

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS E PROCESSOS  
INDUSTRIAIS – MESTRADO  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM CONTROLE  
E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Jaime André Back

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO VOLTADO AO  
GERENCIAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Santa Cruz do Sul

2013

Jaime André Back

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO VOLTADO AO  
GERENCIAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais – Mestrado, Área de concentração em Controle e Otimização de Processos Industriais, Linha de Pesquisa em Monitoramento, Simulação e Otimização de Sistemas e Processos, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção ao título de Mestre em Sistemas e Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Leonel Pablo Tedesco

Santa Cruz do Sul

2013

Jaime André Back

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO VOLTADO AO  
GERENCIAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Esta dissertação foi submetida ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais – Mestrado, Área de concentração em Controle e Otimização de Processos Industriais, Linha de Pesquisa em Monitoramento, Simulação e Otimização de Sistemas e Processos, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção ao título de Mestre em Sistemas e Processos Industriais.

Dr. Leonel Pablo Tedesco

Professor Orientador – UNISC

Dr. Rolf Fredi Molz

Professor Examinador – UNISC

Dr. Ivan Müller

Professor Examinador – UFRGS

Santa Cruz do Sul  
2013

*Dedico este trabalho à minha noiva Fernanda pela compreensão, paciência e apoio em todos os momentos. Aos meus pais, Dirceu e Teresinha, em especial a minha mãe, pela sua atenção e carinho, sempre disposta, cuidando para que nada me faltasse.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente a minha família pelo constante incentivo, apoio e compreensão em todos os momentos de ausência, em virtude da dedicação necessária para a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor orientador Leonel Pablo Tedesco pela orientação segura, atenção constante, disposição e profissionalismo durante a realização deste trabalho, e principalmente pelo respeito e amizade cultivados durante todo este período.

Da mesma forma agradeço a todos os professores, em especial as professoras Liane Kipper e Rejane Frozza e ao professor Rolf Fredi Molz pelo conhecimento repassado, e pelas críticas sempre construtivas. A Janaína Haas, sempre disposta a ajudar, aos demais colegas, colaboradores e amigos do PPGSPI UNISC pelas horas de estudos e de convívio.

Ao *expert* Marco Gobbi pela ajuda nos códigos do dsPIC e ao Sr. Vanderlei Carvalho e demais colegas da empresa CTS Brazil Tabaccos, sinceros agradecimentos pela contribuição, pela confiança e pelo grande apoio durante a etapa de implementação, teste e validação do sistema.

Também agradeço à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela concessão da minha bolsa de mestrado.

Por fim, agradeço a todos os demais que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado para monitoração da energia elétrica em processos industriais. O objetivo principal deste estudo foi desenvolver uma metodologia para o gerenciamento da energia elétrica (monitoração, aquisição e análise), através da coleta de parâmetros elétricos, utilizando para isso técnicas de processamento digital de sinais (DSP). Os dados coletados permitiram, de forma rápida e precisa, a detecção de perturbações elétricas, além do registro de consumo de energia elétrica nos processos de produção possibilitando assim traçar a curva de demanda da empresa. Inicialmente, o trabalho foi desenvolvido em laboratório utilizando protótipos e ferramentas de simulação, com o intuito de comprovar a validade da proposta. Posteriormente, se desenvolveu o dispositivo embarcado (*hardware* e *software*) responsável pela aquisição e registro dos sinais, utilizando tecnologias de baixo custo, como microcontroladores dsPIC e plataformas como o *FriendlyARM*<sup>®</sup> MINI2440. Por fim, para análise *offline* dos dados, foram criados dois aplicativos: um para rodar em computador de propósito geral (PC), utilizando o Matlab<sup>®</sup>; e outro, derivado do primeiro, para rodar no dispositivo embarcado. Ambas aplicações utilizaram como principal técnica de detecção de perturbações as Transformadas *Wavelets* Discretas. Como resultado, a criação de um sistema completo para monitoração e análise de parâmetros elétricos, servindo como ferramenta de auxílio para o gerenciamento da energia elétrica nos processos industriais. Por fim, com a finalidade de demonstrar a eficácia deste sistema, foi realizado um estudo de caso que compreendeu a sua instalação em uma linha de beneficiamento de tabaco, alimentada por uma subestação de 500 kVA.

**Palavras-chaves:** Processamento Digital de Sinais, Transformadas *Wavelets* Discretas, Sistemas Embarcados, Perturbações Elétricas.

## ABSTRACT

This paper presents the development of an embedded system for monitoring electricity in industrial processes. The main objective of this study was to develop a methodology for managing electricity (monitoring, acquisition and analysis), through the collection of electrical parameters, using techniques that digital signal processing (DSP). The data collected allowed, quickly and accurately detect electrical disturbances, in addition to record electricity consumption in production processes thus enabling trace the demand curve of the firm. Initially, the study was conducted in the laboratory using prototypes and simulation tools, in order to prove the validity of the proposal. Later, it developed the embedded device (hardware and software) responsible for the acquisition and recording of signals using low-cost technologies, such as dsPIC microcontrollers and platforms like FriendlyARM<sup>®</sup> MINI2440. Finally, for offline analysis of the data were created two applications: one to run on general purpose computer (PC) using Matlab<sup>®</sup>; and another, derived from the first, to run on the embedded device. Both applications used as primary technique disturbances detection the Discrete Wavelet Transforms. As a result, creating a complete system for monitoring and analysis of electrical parameters, serving as a tool to aid the management of electricity in industrial processes. Finally, in order to demonstrate the effectiveness of this system, we performed a case study that included the installation in a row of tobacco processing, fed by a 500 kVA substation.

**Keywords: Digital Signal Processing, Discrete Wavelet Transform, Embedded Systems, Electrical Disturbances.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Demanda contratada <i>Versus</i> demanda consumida .....	19
Figura 2 – Diagrama contendo os principais distúrbios relacionados à QEE .....	23
Figura 3 – Principais distúrbios associados à QEE .....	26
Figura 4 – Transitório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores .....	27
Figura 5 – Fenômeno de ferorrressonância em energização de transformadores .....	27
Figura 6 – Distribuição dos distúrbios em função da frequência .....	28
Figura 7 – Afundamento de tensão .....	30
Figura 8 – Elevação na tensão .....	31
Figura 9 – Falta momentânea.....	31
Figura 10 – Caracterização de um afundamento (Normas Brasileira e Americana).....	33
Figura 11 – Distorções na forma de onda (ruído, <i>notches</i> e harmônicos) .....	34
Figura 12 – Valores eficazes de afundamento de tensão.....	36
Figura 13 – Transitório em uma fase e a NEI.....	37
Figura 14 – Transformada de <i>Fourier</i> Janelada .....	39
Figura 15 – Afundamento de tensão e os coeficientes de detalhes da TW .....	40
Figura 16 – Transformadores de corrente (TC).....	41
Figura 17 – Janelamento utilizado para amostragem de dados.....	42
Figura 18 – Sinal senoidal (a), reconstrução das amostras (b) e efeito <i>aliasing</i> (c) .....	43
Figura 19 – Decomposição de sinais de um sinal com perturbação.....	44
Figura 20 – Demonstração do fator de escala em uma função senoide .....	47
Figura 21 – Translação de uma função <i>Wavelet</i> .....	48
Figura 22 – Decomposição de sinais utilizando TWD .....	49
Figura 23 – Arvore de decomposição <i>wavelet</i> até o nível 3 .....	49
Figura 24 – Decomposições sucessivas. L = filtro passa-baixa e H = filtro passa-alta .....	50
Figura 25 – Exemplo da decomposição por AMR.....	51
Figura 26 – <i>Wavelet</i> mãe Haar .....	52
Figura 27 – <i>Wavelet</i> mãe Daubechies .....	52
Figura 28 – <i>Wavelet</i> mãe Biortogonais.....	53
Figura 29 – <i>Wavelet</i> mãe Symlets .....	53
Figura 30 – <i>Wavelet</i> mãe Coiflets .....	54
Figura 31 – <i>Wavelet</i> mãe MexiHat, Meyer e Morlet.....	54
Figura 32 – Elementos de um sistema embarcado .....	57
Figura 33 – Etapas que compreendem o desenvolvimento do projeto .....	62
Figura 34 – Diagrama de blocos do sistema proposto (etapas 3 e 4).....	63
Figura 35 – Divisão e fluxo de desenvolvimento do sistema .....	64
Figura 36 – Esboço dos sensores de corrente e sistema DSP .....	65
Figura 37 – Fluxo de sinais no cenário de estudo .....	66
Figura 38 – Circuito condicionador (Retificador de Precisão) .....	67
Figura 39 – Sinais de entrada e saída do condicionador.....	67
Figura 40 – Visualização das placas de condicionamento (simples e RST).....	68



Figura 41 – Estrutura genérica do dsPIC30F .....	69
Figura 42 – Sinais de I/O utilizados no $\mu$ C dsPic30F3012 .....	71
Figura 43 – Sinais de I/O utilizados no $\mu$ C dsPic30F4013 .....	72
Figura 44 – Protótipo desenvolvido e integrado (placa dsPic30F4013).....	73
Figura 45 – Fluxo do algoritmo de aquisição .....	74
Figura 46 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido para o dsPIC .....	75
Figura 47 – Sistema Embarcado MINI2440 da <i>FriendlyARM</i> .....	76
Figura 48 – Características do SE <i>FriendlyARM</i> MINI2440.....	77
Figura 49 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido para o MINI2440.....	78
Figura 50 – Integração entre SE MINI2440 e SAD.....	79
Figura 51 – Simulação de chaveamento de capacitores utilizando o Simulink .....	80
Figura 52 – Esquema de decomposição proposta por Mallat.....	82
Figura 53 – Passo-a-passo para decomposição <i>wavelet</i> até o nível 3.....	83
Figura 54 – Diagrama de Fluxo da TWD .....	84
Figura 55 – Exemplo de algoritmo para análise TWD .....	85
Figura 56 – Algoritmo SE <i>Versus</i> Matlab (TWD Haar nível 1).....	87
Figura 57 – Algoritmo SE <i>Versus</i> Matlab (TWD Haar nível 2 e 3) .....	88
Figura 58 – Análise TWD para dados de consumo (Algoritmo SE <i>Versus</i> Matlab) .....	88
Figura 59 – Gráfico de saída para dados de consumo (Algoritmo SE <i>Versus</i> Matlab)....	89
Figura 60 – <i>Toolbox</i> GUIDE – Tela de desenvolvimento da aplicação gráfica.....	90
Figura 61 – Tela inicial do software de Análise de QEE e EE .....	91
Figura 62 – Subestação de Alta Tensão .....	95
Figura 63 – Sala de comando da subestação .....	96
Figura 64 – Quadro de comando e sistema de proteção de um transformador.....	97
Figura 65 – TCs presentes na saída dos transformadores .....	97
Figura 66 – Instalação série do condicionador ao amperímetro e ao TC.....	98
Figura 67 – TCs conectados aos condicionadores de sinal .....	99
Figura 68 – Instalação paralela do condicionador ao TP .....	100
Figura 69 – TPs conectados à placa condicionadora RST.....	100
Figura 70 – Captura da tensão de fase com instrumentos comerciais.....	101
Figura 71 – Captura da corrente de fase com instrumentos comerciais .....	102
Figura 72 – Arquivo salvo na <i>flash</i> com informações coletadas pelo SAD .....	102
Figura 73 – Integração de dois SADs ao SE MINI2440 .....	103
Figura 74 – Análise do consumo de energia do dia 01/11/2012 .....	105
Figura 75 – Gráfico com as correntes IR de três transformadores .....	106
Figura 76 – Gráfico com as correntes IR de diferentes dias.....	107
Figura 77 – Gráfico do modelo de consumo.....	107
Figura 78 – Análise do consumo diário com perturbação .....	108
Figura 79 – Análise por TWD – <i>wavelet</i> mãe Haar nível 1.....	109
Figura 80 – Análise por TWD – <i>wavelet</i> mãe db4 nível 2 .....	109
Figura 81 – Correntes das fases RST (detalhe: perturbações similares).....	111
Figura 82 – Gráfico de Tensão e Corrente <i>Versus</i> Tempo na fase R.....	112
Figura 83 – Arquivo contendo o registro de sobre-tensão .....	112
Figura 84 – Gráfico de sobre-tensão e afundamento de corrente .....	113
Figura 85 – Análise de elevação de tensão por TWD .....	114

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Classificação das variações de tensão de curta duração (VTCDs).....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 2 – Comparação entre os trabalhos pesquisados .....</b>	<b>61</b>
<b>Tabela 3 – Famílias <i>Wavelets</i> disponíveis no Matlab .....</b>	<b>92</b>
<b>Tabela 4 – Comparação entre as famílias de TW.....</b>	<b>110</b>

## **LISTA DE CÓDIGOS**

<b>Listagem 1 – Simulação do chaveamento de banco de capacitores na rede elétrica .....</b>	<b>81</b>
<b>Listagem 2 – Trecho de código em C para análise TWD (algoritmo de Mallat) .....</b>	<b>86</b>
<b>Listagem 3 – Trecho de código em C para análise TWD (intensidade de cD).....</b>	<b>86</b>
<b>Listagem 4 – Algoritmo implementado no Matlab para análise TW Haar (nível 1) .....</b>	<b>89</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Analógico/Digital
ADC	<i>Analogic/Digital Converter</i>
AMR	Análise Multi-Resolução
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CNI	Confederação Nacional da Indústria
DHT	Distorção Harmônica Total
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
EE	Eficiência Energética
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FP	Fator de Potência
FPGA	<i>Application Specific Integrated Circuit</i>
GUIDE	<i>GUI Design Environment</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
MLP	<i>Multilayer Perceptron</i>
NEI	Norma Euclidiana Instantânea
PCI	Placa de Circuito Impresso
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNA	Rede Neural Artificial
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SE	Sistemas Embarcados
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TF	Transformada de <i>Fourier</i>
TFJ	Transformada de <i>Fourier</i> Janelada
TW	Transformada <i>Wavelet</i>
TWC	Transformada <i>Wavelet</i> Contínua
TWD	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampères
Hz	Hertz
mA	Miliapères
$I_{RMS}$	Corrente Eficaz ou <i>True</i> RMS
pu	Valor por unidade
V	Volt
$V_{CA}$	Tensão em corrente alternada
$V_{CC}$	Tensão em corrente contínua
$V_L$	Tensão de linha
$V_{Mag}$	Magnitude do evento ou desvio mais significativo da tensão
$V_n$	Tensão nominal
$V_{res}$	Tensão residual
$V_{RMS}$	Tensão Eficaz ou <i>True</i> RMS
$V_P$	Tensão de pico
$t_i$	Instante inicial
$t_f$	Instante final
W	Watt
Z	Impedância
$\psi$	<i>Wavelet</i> mãe
$\Delta t$	Duração do evento
$\mu C$	Microcontrolador

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	Objetivo Geral .....	20
1.2	Objetivos Específicos.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>22</b>
2.1	Distúrbios relacionados à QEE .....	22
2.1.1	Por que monitorar a QEE.....	24
2.1.2	Como monitorar a QEE .....	24
2.1.3	Indicadores de QEE .....	25
2.2	Identificação e classificação de distúrbio de QEE .....	25
2.2.1	Transitórios oscilatórios.....	26
2.2.2	Variações de tensão de curta duração (VTCDs).....	30
2.2.3	Variações de tensão de longa duração .....	33
2.2.4	Distorção na forma de onda.....	34
2.2.5	Flutuações ou oscilações de tensão .....	35
2.3	Os principais métodos utilizados na identificação de distúrbios elétricos .....	35
2.3.1	Método baseado no cálculo do Valor RMS .....	36
2.3.2	Método baseado na Norma Euclidiana Instantânea (NEI).....	37
2.3.3	Método baseado na aplicação da Transformada de <i>Fourier</i> .....	38
2.3.4	Método baseado na aplicação da Transformada <i>Wavelet</i> .....	39
2.4	Detecção de distúrbios.....	40
2.4.1	Sensores .....	40
2.4.2	Amostragem de sinais.....	42
2.4.3	Teorema de <i>Nyquist</i> .....	43
2.4.4	Decomposição de sinais .....	44
2.5	Transformada <i>Wavelet</i> – TW .....	45
2.5.1	Transformada <i>Wavelet</i> Contínua (TWC).....	46
2.5.2	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta (TWD).....	48
2.5.3	A TWD – Análise Multiresolução .....	49
2.5.4	Introdução à Família <i>Wavelet</i> .....	51
2.5.5	Aplicação da TW em QEE.....	55
2.6	Sistemas Embarcados.....	56
2.6.1	Definição .....	56
2.6.2	Arquitetura .....	57
2.6.3	Sistema operacional embarcado.....	58
2.7	Trabalhos relacionados à QEE.....	59
2.8	Considerações finais .....	61
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>62</b>
3.1	Implementação do <i>hardware</i> de aquisição.....	65
3.1.1	Condicionamento do sinal.....	67

3.1.2	Sistema $\mu$ C dsPIC30F.....	69
3.2	Implementação do <i>software</i> de aquisição .....	73
3.2.1	Algoritmo de monitoração de QEE.....	73
3.2.2	<i>Software</i> desenvolvido para os dsPIC .....	74
3.3	Sistema embarcado MINI2440 .....	76
3.3.1	Interfaces utilizadas.....	77
3.3.2	<i>Software</i> embarcado .....	78
3.3.3	Integração entre SA e SE .....	79
3.4	Modelagem e simulação .....	80
3.5	Algoritmo TWD Multiresolução .....	82
3.5.1	Algoritmo AMR embarcado .....	83
3.5.2	Teste do algoritmo .....	87
3.6	Interface Gráfica Matlab - GUIDE.....	90
3.7	Considerações finais .....	93
4	<b>RESULTADOS</b> .....	94
4.1	Cenário de estudos.....	94
4.1.1	Subestação .....	95
4.2	Instalação do SAD .....	97
4.2.1	Leitura da corrente.....	98
4.2.2	Leitura da tensão .....	99
4.2.3	Calibração do SAD .....	101
4.2.4	Integração de diferentes SADs ao MINI2440.....	103
4.3	Análise dos dados coletados .....	104
4.3.1	Análise de Consumo (Eficiência Energética) .....	106
4.3.2	Modelo de Consumo .....	106
4.3.3	Análise de perturbações na corrente .....	108
4.3.4	Análise de perturbações nas correntes RST .....	111
4.3.5	Análise de perturbações na tensão utilizando Valor RMS .....	111
4.3.6	Análise de perturbações na tensão utilizando TWD .....	113
4.4	Considerações finais .....	114
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	115
	<b>APÊNDICE A: DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS UTILIZADOS NO PROJETO</b> .....	124
	<b>APÊNDICE B: CÓDIGO EM LINGUAGEM C PARA ANÁLISE TWD HAAR</b> .....	127
	<b>APÊNDICE C: ARTIGO APRESENTADO NO XXXII ENEGEP</b> .....	129

## 1 INTRODUÇÃO

O constante crescimento econômico pelo qual passa o país tem influenciado diretamente no aquecimento do setor industrial. Isto se reflete na modernização de parques e processos industriais, os quais trazem consigo uma demanda considerável de energia elétrica. Para Junior, O. (2009), a disponibilidade de energia elétrica representa para a população uma série de benefícios: por um lado as indústrias que cada vez mais ampliam sua infraestrutura e aumentam sua produção, gerando assim um incremento na disponibilidade de empregos; por outro lado, ela proporciona maior conforto e comodidade, gerando assim um acréscimo de qualidade de vida para a maioria das pessoas.

Contudo, o aumento desta demanda depende principalmente da disponibilidade da energia elétrica, tornando necessário investimentos desde sua geração, manutenção, além do impacto ambiental de uma região, no caso de criação de barragens, usinas (hidrelétricas, carvão ou nuclear) e a colocação de linhas de distribuição.

Desta forma, a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tem se tornado uma preocupação crescente e comum às empresas de energia elétrica (concessionárias estatais, cooperativas de eletrificação) e aos consumidores de modo geral (NORONHA, 1999; LEBORGNE, 2003; SOLÓRZANO, 2004). Este crescente interesse pela QEE deve-se, principalmente, à evolução tecnológica dos equipamentos eletroeletrônicos, amplamente utilizados nos diversos segmentos de atividade, sejam eles industriais, comerciais ou residenciais. Esta evolução resultou em equipamentos mais sensíveis às perturbações elétricas (GARCIA et al., 2009), sendo estas geradas principalmente pela aplicação da eletrônica de potência em diversos setores da indústria, como por exemplo, na automação de processos e na conversão de energia de CA (Corrente Alternada) para CC (Corrente Contínua).

Segundo Leborgne (2003) e Oliveira (2004), as indústrias modernizaram seus parques e processos industriais, havendo a aplicação disseminada de acionamentos por *soft-starters* e inversores de frequência, de sistemas controlados eletronicamente e de fontes chaveadas, revelando assim um aspecto importante da QEE e que diz respeito à sensibilidade destas cargas frente às variações momentâneas de tensão, que são geradas no sistema elétrico e podem ser resultantes de diversos fatores (curto-circuitos, acionamentos, mau dimensionamento), mesmo que localizadas em pontos remotos do sistema elétrico.



Para Noronha (1999) e Dugan et al. (2003), o conceito de QEE está vinculado a um conjunto de alterações que podem ocorrer, devido a diferentes fatores, no fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Em geral, os fenômenos envolvendo a qualidade da energia afetam a tensão de fornecimento na forma de variações de tensão, englobando surtos, transitórios oscilatórios e cortes na tensão.

O estudo da QEE em sistemas elétricos engloba a análise, o diagnóstico, a proposição de possíveis soluções para os problemas identificados e sua avaliação técnico-econômica (NORONHA, 1999; LEBORGNE, 2003). Conforme Garcia et al. (2009), estudos já realizados na área de geração e consumo de energia têm mostrado que as perdas técnicas, comerciais e financeiras somam custos de bilhões de dólares por ano em todo o mundo, e sua principal causa está associada à QEE.

Assim, devem-se estabelecer ações conjuntas entre as empresas de energia elétrica, consumidores e fabricantes de equipamentos, de tal forma que os problemas relativos à QEE sejam diagnosticados e solucionados antecipadamente na fase de elaboração dos projetos. Porém, é de grande importância que ações corretivas e programas de conscientização para a utilização consciente da energia elétrica sejam aplicados e mantidos permanentemente.

No Brasil, grandes instituições e agentes reguladores, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) têm se mobilizado no sentido de mensurarem o impacto financeiro devido a estes fenômenos. Deste modo, são cada vez mais comuns as solicitações de clientes, com instalações sensíveis a estes fenômenos de QEE que requerem desempenho em continuidade e conformidade do fornecimento de energia superior aos padrões estabelecidos.

Neste contexto, o seguinte trabalho aborda o estudo da QEE, bem como as metodologias utilizadas para melhorar a Eficiência Energética (EE) nos processos industriais, em indústrias de pequeno e médio porte<sup>1</sup>.

A QEE afeta diretamente o setor industrial, que consome aproximadamente 40% da energia elétrica gerada no Brasil, conforme dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI). Segundo Fernandes et al. (2009), a QEE nos últimos anos tornou-se alvo de muitas pesquisas, realizadas tanto por universidades quanto pelas próprias concessionárias de energia elétrica.

---

<sup>1</sup> Conforme PME (2012), empresas de pequeno porte (pessoa jurídica e a firma mercantil individual) com receita bruta anual superior a R\$ 244.000,00 (duzentos e quarenta e quatro mil reais) e igual ou inferior a R\$ 1.200.000,00 (um milhão e duzentos mil reais). Já a empresa de médio porte é aquela com receita bruta anual superior a R\$ 1.200.000,00 e igual ou inferior a R\$ 12.000.000,00 (doze milhões de reais).

A EE representa as atividades socioeconômicas que objetivam proporcionar um melhor consumo de energia (seja ela hídrica, elétrica, ou combustíveis fósseis). Portanto, buscar alternativas e melhorar a eficiência dos processos industriais para os gestores é mais do que uma necessidade, é questão de sobrevivência no mercado (SOLA; KOVALESKI, 2004; SILVA; DESCHAMPS; PÉRES, 2009; GARCIA et al., 2009). A redução do consumo de energia, além de ser ação de preservação do meio natural, uma vez que representa a redução da necessidade de ampliação da oferta, também proporciona retorno financeiro para as empresas.

