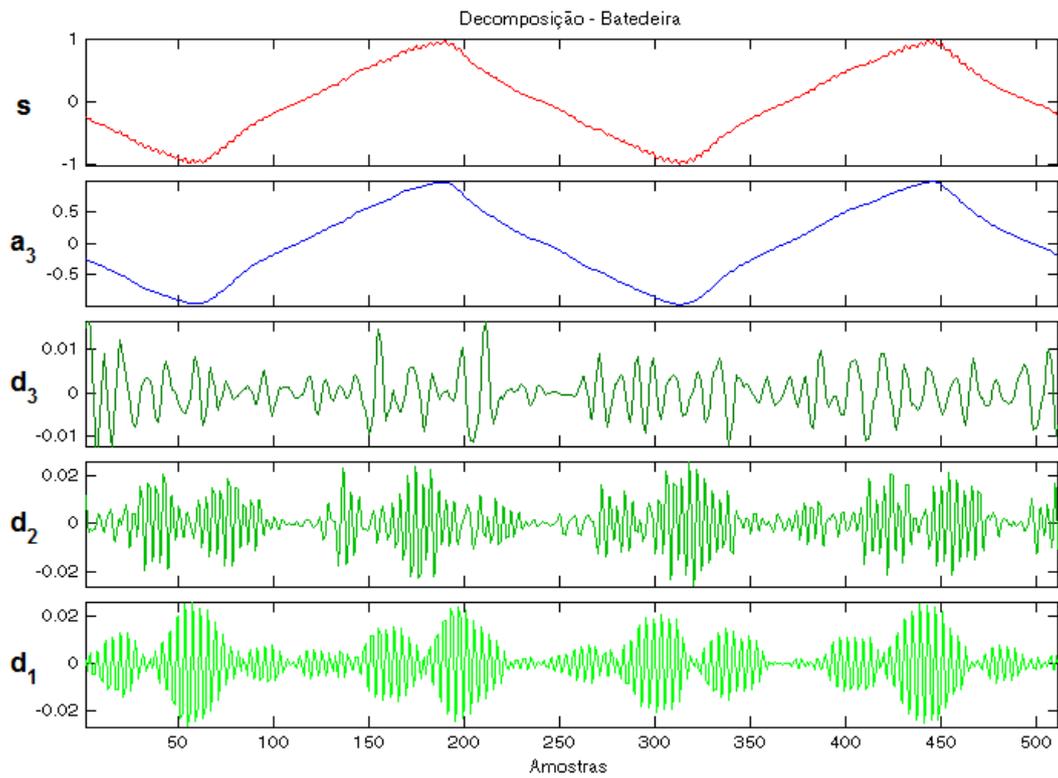


Figura 3.38 - Transformada Wavelet da onda de corrente da bateadeira.