Para o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), mobilizar a sociedade para o uso consciente e eficiente da energia elétrica, combatendo principalmente o seu desperdício, não é apenas uma atividade relativa à sustentabilidade, mas também uma ação estratégica. A economia de energia elétrica traz inúmeras vantagens, como o adiamento da necessidade de construção de novas usinas geradoras e sistemas associados, liberando recursos para outras áreas e contribuindo para a preservação do meio ambiente (ELETROBRAS, 2010).

Junior, O. (2009) também afirma que a QEE não é apenas uma preocupação comum somente das empresas de geração de energia elétrica, mas também dos consumidores de modo geral, principalmente do setor industrial, que consome parte considerável de toda a energia produzida no Brasil, sendo este setor o mais afetado.

Os fatores que influenciam na QEE podem ser originados tanto nas concessionárias como nos sistemas consumidores (MELO, 2008). Estes distúrbios, ou perturbações assim chamados, podem ser gerados por fenômenos naturais, por operações da concessionária (chaveamentos devido a operações com banco de capacitores e manutenções) ou pelos próprios consumidores (excesso de cargas, acionamento de disjuntores, sistemas motrizes, baixo fator de potência entre outros). Da mesma forma, uma maior demanda em horário de ponta<sup>2</sup> causa perturbações e desequilíbrios na rede, além de penalizações por parte da ANEEL, caso o consumo ultrapasse o limite contratado.

Torna-se importante que as indústrias tenham um gerenciamento eficaz das demandas energéticas consumidas diariamente, evitando tanto o desperdício de energia quanto a

---

<sup>2</sup> Horário de ponta ou Período de ponta (P): Período definido pela distribuidora e aprovado pela ANEEL para toda sua área de concessão considerando a curva de carga de seu sistema elétrico e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados e domingos. Neste período, a energia elétrica tem um preço significativamente maior, podendo chegar a 10 vezes o valor nominal (PRODIST, 2012).

diminuição da qualidade da mesma. Sendo assim, a eletricidade pode chegar ao consumidor com um excelente padrão de qualidade, porém seu mau gerenciamento, ou até mesmo problemas decorrentes da própria infraestrutura da empresa, pode implicar na diminuição da qualidade da energia consumida no processo industrial.

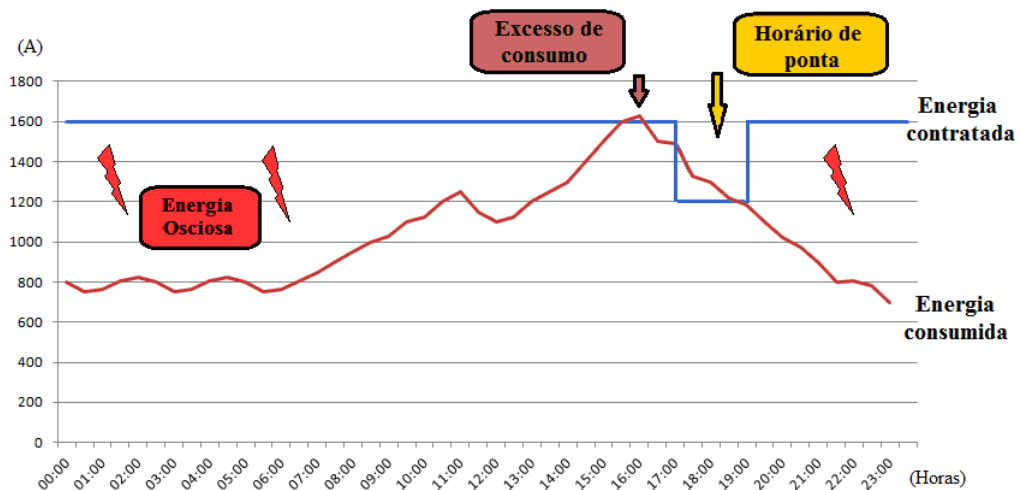
Para auxiliar na solução desses problemas, existe a necessidade de se desenvolver uma metodologia para o gerenciamento das demandas (controlar o consumo energético bem como monitorar a qualidade da energia) que atenda aos paradigmas da EE e da QEE no Brasil. Conforme Sola e Kovaleski (2004), Silva et al. (2009), as indústrias são peças importantes no contexto estudado, devido ao grande consumo de energia elétrica necessário em seus processos de produção.

Em função disto, Sola e Kovaleski (2004), citam em seus trabalhos alguns pontos relevantes para o assunto abordado neste trabalho (QEE e EE):

- Conscientização para eficiência energética;
- Gestão energética eficaz;
- Política de uso de tecnologias energeticamente eficientes;
- Monitoração da qualidade da energia consumida.

Um exemplo da falta de gestão elétrica pode ser visualizado na Figura 1, que apresenta um exemplo de consumo de energia em uma empresa.

**Figura 1** – Demanda contratada *Versus* demanda consumida



Fonte: Adaptado de UFSCAR (2011).

No gráfico da Figura 1 é possível observar que a demanda consumida (linha em vermelho) não segue as variações da demanda contratada (linha em azul). Quando o consumo está muito abaixo da demanda contratada, haverá perdas, pois se está pagando por uma energia que não está sendo consumida (energia ociosa). Da mesma maneira, quando se ultrapassam os limites contratados, haverá cobrança de multas por excesso de consumo.

Portanto, justifica-se a importância de estudar e desenvolver um sistema (metodologia) de gerenciamento de energia elétrica que atenda aos requisitos propostos, que sirva de apoio à tomada de decisão e também como uma solução eficiente em termos de EE para o setor industrial (GARCIA et al., 2009), visto à necessidade de se consumir a energia elétrica de forma consciente e sem desperdícios.

Para isso, se faz necessário o desenvolvimento de um sistema embarcado (*hardware e software*) capaz de capturar, armazenar e analisar informações correspondentes ao consumo e a QEE nos sistemas industriais.

Desta forma, é preciso avaliar as principais metodologias aplicadas atualmente, mapear detalhadamente o consumo de energia elétrica em uma indústria (organização a ser pesquisada), identificando os setores de maior consumo, detectar e classificar as perturbações, pesquisando por possíveis soluções.

Assim, este trabalho versa sobre o desenvolvimento de um sistema para monitoração e gerenciamento da energia elétrica em sistemas industriais, possibilitando o registro e análise da energia elétrica consumida (EE), bem como seus padrões de qualidade (QEE), servindo de ferramenta no auxílio à tomada de decisão para um melhor aproveitamento das demandas energéticas contratadas, principalmente no horário de ponta.

## **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo principal deste estudo é desenvolver um sistema embarcado de baixo custo voltado ao gerenciamento da energia elétrica nos processos industriais (monitoração, aquisição e análise), através da utilização de técnicas de DSP (*Digital Signal Processing*), além de algoritmos que implementam funções matemáticas, como Valor Médio e as Transformadas *Wavelets*. O público alvo são as indústrias de pequeno e médio porte, principalmente aquelas em que a energia elétrica representa gastos relevantes para o processo fabril.

## 1.2 Objetivos Específicos

1. Conhecer os distúrbios de QEE no processo industrial (sistema de potência) e seus efeitos, identificando o local e o instante que o mesmo ocorreu. Esta etapa foi inicialmente efetuada através da modelagem matemática de tais fenômenos. Em seguida, dados reais foram coletados, armazenados e posteriormente analisados;
2. Desenvolver uma metodologia para quantificar e classificar os distúrbios de QEE baseado em técnicas de DSP para a identificação de perturbações na rede elétrica. O desenvolvimento desta metodologia fez uso de ferramentas matemáticas de análise (transformadas *wavelets* e valor médio);
3. Analisar a demanda consumida (demanda total, por área, setor, horário), em tempo real e também com as informações armazenadas em base de dados (análise *offline*);
4. Estimar a tendência de ocorrência de picos de consumo de energia elétrica que possam ocasionar multa por parte da concessionária;
5. Modelar e implementar uma interface para facilitar a utilização do sistema. Esta interface contém itens para configurar a simulação do cenário, tendo como entrada os dados de consumo, e como saída, os comportamentos de cada elemento que contribui para a curva de consumo (EE) e seus indicadores de QEE;

O presente trabalho está dividido da seguinte forma: o primeiro capítulo apresentou uma introdução ao tema da dissertação, abordando a sua relevância, o problema, as justificativas e seus objetivos; a seguir, no Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica para o tema proposto, descrevendo detalhadamente os assuntos envolvidos na QEE bem como o estudo das transformadas *wavelets*; já o Capítulo 3 descreve em detalhes a metodologia a ser utilizada no desenvolvimento do trabalho, destacando circuitos, algoritmos e simulações envolvidas na modelagem do sistema; o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na implementação e instalação do sistema de monitoramento; por fim no Capítulo 5 expõem-se as conclusões finais e discute ideias e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura abordada nesta pesquisa está dividida em oito tópicos principais. O primeiro descreve o que são os distúrbios relacionados à QEE. O segundo tópico compreende o estado da arte na identificação e classificação de distúrbios elétricos. O terceiro se refere aos métodos mais utilizados para a captura destes eventos. Já o quarto corresponde às técnicas utilizadas para aquisição e análise de dados. O quinto e o sexto abrangem respectivamente o estudo das Transformadas *Wavelets* e dos Sistemas Embarcados e suas tecnologias para a solução do problema. No sétimo é apresentado um resumo dos vários estudos já realizados nesta área, trazendo assim um comparativo entre cada um deles com o presente projeto. Por fim são apresentadas as considerações referentes ao contexto estudado em todo o capítulo.

### 2.1 Distúrbios relacionados à QEE

Conforme Ferreira e Garcia et al. (2009) existem diferentes razões para o aumento de interesse em QEE. Citam-se, por exemplo, o fato dos equipamentos terem se tornado menos tolerantes a distúrbios de tensão, e também aos processos de produção terem se tornado menos tolerantes à operação incorreta de tais equipamentos. Até mesmo o aumento de consumidores interessados ou informados sobre QEE, o que leva ao aumento de reclamações nos órgãos competentes, é um fator responsável pelo aumento da necessidade de indicadores de QEE. Para Ferreira (2009) e Felber (2010) a crescente utilização de dispositivos eletrônicos de potência nos processos industriais aumentou, na mesma proporção, o aparecimento de distúrbios na tensão e/ou corrente do sistema como um todo.

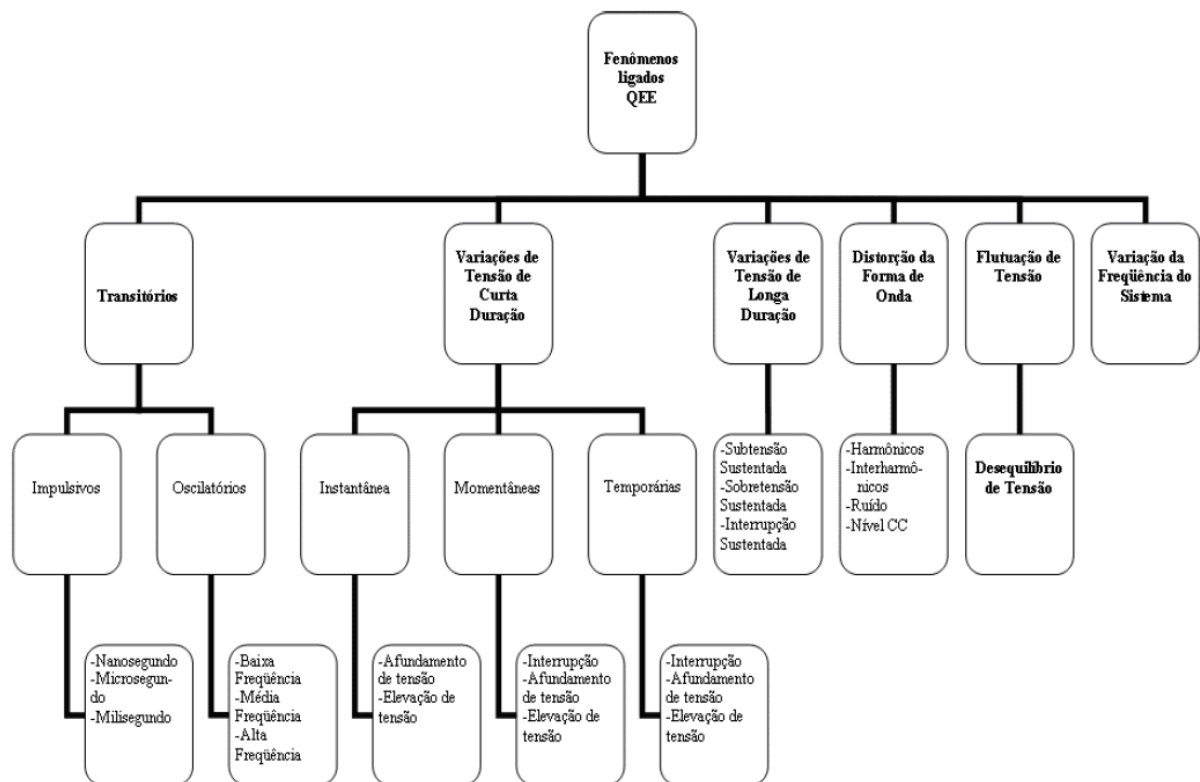
Para Deckmann e Pomilio (2010) o termo qualidade de energia elétrica (que virou jargão no setor elétrico nos últimos anos) é utilizado para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores. Essa medida inclui características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema supridor como das cargas elétricas.

Já para Ferreira (2009), a QEE possui três níveis de qualidade, a saber: qualidade do atendimento, qualidade do serviço e qualidade do produto. A qualidade no atendimento refere-se às cobranças indevidas, taxas, tempo de atendimento entre outros. A qualidade no

serviço esta relacionada à operação e manutenção do sistema elétrico, proporcionando para os clientes o mínimo de interrupção aceitável. Já a qualidade no produto possui um foco técnico, que diz respeito à conformidade do produto em si, ou seja, a disponibilidade de energia elétrica com tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constante (NORONHA, 1999; DUGAN et al., (2003); FERREIRA; GARCIA et al., 2009).

Assim, todas as alterações que ocorrem no sistema elétrico, sejam elas manifestadas na tensão, na corrente ou na frequência, que resulte em falha ou má operação de equipamentos dos consumidores, são considerados como problemas de QEE. Estas alterações são apresentadas no diagrama da Figura 2, e podem acontecer em várias partes do sistema de energia, seja nos consumidores, transmissão, distribuição e ou concessionária (MELO, 2008; JUNIOR, O., 2009; FERREIRA, 2010).

**Figura 2** – Diagrama contendo os principais distúrbios relacionados à QEE



Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

### **2.1.1 Por que monitorar a QEE**

Segundo de Deckmann e Pomilio (2010), os problemas relacionados com a QEE podem ter seu início quando equipamentos alimentados pela rede elétrica deixam de funcionar corretamente. Assim, uma lâmpada que apresenta variações luminosas, um motor ou equipamentos operando com sobre-aquecimento, proteção atuando intempestivamente, capacitores com sobre-tensões ou sobre-correntes podem ser indícios de sérios problemas elétricos.

Se tais problemas não forem devidamente tratados, poderá haver prejuízos materiais (redução da vida útil ou até queima de transformadores, motores, capacitores e equipamentos eletrônicos sensíveis), bem como ocorrer perturbações físicas em pessoas (incômodo visual devido ao efeito de cintilação, ou incômodo auditivo devido a ressonâncias eletromagnéticas).

Conforme já citado por Garcia et al. (2009) e também comentado por Deckmann e Pomilio (2010) estudos que mostram os custos relacionados com perda de QEE superam bilhões de dólares por ano, e a tendência é que este valor cresça ainda mais, caso não sejam adotadas medidas saneadoras.

### **2.1.2 Como monitorar a QEE**

Para Deckmann e Pomilio (2010) é necessário que os técnicos ou especialistas façam uma pesquisa (estudo) para diagnosticar as causas dos problemas relativos à QEE. Como se trata de diagnosticar um problema de compatibilidade eletromagnética ou a busca por indicadores de parâmetros elétricos fora de padrões, essa pesquisa pode envolver questões que vão além de um simples problema tecnológico. Uma abordagem recomendável incluiria os seguintes passos:

- Em primeiro lugar deve-se conhecer os problemas que se poderá enfrentar;
- Deve-se estudar as condições locais onde o problema se manifesta;
- Se possível medir e registrar as grandezas contendo os sintomas do problema;
- Analisar os dados e confrontar os resultados obtidos com estudos ou simulações;
- Finalmente diagnosticar o problema, sua possível causa e propor soluções.



Cada um desses passos requer um conhecimento ou estudo específico. Tratar de conhecer esses problemas é um dos objetivos deste trabalho. Quando se tem uma ideia de como os problemas se manifestam, das suas causas, dos seus efeitos e das soluções usuais, seu diagnóstico torna-se mais fácil e rápido, possibilitando a escolha da solução mais adequada.

### **2.1.3 Indicadores de QEE**

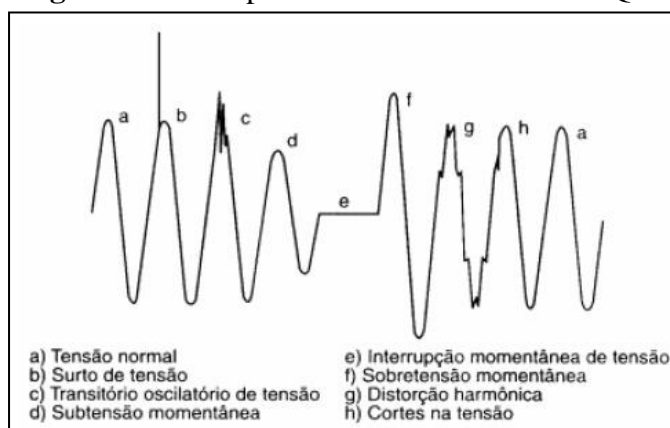
Um sistema elétrico trifásico ‘ideal’ deve satisfazer às seguintes condições de operação em regime permanente (PRODIST, 2010):

- Tensões e correntes alternadas, com formas senoidais;
- Amplitudes constantes, nos valores nominais;
- Frequência constante, no valor síncrono;
- Tensões trifásicas equilibradas;
- Fator de potência (FP) unitário nas cargas;
- Perdas nulas na transmissão e distribuição.

Estas seis condições podem garantir que o sistema atenda adequadamente a carga prevista para operar com corrente alternada nos sistemas industriais. Porém, segundo Ferreira (2010), em um sistema real é praticamente impossível satisfazer totalmente a estas condições, pois a rede e os equipamentos elétricos estão sempre sujeitos a falhas ou perturbações que deterioram de alguma maneira as condições que seriam as desejáveis. Quem determina o grau de confiabilidade com que essas condições podem ser atendidas depende, em grande parte, dos equipamentos de monitoração e controle que estiverem disponíveis no sistema, isto é, se eles existirem.

## **2.2 Identificação e classificação de distúrbio de QEE**

Segundo Solórzano (2004) e Ferreira (2009), a QEE se refere a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos conduzidos que caracterizam a tensão e a corrente num dado tempo e local do sistema elétrico, conforme Figura 3.

**Figura 3** – Principais distúrbios associados à QEE

Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

De acordo com Ferreira (2009) e Felber (2010), as perturbações na forma de onda (tensão ou corrente) são devido ao uso crescente de equipamentos eletroeletrônicos e circuitos de potência em consumidores industriais. Este aumento contribui para o crescimento da produção, porém trazem problemas relacionados à QEE, tanto para as empresas distribuidoras de energia elétrica, quanto para os próprios consumidores.

A seção seguinte descreve detalhadamente as principais perturbações (eventos de QEE) estudadas para o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.2.1 Transitórios oscilatórios

Ferreira (2009) descreve os transitórios oscilatórios, ou oscilação transitória, como eventos mais frequentemente causados pela energização de bancos de capacitores (utilizados para correção do FP). Estes chaveamentos de capacitores resultam em oscilações de tensão com frequência entre 300 e 900 Hz, com magnitude entre 2,0 pu<sup>3</sup>, sendo os valores típicos de 1,3 a 1,5 pu, com duração entre 0,5 a 3 ciclos dependendo das características de amortecimento do sistema. Além dos bancos de capacitores, este tipo de transitórios é decorrente também da energização de linhas de transmissão, corte de corrente indutiva, etc.

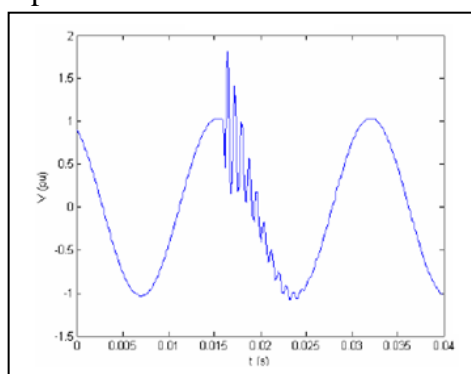
Segundo Junior, O. (2009), os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de variações súbitas do valor instantâneo da tensão do sistema de energia elétrica. Caracteriza-se por ser um evento indesejável com altas frequências em seu espectro e de curta duração, mas de vital relevância, já que submete os equipamentos a grandes variações tanto

<sup>3</sup> Valor por unidade (pu), conforme Deckmann e Pomilio (2012).

de tensão quanto de corrente (DELMONT, 2003). A intensidade do transitório depende da quantidade de energia armazenada no instante inicial do fenômeno e do comportamento transitório até o restabelecimento do novo ponto de operação do sistema. Os transitórios são classificados em impulsivos e oscilatórios.

A Figura 4 apresenta um evento oscilatório devido ao chaveamento de capacitores na rede. Isto se deve aos elevados valores de  $di/dt$  provocados pela brusca energização do capacitor, em que são excitadas ressonâncias em alta frequência, que se convertem em oscilações rápidas da tensão no ponto de conexão do capacitor (DECKMANN; POMILIO, 2010). Essas oscilações podem provocar a atuação da proteção ou produzir sobre-tensões em outros equipamentos próximos.

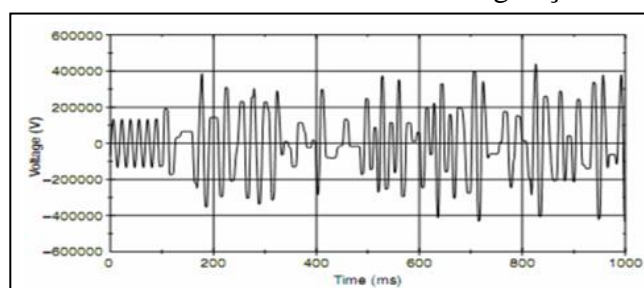
**Figura 4** – Transitório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores



Fonte: Adaptado de Ferreira e Junior, F. (2009).

Já a Figura 5 ilustra as perturbações associadas, geralmente, aos fenômenos de ferrorressonância e energização de transformadores (FERREIRA, 2009). Estes comportamentos são típicos de circuitos indutivos, pois apresentam séria resistência a variações abruptas na corrente, podendo fazer com que a tensão diminua, ou aumente significativamente, além da perda de referência da frequência fundamental.

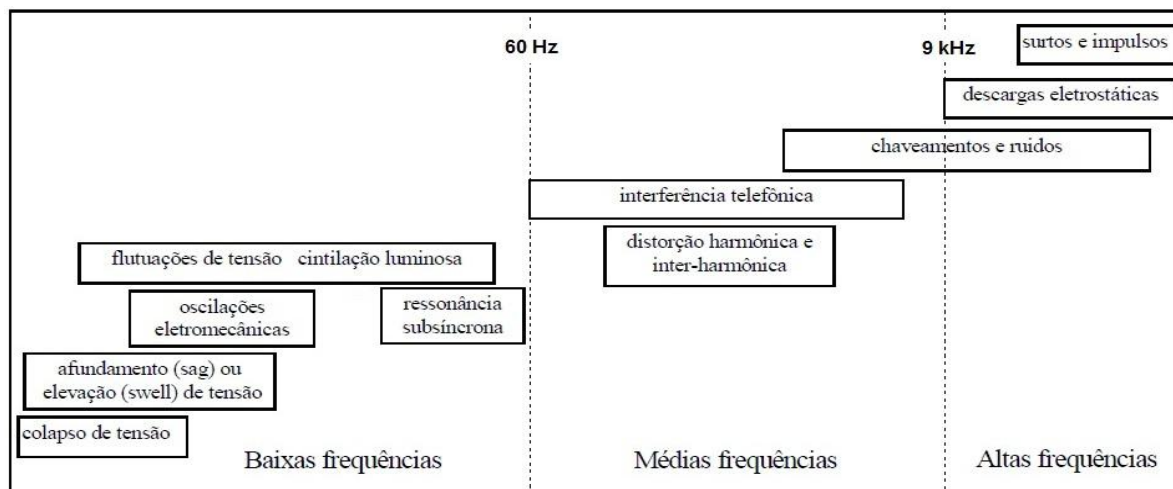
**Figura 5** – Fenômeno de ferrorressonância em energização de transformadores



Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

Em função das frequências que caracterizam cada fenômeno oscilatório, podem-se definir três faixas principais, como descritas na Figura 6:

**Figura 6** – Distribuição dos distúrbios em função da frequência



Fonte: Adaptado de Deckmann e Pomilio (2010).