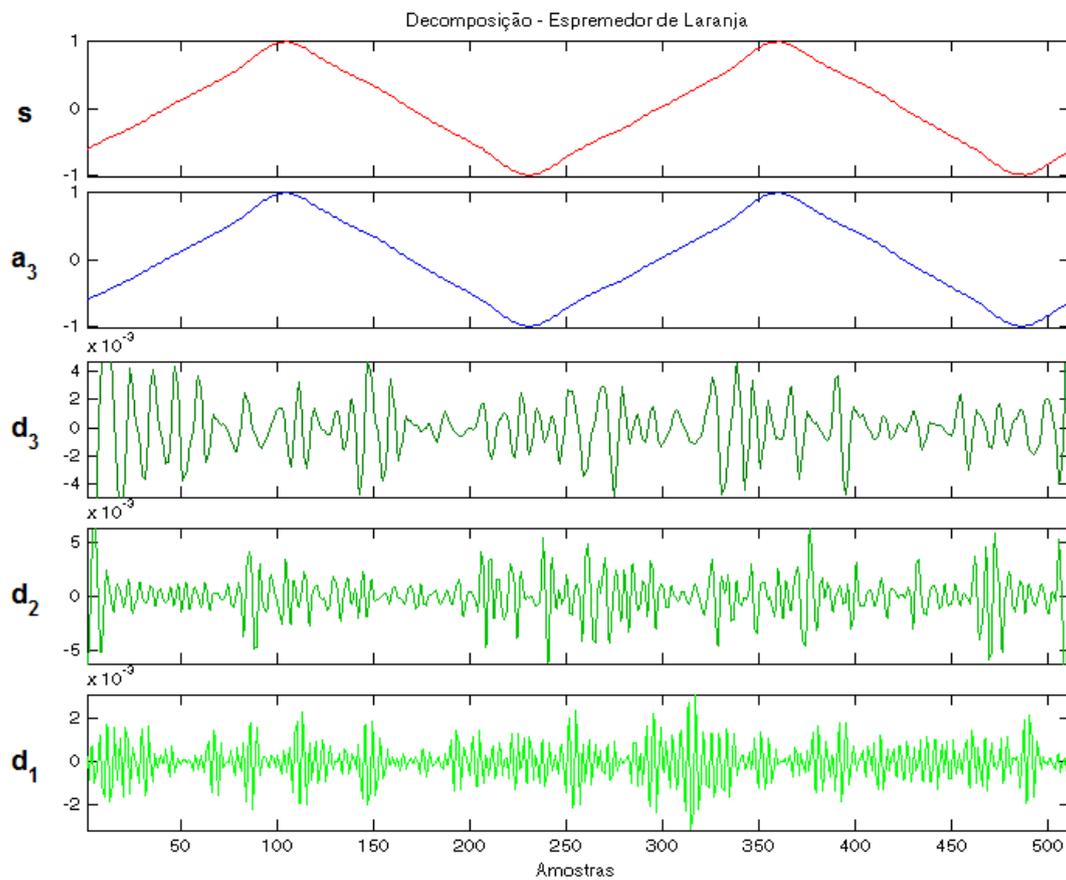


Figura 3.39 - Transformada Wavelet da onda de corrente do espregedor de laranja.

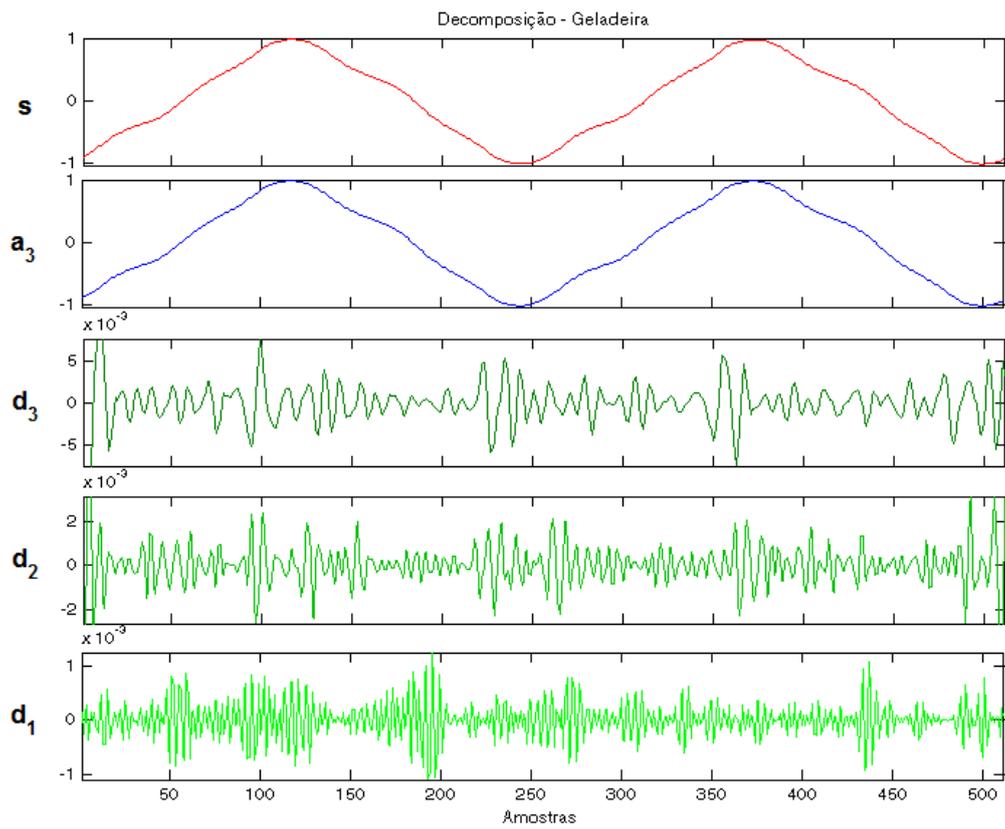


Figura 3.40 - Transformada Wavelet da onda de corrente da geladeira.