#### a) Transitórios oscilatórios de baixa frequência

Os transitórios oscilatórios de baixa frequência, até 60 Hz, são:

- Colapso de tensão;
- Oscilação eletromecânica;
- Cintilação ou *flicker*;
- Ressonância subsíncrona.

De acordo com Deckmann e Pomilio (2010) estes são os distúrbios elétricos mais lentos a que um sistema está sujeito. Tem-se como exemplo o colapso da tensão, que pode se estender por vários minutos; as oscilações eletromecânicas dos geradores, que ocorrem na faixa 0.2 a 2 Hz; a seguir a modulação da tensão, responsável pelo efeito da cintilação luminosa (*flicker*), na faixa de 0 a 30 Hz e a ressonância subsíncrona entre turbina e gerador, que se manifesta tipicamente na faixa entre 10 a 20 Hz.

#### b) Transitórios oscilatórios de média frequência

Os transitórios oscilatórios de média frequência, até 9 kHz, são bastante comuns na rede de distribuição (DECKMANN; POMILIO, 2010), e são produzidos em sua maioria por:

- Chaveamento de bancos de capacitores;
- Distorção harmônica e inter-harmônica;
- Energização de transformadores;
- Ressonâncias paralelas entre transformadores, cargas e compensadores;
- Interferência telefônica.

Nesta faixa intermediária de frequências estão incluídos todos os processos que produzem distorções de forma de onda das tensões e correntes com frequência fundamental de 60 Hz, e cujo espectro pode apresentar componentes significativas até da 50ª harmônica (3 kHz). Elementos não lineares, que distorcem as formas de onda de tensão e corrente, sempre estiveram presentes no sistema elétrico, por exemplo, e em dispositivos com núcleo ferromagnético saturável (por exemplo, fontes chaveadas).

Com a introdução dos dispositivos chaveados eletronicamente, no entanto, o grau de distorção produzido aumentou significativamente, gerando assim constantes verificações dos níveis harmônicos no sistema (FERREIRA, 2009; DECKMANN; POMILIO, 2010).

### **c) Transitórios oscilatórios de alta frequência**

Na faixa superior de frequências (de 9 kHz até 30 MHz) surgem os fenômenos de interferência:

- Chaveamentos rápidos de disjuntores e conversores eletrônicos;
- Descargas eletrostáticas e surtos de tensão;
- Interferências eletromagnéticas conduzidas e irradiadas.

Surtos, descargas de tensão e manobras de disjuntores, são exemplos típicos de distúrbios com conteúdo espectral de alta frequência. Porém, os distúrbios de alta frequência mais comuns são devidos ao chaveamento (comutação na faixa de dezenas de kHz) para o comando de conversores estáticos, fontes chaveadas e inversores de frequência.

A alta frequência para o chaveamento eletrônico é usada devido à melhoria da resposta dinâmica do circuito e a redução física dos elementos de filtragem (indutores e capacitores) e de eventuais transformadores, com a elevação da densidade de potência destes dispositivos (FERREIRA, 2009; DECKMANN; POMILIO, 2010).

### 2.2.2 Variações de tensão de curta duração (VTCDs)

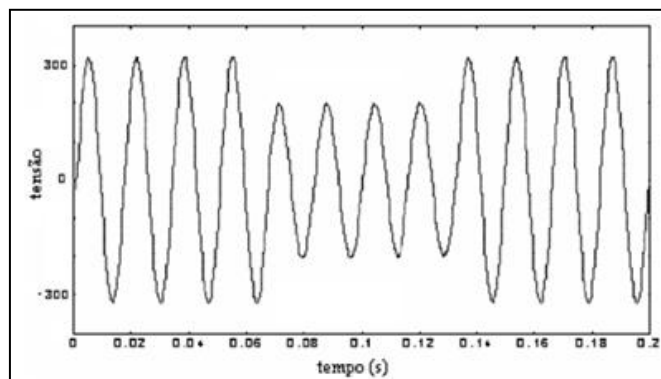
Conforme apresentado por Fernandes (1999), variações de tensão de curta duração (VTCD) como afundamentos, elevações e interrupções na tensão também são fenômenos comuns na rede de distribuição, apresentando duração típica entre 0,5 ciclo e 1 minuto, e podem ser subdivididas em alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da duração do fenômeno.

Segundo Ferreira e Junior, O. (2009) estas alterações são geralmente causadas por curtos circuitos no sistema elétrico, chaveamento de cargas que demandam altas correntes (partida de grandes motores e corrente de energização dos transformadores) ou perdas intermitentes da conexão com a rede (faltas em sistemas de transmissão e de distribuição).

Estes eventos geram instabilidade ao sistema causando transtornos ao processo de produção por distorcer a forma de onda da tensão, podendo até interromper o abastecimento de energia elétrica caso não sejam tomadas às medidas preventivas. Dependendo do local da falha e das condições do sistema, o distúrbio resultante pode ser um afundamento de tensão, uma elevação de tensão ou uma interrupção do fornecimento de energia.

A Figura 7 apresenta um afundamento de tensão (ou “Sag”), que representa uma subtensão de curta duração, caracterizada por uma redução no valor eficaz<sup>4</sup> da tensão, entre 0,1 e 0,9 pu, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto (PRODIST, 2010).

**Figura 7 – Afundamento de tensão**



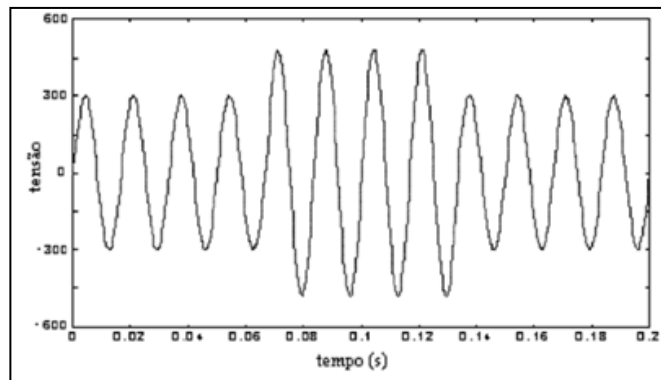
Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

Na Figura 8 é mostrada uma elevação de tensão (ou “Swell”) e é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz, para a frequência da rede, com duração entre

<sup>4</sup> Valor Eficaz corresponde à raiz quadrada da integral da tensão instantânea (valor amostrado) ao quadrado, dividido pelo intervalo de tempo da integração (número de amostras), conforme Prodinst (2010).

0,5 ciclo e 1 minuto (PRODIST, 2010). Assim como os afundamentos de tensão, as elevações de tensão estão geralmente associadas com as condições de falta no sistema, principalmente aos curtos-circuitos fase-terra, sendo que nestas condições as fases não defeituosas tendem a sofrer uma elevação de tensão (FERNANDES, 1999).

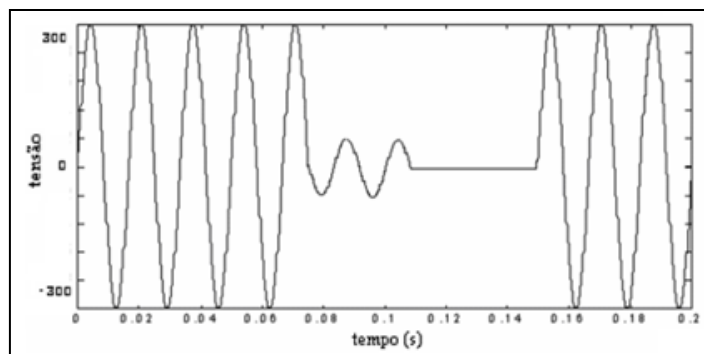
**Figura 8 – Elevação na tensão**



Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

Por fim, a Figura 9 apresenta uma interrupção de tensão de curta duração. Conforme apresentado pelo Prodist (2010), uma interrupção de tensão de curta duração ocorre quando a tensão de suprimento decresce para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 minuto. Este tipo de interrupção pode ser causado por faltas no sistema de energia, falhas de equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle. Algumas interrupções podem ser precedidas por um afundamento de tensão quando estas são devidas a faltas no sistema supridor (FERNANDES, 1999).

**Figura 9 – Falta momentânea**



Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

Assim, as VTCDs se resumem em desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Classificação das variações de tensão de curta duração (VTCDs)

Classificação	Denominação	Duração do Evento	Amplitude da Tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior ou igual a 1 minuto	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior a igual a 1 minuto	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a 3 segundos e inferior ou igual a 1 minuto	Superior a 1,1 pu

Fonte: Adaptado de PRODIST (2010).

Para o cálculo de VTCD, segundo Deckmann e Pomilio (2010), deve-se considerar a magnitude ( $V_{Mag}$ ) do evento, ou seja, o desvio mais significativo da tensão, que é definido segundo a norma americana e a recomendação brasileira como sendo (PRODIST, 2010): “Nível extremo do valor eficaz da tensão, tensão residual ou remanescente ( $V_{res}$ ), em relação à tensão nominal<sup>5</sup> ( $V_n$ ) no ponto de observação, expresso em porcentagem (%) ou valor por unidade (pu)”.

O cálculo de  $V_{Mag}$  é descrito pela Equação 1:

$$V_{Mag} = \frac{V_{res}}{V_n} \cdot pu \quad (1)$$

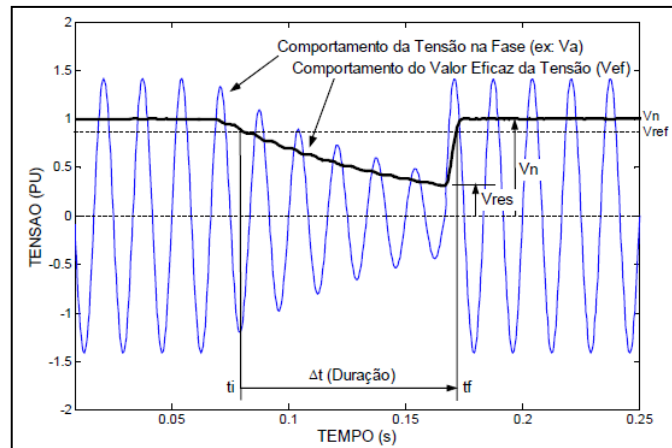
Já a Equação 2 descreve a duração do evento ( $\Delta t$ ), que é definido como (PRODIST, 2010): “o intervalo de tempo decorrido entre o instante inicial ( $t_i$ ) em que o valor eficaz da tensão ultrapassa determinado limite de referência ( $V_{ref}$ ) e o instante ( $t_f$ ) em que a mesma variável volta a cruzar esse limite, expresso em segundos ou ciclos da frequência fundamental.”

$$\Delta t = t_f - t_i \quad (2)$$

<sup>5</sup> O Prodlist (2010) indica que a tensão de comparação é a tensão de referência, a qual pode ser a tensão nominal ou a contratada.



**Figura 10** – Caracterização de um afundamento (Normas Brasileira e Americana)



Fonte: Adaptado de Deckmann e Pomilio (2010).

A Figura 10 ilustra estes valores e sua localização em termos de tempo e amplitude. É importante perceber que o valor eficaz ( $V_{ef}$ ) tem valor unitário de amplitude (1 pu), já a tensão de fase atinge picos de 1.414 pu (para uma senoide pura), pois a tensão eficaz é calculada pela Equação 3:

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Onde :

$V_p$  = tensão de pico

$V_{ef}$  = tensão eficaz

### 2.2.3 Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração podem ser caracterizadas como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, estando esta na frequência do sistema, com duração maior que 1 minuto. Estas variações de tensão podem se dar como afundamentos de tensão, elevações de tensão ou interrupções sustentadas. Todas elas são geralmente causadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema (FERREIRA, 2009; DECKMANN; POMILIO, 2010).

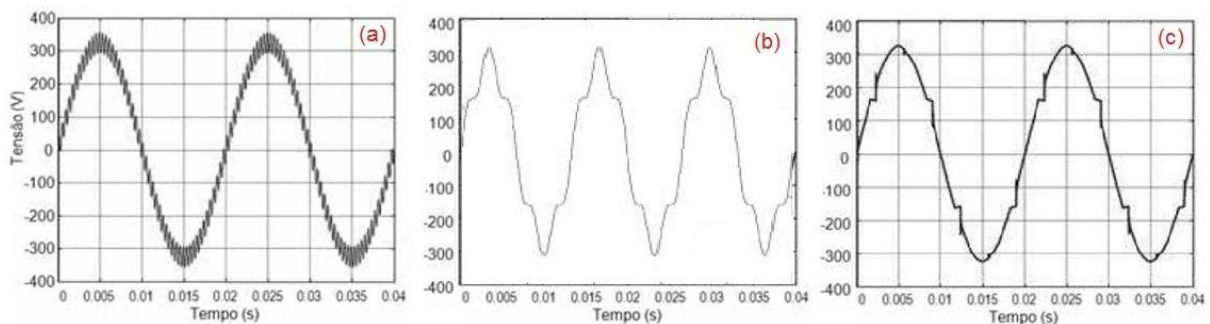
Basicamente elas representam as mesmas perturbações descritas como VTCDs (seção 2.2.2), porém o tempo de duração deve ultrapassar o limite de 1 minuto. Pelo fato de possuírem tempos elevados, estes eventos são facilmente detectados, não necessitando dispositivos de análise muito complexos.

### 2.2.4 Distorção na forma de onda

As distorções na forma de onda são causadas principalmente por cargas não lineares conectadas à rede (JUNIOR, F., 2009). Geralmente são fenômenos que ocorrem em regime permanente, sendo calculados na forma de distorção harmônica total (DHT).

De acordo com Ferreira e Junior, O. (2009), define-se como uma variação da forma de onda senoidal, na frequência fundamental, da tensão ou corrente em regime permanente. As distorções na forma de onda são caracterizadas de acordo com seu conteúdo espectral do desvio e podem ser classificadas como sendo harmônicos, ruídos, *notching* e nível CC.

**Figura 11** – Distorções na forma de onda (ruído, *notches* e harmônicos)



Fonte: Adaptado de Ferreira (2009).

A Figura 11 apresenta algumas das distorções mais comuns na forma de onda, sendo:

- a) Ruído: são componentes espectrais de larga faixa de frequência observados na tensão ou corrente fundamentais (DECKMANN; POMILIO, 2010). Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos retificadores, etc... (ARRUDA, 2003; FERREIRA, 2009);
- b) Harmônicos: é a combinação da tensão (ou corrente) fundamental com componentes de frequência múltipla inteira (FERREIRA, 2009; DECKMANN; POMILIO, 2010). Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não lineares instalados no sistema de energia;
- c) *Notches*: são transições sucessivas e bruscas de tensão ou corrente entre diferentes níveis. São fontes interferências indesejáveis e de difícil tratamento, causado pela operação de equipamentos eletrônicos de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra (FERREIRA, 2009).

### 2.2.5 Flutuações ou oscilações de tensão

Conforme Deckmann e Pomilio (2010) flutuações são mudanças sustentadas da amplitude da tensão fundamental, e correspondem a variações sistemáticas do valor eficaz da tensão de suprimento dentro da faixa que compreende 0,95 e 1,05 pu. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e se manifestam de diferentes formas, como citadas por (ARRUDA; DUGAN et al., 2003):

- Flutuações aleatórias: a principal fonte destas flutuações são os fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de corrente de curto-circuito do equipamento;
- Flutuações repetitivas: dentre as principais fontes geradoras de flutuações desta natureza tem-se máquinas de solda, elevadores de minas e ferrovias;
- Flutuações esporádicas: a principal fonte causadora destas oscilações é a partida direta de grandes motores.

Para Ferreira (2009) os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente são:

- Oscilações de potência e torque das máquinas elétricas;
- Queda de rendimento dos equipamentos elétricos;
- Interferência nos sistemas de proteção;
- Efeito *flicker* ou cintilação luminosa.

## 2.3 Os principais métodos utilizados na identificação de distúrbios elétricos

Para Ferreira (2010) identificação e classificação de distúrbios elétricos consiste em uma importante etapa num processo de monitoramento da QEE, uma vez que pode contribuir diretamente na identificação das causas dos distúrbios.

Já a classificação deve ser precedida pela etapa de detecção de distúrbios. Várias técnicas podem ser utilizadas, como o valor médio, a Transformada *Wavelet* (TW), a Transformada de *Fourier* (FT) ou a Transformada Rápida de *Fourier* (FFT). Até mesmo a inteligência computacional tem sido aplicada na detecção de distúrbios em QEE (SANTOSO; GRADY; POWERS, 2000; RAMOS; RIBEIRO; ROMANO, 2002; DUQUE et. al, 2005).

A maioria dos métodos de detecção e segmentação requerem janelas do sinal maiores (para o cálculo do valor eficaz ( $V_{RMS}$ ) ou aplicação de filtros digitais, dentre outros) e, conseqüentemente, um tempo de processamento maior (FERREIRA, 2010).

Assim, para a identificação de um distúrbio, são necessárias as funções ou os algoritmos que permitam extrair suas características (GARCIA et al., 2009). Desta forma, serão explicados os seguintes métodos para identificação de distúrbios:

- Método baseado no cálculo do Valor RMS;
- Método baseado na Norma Euclidiana Instantânea;
- Método baseado na aplicação da Transformada de *Fourier*;
- Método baseado na aplicação da Transformada *Wavelet*.

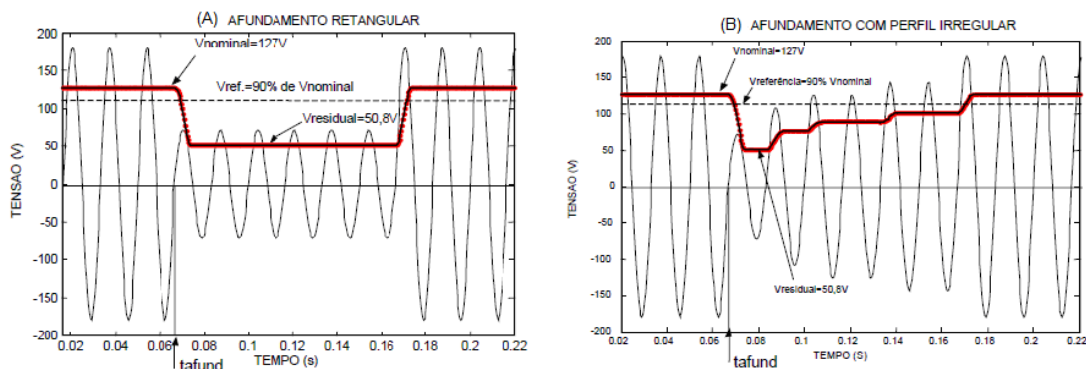
### 2.3.1 Método baseado no cálculo do Valor RMS

O valor eficaz ou RMS (*Root Mean Square*) é uma das técnicas mais utilizadas para a detecção de eventos que afetam a qualidade de energia (JUNIOR; KAGAN, 2009). Afundamentos e elevações são definidos quando da ultrapassagem de limites considerados adequados. O cálculo do valor eficaz pode ser feito de forma contínua ou de forma discreta.

O cálculo do valor eficaz da tensão é uma média quadrática de um período  $T$  (DECKMANN; POMILIO, 2010). A utilização da Equação 4 baseia-se em uma janela móvel de  $N$  amostras no período de integração, calculados de modo iterativo, atualizando-se a janela móvel amostra a amostra.

$$s_{iRMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_i^2[n]} \quad (4)$$

**Figura 12** – Valores eficazes de afundamento de tensão



Fonte: Adaptado de (DECKMANN; POMILIO, 2010).

A Figura 12 ilustra o valor RMS calculado a partir da leitura das amostras do sinal senoidal. Um afundamento regular é mostrado na Figura 12 (A), e um afundamento irregular é visto na Figura 12 (B).

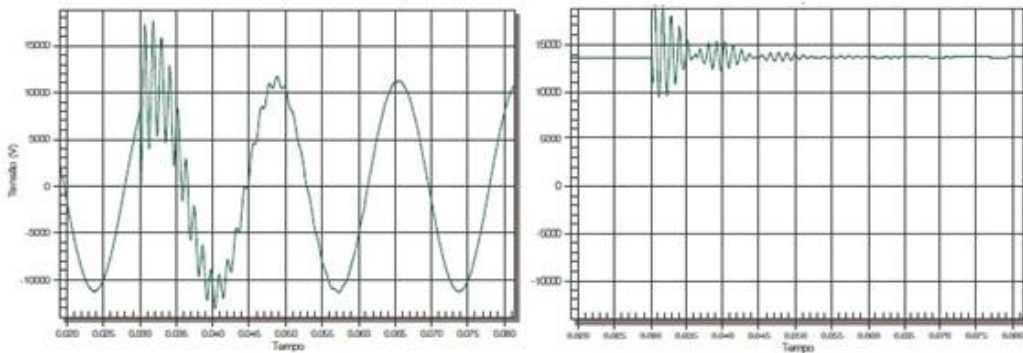
### 2.3.2 Método baseado na Norma Euclidiana Instantânea (NEI)

A NEI é apresentada por Marafão (2000) como uma das formas de decomposição de sinais no domínio do tempo. Embora sua definição seja válida para sistemas com qualquer número de fases, aqui a definição da NEI é restrita para um sistema trifásico.

A Equação 5 representa o cálculo da Norma Euclidiana.

$$\|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2} \quad (5)$$

**Figura 13** – Transitório em uma fase e a NEI



Fonte: Adaptado de (JUNIOR; KAGAN, 2009).

Na Figura 13 é mostrada a simulação de um transitório em apenas uma das fases e a NEI correspondente. O nível contínuo da NEI representa a componente fundamental enquanto a oscilação representa a componente residual. A NEI apresenta um valor constante em sistemas equilibrados e sem distorção. Segundo Junior e Kagan (2009), ocorrendo desequilíbrio de amplitude ou de fase, o valor da NEI deixa de ser um sinal contínuo e passa a refletir este desequilíbrio.

### 2.3.3 Método baseado na aplicação da Transformada de *Fourier*

A Transformada de *Fourier* é a soma de funções trigonométricas (senoidal e cossenoidal) ou de exponenciais complexas harmonicamente relacionadas (JUNIOR; KAGAN, 2009).

Conforme Oliveira (2007), a TF de um sinal  $f(t) - \infty < t < +\infty$  é:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

Onde  $\omega = 2\pi f$ .

A partir da Equação 6 pode-se calcular o espectro de frequência ( $F(u)$ ) de um sinal contínuo  $f(t)$ . Este cálculo está baseado na integração de todo o sinal que representa seu espectro e onde  $e^{-i2\pi ut}$  é à base da TF (SANTOSO; GRADY; POWERS, 2000; YANG; LIAO, 2001), como visto na Equação 7.

$$F(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i2\pi ut} dt \quad (7)$$

Conforme Filho (2003) a TF não permite uma análise local do conteúdo de frequência do sinal. Ou seja, eventos que venham a ocorrer em intervalos de tempos distintos, e mesmo bastante remotos, contribuem de maneira global para a transformada, afetando a representação como um todo.

Segundo Garcia et al. (2009), um método comumente usado é “*janelar*” o sinal em uma sequência de intervalos, onde cada sequência é suficientemente pequena de maneira que a forma de onda seja uma aproximação de uma forma de onda estacionária. Este método será melhor descrito na seção 2.4.2.

Assim, a Transformada de *Fourier* Janelada (TFJ), proposta por Dennis Gabor, permite uma análise da frequência do sinal localmente no tempo (OLIVEIRA, 2007). Neste caso, uma janela de observação é deslocada no domínio do tempo, em uma técnica chamada de análise do sinal por janelas, e a TF é calculada para cada posição da janela, como mostra a Figura 14, mapeando o sinal original em uma função bidimensional de tempo e frequência.