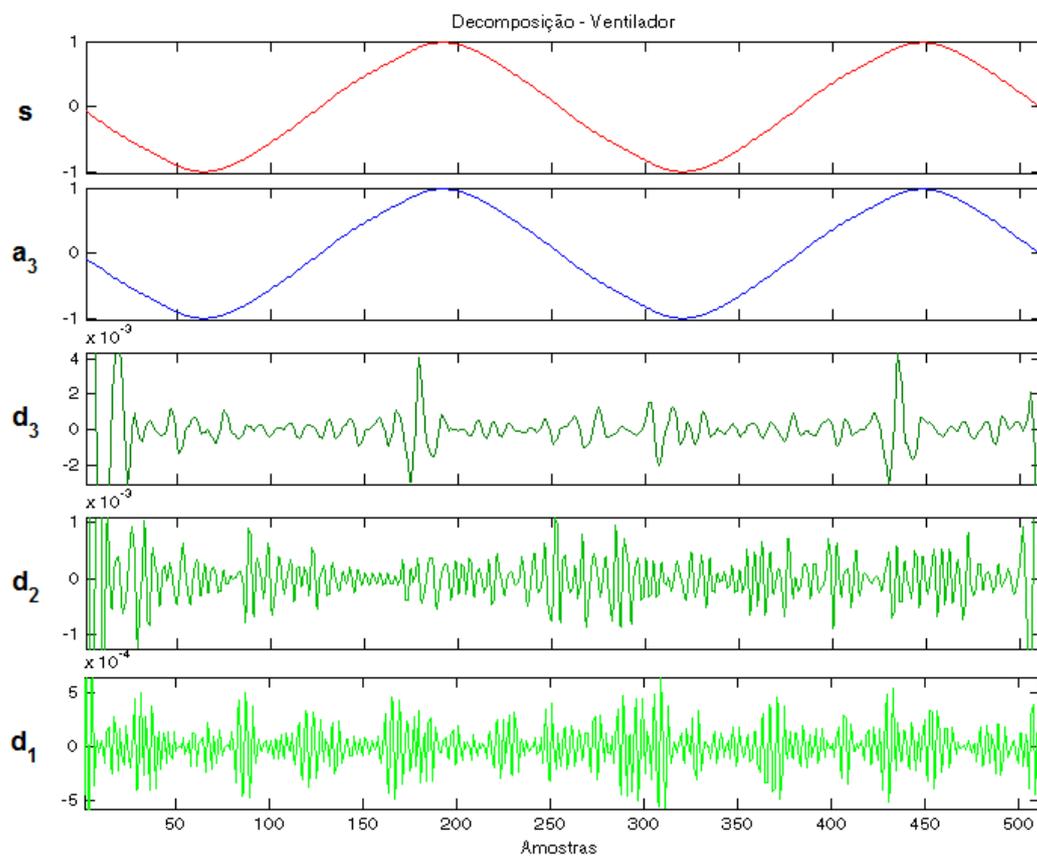


Figura 3.41 - Transformada Wavelet da onda de corrente do ventilador.

A Fig. 3.42 apresenta a decomposição relativa à forma de onda de corrente da lâmpada LED. Este equipamento destaca-se dos demais por apresentar formas de onda dos detalhes que podem se confundir com os detalhes de equipamentos resistivos ou mesmo de equipamentos motorizados, e forma de onda da aproximação que se diferencia de todos os demais analisados, portanto, é razoável que seja separado dos demais com certa facilidade. Vale observar que esta forma de onda é semelhante à de uma fonte de corrente ponte H [17].

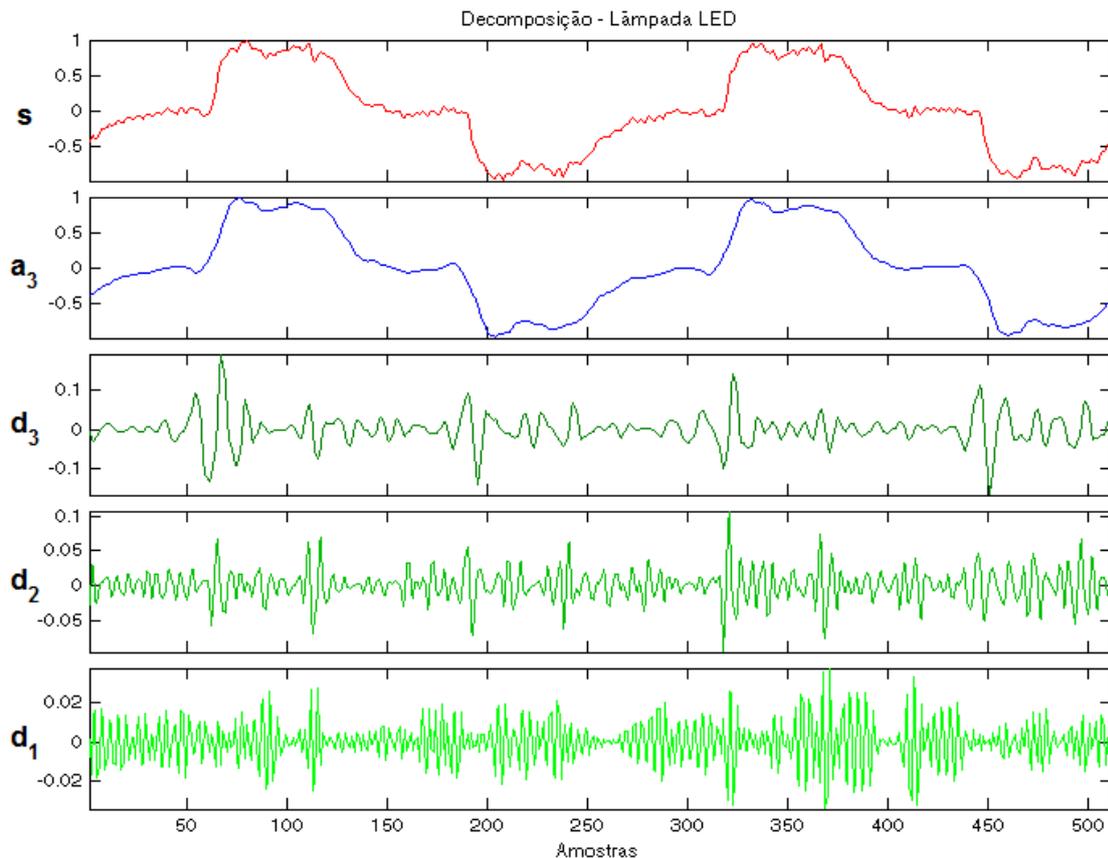


Figura 3.42 - Transformada Wavelet da onda de corrente da lâmpada de LED.