**Figura 14** – Transformada de *Fourier* Janelada



Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

Considerando  $j(t)$  a função que cumpre o papel de janela e  $b$  o tamanho da janela, pode-se definir a TFJ de um sinal contínuo  $f(t)$  como segue:

$$F(u, b) = \int_{-\infty}^{\infty} j(t-b) f(t) e^{-i2\pi ut} dt \quad (8)$$

Para Oliveira (2007) a TFJ pode não ser adequada para a análise de determinados sinais, pois sua precisão pode ser limitada. A partir desta limitação, surge a análise por Transformada *Wavelet*.

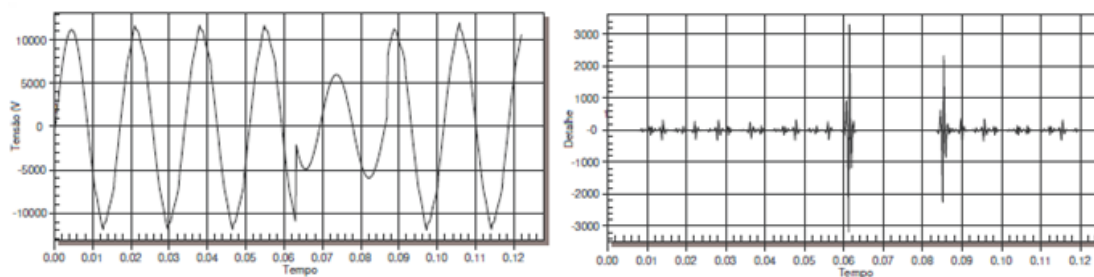
### 2.3.4 Método baseado na aplicação da Transformada *Wavelet*

A Transformada *Wavelet* é utilizada quando se necessita localizar eventos isolados no domínio do tempo (HUA; BUAGUN; HONG, 2008), visto que o método clássico de análise de espectro de frequência usando a Transformada de *Fourier* é adequado para sinais periódicos em regime permanente. Esta transformada possui suas variantes contínua (TWC) e discreta (TWD).

Já Garcia et al. (2009) e Filho (2003) afirmam ser possível separar componentes de frequência dos sinais utilizando os filtros de decomposição *wavelet*. O resultado da utilização do filtro de decomposição passa-alta permite obter o que se conhece como coeficientes de detalhe no domínio *wavelet*, e as seqüências de detalhe no domínio do tempo (FIGURA 15).

Segundo Ferreira (2010), em geral, os métodos de classificação de distúrbios de QEE utilizam técnicas de extração de parâmetros seguida de técnicas tradicionais de reconhecimentos de padrões. No campo de extração de parâmetros com a finalidade de classificação, as TW são as mais empregadas e no campo da classificação, as redes neurais artificiais (RNA), lógica *fuzzy* e algoritmos genéticos têm sido as técnicas mais utilizadas.

**Figura 15** – Afundamento de tensão e os coeficientes de detalhes da TW



Fonte: Adaptado de Junior e Kagan (2009).

Como este trabalho foca seu estudo na utilização da Transformada *Wavelet* para detecção de distúrbios nos sistemas elétricos industriais, além da sua implementação em Sistemas Embarcados (SE), esta é detalhada com mais ênfase na seção 2.5.

## 2.4 Detecção de distúrbios

Uma das principais atribuições do monitoramento da QEE é a análise dos distúrbios elétricos (FERREIRA, 2010). Para tal, os sinais de tensão do sistema monitorado devem ser primeiramente discretizados, e posteriormente, armazenados.

Para Ferreira (2010) a detecção dos distúrbios pode ser feita *online*, ou seja, em tempo real, logo após a discretização dos dados, o que demanda sistemas com rápido processamento de sinais e bom desempenho. Outra forma de análise é a *offline*, em que a detecção dos distúrbios ocorre a partir dos dados armazenados.

Assim, a detecção de distúrbios compreende basicamente da extração de parâmetros e a aplicação de um algoritmo que realize a detecção baseada nestes parâmetros. A extração destes parâmetros consiste na transformação dos dados para um novo espaço, onde as características dos distúrbios são destacadas em relação ao sinal original (FERREIRA, 2010).

### 2.4.1 Sensores

A monitoração de padrões de QEE inicia com a instalação de sensores no sistema elétrico (quadro de alimentação, rede de distribuição, barramento) para a leitura dos parâmetros elétricos envolvidos no processo industrial.

Assim, definem-se sensores como dispositivos que recebem um sinal ou estímulo e o converte em um sinal elétrico que seja compatível com circuitos eletrônicos. O sinal de entrada



pode ser uma quantidade, uma propriedade ou um estado, a qual o sensor converte em tensão ou corrente, podendo ser amplificada e modificada por circuitos eletrônicos de aquisição (FRADEN, 2004; THOMAZINI, ALBUQUERQUE, 2007).

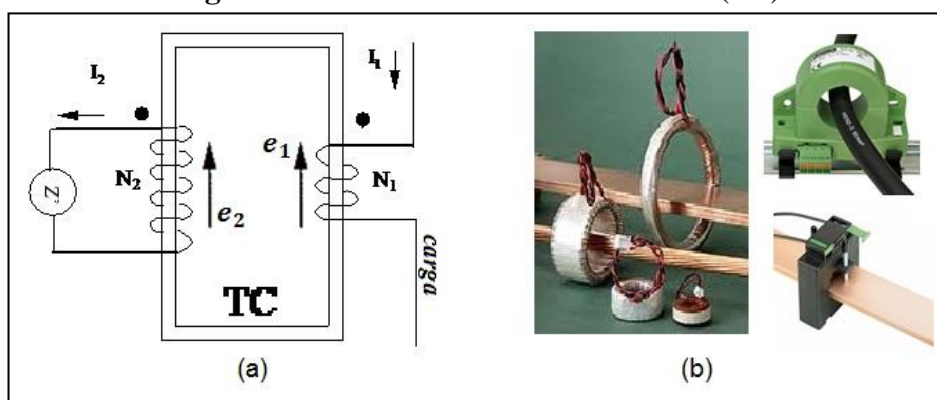
Já os transdutores, conforme comentam Moraes e Castrucci (2001), são dispositivos que transmitem sinais de um sistema para outro sob uma forma de energia, como por exemplo, elétrica. Apesar dos termos transdutores e sensores serem usados frequentemente como sinônimos, existem diferentes significados para cada um destes termos.

#### 2.4.1.1 Sensor para corrente – Transformador de corrente

O transformador de corrente (TC) é um dispositivo composto de dois enrolamentos, um primário e outro secundário, cujo valor da corrente que circula no secundário depende da relação de transformação (número de espiras dos enrolamentos primário pelo secundário). O enrolamento primário dos TCs é normalmente constituído de poucas espiras (por exemplo, duas ou três), podendo ser até mesmo o próprio condutor ao qual o TC está conectado. O enrolamento secundário possui um número elevado de espiras e é projetado para uma corrente nominal padronizada de 5 A, sendo a corrente primária nominal estabelecida de acordo com a ordem de grandeza da corrente do circuito em que o TC está ligado (100 A, 500 A, 1000 A).

Para efetuar a leitura de tensão no secundário se faz necessário a conexão de uma carga de baixa resistividade, ou baixa impedância ( $Z$ ), onde a corrente ( $i_2$ ) gera uma queda de tensão, conforme Figura 16 (a). Já a Figura 16 (b) apresenta TCs comerciais, os quais podem ter valores de transformação de 5/5, 10/5, 20/5, 50/5, 100/5 até valores mais elevados como 1500/5, 2000/5 e 3000/5.

**Figura 16** – Transformadores de corrente (TC).



Fonte: Do autor.

### 2.4.1.2 Sensor de tensão – Transformador de Potencial

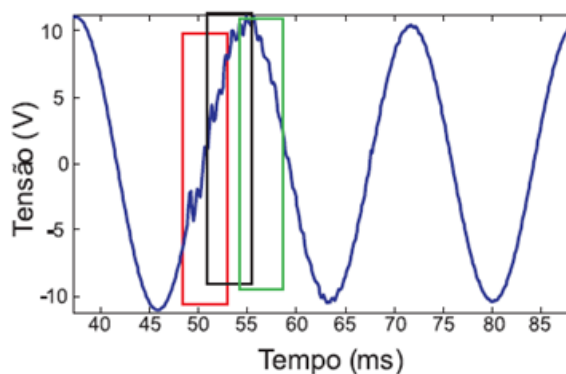
O transformador de potencial (TP) corresponde à transformação da tensão elétrica para um nível diferente e aceitável para os dispositivos de leitura. Basicamente é composto de um transformador rebaixador, onde é aplicada uma tensão no enrolamento primário e por indução é gerada uma tensão no secundário (da mesma forma como explicado no TC, porém neste caso as correntes no enrolamento secundário são menores, e a tensão assume valores nominais e que não dependem da carga utilizada).

### 2.4.2 Amostragem de sinais

A amostragem de dados é importante neste trabalho devido à necessidade de se capturar os parâmetros elétricos (tensão e corrente elétrica) para a monitoração do consumo, detecção e identificação dos distúrbios eletromagnéticos. Para tanto, se faz necessário à utilização de técnicas de processamento digital de sinais, chamadas de técnicas de DSP.

Segundo o trabalho de Fernandes et al. (2009), o janelamento dos dados é necessário para que uma base de dados homogênea possa ser criada, bem como para preparar os dados à etapa de pré-processamento.

**Figura 17** – Janelamento utilizado para amostragem de dados



Fonte: Adaptado de Felber (2010).

O deslocamento pertinente desta janela de dados pode ser caracterizado a um passo de  $n$  amostras por  $m$  pontos por amostragens. Um exemplo pode ser visualizado por meio da Figura 17, onde são feitas 3 amostras contendo 32 pontos cada.

Segundo Ferreira (2010), o janelamento é utilizado para análise de sinais no domínio do tempo, tanto pela aplicação da TFJ quanto pela aplicação da Transformada *Wavelet*.

Porém, para alguns tipos de sinais, a utilização da TFJ pode não ser a mais adequada, em função dos limites de tamanho da janela.

### 2.4.3 Teorema de Nyquist

Segundo o teorema da amostragem, ou Teorema de *Nyquist* (OPPENHEIM; SCHAEFER, 1989), a frequência de amostragem deve ser no mínimo maior que o dobro da frequência máxima do sinal a ser amostrado. A Equação 2 representa a função clássica de *Nyquist*, porém alguns autores afirmam que a frequência de amostragem deve ser de no mínimo 10 vezes a frequência do sinal discretizado.

$$f_s = 2f_M \quad (9)$$

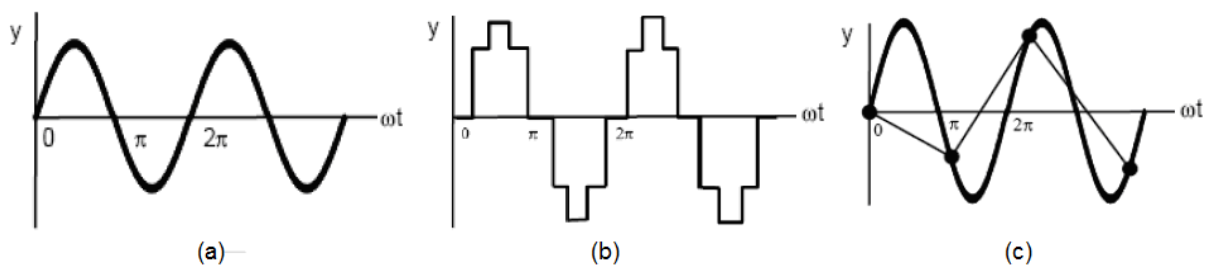
Onde:

$f_s$  - Frequência de amostragem em Hz

$f_M$  - Frequência máxima do sinal analógico em Hz

Assim, uma amostragem correta deve cumprir o teorema de *Nyquist*, pois ao se respeitar esta lei consegue-se fazer a amostragem do sinal com perdas mínimas de informação. Caso não se cumpra este lei, todas as frequências do sinal analógico que estiverem acima da frequência máxima permitida serão mal interpretadas, sendo consideradas de frequência diferente. A este efeito chama-se de *aliasing* ou subamostragem, conforme apresentado na Figura 18 (c).

**Figura 18** – Sinal senoidal (a), reconstrução das amostras (b) e efeito *aliasing* (c)



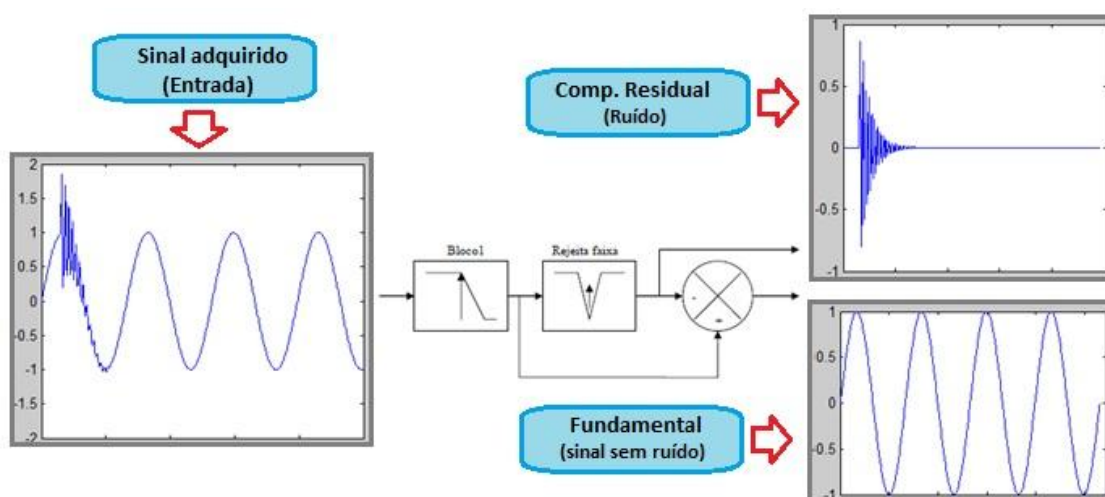
Fonte: Do autor

#### 2.4.4 Decomposição de sinais

Conforme Junior, O. (2009), uma forma de detecção de perturbações em um sistema estável de 60 Hz é a decomposição do sinal em sua componente fundamental (de baixa frequência) e em uma componente residual contendo os demais componentes (altas frequências).

O sinal adquirido pelo sistema de amostragem de dados deve ser digitalizado e após decomposto para sua utilização por algum sistema computacional. Um dos métodos de decomposição de sinais pode ser aplicação de filtros digitais (passa-baixa, passa-alta ou rejeita-faixa). A aplicação desse filtro para a decomposição do sinal permite a separação dos dados referentes ao distúrbio (residual) e o próprio sinal (fundamental).

**Figura 19** – Decomposição de sinais de um sinal com perturbação



Fonte: Adaptado de Junior, O. (2009).

A Figura 19 apresenta detalhadamente o funcionamento deste tipo de decomposição, em que um sinal de entrada é submetido a um filtro rejeita faixa, e posteriormente, este sinal é decomposto em dois sinais distintos, um representando o sinal puro (fundamental) e o outro o sinal residual (de alta frequência), que podemos considerar como perturbação.

Outra forma de decomposição de sinais é a utilização da TW (FILHO, 2003; GARCIA et al., 2009), a qual utiliza filtros de decomposição de sinais que separam os componentes de alta frequência (detalhes) e os componentes de baixa frequência (aproximações). A aplicação de TW será melhor descrita nas seções seguintes.

## 2.5 Transformada *Wavelet* – TW

Conforme Filho (2003), a análise de dados de acordo com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência é a ideia básica da utilização da teoria *Wavelet*, diferentemente das limitações impostas pela análise utilizando TFJ.

Alguns pesquisadores afirmam que a utilização da teoria *Wavelet* abriu novas perspectivas na análise de sinais (FILHO, 2003). Desde a década de 80, a teoria *Wavelet* tem despertado enorme interesse em diversas áreas. A formalização desta teoria foi realizada na década de 80, com base na generalização de conceitos já conhecidos, originados de vários campos de pesquisa, como análise e compressão de sinais, astronomia, acústica, música, fractais, geofísica, matemática e física, o que tem despertado um grande interesse dos cientistas (POISSON; RIOUAL; MEUNIER, 2000).

Como descrito por Filho (2003) o termo “*wavelet*” foi originariamente introduzido por J. Morlet, sendo a base matemática da maioria de suas ideias. A partir de dados sísmicos estudados por Morlet, onde estes exibiam conteúdos de frequência que mudavam rapidamente ao longo do tempo, e para os quais a Transformada de *Fourier* não se mostrava adequada como ferramenta de análise (SANTOSO; GRADY; POWERS, 2000; YANG; LIAO, 2001).

Com isso, ainda segundo Filho (2003), Morlet introduziu uma nova transformada, denominada Transformada *Wavelet*, na qual o tamanho da janela é variável, permitindo que eventos de alta frequência possam ser localizados com uma maior resolução temporal.

Por exemplo, um evento de baixa frequência precisa de uma janela maior no domínio do tempo para ser observado. Inicialmente, define-se a TW considerando um sinal contínuo  $f(t)$ , porém a generalização para sinais ou imagens bidimensionais  $f(x,y)$ , também pode ser obtida. A definição da TW é apresentada pela Equação 10:

$$F(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{ab}(t)dt \quad (10)$$

Onde:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (11)$$

$$a,b \in \mathfrak{R}; a \neq 0$$

De acordo com Filho (2003), ao analisar a Equação 8 percebe-se que a TW depende de dois parâmetros,  $a$  e  $b$ , que correspondem às informações de escala e translação,

respectivamente. Assim, o sinal de uma dimensão  $f(t)$  é desdobrado em uma transformada bidimensional  $F(a,b)$ , permitindo uma análise tempo-frequência do sinal, de forma semelhante à TFJ.

Para Daubechies (1990), as *Wavelets* são funções matemáticas que separam dados em suas diferentes componentes de frequências, extraíndo cada componente com uma resolução adequada à sua escala. Elas têm vantagens em relação à análise de *Fourier*, pois esta última analisa o sinal como um todo, acarretando uma representação mais pobre para sinais que contêm descontinuidade e variação bruscas (DAUBECHIES, 1990; SANTOSO; GRADY; POWERS, 2000; YANG; LIAO, 2001; MISITI et al., 2002).

A transformada *Wavelet* possui suas variantes contínua (TWC) e discreta (TWD), além de diferentes famílias de *wavelets* mãe<sup>6</sup>.

### 2.5.1 Transformada *Wavelet* Contínua (TWC)

A TW é utilizada quando necessitamos localizar no tempo eventos isolados (HUA; BUAGUN; HONG, 2008), visto que o método clássico de análise de espectro de frequência usando a TF é adequado quando temos sinais periódicos em regime permanente (domínio da frequência).

A definição da Transformada *Wavelet* Contínua ( $TWC_f^\psi$ ) de uma função  $f$  pela *wavelet*  $\psi$  é (OLIVEIRA, 2007; JUNIOR; KAGAN, 2009):

$$TWC_f^\psi(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{ab}(t)dt \quad (12)$$

ou,

$$(TWC)(a,b) = |a_0^m|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(n)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (13)$$

A Equação 13 mostra que o sinal unidimensional original  $f(t)$  é mapeado em uma nova função, em um espaço bidimensional, em escala  $a$  e translação  $b$ , pela TW. Um coeficiente da transformada *wavelet* ( $TWC(a,b)$ ), de uma escala e translação particulares, representa o quão bem corresponde o sinal original  $f(t)$  com a *wavelet* mãe.

---

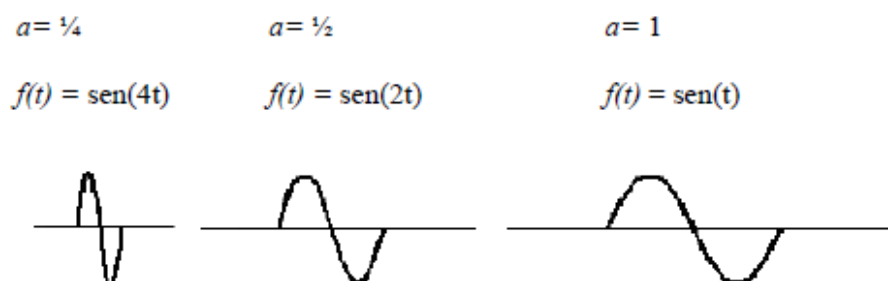
<sup>6</sup>A família das funções  $\psi(x)$ , chamadas “*Wavelet* mãe”, com escalas variáveis, são obtidas pela fixação de  $p \geq 0$  (fator de normalização) e para todo  $a \in \mathfrak{R}; a \neq 0$  (FERREIRA, 2010).

Assim, pode-se visualizar a *wavelet* mãe como uma função janela em que o fator de escala  $a$  e o tamanho da janela são interdependentes, onde menores escalas implicam em menores janelas (FILHO, 2003). Consequentemente, podem-se analisar componentes de bandas estreitas de frequência de um sinal com um pequeno fator de escala e componentes de bandas largas de frequência com fatores de escala maiores, o que permite captar todas as características de um sinal particular.

### 2.5.1.1 Escala

Segundo Filho (2003) escalar uma *wavelet* significa simplesmente dilatá-la ou comprimí-la (em função do tempo). Para ir além de descrições coloquiais tais como “dilatar”, é introduzido o fator de “escala”, usualmente denotado pela letra  $a$ . Por exemplo, este efeito é facilmente observado na função senoidal da Figura 20.

**Figura 20** – Demonstração do fator de escala em uma função senoide



Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

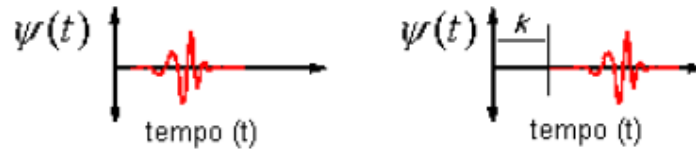
O fator de escala indica o comportamento da *wavelet* mãe. Quanto menor o fator de escala, mais “comprimida” será a *wavelet*.

### 2.5.1.2 Translação

Transladar uma *wavelet* significa deslocá-la no eixo de tempo, o que se faz matematicamente quando escreve-se  $f(x-k)$  como um atraso na função  $f$  de um fator  $k$ , sendo  $k$  constante (FILHO, 2003).

O processo de translação de uma função *wavelet* pode ser vista na Figura 21, que ilustra uma função *wavelet*  $\psi(t)$  e sua função *wavelet* transladada  $\psi(t-k)$ .

**Figura 21** – Translação de uma função *Wavelet*



Fonte: Adaptado de Filho (2003).

### 2.5.2 Transformada *Wavelet* Discreta (TWD)

Conforme Filho (2003) a discretização dos parâmetros  $a$  e  $b$  de uma TWC origina a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD). A discretização do parâmetro de translação depende da escala da *wavelet* mãe. Assim, para altas frequências, as *wavelet* mães são transladadas por passos pequenos, enquanto que para frequências baixas, a translação é feita com passos maiores (SANTOSO; GRADY; POWERS, 2000; GU; ERNBERG; STYVAKTAKIS, 2004).

Matematicamente, a definição da TWD de uma função de expansão para qualquer sinal em  $L^2(\mathfrak{R})$  pode ser representada pela Equação 14 (BURRUS; GOPINATH, 1998):

$$f(t) = \sum_{j-k} a_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (14)$$

ou simplificando:

$$f(t) = \sum_{j-k} a_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (15)$$

Uma forma mais específica, que indica como os coeficientes  $a_{j,k}$  são calculados, pode ser escrita usando produto interno:

$$f(t) = \sum_{j-k} \langle \psi_{j,k}(t), f(t) \rangle \psi_{j,k}(t) \quad (16)$$

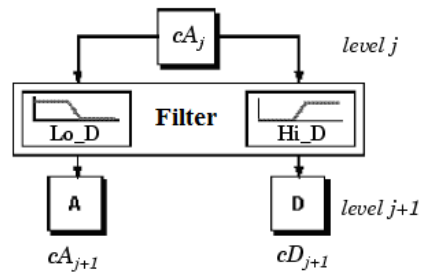
Onde  $\psi_{j,k}(t)$  forma uma base ortonormal para o espaço de sinais de interesse. Por fim, a TWD também pode ser escrita conforme Equação 17, onde  $m$  é a escala  $n$  a translação.

$$TWD(m, n) = |a_0^m|^{-\frac{1}{2}} \sum_n f(n) \psi\left(\frac{x - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (17)$$

De acordo com Misiti et al. (2002) a TWD utiliza filtros de decomposição dos sinais que separam os componentes de alta frequência (detalhes) e os componentes de baixa frequência (aproximações), conforme ilustra a Figura 22.