3.5.1 Discussão

A complexidade do problema da caracterização das cargas elétricas residenciais exige que se façam quantas análises quanto forem necessárias até que se chegue a um resultado conclusivo ou ao menos aceitável, dependendo da aplicação que será dada a esta caracterização.

Como visto ao decorrer desta seção, a aplicação da Transformada Wavelet às formas de onda de corrente elétrica dos equipamentos eletrodomésticos auxilia mas não é decisiva a ponto de ser utilizada como única forma de classificação dos equipamentos. Embora se trate de uma análise num domínio híbrido, sua resposta é dada no domínio do tempo, o que faz com que a comparação de resultados, por exemplo, numa matriz de confusão [16] tenha que ser feita em conjunto com outra ferramenta que dê os resultados de forma mais direta e comparável.

Em alguns casos, como nos equipamentos a fontes chaveadas, a análise Wavelet mostrou tanto semelhanças quanto diferenças, o que afinal é a grande questão complicadora da classificação de cargas residenciais: equipamentos que possuem as mesmas características podem ser classificados diferentes ou o contrário.

Portanto, outro resultado importante que se chega ao final desta seção é a necessidade de combinar a análise Wavelet com outra, por exemplo, a realizada na seção anterior. As informações reveladas pela análise harmônica quando utilizadas como ponto de partida podem direcionar uma divisão dos equipamentos.

4 Conclusão

Este trabalho apresentou uma proposta de caracterização das cargas elétricas residenciais, levando em consideração seu espectro harmônico e sua forma de onda decomposta em aproximação e níveis de detalhe numa análise em multirresolução, de modo a conhecer seus impactos na rede elétrica de distribuição.

A utilização da Transformada Rápida de Fourier no cálculo dos coeficientes da Série de Fourier e, portanto, das amplitudes das componentes harmônicas se mostrou importante para o conhecimento da poluição elétrica a qual o sistema é submetido diariamente. Isto fica claro uma vez que, ao ser aplicada à onda da tensão que foi imposta aos equipamentos, esta apresentou pequenas amplitudes de componentes harmônicos de 3ª e 5ª ordem, mostrando que o sistema não consegue manter-se com a forma de onda apenas com frequência fundamental de 60 Hz, o que influenciou nos resultados obtidos para as correntes.

A utilização da Análise em Multirresolução dos sinais de corrente elétrica, obtida a partir da aplicação da Transformada Wavelet se mostrou importante para aprimorar a análise harmônica. Com ela foi possível complementar o estudo, possibilitando aprimorar a divisão feita com a análise harmônica (poucos ou muitos harmônicos). Também foi possível identificar algumas diferenças entre equipamentos agrupados por semelhança.

O que se conseguiu de cada ferramenta utilizada no trabalho é mostrado resumidamente no esquema da Fig. 4.1.



Figura 4.1 - Contribuição de cada ferramenta.

A Tab. 4.1 mostra uma divisão feita com base nas duas análises. As cargas foram divididas em resistivos, motorizados e eletrônicos (a fontes chaveadas), além da Lâmpada de LED que não apresenta características suficientes que a agrupe com os demais equipamentos.

Tabela 4.1 - Divisão dos equipamentos em grupos.

Grupos	Equipamentos
Resistivos	Cafeteira
	Chuveiro Elétrico
	Lâmpada Incandescente 100 W
	Torradeira
Motorizados	Batedeira
	Espremedor de Laranja
	Geladeira
	Ventilador
Eletrônicos	<i>Desktop</i>
	<i>Notebook</i>
	TV de LCD
	TV de Tubo
Outros	Lâmpada de LED

Foi abordada na introdução do trabalho a importância do conhecimento da caracterização de cada equipamento residencial, do ponto de vista da qualidade de energia que a rede elétrica deve entregar a seus consumidores e, também, do ponto de vista das inovações propostas com as tecnologias das redes inteligentes (*Smart Grids*). Acredita-se que o presente trabalho possa ajudar como ponto de partida para o conhecimento maior da carga residencial e que seja de alguma utilidade na construção de um Dicionário de Cargas.

4.1 Trabalhos Futuros

O desenvolvimento do trabalho baseou-se num número restrito de equipamentos residenciais, de modo a mostrar a funcionalidade do processo de análise. Existem ainda equipamentos dos tipos mais variados que não foram testados como, por exemplo, os equipamentos bifásicos ou mesmo trifásicos, que também estão presentes em muitas áreas residenciais.

As análises feitas a partir da Transformada Rápida de Fourier levam ao conhecimento do espectro harmônico, explorado no presente trabalho. Pode-se pensar numa análise espectral dos diversos elementos da Transformada Wavelet. Com relação a mesma, pode-se ser estudado o efeito de diferentes decomposições dos sinais analisados.

Como propostas de continuidade, podem-se destacar os seguintes itens:

- Aumento do número de equipamentos considerados;
- Avaliação do impacto em cada fase de equipamentos bifásicos ou trifásicos;
- Análise da decomposição do sinal de “impedância no domínio do tempo” (relação entre tensão e corrente no domínio do tempo).

Referências Bibliográficas

- [1]. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “*Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)*”, Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>, Acessado em 25/06/2012, às 10:53h.
- [2]. PIRES, I., “*Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica*”, Dissertação de M.Sc., UFMG, 2006.
- [3]. PRADO, C., “*Sistema de Monitoração de Carga Elétrica Residencial com Implementação para Diferentes Cenários de Aplicação*”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, 2006.
- [4]. CAÑÓN, A., “*Sistema Neural de Monitoração Não Invasiva de Carga Elétrica Residencial*”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, 2009.
- [5]. RODRIGUES, R., “*Reconhecimento de cargas elétricas monofásicas não-lineares através da decomposição Wavelet e de redes neurais artificiais*”, Dissertação de M.Sc., UNIFEI, 2009.
- [6]. GAO, R.; YAN, R., “*Wavelets. Theory and Applications for Manufacturing*”, Chapter 2, Springer, 2011.
- [7]. GÓMEZ, P., URIBE, F., “*The Numerical Laplace Transform: An Accurate Technique for Analyzing Electromagnetic Transients on Power System Devices*”, International Journal of Electrical Power & Energy System, 2008.
- [8]. COOLEY, J., TUKEY, O., “*An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series*”, Math. Comput. 19, 297-301, 1965.
- [9]. MALLAT, S., “*A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation*”. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11(7), 674-693, 1989.
- [10]. COHEN, A.; KOVACEVIC, J., “*Wavelets: The Mathematical Background*”, Proc. IEEE, vol. 84, no.4, pp. 514-522, 1996.
- [11]. GRAPS, A., “*An Introduction to Wavelets*”, IEEE Computational Science & Engineering, pp. 50-61, 1995.

- [12]. RAMIREZ, A.; CHAVEZ, J.; DINAVAHI, V.; IRAVANI, R.; MARTINEZ, J.; JATSKEVICH, J.; CHANG, G., “*Interfacing Techniques for Time-Domain and Frequency-Domain Simulation Methods*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1796-1807, 2010.
- [13]. GOSWAMI, J.; CHAN, A., “*Fundamentals of Wavelets Theory, Algorithms and Applications*”, New York, 1999.
- [14]. MANJUNATH, A., RAVIKUMAR, H. “*Comparison of Discrete Wavelet Transform (DWT), Lifting Wavelet Transform (LWT), Stationary Wavelet Transform (SWT) and S-Transform in Power Quality Analysis*”, European Journal of Scientific Research, Vol. 39, No. 4, 2010.
- [15]. PESQUET, J., KRIM, H., CARFANTAN, H., “*Time-Invariant Orthonormal Wavelet Representations*”, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 44, No. 8, 1996.
- [16]. PRESS, W., TEUKOLSKY, S., VETTERLING, W., FLANNERY, B., “*Numerical Recipes - The Art of Scientific Computing*”, Cambridge University Press, Third Edition, 2007.
- [17]. MOHAN, UNDELAND, ROBBINS, “*Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*”, 2nd Edition, John Wiley, 1994.
- [18]. KOHAVI, R., PROVOST, F., “*Glossary of Terms, Editorial for the special issue on Application of Machine Learning and the Knowledge Discovery Process*”, Vol. 30, No. 2/3, 1998.

Apêndice A – Parte Computacional

EXEMPLO – onda retangular

```
tic
clear all;
close all;
clc;

t = 0:1/255:20;

y = 0;
for n = 1:2:30000
    y = y + (1/n)*sin(n*t);
end

plot(t,y);
title('Onda retangular')
ylabel('Amplitude')
xlabel('Tempo')

wavemenu
toc
```

EXEMPLO FFT

```
clear all;
close all;
clc

t = 0:.001:1;
f = sin(2*pi*t)+1/5*sin(5*2*pi*t)+1/9*sin(9*2*pi*t);

plot(t,f);
title('Exemplo f(t) =
sen(\omegat)+1/5*sen(5\omegat)+1/9*sen(9\omegat)')
ylabel('Amplitude')
xlabel('t')
N = length(f);

figure(2)
F = fft(f);
h = 0:9;
bar(h,abs(F(1:10)))
title('Resultado da aplicação direta da FFT')
ylabel('Amplitude')
xlabel('Ordem harmônica')
```

```

figure(3)
F = fft(f)*2/N;
h = 0:9;
bar(h,abs(F(1:10)))
title('Resultado da obtenção dos coeficientes da Série de Fourier')
ylabel('Amplitude')
xlabel('Ordem harmônica')
axis([-1 10 0 1.05])