**Figura 22** – Decomposição de sinais utilizando TWD



Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

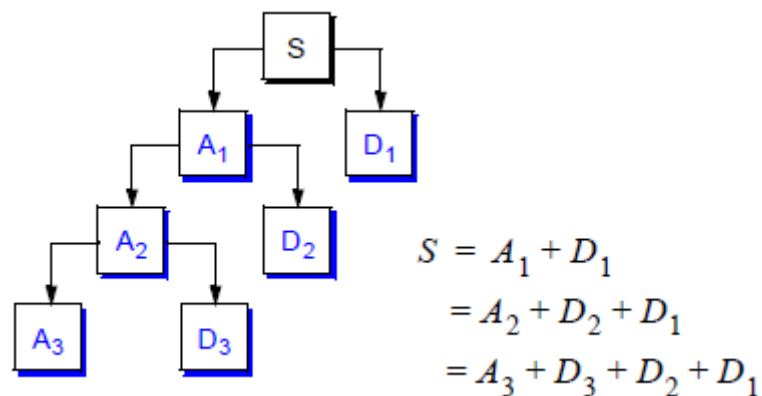
### 2.5.3 A TWD – Análise Multiresolução

Para Ferreira (2009) o efeito da mudança de escala de um sinal pode ser melhor interpretado usando-se o conceito de resolução e obtida utilizando filtros. O processo de filtragem utilizado para a TWD apresenta uma forma de realização da técnica de Análise Multiresolução (AMR).

A AMR foi criada por Stéphane Mallat em 1989 e consiste de um processo pelo qual um sinal é analisado em relação às baixas e às altas frequências que o compõe (MALLAT, 1989), e como resultado tem-se a combinação de uma função de escala  $f(t)$  e de uma função *wavelet*  $\psi(t)$ .

Este processo baseia-se na filtragem de um sinal a ser analisado através de filtros passa-alta e passa-baixa, fornecendo versões do sinal original relativas aos coeficientes de funções *wavelets* e funções escala, ou aproximações e detalhes, respectivamente.

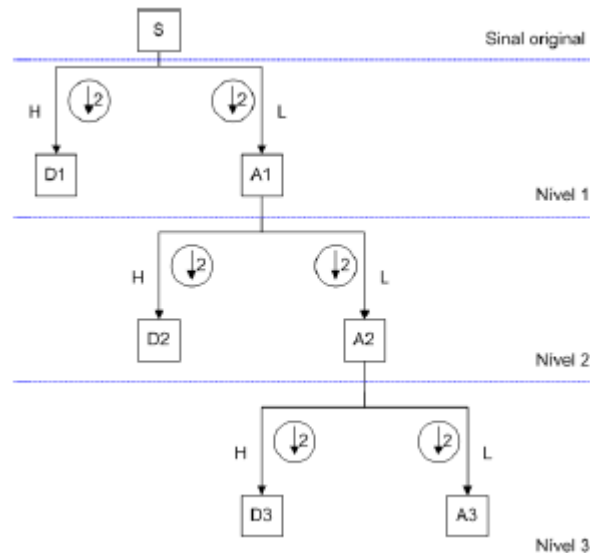
**Figura 23** – Arvore de decomposição *wavelet* até o nível 3



Fonte: Adaptado de (MISITI et al., 2002).

O processo de decomposição pode ser iterado, com sucessivas aproximações a serem decompostas, de forma que um sinal seja dividido em muitas componentes de baixa resolução (MISITI et al., 2002). Este processo é chamado de “árvore de decomposição de *wavelet*”, conforme ilustra a Figura 23.

**Figura 24** – Decomposições sucessivas. L = filtro passa-baixa e H = filtro passa-alta

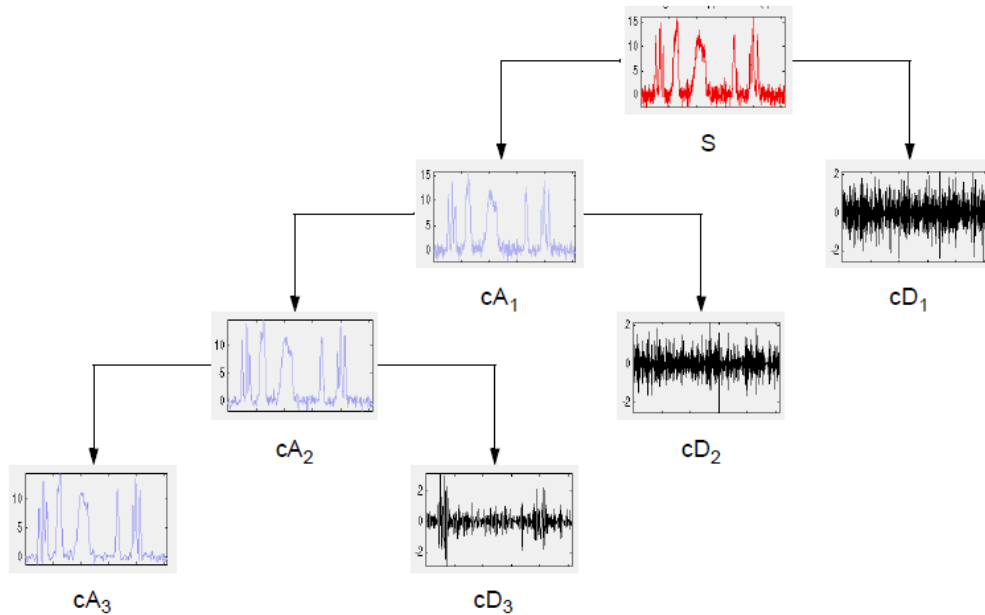


Fonte: Adaptado de Ferreira (2010).

Em resumo, como apresentado pela Figura 24, a AMR é definida como o cálculo da TWD por sucessivos filtros de passa-baixa e passa-alta do sinal discreto, no domínio do tempo. Assim, no primeiro nível de aplicação da TWD, o sinal original é decomposto em dois subsinais:  $A1$  e  $D1$ . Utilizando o subsinal de acumulação do primeiro nível de decomposição ( $A1$ ) aplicam-se novamente as TWD, obtendo outros dois subsinais:  $A2$  e  $D2$ . No terceiro nível de decomposição, aplicam-se novamente as TWD ao subsinal de acumulação do segundo nível ( $A2$ ), decompondo o sinal em outros dois subsinais:  $A3$  e  $D3$  (FILHO, 2003; FERREIRA; JUNIO; KAGAN, 2009; FERREIRA, 2010).

Um exemplo prático da utilização da AMR pode ser visualizado na Figura 25. A decomposição *wavelet* de  $S$  (sinal original mais ruído) resulta nas saídas  $cA1$  e  $cD1$  para o primeiro nível de decomposição. Aplicando mais um nível de decomposição sobre  $cA1$  teremos os sinais  $cA2$  e  $cD2$ . Já é possível observar uma melhora na qualidade do sinal  $cA2$  em relação a  $S$  de (MISITI et al., 2002).

**Figura 25** – Exemplo da decomposição por AMR



Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

## 2.5.4 Introdução à Família *Wavelet*

Para Ferreira 2009, existe um grande número de funções que podem ser eleitas como *wavelets* mãe. As famílias de funções são comumente representadas pela abreviação do nome do pesquisador que as desenvolveram (“coif” para Coifman ou “db” para Daubechies) ou de alguma denominação dada (“sym” para Symlets), seguido por um número que costuma representar uma característica da função.

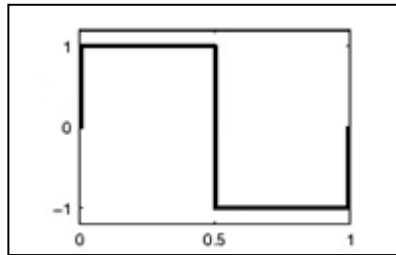
Como característica geral, observa-se que todas as funções decaem rapidamente para zero. As *wavelets* Morlet e MexiHat (ou Chapéu Mexicano) não possuem escalonadoras e são simétricas. Já a *wavelet* Haar é a única função descontínua, com três pontos de descontinuidade.

### 2.5.4.1 *Wavelet* de Haar

A *Wavelet* com os mais simples coeficientes no espaço  $L^2(\mathfrak{R})$  é denominada *Wavelet* de Haar. Uma de suas propriedades é ter suporte compacto, contudo ela não é continuamente diferenciável, o que de certa forma limita suas aplicações (GOMES et al., 1997). A *Wavelet* de Haar é apresentada na Figura 26 com a seguinte função:

$$\psi = \begin{cases} +1 & 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t < 1 \end{cases} \quad (18)$$

**Figura 26** – *Wavelet* mãe Haar



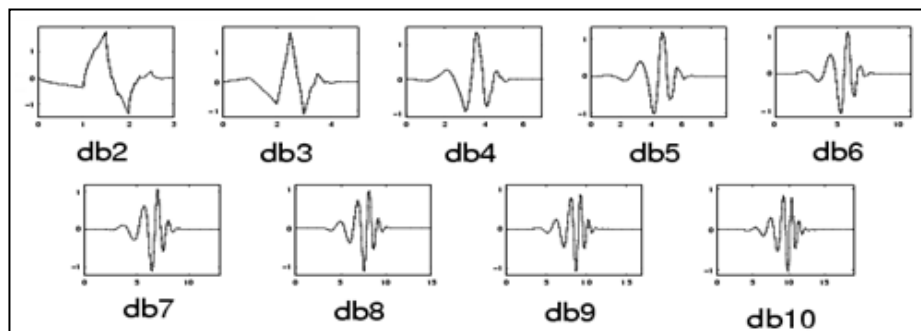
Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

#### 2.5.4.2 *Wavelet* de Daubechies

Segundo Misiti et al (2002), Ingrid Daubechies é considerada uma das mais brilhantes pesquisadoras sobre *wavelet* no mundo, e criou o que é chamado “*wavelet* ortonormal com suporte compacto”. Os nomes das *wavelet* da família de Daubechies são escritos por dbN, onde N é a ordem de decomposição, e db é o sobrenome da autora da *wavelet* mãe.

Ainda conforme Misiti et al. (2002), a *wavelet* mãe db1 é semelhante à de Haar. Já os demais modelos de *wavelet* mães da família Daubechies são mostrados na Figura 27.

**Figura 27** – *Wavelet* mãe Daubechies



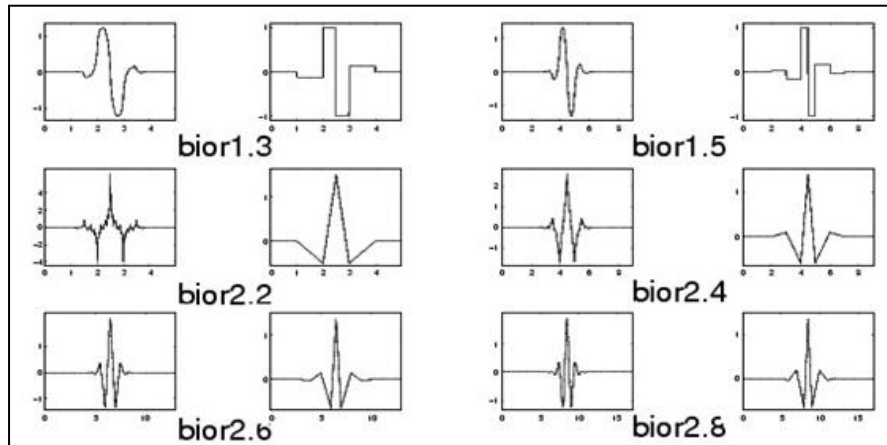
Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

#### 2.5.4.3 *Wavelet* Biortogonais

A família de *wavelets* biortogonais exibe a propriedade de fase linear, além de ter suporte compacto e serem simétricas. São utilizadas duas *wavelets*, uma para a decomposição e outra para a reconstrução, em lugar de uma só, e são definidas como pares de bases

mutuamente ortogonais (MISITI et al., 2002). Alguns pares de *wavelets* biortogonais são apresentados na Figura 28.

**Figura 28 – Wavelet mãe Biortogonais**

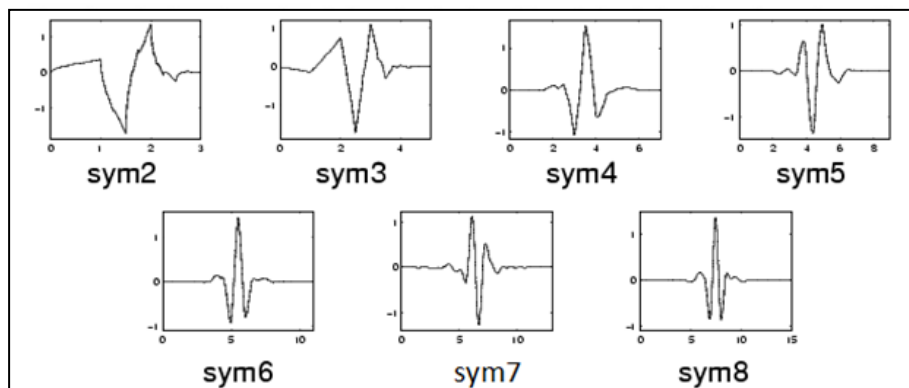


Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

#### 2.5.4.4 Wavelet de Symlets

As *wavelets* mães da família Symlet são quase simétricas como às propostas pela família da Daubechies, sendo as propriedades das duas famílias de ondas muito semelhantes. As Symlet apresentam-se em vários modelos, variando da sym2 à sym45. Na figura 29 apresentam-se alguns destes modelos.

**Figura 29 – Wavelet mãe Symlets**

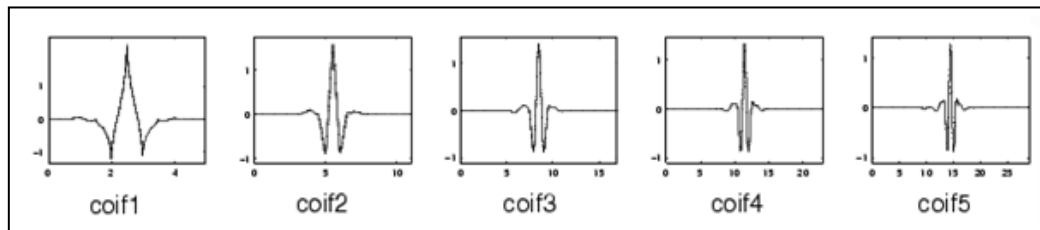


Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

### 2.5.4.5 Wavelet de Coiflets

Estas *wavelets* foram definidas por I. Daubechies e R. Coifman, pesquisadores na área de Teoria *Wavelet*, em 1989. As Coiflets foram construídas para tentar manter uma semelhança maior entre o sinal original e o sinal transformado. As *wavelet* mães da família Coiflets são denominadas *coifN*, onde  $N$  é a ordem destas. Porém alguns autores usam  $2N$  no lugar de  $N$  (MISITI et al., 2002). Estas *wavelet* mãe são ilustradas na Figura 30.

**Figura 30** – *Wavelet* mãe Coiflets



Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

### 2.5.4.6 Wavelet de MexiHat, Meyer e Morlet

A *wavelet* mãe de Morlet não tem função de escala, sendo apenas explícita. É definida pela Equação 19.

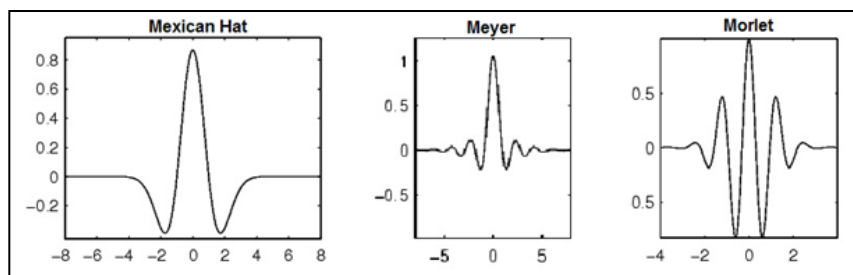
$$\psi(x) = Ce^{-x^2/2} \cos(5x) \quad (19)$$

A *wavelet* MexiHat (ou Chapéu Mexicano) não tem nenhuma função de escala e é derivada a partir de uma função que é proporcional à segunda função derivada da função de densidade de probabilidade Gaussiana (MISITI et al., 2002), expressada pela Equação 20:

$$\psi(x) = \left( \frac{2}{\sqrt{2}} \pi^{-1/4} \right) (1 - x^2) e^{-x^2/2} \quad (20)$$

As *Wavelet* mãe MexiHat, Meyer e Morlet são apresentadas pela Figura 31.

**Figura 31** – *Wavelet* mãe MexiHat, Meyer e Morlet



Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2002).

### 2.5.5 Aplicação da TW em QEE

Gaouda (1999) introduziram a TW como uma ferramenta para a análise de sinais, sendo capaz de detectar e localizar alguns distúrbios que ocorrem no sistema elétrico. A detecção e a localização dos diferentes problemas de QEE são feitas através da técnica de AMR, utilizando para isso a *wavelet* mãe db4, possibilitando, desta forma, detectar qualquer anormalidade no sinal original por menor que seja, pelos níveis finos de resolução.

Em seu tutorial, Kim e Aggarwal (2000) explicam as vantagens que a TW possui sobre a TF para análise de sinais, por possuir a capacidade de analisar simultaneamente informações de tempo e frequência. Eles utilizaram as *wavelet* mães ortogonais de Haar, Symmlet e Daubechies, implementando a teoria da TWD com o auxílio do Matlab, para um sinal transitório provocado por um chaveamento de capacitor. Este algoritmo verifica a eficácia que se pode obter com a transformada, onde esta, usada adequadamente, é capaz de detectar o distúrbio e quantificar a frequência em cada nível de detalhe, baseado na AMR.

Em outro trabalho, Resende e Penna (2001) apresentam uma metodologia que analisa a tensão num barramento, possibilitando a detecção e classificação de possíveis distúrbios da QEE ocorridos em tal barramento. Para isso, utilizam a TWD como técnica base para tais estudos, sendo a db4 a *wavelet* mãe utilizada para a análise. O Matlab foi utilizado como plataforma para a implementação do programa.

Filho (2003) apresenta um estudo sobre Transformada *Wavelet* aplicada à QEE com o intuito de detectar, localizar e classificar eventuais distúrbios que ocorrem no Sistema Elétrico. Assim, os distúrbios de tensão gerados e analisados foram detectados e localizados através da técnica de AMR.

Por fim, a dissertação de Ferreira (2009) apresenta importância de registrar as variações eventuais de frequência no sistema elétrico de potência as quais podem ultrapassar os limites estabelecidos para sua operação normal. Neste trabalho implementou-se um algoritmo capaz de detectar distúrbios na frequência, caracterizados por situações de sub ou sobrefrequência, e também quantizar o tempo em que o sistema esteve operando nestas condições. Para atingir este objetivo foi empregada a técnica de AMR para detecção dos distúrbios gerados.

## 2.6 Sistemas Embarcados

Com o avanço da tecnologia e a proliferação de sistemas eletrônicos, os SE já estão presentes em praticamente todas as atividades humanas e tendem a aumentar sua presença no cotidiano da população. Exemplos de tais sistemas são os telefones celulares, *smarphones*, *palm-tops*, o sistema de controle dos carros e ônibus, os fornos de micro-ondas com controle de temperatura inteligente, as máquinas de lavar e outros eletrodomésticos (CARRO; WAGNER, 2003).

Os sistemas embarcados apresentam características em comum com os sistemas computacionais de propósito geral, porém possuem capacidades e aplicações limitadas e específicas. Cada aplicação pode apresentar requisitos diferentes de desempenho, consumo de potência e área ocupada, o que acarreta em uma combinação distinta de módulos de hardware e software para atender estes requisitos especiais.

### 2.6.1 Definição

Um sistema embarcado é uma combinação de *hardware* e *software* para desempenhar uma função específica, fazendo parte de algum sistema que pode ou não ser um computador. Também pode ser considerado como um sistema microprocessado no qual o computador é completamente encapsulado ou dedicado ao dispositivo ou sistema que ele controla. Um sistema embarcado realiza um conjunto de tarefas predefinidas, geralmente com requisitos específicos.

Como executam tarefas dedicadas, o projeto destes sistemas pode ser otimizado ao máximo. Desta forma, possuem características como baixo consumo de energia, tamanho reduzido, preço competitivo, confiabilidade e portabilidade. Podem executar múltiplas tarefas e em tempo real (*real-time*). Possuem alto desempenho e funcionalidades avançadas para as suas aplicações.

O *software* escrito para sistemas embarcados é muitas vezes chamado *firmware*, e armazenado em uma memória ROM ou memória *flash*, ao invés de um disco rígido. Por vezes o sistema também é executado com recursos computacionais limitados: sem teclado, sem tela e com pouca memória.

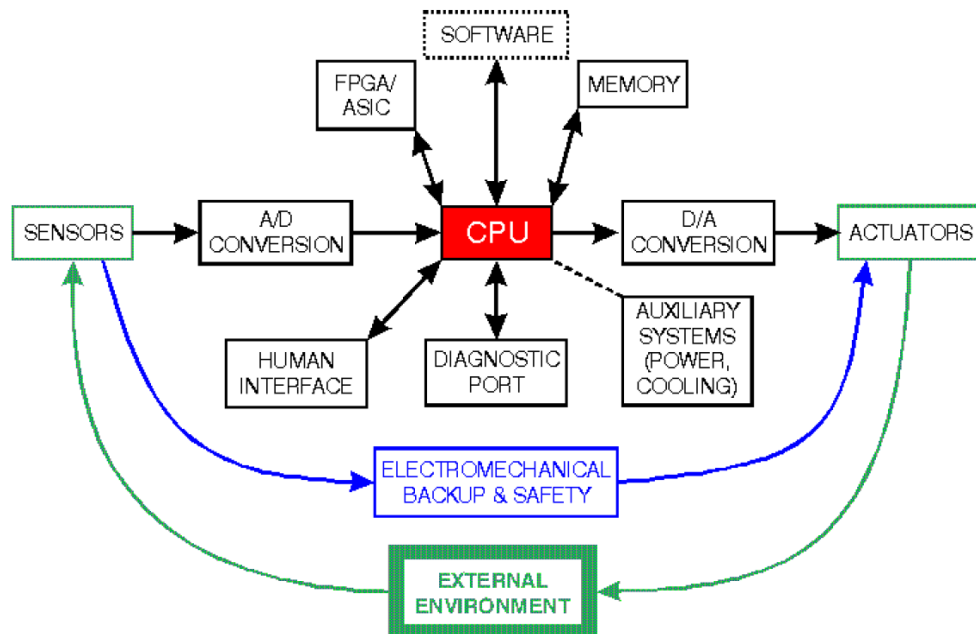


## 2.6.2 Arquitetura

O projeto deste tipo de sistema envolve conceitos diferentes daqueles utilizados pela computação de propósitos gerais. Por exemplo, as questões da portabilidade e do limite de consumo de potência sem perda de desempenho, a baixa disponibilidade de memória, a necessidade de segurança e confiabilidade, a possibilidade de funcionamento em uma rede maior, e o curto tempo de projeto tornam o desenvolvimento de sistemas computacionais embarcados uma área em si (WOLF, 2001).

Em geral os sistemas embarcados possuem uma capacidade de processamento reduzida em comparação com computadores desktops. Ao invés de utilizar microprocessadores, os desenvolvedores preferem utilizar microcontroladores, pois estes já possuem diversos periféricos integrados no mesmo *chip* (FIGURA 32), como entradas, saídas, processamento, memórias, entre outros.

**Figura 32** – Elementos de um sistema embarcado



Fonte: Adaptado de EmbeddedSystems (2012).

Para uma aplicação específica, um projeto usando lógica programável como FPGAs ou ASICs pode ter um desempenho superior ao que usa um processador, ou até mesmo consumir menos energia (CARRO; WAGNER, 2003).