```

PROGRAMA PRINCIPAL

```

close all;
clear all;
clc;
tic

%%%%% Importação de dados
pasta Equip=[pwd '\Equipamentos_tcc'];
fileList = getallfiles(pasta Equip);
[num,txt]=xlsread('Equipamentos');
codigo_nome=txt(2:end,2:3);
eletro={};
nome_antigo=' ';
indice=1;
numero_curva=0;
n_csv=0;
armazena={};

for i = 1:numel(fileList)
    a = cell2mat(fileList(i));
    k = 1;
    l = [];
    while k < numel(a)
        if (a(k) == '\')
            l = [l k];
        end
        if (a(k)=='.')
            p = k;
        end
        k=k+1;
    end

    nl=numel(l);
    tipo=a(p+1:end);

    if (tipo ~= 'csv')
        continue;
    else
        n_csv=n_csv+1;
    end

    nome = a(l(nl-1)+1:l(nl)-1);

```

```

if (numel(nome) == numel(nome_antigo))
    if (nome == nome_antigo)
        numero_curva = numero_curva+1;
    else
        numero_curva = 1;
    end
else
    numero_curva = 1;
end

nome_antigo = nome;

[x,y] = size(codigo_nome);
for j = 1:x
    t = cell2mat(codigo_nome(j,2));
    if (numel(nome) == numel(t))
        if (t == nome)
            cod = cell2mat(codigo_nome(j,1));
            cod = num2str(cod);
            if (numero_curva < 10)
                cod = [cod '0' num2str(numero_curva)];
            elseif (numero_curva > 10)
                cod = [cod num2str(numero_curva)];
            end
            cod=str2num(cod);
            break;
        end
    end
end

M=csvread(a,2,0);
A=M;

if (numero_curva == 1)
    armazena = [armazena; num2cell(cod) nome_antigo];
end

nome2 = nome;
nome2 = [nome2 ' curva ' num2str(numero_curva)];
eletro=[eletro; num2cell(cod) cellstr(nome2)];

x1 = 8192-511; % Primeiro ponto da amostra
x2 = 8192; % Último ponto da amostra

n = x2-x1+1; % Número de amostras
deltaT = (1/60)/256;
t = deltaT*M(x1:x2,1);

% Armazenamento dos dados
Dados(1,n_csv) = cod;
Dados(2,n_csv) = n;
auxffti = fft(M(x1:x2,2));
auxffti(1) = 0;
Dados(3:n+2,n_csv) = ifft(auxffti);
DadosV(1,n_csv) = cod;
DadosV(2,n_csv) = n;
auxfftv = fft(M(x1:x2,3));
auxfftv(1) = 0;
DadosV(3:n+2,n_csv) = ifft(auxfftv);
end

```

```

% FFT da corrente e da tensão
for kk = 1:size(Dados,2)
    FFTi(1, kk) = Dados(1, kk);
    FFTi(2, kk) = Dados(2, kk);
    FFTi(3:n+2, kk) = fft(Dados(3:n+2, kk))/(n/2);
    FFTv(1, kk) = DadosV(1, kk);
    FFTv(2, kk) = DadosV(2, kk);
    FFTv(3:n+2, kk) = fft(DadosV(3:n+2, kk))/(n/2);
end

% Normalização pelo valor máximo
for mm = 1:size(Dados,2)
    vmax = max(DadosV(3:end, mm));
    imax = max(Dados(3:end, mm));
    Dados(3:end, mm) = Dados(3:end, mm)/imax;
    DadosV(3:end, mm) = DadosV(3:end, mm)/vmax;
end

% Fator de Potência
for c = 1:size(Dados,2)
    FP(c, :) = cos(angle(FFTv(5, c)) - angle(FFTi(5, c)));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Gráficos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
arm = cell2mat(armazena(:,1));
for m=1:size(Dados,2)
    figure;
    plot(t,Dados(3:end,m), 'b-.', 'LineWidth',1.7);
    hold on;
    plot(t,DadosV(3:end,m), 'r', 'LineWidth',1.2);
    ee = find(arm == Dados(1,m));
    title(cell2mat(armazena(ee,2)));
    ylabel('Amplitude [pu]')
    xlabel('Tempo [s]')
    legend('Corrente','Tensão','Location','Best')
    axis([t(1) t(end) -1.1 1.1]);
    hold off;
    print -dpng
end

for m=1:size(FFTi,2)
    figure;
    fimax = max(abs(FFTi(3:30,m)));
    bar(0:27,abs(FFTi(3:30,m))/fimax);
    ee = find(arm == FFTi(1,m));
    title(['Corrente - ' cell2mat(armazena(ee,2))]);
    legend('Coeficientes da Série de Fourier')
    xlabel('Ordem harmônica')
    ylabel('Amplitude [pu]')
    axis([-5 30 0 1.05])
end

% Utilização o wavemenu
btd = Dados(3:end,1);
caf = Dados(3:end,2);
chv = Dados(3:end,3);
dkt = Dados(3:end,4);

```

```

esp = Dados (3:end, 5);
gel = Dados (3:end, 6);
inc = Dados (3:end, 7);
led = Dados (3:end, 8);
nbk = Dados (3:end, 9);
lcd = Dados (3:end, 10);
tub = Dados (3:end, 11);
tor = Dados (3:end, 12);
ven = Dados (3:end, 13);

wavemenu

toc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fim do programa %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

FERRAMENTA WAVEMENU

A Fig. A.0.1 mostra a interface da importação de um sinal do *workspace* do *Matlab* para ser analisado na ferramenta *wavemenu*.

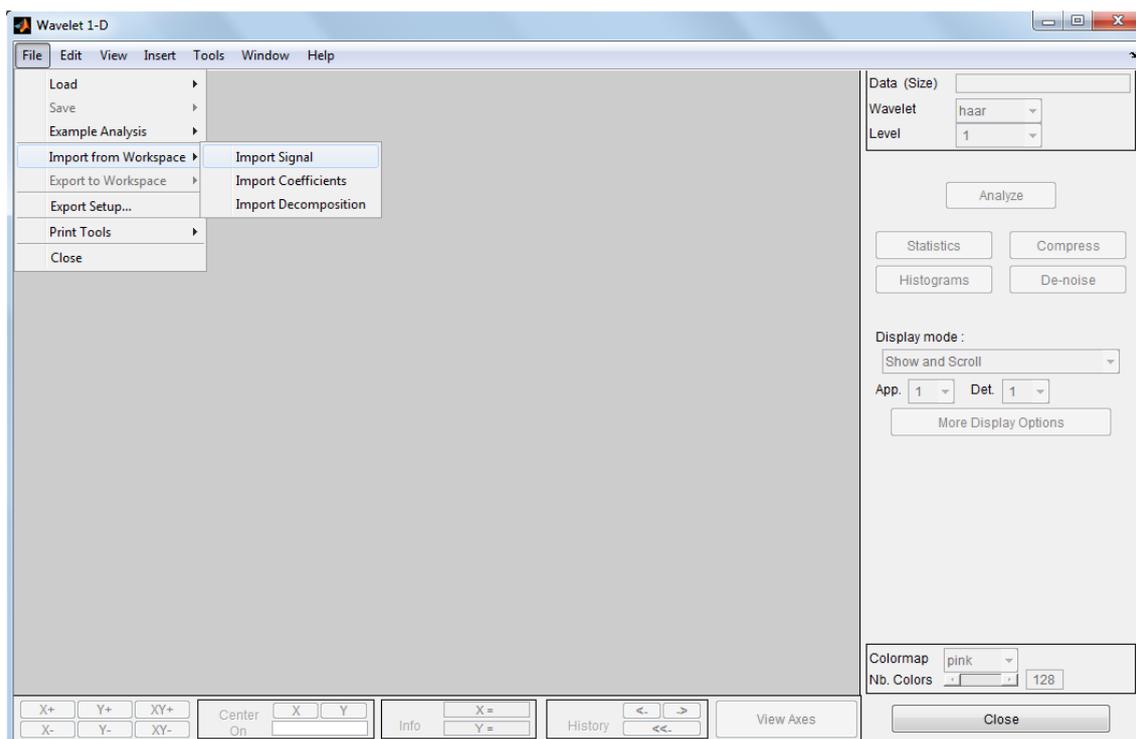


Figura A.0.1 - Interface da ferramenta *wavemenu* do *Matlab*.

Apêndice B – Hardware do Equipamento

Estas informações foram retiradas da referência:

- DE LIMA, A. C. S.; DA SILVA, A. P. A.; FERNANDES, D. M.; DA SILVA, E. S. V.; DOS REIS, D. C. S.; NASCIMENTO, D. M., “*Monitoramento Não Invasivo de Cargas Elétricas Residenciais*”, Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, SENDI 2012.

A Fig. B.0.1 mostra a estrutura geral do protótipo. Nela pode-se identificar os transdutores de corrente e tensão, ambos construídos a partir de resistores para maximização da resposta em frequência do sistema. Depois disso cada canal possui um filtro passa-baixas com 95 dB de atenuação, de forma a satisfazer os requisitos do teorema de Nyquist para a digitalização dos dados. Têm-se então os conversores A/D propriamente ditos, seguidos da barreira de isolamento que permite que cada canal opere em um potencial diferente, garantindo mais de 1000 V de isolamento entre eles. Depois disso o sistema de disparo, recepção, filtragem digital e transmissão efetua estas operações e por fim transmite os resultados usando o protocolo UDP sobre uma conexão Ethernet para o sistema de processamento de dados.