### 2.6.3 Sistema operacional embarcado

Os sistemas embarcados podem ser desenvolvidos com um *firmware* específico, contendo somente as funcionalidades disponíveis pelo hardware, ou podem suportar diferentes sistemas operacionais. A seguir citam-se alguns exemplos de sistemas operacionais:

#### a) NetBSD

O NetBSD é um sistema operacional do tipo Unix, seguro e de código aberto. Pode ser baixado gratuitamente no site do projeto do NetBSD. É altamente portátil e disponível para uma grande variedade de plataformas inclusive para sistemas embarcados.

#### b) FreeRTOS

FreeRTOS é um mini *kernel* de tempo real, portátil e de código fonte aberto. Seu ambiente de projeto mostra como criar um sistema embarcado de tempo real a partir de uma máquina rodando *Windows*. É preemptivo com política *round robin*, dando preferência as tarefa de maior prioridade. Tarefas com mesma prioridade compartilham o tempo de CPU.

#### c) Embedded Linux

O termo *embedded Linux* refere-se ao uso do sistema operacional GNU/Linux em sistemas embarcados, como telefones celulares e PDAs. É formado pela combinação do *kernel* do Linux mais alguns poucos softwares necessários para desempenhar a função do sistema embarcado. Uma instalação típica do *embedded Linux* contem cerca de 2 MB.

Dentre suas características pode-se citar: é de código aberto, necessita de pouco espaço, é maduro e estável. Sobre o *kernel* do Linux pode-se dizer que ele é multitarefa, utiliza memória virtual e tem suporte a TCP/IP.

#### **d) WindowsCE**

Lançado em 1996 pela Microsoft, o WindowsCE continha poucas características de sistema operacional de tempo real. Em 2000 a Microsoft reescreveu o seu *kernel* para torná-lo de fato um sistema de tempo real. Hoje o WindowsCE suporta 256 níveis de prioridade para classificar tarefas que serão escalonadas. Sua instalação necessita de 21 MB de memória.

#### **e) Android**

O Android é um sistema operacional baseado no *kernel* do Linux. Voltado principalmente para utilização em dispositivos móveis (*smartphones*), possui bibliotecas gráficas 2D e 3D. O Android é totalmente capaz de fazer uso de câmeras de vídeo, tela sensível ao toque, GPS, acelerômetros, entre outros *hardwares*.

### **2.7 Trabalhos relacionados à QEE**

Como já comentado na introdução deste trabalho, a QEE tem-se tornado uma preocupação crescente e comum às empresas geradoras e seus consumidores. Grandes instituições e agentes reguladores, como a ANEEL, têm se mobilizado no sentido de mensurarem o impacto financeiro devido a uma má QEE.

Visando auxiliar no desenvolvimento de técnicas, metodologias e sistemas capazes de controlar, analisar e mensurar eventos relacionados à QEE, vários estudos têm sido desenvolvidos pelas comunidades acadêmica e científica. Dentre as pesquisas voltadas à detecção e classificação de distúrbios relacionados à QEE muitas são baseadas em aplicações de certas ferramentas matemáticas, como Transformadas *Wavelet* e Transformada de *Fourier* (UYAR; YILDIRIM; GENCONGLU, 2003; HUA; BUAGUN; HONG, 2008).

Assim, na dissertação de Leborgne (2003) é apresentada uma metodologia alternativa para a caracterização da sensibilidade de cargas e processos industriais frente a afundamentos de tensão, utilizando de um sistema integrado de monitoração da QEE a partir da coleta de dados diretamente do processo industrial. A metodologia apresentada neste trabalho permitiu caracterizar a sensibilidade das cargas e processos tanto pelo método convencional de caracterização (intensidade e duração) como por métodos alternativos.

Em (OLESKOVICZ et al., 2006), realiza-se um estudo comparativo entre a Transformada de *Fourier* com diversos tipos de janelas e a Transformada *Wavelet* com filtro de *Daubechies*. Posteriormente os sinais processados pelas transformadas foram submetidos a uma rede neural artificial (RNA) para que esta viesse a classificar os distúrbios.

É apresentada no artigo de Garcia et al. (2009) uma ferramenta computacional para auxílio na solução de problemas de QEE, sendo esta responsável pela análise de situações provocadas por possíveis distúrbios originados em diferentes processos. A análise se realiza a partir de informações coletadas num repositório de dados do sistema de monitoramento. Este sistema possui um módulo para o reconhecimento de distúrbios transitórios semelhantes, utiliza como ferramenta de teste e validação o Matlab.

No artigo (FERNANDES et al., 2009) é descrito o desenvolvimento de uma técnica para o pré-processamento de sinais, destinada à classificação dos distúrbios ocorridos em um determinado sistema elétrico de potência. Em relação aos distúrbios, foram considerados os afundamentos, elevações, interrupções e oscilações transitórias. Para aquisição e digitalização dos sinais, foi utilizado o janelamento, e as RNAs foram empregadas para a tarefa de classificação das ocorrências. Os resultados mostraram um bom desempenho de toda a metodologia proposta para a análise de sinais no contexto de QEE.

O trabalho de Junior, O. (2009) apresenta uma metodologia para análise e monitoração da QEE, através da identificação e quantificação dos distúrbios eletromagnéticos. A metodologia utilizou técnicas de DSP, possibilitando a construção de filtros digitais, a detecção de eventos e a estimativa da frequência dos sinais elétricos analisados. O programa desenvolvido foi testado usando formas de ondas com distúrbios previamente conhecidos para sua validação. Foram analisadas formas de onda obtidas de medições em campo, verificando a eficiência do algoritmo frente a ruídos e outros fenômenos de QEE em medições reais.

Na dissertação (JUNIOR, F., 2009) é descrita a utilização da Transformada *Wavelet* e a Norma Euclidiana Instantânea para a detecção de eventos e monitoração da QEE. O sistema foi simulado utilizando o Simulink e os dados de saída foram validados no próprio Matlab.

Por fim, Ferreira (2010) apresenta em sua tese técnicas de processamento de sinais e inteligência computacional que foram aplicadas à análise, detecção e classificação dos distúrbios elétricos. A técnica de curvas principais foi utilizada para análise dos distúrbios. Como resultado, foi possível avaliar a complexidade de cada classe de distúrbios, em que parâmetros importantes à detecção e classificação foram revelados. Na detecção, estes parâmetros foram explorados em comparação com parâmetros já utilizados, como o RMS.

**Tabela 2** – Comparação entre os trabalhos pesquisados

Autor	Análise de QEE	Análise de EE	TW	TF	S.E.	Matlab Simulink	Estudo de Caso
LEBORGNE	S	N	N	S	S	S	S
OLESKOVICZ	S	N	S	S	N	S	N
GRACIA	S	N	S	N	S	S	N
FERNANDES JUNIOR, O.	S	N	S	S	S	S	S
JUNIOR, F.	S	N	S	S	S	S	N
FERREIRA	S	N	S	S	N	N	N
<b>SISTEMA SE PROPOSTO</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>

Legenda: S – Sim, N – Não

Fonte: Do autor.

A Tabela 2 faz um comparativo entre os trabalhos já realizados e a proposta de projeto desta dissertação. Neste trabalho são utilizados os métodos de valor RMS e TW para detecção de distúrbios de QEE. A não utilização do método baseado na TF se justifica pela necessidade de análise do domínio do tempo, e não da frequência, como comumente é utilizado.

## 2.8 Considerações finais

Este capítulo abordou os principais conceitos que envolvem a QEE, descrevendo suas causas e efeitos, bem como trazendo ferramentas para análise e detecção de perturbações que podem ocorrer na rede elétrica. Também foram apresentadas as tecnologias disponíveis para auxiliar no monitoramento da QEE, como por exemplo, a utilização de sistemas embarcados, que possibilitam a criação e desenvolvimento de sistemas complexos, porém com custos aceitáveis de projeto.

Conforme descrito neste referencial, a análise *wavelet* representa uma ferramenta para a detecção de distúrbios elétricos, principalmente em sua versão discreta, sendo a haar e a db4 as *wavelets* mãe mais apropriadas, conforme abordado nos referenciais deste estudo.

Outro ponto importante deste estudo é a implementação da AMR em SE (utilizando a estrutura piramidal proposta por Mallat), que representa um avanço tecnológico e potencializa uma diminuição de gastos financeiros, pois dispensa a utilização de circuitos eletrônicos muito complexos.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho refere-se a uma pesquisa aplicada de natureza descritiva e experimental. Também é de natureza exploratória, baseando-se em dados bibliográficos para a criação de uma metodologia para o gerenciamento de parâmetros e demandas energéticas. Para atingir os objetivos específicos deste trabalho, o presente projeto foi dividido em quatro fases, durante todo o período de realização da dissertação.

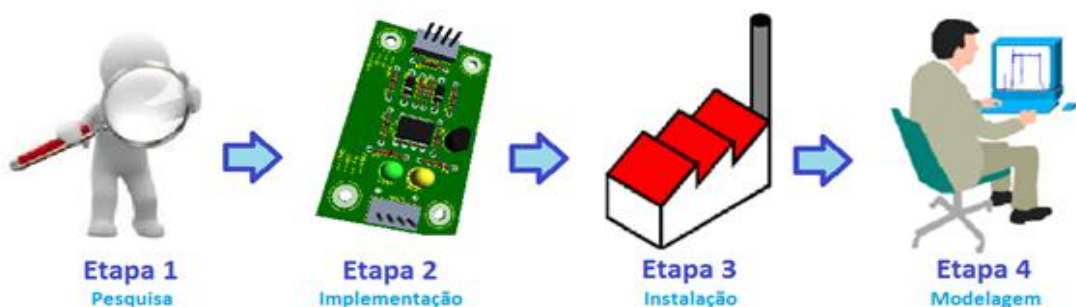
A primeira etapa compreendeu a análise das soluções existentes no mercado, bem como dos estudos realizados no cenário atual de QEE nacional. Nesta fase também foi executado o levantamento de referencial teórico, a fim de expandir a pesquisa já realizada. O objetivo é fundamentar sua importância e contribuições que as pesquisas nesta área proporcionam para novas ideias de aprimoramento e melhorias científicas e práticas.

Na segunda etapa, foi desenvolvido o sistema de aquisição e análise de dados provenientes da subestação de fornecimento de energia elétrica. Esta etapa compreende o projeto e dimensionamento das placas eletrônicas de condicionamento de sinais, das placas de aquisição e discretização dos dados e a programação dos sistemas embarcados.

A etapa seguinte correspondeu à instalação e calibração do sistema de aquisição no ambiente industrial. Este sistema permaneceu em funcionamento durante cinco semanas, onde coletou parâmetros de tensão e corrente de 3 subestações de energia elétrica, com capacidade de até 1000 A cada.

Na quarta e última etapa, os dados coletados pelo sistema foram analisados, podendo assim ser levantado o modelo de consumo e também foi criada uma ferramenta para detecção e classificação dos distúrbios elétricos. A Figura 33 ilustra as etapas do projeto desenvolvido.

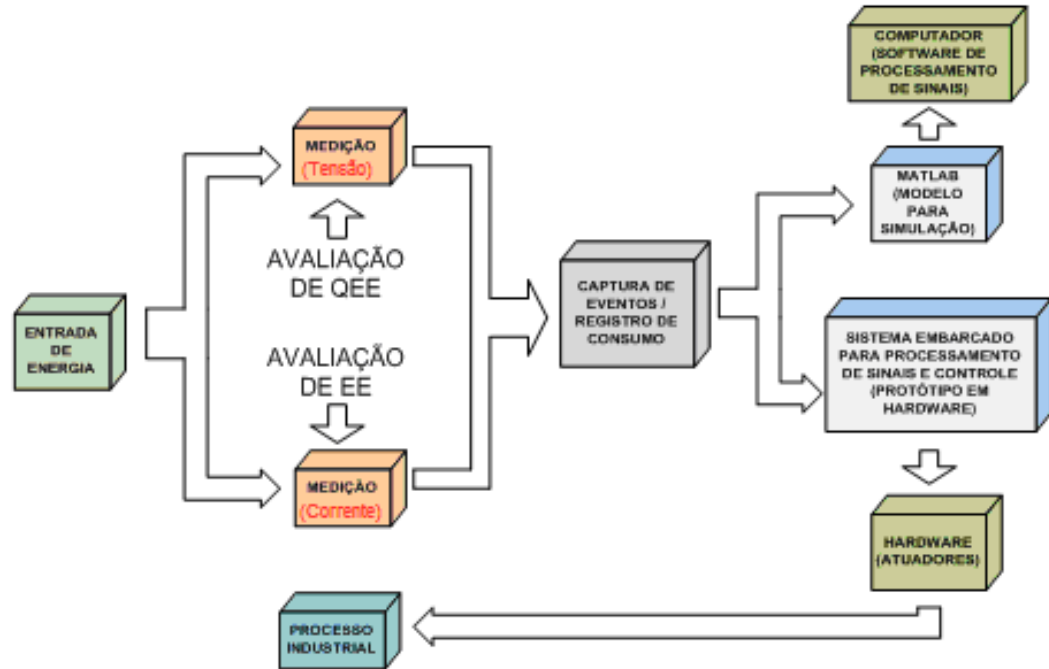
**Figura 33** – Etapas que compreendem o desenvolvimento do projeto



Fonte: Do autor.

Já a Figura 34 apresenta uma visão mais detalhada de como o sistema implementado (Etapa 2) interage entre a aquisição dos parâmetros elétricos do processo industrial (Etapa 3) e a apresentação indicadores de QEE e o modelo de consumo e EE (Etapa 4).

**Figura 34** – Diagrama de blocos do sistema proposto (etapas 3 e 4)



Fonte: Do autor.

Abaixo segue a descrição de cada um dos blocos vistos no fluxograma:

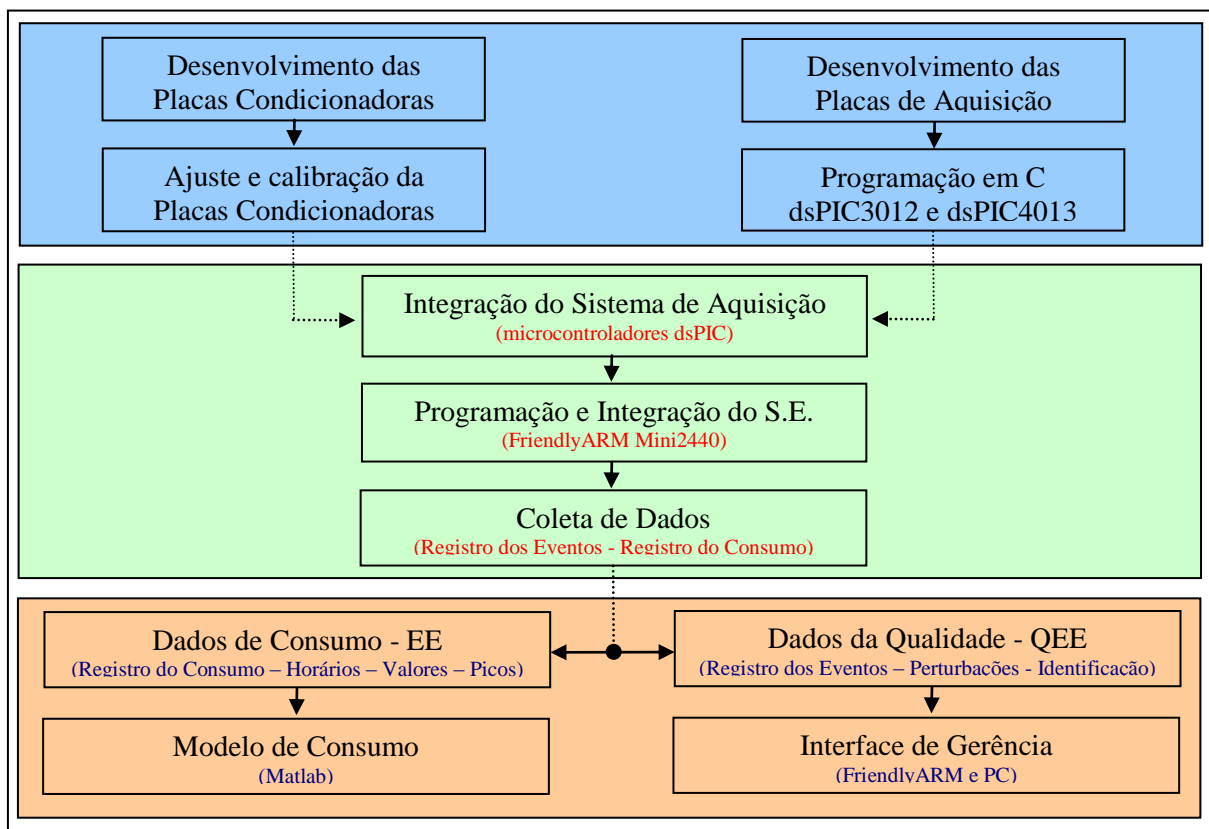
- Entrada de energia: representa a entrada de tensão geral que alimenta um ou mais processos industriais;
- Medição: este bloco representa o processo de aquisição de dados e é responsável pela conversão analógica/digital;
- Captura de eventos: recebe os dados já digitalizados do bloco de medição. É responsável pela captura dos eventos (perturbações), para posterior análise do estado da QEE no processo;
- Captura e registros de consumo: recebe os dados já digitalizados do bloco de medição, sendo responsável pelo registro do consumo;
- Modelo: este bloco possui o modelo que descreve o consumo de energia do processo, servindo como base para as simulações, tanto na questão de

quantificar as perturbações quanto determinar uma melhor eficiência energética do processo;

- Sistema de gerência: a partir dos dados encontrados pelo modelo desenvolvido, estes são disponibilizados por uma interface computacional;
- Atuadores: caso constatado uma QEE abaixo dos padrões exigidos pela ANNEL, ou mesmo um consumo acima do permitido para o horário, pode-se interagir com os dispositivos consumidores a fim de estabilizar o sistema;
- Processo industrial: bloco representando o processo que está consumindo energia elétrica. Poderá, caso necessário, ser gerenciado pelo sistema proposto.

A Figura 35 apresenta o fluxograma do desenvolvimento do projeto, desde o desenvolvimento das placas de aquisição, programação dos sistemas embarcados (dsPIC e ARM) até a análise dos dados (com o Matlab, por exemplo).

**Figura 35** – Divisão e fluxo de desenvolvimento do sistema



Fonte: Do autor.

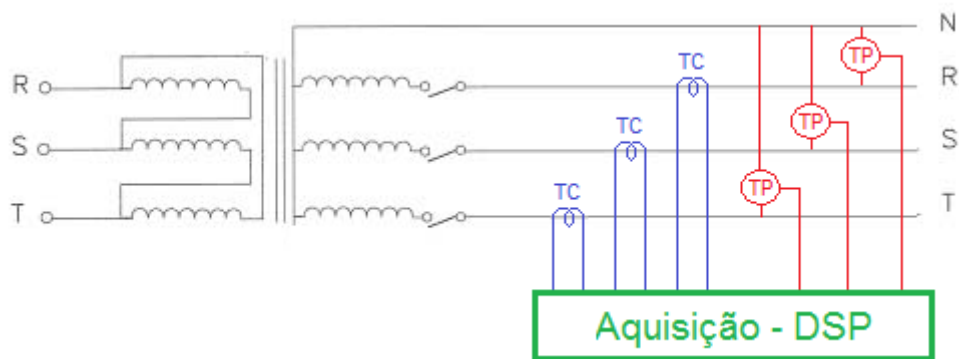


### 3.1 Implementação do *hardware* de aquisição

A primeira etapa está focada na entrada do sinal, onde estes sinais são digitalizados. Os passos envolvidos em cada etapa seguem os dados teóricos estudados até o momento.

A aquisição do sinal é realizada com a utilização de sensores do tipo TC e TP, que são conectados à rede elétrica, correspondendo à etapa de entrada de sinal. Este sinal é condicionado para atingir faixas de valor específicos e dentro dos limites do conversor analógico digital (ADC) do DSP utilizado. Como saída, tem-se um sinal digitalizado (valor discreto), podendo assim ser manipulado computacionalmente. A Figura 36 esboça os sensores conectados ao barramento elétrico e ao dispositivo de aquisição.

**Figura 36** – Esboço dos sensores de corrente e sistema DSP



Fonte: Do autor.

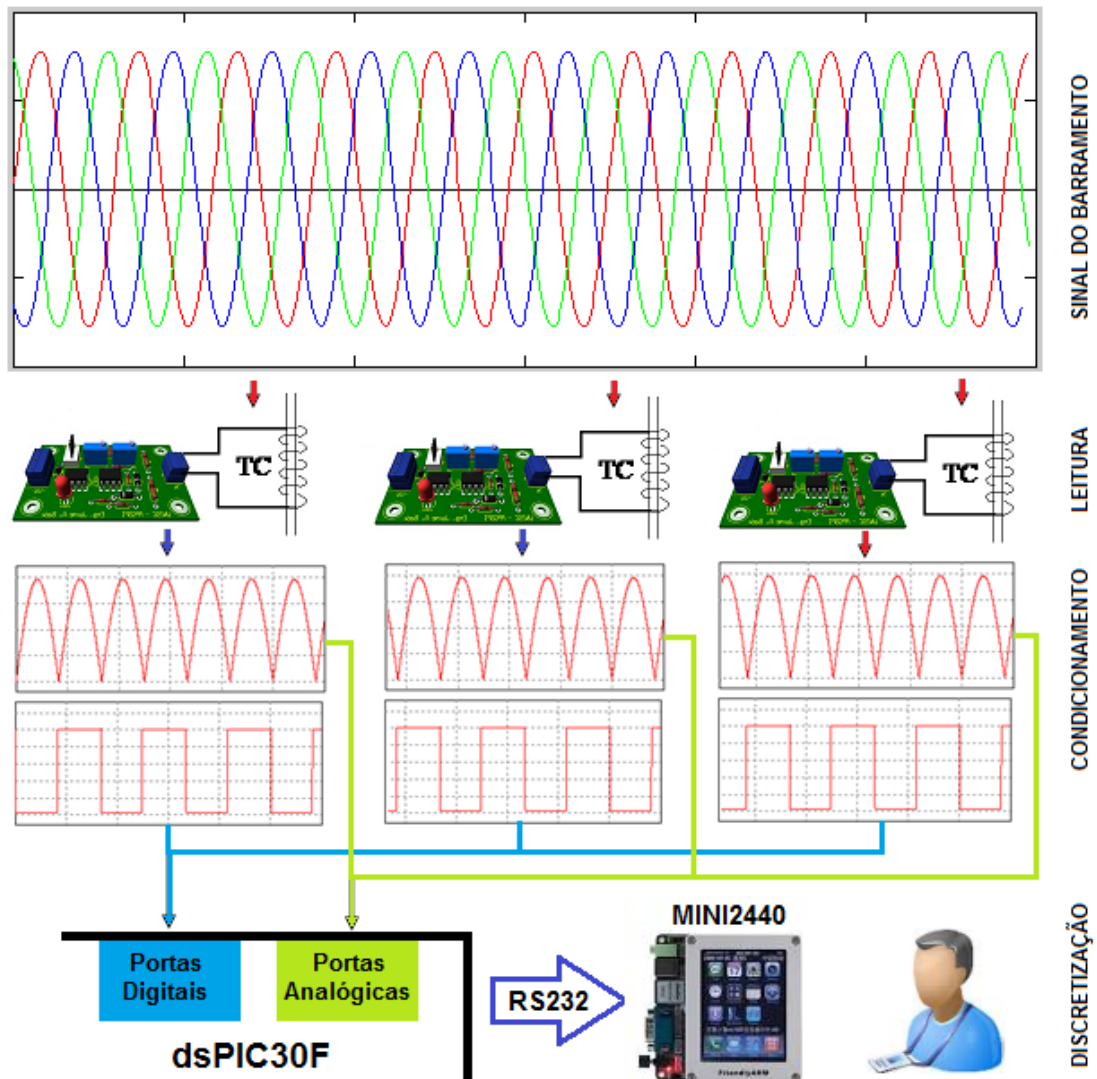
Na implementação deste projeto, foram desenvolvidos alguns dispositivos de *hardware* necessários para a integração do sistema de monitoramento, ou seja, placas para o condicionamento do sinal, placas para aquisição e placas para comunicação e interface com o sistema embarcado. Assim, as seguintes placas eletrônicas foram desenvolvidas:

- Placa de condicionamento (simples);
- Placa de condicionamento (RST);
- Placa de aquisição dsPIC30F3012;
- Placa de aquisição dsPIC30F4013;
- Conversor RS232/485.

A necessidade da criação destas placas pode ser melhor compreendida ao se observar o cenário proposto na Figura 37. Esta ilustração descreve com mais detalhe e clareza o que

vem a ser o sistema de monitoramento de QEE proposto neste trabalho, e também apresenta uma visão mais técnica dos tipos de sinais e o fluxo destes dados em cada parte do projeto.

**Figura 37** – Fluxo de sinais no cenário de estudo



Fonte: Do autor.

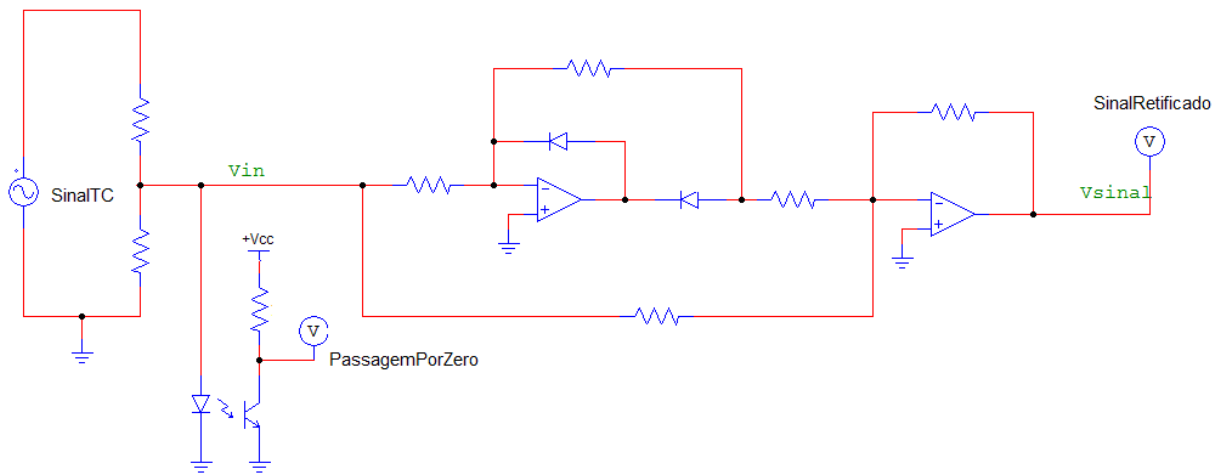
Nesta figura é possível observar os sinais senoidais de entrada, que são capturados pelos sensores e posteriormente condicionados de forma a se ter dois sinais distintos: um sinal retificado e um sinal digital. Ambos sinais são lidos pelo circuito DSP (dsPIC30F), discretizados e enviados ao sistema embarcado (MINI2440) para serem visualizados pelo usuário.

As seções a seguir contemplam a descrição detalhada do projeto e funcionalidades de cada um desses dispositivos.

### 3.1.1 Condicionamento do sinal

A aquisição do sinal é realizada com a utilização de TPs e TCs, correspondendo à etapa de entrada, os quais são conectados à rede elétrica. Nesta etapa é necessário o condicionamento do sinal, que corresponde à retificação da tensão alternada que provém dos sensores. Esta retificação é feita através de um circuito retificador de precisão, circuito este observado na Figura 38.

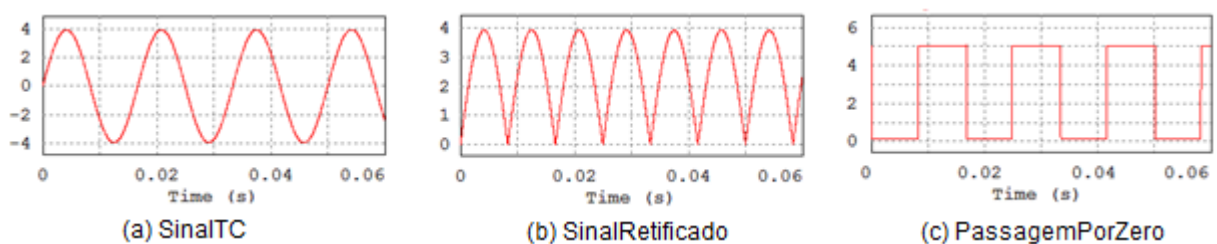
**Figura 38** – Circuito condicionador (Retificador de Precisão)



Fonte: Do autor, extraído do *software* PSIM.

As formas de onda de entrada e saída da placa de condicionamento são mostradas na Figura 39. Sinal de entrada (*SinalTC*) corresponde à queda de tensão resultante da corrente que circula entre os dois resistores série ligados ao TC. Como saída do condicionador temos o dois sinais, o *SinalRetificado* e o sinal de *PassagemPorZero* que informa o semiciclo negativo de cada ciclo de onda completa do sinal condicionado.

**Figura 39** – Sinais de entrada e saída do condicionador



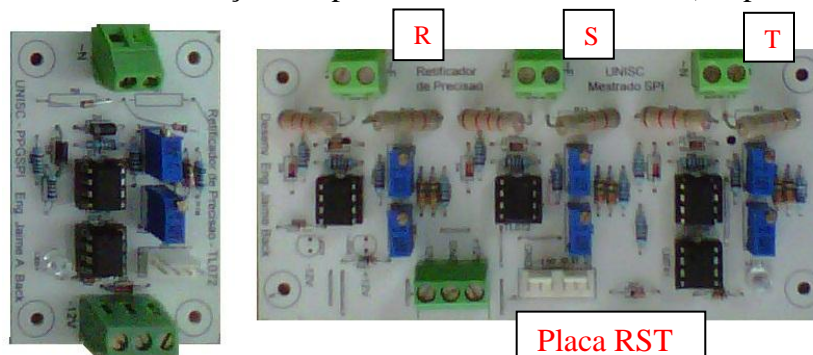
Fonte: Do autor, extraído do *software* PSIM.

Com base nos resultados adquiridos na simulação deste circuito, foram desenvolvidas duas placas de condicionamento, sendo uma placa para conexão de um único sensor para leitura de apenas uma fase, e outra placa destinada a leitura das três fases simultaneamente (conexão de três sensores no sistema trifásico), com as seguintes características:

- Placa de condicionamento simples: esta placa corresponde ao circuito eletrônico (retificador de precisão) mostrado na Figura 38. Possui alimentação simétrica de  $\pm 12V$ , entrada para sensores e como saída têm os sinais correspondentes à Figura 39. O circuito completo pode ser visto no Apêndice A (*Condicionador.dsn*);
- Placa de condicionamento RST: A placa de condicionamento RST possui as mesmas características da citada acima, porém possibilita a conexão de três sensores ao mesmo tempo, permitindo assim o monitoramento de um sistema trifásico (tensões ou correntes nas fases R, S e T). Na prática esta placa integra três circuitos retificadores de precisão, e tem como sinais de saída o referencial de polaridade (*Vciclo*) da fase R, e os sinais retificados da fase R, da S e T.

A Figura 40 apresenta as placas de condicionamento desenvolvidas (simples e RST). A integração de três circuitos condicionadores simples em uma única placa resulta na utilização de uma quantidade menor que componentes, como conectores de alimentação e de saída de sinais. Utiliza-se apenas um circuito para detecção de ciclo, sendo implementado para apenas uma das fases. Isto é possível visto que em um sistema trifásico a tensão está defasada em 120 graus por fase. Logo, essa defasagem deve ser calculada pelo circuito DSP.

**Figura 40** – Visualização das placas de condicionamento (simples e RST)



Fonte: Do autor.

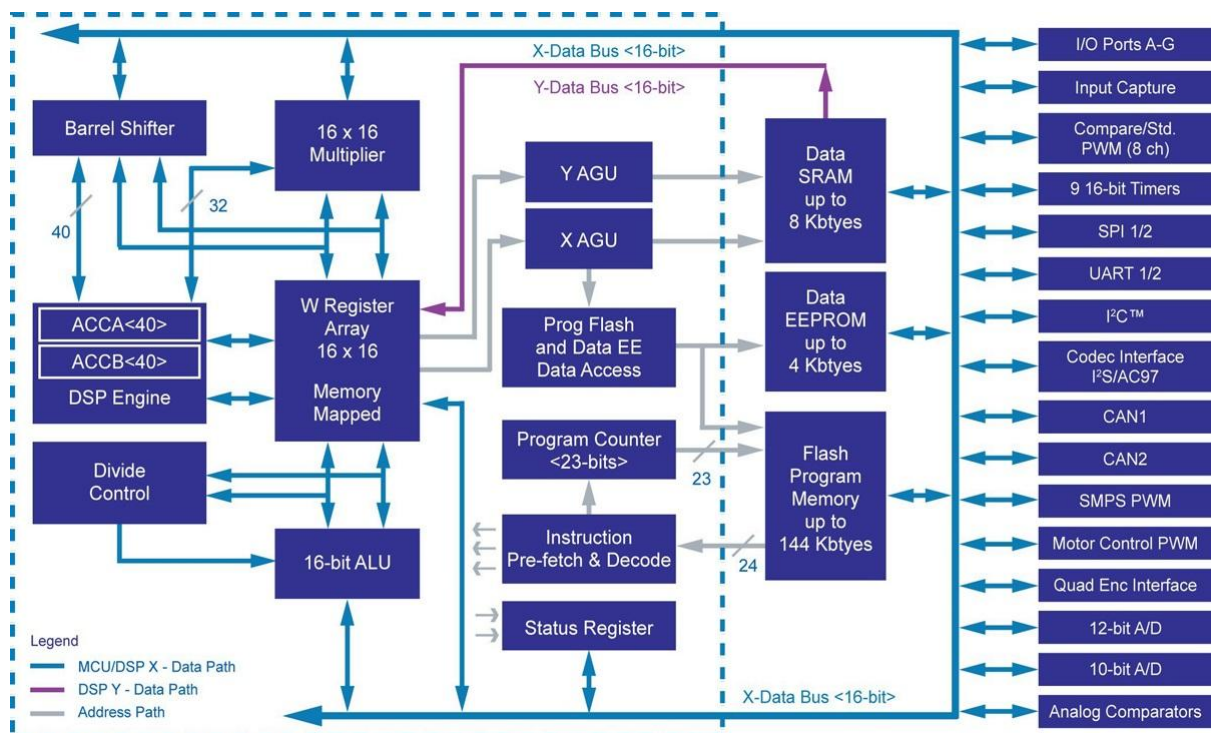
### 3.1.2 Sistema $\mu$ C dsPIC30F

A aquisição, digitalização e análise dos sinais provenientes dos circuitos condicionadores são feitos por circuitos microcontrolados dotados de funções DSP. Neste trabalho foram utilizados  $\mu$ Cs da família dsPIC, da Microchip<sup>®</sup>, mais especificamente a família dsPIC30F. A escolha destes  $\mu$ Cs é explicada mais a seguir, porém o baixo custo e capacidade de conversão AD (analogico/digital) de 12 bits foram fatores determinantes.

Sobre os dispositivos da família dsPIC30F, estes empregam uma arquitetura de 16 bits, que integra as funções de controle de um microcontrolador com as capacidades computacionais de um processador do tipo DSP. Sua funcionalidade é ideal para aplicações que dependem de alta velocidade e cálculos repetitivos, voltados principalmente para a área de controle (DSPIC, 2005).

Ainda conforme DSPIC (2005), o núcleo DSP deste  $\mu$ C possui acumuladores duplos de 40 bits, suporte de *hardware* para operações de divisão, e multiplicação, uma grande variedade de registradores de 16 bits de trabalho além de vários modos de endereçamento de dados. Este conjunto fornece ao dsPIC uma extensiva capacidade de processamento matemático, juntamente com uma considerável gama de periféricos.

**Figura 41** – Estrutura genérica do dsPIC30F



Fonte: Adaptado de DSPIC (2005).

Na Figura 41 pode-se observar a estrutura genérica de todos os  $\mu$ Cs da família dsPIC30F. Internamente, este é dotado de registradores, unidade lógica aritmética, áreas de memória de barramento de dados e instrução. Externamente encontram-se os periféricos, como portas de entrada e saída (I/O) digitais e analógicas, interfaces de comunicação (RS232, UART, I2C, CAN) entre outros.

Conforme cenário apresentado na Figura 37, após o condicionamento dos sinais (retificação), estes são discretizados e enviados ao MINI2440. Para esta tarefa optou-se pela utilização de dois modelos de dsPIC, um exclusivo para análise de tensão por TWD e outro para análise por Valor RMS nas três fases, como segue.

### 3.1.2.1 Placa de aquisição dsPIC30F3012

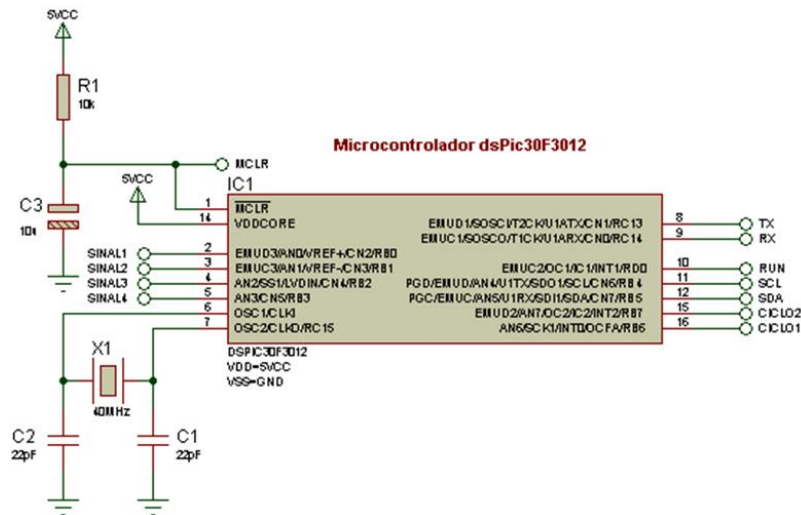
Esta placa tem como função principal a aquisição de sinais em que é necessária a análise dos dados em tempo real. Por exemplo, quando deseja-se monitorar afundamentos ou elevação de tensão de curta duração, ou até mesmo transitórios oscilatórios provenientes do chaveamento de capacitores. Para tal tarefa é utilizada a AMR.

Como estes tipos de perturbações ocorrem em instantes de tempo geralmente pequenos, a amostragem de dados ocorre em uma frequência maior, ocasionando uma limitação da quantidade de sinais sendo analisadas simultaneamente. A placa possibilita até 4 entradas de sinais, porém caso de desejar-se capturar eventos transitórios o sistema se limita a apenas uma entrada devido as limitações de taxa de amostragem. Outras características desta placa são vistas a seguir (DSPIC, 2005):

- 40 MHz de *clock*
- 4 entradas analógicas
- 2 entradas digitais + 2 compartilhadas
- Comunicação TTL, RS232, RS485 e I2C
- Até 1024 kB de memória EEPROM externa

A Figura 42 ilustra o esquema de ligação dos pinos de I/Os utilizados na placa de aquisição desenvolvida para utilização do  $\mu$ C dsPIC30F3012. O circuito completo pode ser visualizado no Apêndice A (*Conversor AD.dsn*). Neste esquema utilizam-se quatro entradas analógicas do microcontrolador (chamadas “SINAL $N$ ”), de modo a efetuar a leitura dos sinais provenientes dos circuitos condicionadores.

**Figura 42** – Sinais de I/O utilizados no  $\mu$ C dsPic30F3012



Fonte: Do autor.

### 3.1.2.2 Placa de aquisição dsPIC30F4013

Esta placa tem como função principal a aquisição de sinais para monitoração dos valores eficazes da tensão e da corrente (demanda) no sistema de produção. Para esta tarefa é necessária à leitura de vários sensores simultaneamente, já que em sistemas industriais a rede elétrica é trifásica. Por exemplo, para monitorar os níveis de tensão e a corrente consumida por um processo é necessário a utilização de 6 portas analógicas do dsPIC30F4013 e mais 4 portas digitais, além dos pinos destinados à comunicação com o MINI2440.

Sobre os tipos de perturbações que são detectados por esta placa, citam-se alguns eventos de curta duração, como afundamentos e elevação, os eventos mais duradouros (afundamentos e elevação com tempos acima de 1 minuto), e o cálculo de fator de potência. Por trabalhar com muitas entradas, a quantidade de amostras para cada sinal é reduzida (24 amostras por semiciclo), o que compromete a análise destes dados para detecção de perturbações que ocorrem em frequências mais elevadas (acima de 1 kHz).

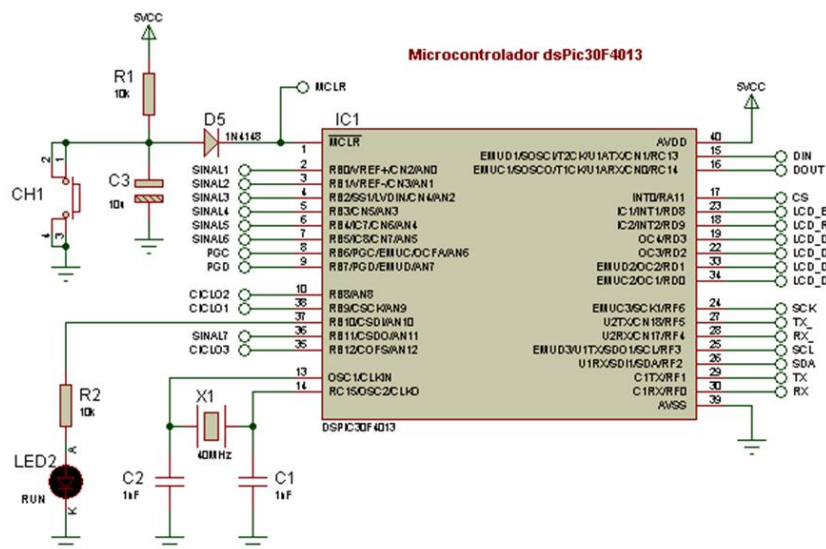
Algumas das características mais importantes desta placa são apresentadas abaixo (DSPIC, 2005):

- 40 MHz de *clock*
- 7 entradas analógicas
- 8 entradas digitais + 5 compartilhadas
- Comunicação TTL, RS232, RS485 e I2C

- Até 1024 kB de memória EEPROM externa
- Entrada para memória *sdCard*
- Circuito RTC (*Real Time Clock*)
- Display LCD 2X40

A Figura 43 ilustra o esquema de ligação dos pinos de I/Os utilizados na placa de aquisição desenvolvida para utilização do  $\mu\text{C}$  dsPIC30F4013, este escolhido pela maior quantidade de pinos de I/Os disponíveis e necessários para monitoração de tensão, consumo e FP. O circuito completo pode ser visualizado no Apêndice A (*Conversor AD\_Dip40.dsn*).

**Figura 43** – Sinais de I/O utilizados no  $\mu\text{C}$  dsPIC30F4013



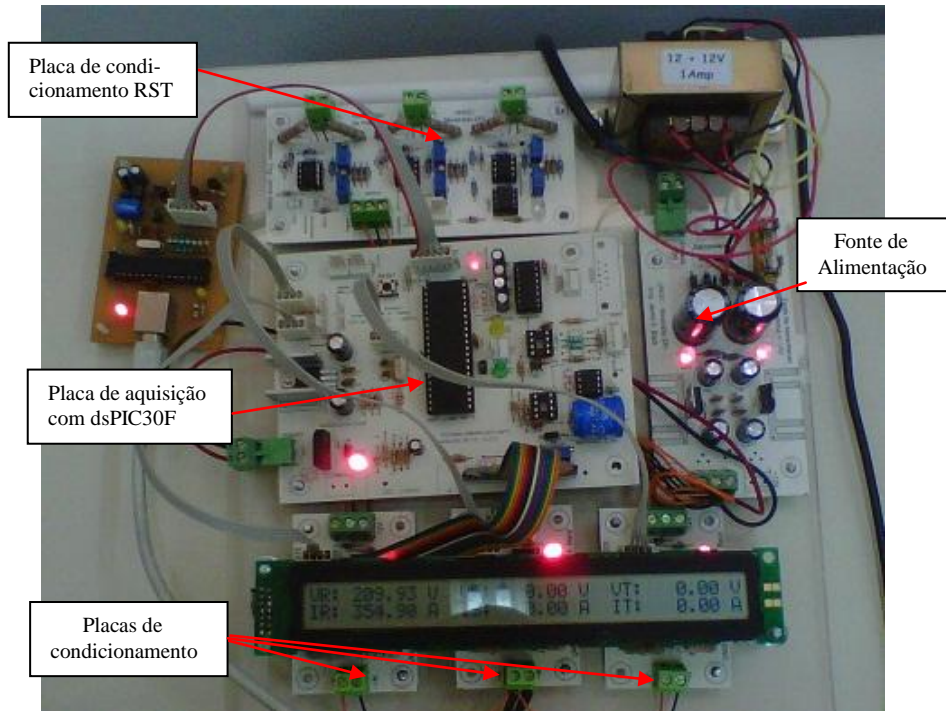
Fonte: Do autor.

### 3.1.2.3 Protótipo desenvolvido e integrado

Por fim, a integração das placas de condicionamento e aquisição pode ser visualizada na Figura 44. Esta integração corresponde ao sistema mínimo necessário para converter os dados elétricos presentes no processo industrial (parâmetros de QEE e EE) em dados digitais, e recebe a denominação de Sistema de Aquisição de Dados (SAD).



**Figura 44** – Protótipo desenvolvido e integrado (placa dsPic30F4013)



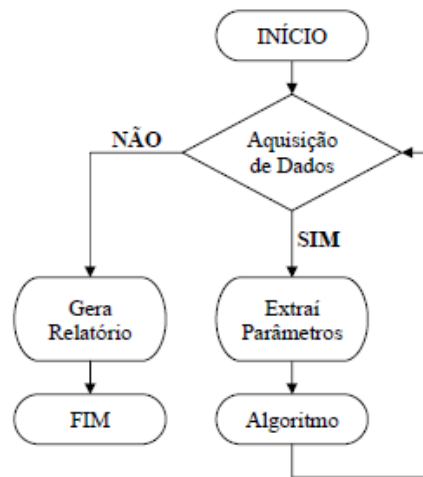
Fonte: Do autor.

## 3.2 Implementação do *software* de aquisição

A aquisição dos dados é uma fase importante do projeto, visto a necessidade de se evitar erros de condicionamento e de conversão do sinal. Estes erros podem causar incertezas e fazer com que o sistema armazene informações que não condizem com o real funcionamento do processo. A seguir serão explicados os passos envolvidos no processo de aquisição dos dados.

### 3.2.1 Algoritmo de monitoração de QEE

Para realizar a análise de determinado distúrbio e armazenar os resultados torna-se necessário a realização de alguns procedimentos, como descreve a estrutura do algoritmo apresentado no fluxograma da Figura 45.

**Figura 45** – Fluxo do algoritmo de aquisição

Fonte: Adaptado de Usida (2008).

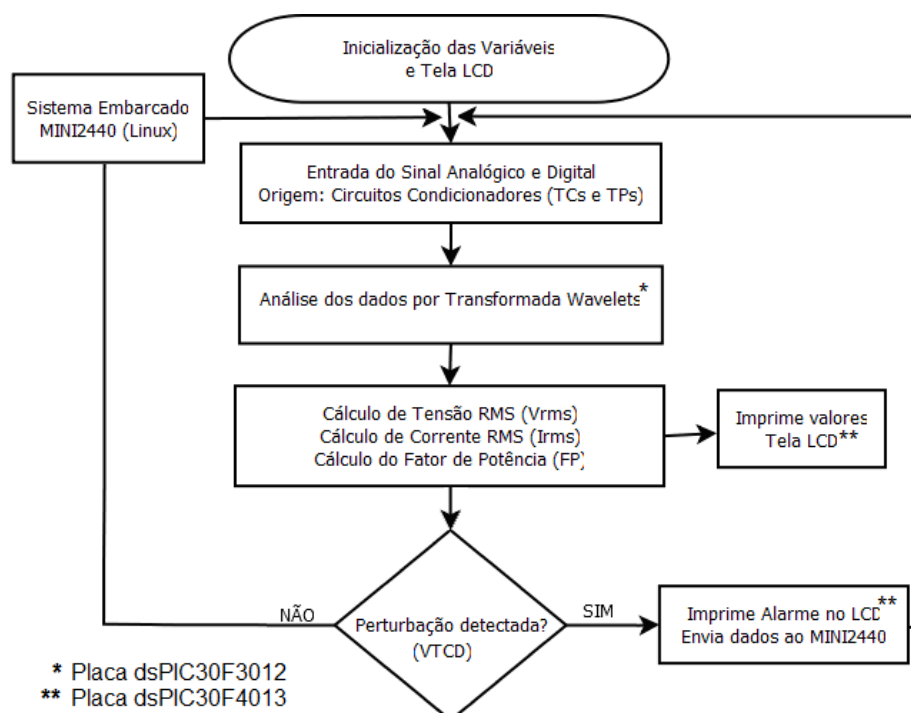
Ao iniciar o algoritmo, a primeira etapa corresponde ao bloco “*aquisição de dados*”, onde os valores provenientes de sensores são analisados e convertidos para valores da tensão eficaz, corrente eficaz, frequência fundamental, número de fases do sistema e taxa de amostragem para garantir uma precisão adequada. Na extração de parâmetros, o algoritmo realiza a amostragem do sinal para detectar e quantificar transitórios, variações de tensão e variações de frequência instantânea. Este algoritmo pode utilizar, por exemplo, o janelamento (FIGURA 17) para detectar e quantificar os distúrbios de QEE.