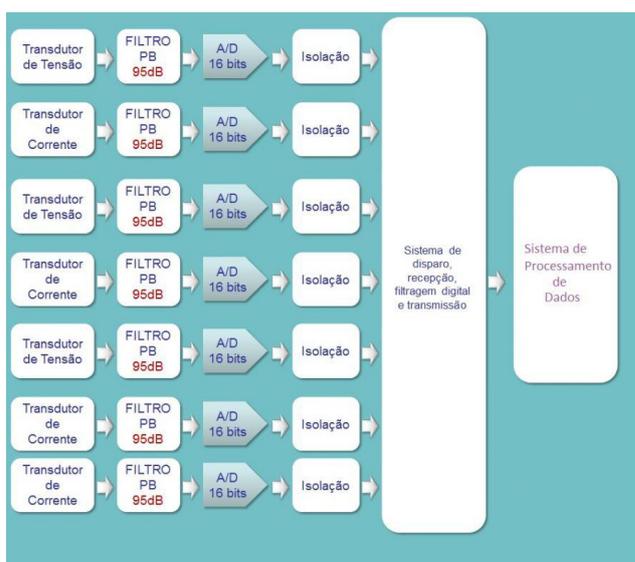


Figura B.0.1 - Estrutura do protótipo e foto do front-end de aquisição de dados.

Na Fig. B.0.2 temos um diagrama geral da operação do protótipo. Os sinais de corrente e tensão, após passagem pelos sensores, são digitalizados pelo *front-end* e enviados para a unidade de processamento. Após comparar os sinais período a período, diferenças são identificadas e consultadas em um dicionário construído após diversas transformações matemáticas do sinal. A entrada do dicionário mais semelhante à atual é selecionada como dispositivo mais provável de ter sido acionado, e seu acionamento é armazenado em uma lista em memória não-volátil juntamente com a hora de ocorrência.

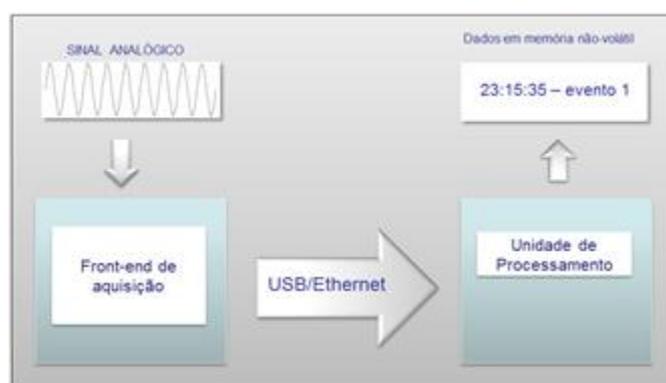


Figura B.0.2 - Diagrama geral de operação.

A Fig. B.0.3 mostra o diagrama de blocos do hardware do IDCarga. A corrente da residência passa em resistores shunt, sendo transformada em uma tensão de baixo valor, que é amplificada pelo condicionador de sinal. Este sinal amplificado é filtrado por um passa-baixa analógico e, a seguir, digitalizado a uma taxa de aproximadamente 4096 amostras por período. A seguir o sinal passa por um filtro passa-baixas digital e depois sofre uma decimação (*downsampling*) por um fator de 16, restando aproximadamente 256 amostras por período. Estes dados são então enfileirados, aguardando que um microcontrolador os envie pela interface de rede para a unidade de processamento onde serão tratados pelo software de identificação de cargas.

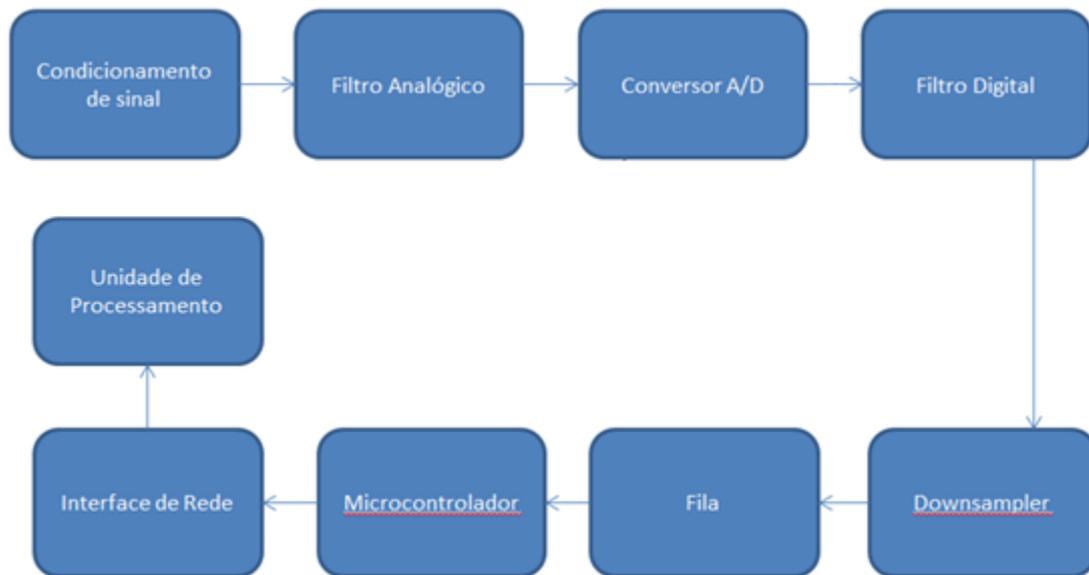


Figura B.0.3 - Arquitetura do Hardware.

O sistema de processamento de dados foi migrado para uma placa de desenvolvimento Pandaboard baseada em ARM Cortex-A9 que substituiu um PC com placa-mãe embarcada mini-ITX da Intel.