Com base no fluxograma apresentado, desenvolveu-se um *software* para rodar nas placas de aquisição, responsáveis pela discretização dos dados provenientes dos sensores de tensão e corrente. Este desenvolvimento é descrito na seção a seguir.

### 3.2.2 *Software* desenvolvido para os dsPIC

Para a conversão AD (discretização) dos sinais lidos pelos circuitos de condicionamento, bem como o envio de dados e visualização das informações (tensão, corrente e FP) em *display* LCD, foi implementado um algoritmo em linguagem C, formando assim o *firmware* das placas de aquisição. Este algoritmo segue o fluxograma apresentado na Figura 46.

**Figura 46** – Fluxograma do algoritmo desenvolvido para o dsPIC



Fonte: Do autor.

A função principal deste algoritmo é a conversão AD dos sinais analógicos que foram previamente condicionados (como apresentado anteriormente pelo cenário da FIGURA 37). Após esta conversão é possível ao  $\mu\text{C}$  calcular os valores eficazes de tensão e corrente. Já o cálculo de FP é feito a partir dos sinais de “*VCiclo*”, sinal este que representa a transição do nível positivo para negativo de cada fase. Estes sinais são lidos pelas portas digitais do  $\mu\text{C}$  e a defasagem entre dois sinais (um de tensão e outro da corrente) determinam o FP do sistema.

O próximo passo do algoritmo é apresentar os dados em um *display* LCD para ser consultado por usuários ou operadores do processo. Sempre que os dados são atualizados no *display*, eles também são enviados via comunicação serial para o MINI2440.

O último bloco corresponde à detecção dos distúrbios de QEE. Como neste trabalho essa tarefa é feita pelo SE MINI2440, limitou-se a detecção de distúrbios do tipo VTCD. Detectado o distúrbio, este é apresentado no *display* e um alarme é enviado ao MINI2440. Se nenhum distúrbio é detectado, o sistema inicia novamente o processo de conversão AD.

Pelo fato do dsPIC possuir todas as entradas analógicas multiplexadas para um único bloco de conversão AD, cada troca de canal consome alguns ciclos de processamento, ocasionando atraso na amostragem dos sinais lidos. Para solucionar este problema, foram criados dois firmwares distintos, um para leitura de uma única entrada (placa dsPIC30F3012),

possibilitando a detecção de eventos oscilatórios de baixa e média frequência, e outro para leitura de várias entradas (placa dsPIC30F4013), fazendo apenas cálculo dos valores eficazes de tensão e corrente e também o cálculo do FP, além da comunicação com o SE e a presença de um display LCD.

### 3.3 Sistema embarcado MINI2440

Desenvolvido pela *FriendlyARM*<sup>®</sup>, corresponde a uma plataforma (*hardware* e *software*) que agrega todas as funcionalidades necessárias para que a metodologia desenvolvida no ambiente de simulação possa ser utilizada na prática. Esta plataforma é chamada de MINI2440 e pode ser visualizada pela Figura 47.

**Figura 47** – Sistema Embarcado MINI2440 da *FriendlyARM*



Fonte: Adaptado de (MINI2440, 2011).

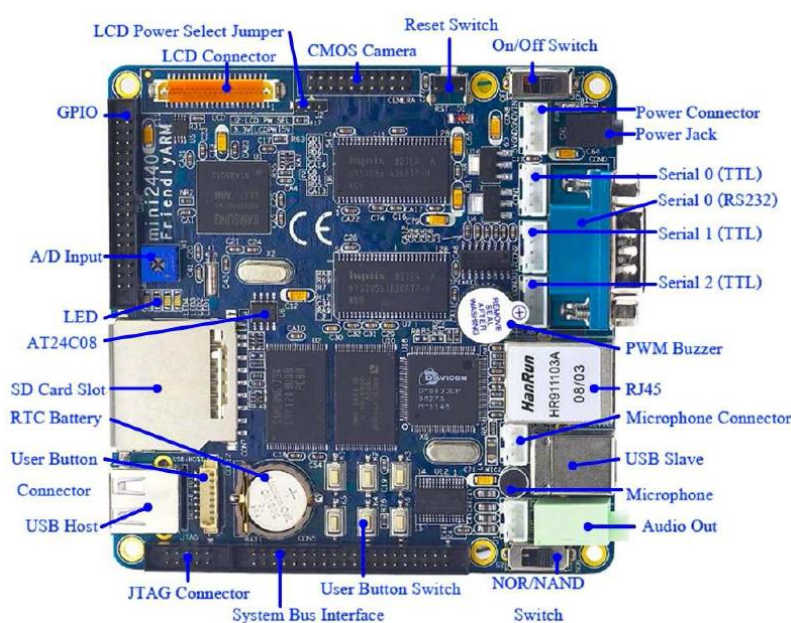
Esta plataforma possui algumas características importantes para o projeto, conforme apresentado a seguir (MINI2440, 2011):

- CPU: 400 MHz Samsung S3C2440A ARM920T
- RAM: 64 MB SDRAM, 32 bit *bus*
- *Flash*: 1GB NAND *Flash* e 2 MB NOR
- Memória Externa: *SD-Card socket*
- Porta Serial: 1x DB9 (RS232), 3x padrão TTL
- USB: 1x USB-A Host 1.1, 1x USB-B Device 1.1
- Ethernet: RJ-45 10/100M (DM9000)
- RTC: Real Time Clock with battery (CR1220)

- LCD Interface: FriendlyARM *Displays VGA Board*
- Touch Panel: *4 wire resistive*
- OS: Windows CE, Linux e Android

Mais detalhes do hardware são apresentados na Figura 48. Nela é possível observar a disposição de todos os componentes, interfaces e conectores disponíveis na placa.

**Figura 48** – Características do SE *FriendlyARM MINI2440*



Fonte: Do autor, extraído do manual do dispositivo (MINI2440, 2011).

### 3.3.1 Interfaces utilizadas

As principais interfaces disponíveis pelo MINI2440 e utilizadas neste projeto são as portas seriais, interface de rede, interface USB e de *sd-Card*, bem como a tela LCD *Touch*.

As três portas seriais (UART0, 1, 2) foram utilizadas para conexão do SAD. Como estas portas trabalham em nível de tensão TTL (0 – 5 V), foi necessário a utilização de um conversor TTL-RS485 (APÊNDICE A - *ConversorRS485.dsn*).

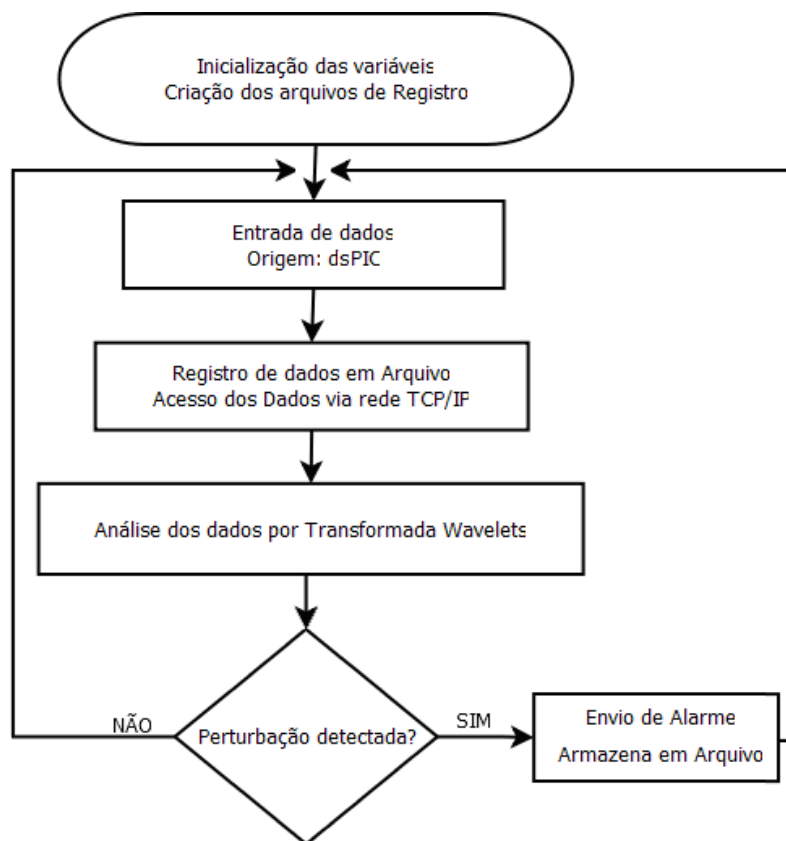
As interfaces para conexão de dispositivos de armazenamento de dados, como *sd-Card* e *pendrive*, também foram utilizadas (os dados foram armazenados como arquivos texto). Para acesso remoto ao dispositivo foi utilizada a interface de rede ethernet.

Finalmente, foi utilizado a tela do dispositivo para disponibilizar ao usuário informações sobre o sistema (QEE e EE do processo), alarmes de eventos ou até mesmo acesso direto a informações de funcionamento, aquisição, entre outros.

### 3.3.2 Software embarcado

Além do *firmware* desenvolvido para o dsPIC, também foi necessário desenvolver um *software* para o SE MINI2440, responsável pelo gerenciamento das informações coletas pelos SADs. Assim, foi projetado um algoritmo que segue o fluxo de comandos visto na Figura 49.

**Figura 49** – Fluxograma do algoritmo desenvolvido para o MINI2440



Fonte: Do autor.

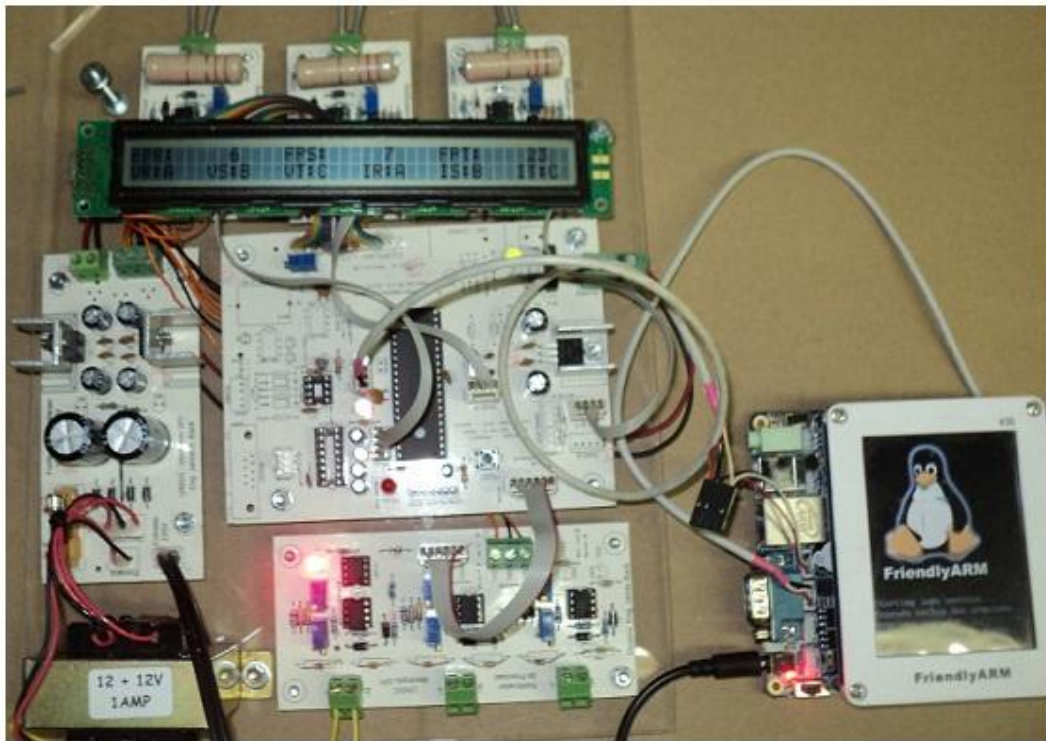
Este algoritmo possui três funções principais: recepção e armazenamento de dados, gerenciamento dos dados e detecção das perturbações. A recepção dos dados ocorre sempre que o SAD envia os dados já digitalizados. A primeira ação a ser feita é o armazenamento destes dados, para análise posterior (análise *offline*). Os dados de tensão e corrente eficaz, picos de corrente e fator de potência são mostrados na tela LCD do dispositivo, mas também são disponibilizados para acesso remoto via TCP/IP.

Por fim é aplicado o bloco responsável pela análise por TWD. A partir dos dados de saída deste bloco são efetuados os processos de detecção de distúrbios. Uma descrição mais detalhada sobre o processo de análise TW é apresentado na seção 3.5.

### 3.3.3 Integração entre SA e SE

A última etapa do desenvolvimento do sistema corresponde à integração de todos os dispositivos já desenvolvidos neste projeto. Para iniciar a monitoração de um sistema de produção trifásico, no mínimo necessita-se de um SE MINI2440, uma placa microcontrolada, condicionadores para os sinais dos TCs, condicionadores para os sinais dos TPs, uma fonte de alimentação e um conversor para comunicação entre os dispositivos. Assim, uma montagem completa do sistema corresponde à apresentada pela Figura 50.

**Figura 50** – Integração entre SE MINI2440 e SAD



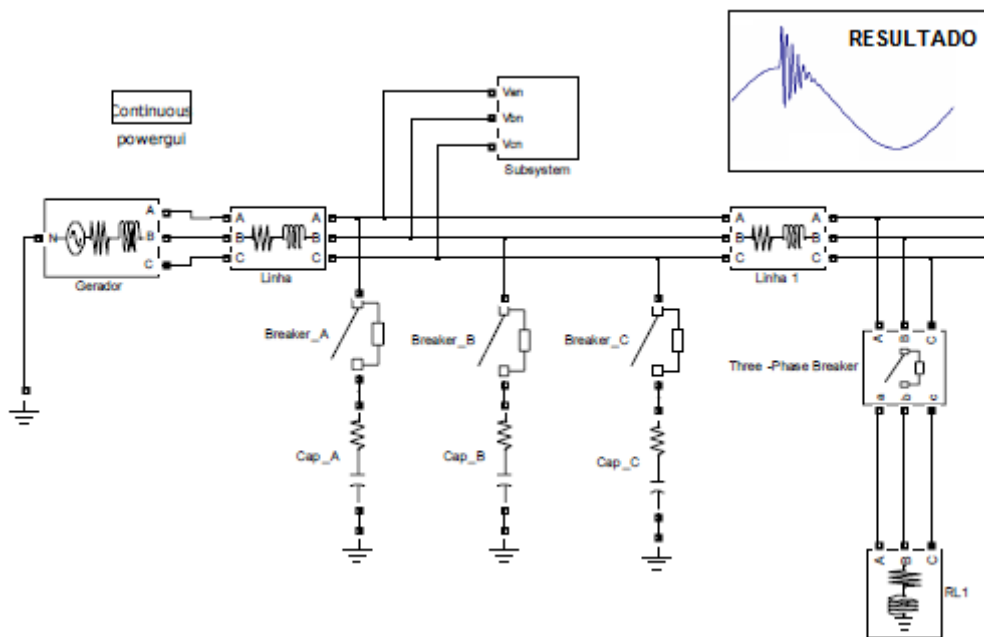
Fonte: Do autor.

### 3.4 Modelagem e simulação

A etapa final deste trabalho se refere à modelagem e simulação dos dados adquiridos. Para isso, inicialmente, foi utilizado o *software* Matlab®, pois disponibiliza uma gama de recursos que podem ser aplicados para auxiliar no desenvolvimento deste projeto.

A utilização de sistema computacional para a simulação e modelagem dos dados é importante visto a possibilidade de se criar um modelo que represente o sistema ou processo em estudo, não havendo a necessidade de se trabalhar com dados reais, o que em algumas vezes se torna uma tarefa onerosa.

**Figura 51** – Simulação de chaveamento de capacitores utilizando o Simulink



Fonte: Adaptado de Junior, F. (2009).

A Figura 51 é um exemplo de simulação de um evento real, que representa o chaveamento de banco de capacitores em um sistema trifásico. Este chaveamento é necessário quando existe a necessidade de correção do fator de potência em sistemas industriais, quando estes demandam de muitas cargas indutivas. Sempre que novos capacitores são adicionados ao sistema elétricos, uma perturbação é inserida na rede elétrica (quadro resultado, em detalhe na FIGURA 51). Nesta simulação foi utilizado o Simulink, que é toolbox disponível pelo Matlab e destinada a simulações que utilizam de blocos previamente configurados em um ambiente gráfico.



Outra forma de simulação é a utilização da linha de comandos do Matlab (MATHWORKS, 2011). Neste caso, é necessário informar comandos e parâmetros ao software, com intuito de reproduzir algum evento ou efetuar cálculos matemáticos extremamente complexos. A Listagem 1 representa, de forma análoga a simulação utilizando o Simulink, o chaveamento de banco de capacitores, porém corresponde a comandos digitados no próprio console, ou organizados em um único arquivo.

**Listagem 1 – Simulação do chaveamento de banco de capacitores na rede elétrica**

```

1   % Simular o chaveamento de banco de capacitores na rede elétrica
2   x=linspace(0,8*pi,531); % gerar uma senóide pura
3   y=sin(x);
4
5   % Código para gerar uma senóide amortecida
6   fs = 1000;          % freq. de amostragem
7   fo = 360;          % freq. fundamental
8   a = -50;           % coef. da exponencial
9   fi = 0;            % fase inicial
10  A = 0.3;            % amplitude da senóide
11  t = 0:1/fs:0.5;    % eixo do tempo
12
13  x = A*sin(2*pi*fo*t + fi).*exp(a*t)
14
15  % vetor para gerar atraso na senoide amortecida
16  a = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
17
18  b = horzcat(a, x); % concateno os dois vetores
19
20  Y = b+y;           % soma da senoide pura e a senoide amortecida
21  T = 0:1/fs:0.53;
22
23  plot(T,Y),xlabel('t(s)'),ylabel('Amplitude')
24  title('Chaveamento de capacitores'), axis([0 0.5 -2 2]);

```

Fonte: Do autor, extraído do *software* MATLAB®.

Neste código é inserida uma perturbação sobre uma senóide pura (linha 20). Esta perturbação é representada por  $x$  (linha 13), sendo uma senóide amortecida de frequência 360 Hz. Após executados todos os comandos descritos na listagem, como resultado tem-se a um sinal como mostrado na Figura 51 (detalhe).

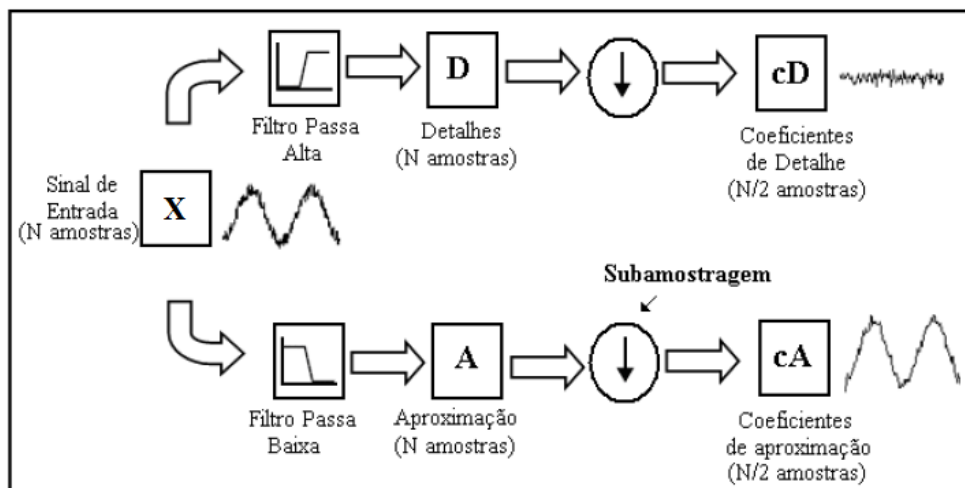
Na prática, usam-se algoritmos para obter a TWD, sendo o algoritmo de Mallat o mais tradicional e muito empregado para a realização dessa operação. Assim, a seção seguinte descreve a implementação e teste do algoritmo para análise de QEE diretamente de um computador pessoal ou mesmo de um sistema embarcado.

### 3.5 Algoritmo TWD Multiresolução

O desenvolvimento de um algoritmo para análise de perturbações por TWD foi necessário neste projeto como alternativa à utilização de software proprietários (como o Matlab, por exemplo), além da necessidade de se ter o algoritmo disponível para a plataforma embarcada.

Assim, conforme descrito na seção 2.5.3, o objetivo da análise multiresolução é representar uma dada função em diferentes níveis de resolução *wavelet*. Com esta análise é possível obter uma boa resolução no tempo e em frequência, que se torna útil pelo fato destes dados já estarem na forma discreta (SANTOS, 2004).

**Figura 52** – Esquema de decomposição proposta por Mallat

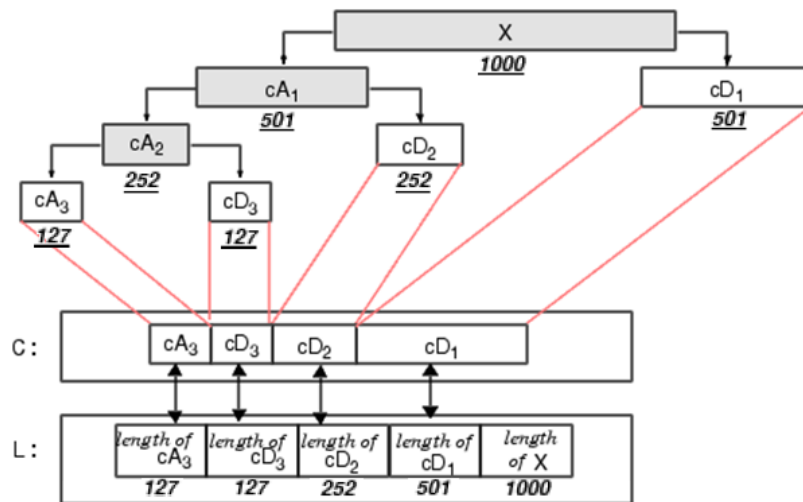


Fonte: Adaptado de Reis e Silva (2004).

Uma forma prática de realizar a AMR, segundo os autores Reis e Silva (2004), é através do algoritmo piramidal de Mallat, que consiste em dividir o sinal original em dois: um é o sinal original suavizado e outro uma ampliação das oscilações ou “ruídos” do sinal analisado. Na Figura 52, tem-se um esquema do algoritmo piramidal de Mallat.

Já na Figura 53 é ilustrado o fluxo de dados para se obter os coeficientes *wavelet* utilizando o algoritmo de Mallat para efetuar a AMR sobre um sinal  $X$  de  $N$  amostras. Nota-se que os coeficientes de aproximação e de detalhe são organizados ordenadamente em um vetor de coeficientes *wavelet* ( $C$ ), com tamanho que depende do número de amostras do sinal e o nível de decomposição escolhido. Da mesma forma, é criado outro vetor ( $L$ ), que corresponde aos tamanhos de cada bloco de coeficientes de aproximação e detalhe armazenados em  $C$ .

**Figura 53** – Passo-a-passo para decomposição *wavelet* até o nível 3



Fonte: Adaptado de Misiti et al. (2012).

### 3.5.1 Algoritmo AMR embarcado

Foi desenvolvido um algoritmo para análise de perturbações para rodar em aplicações embarcadas, contendo as seguintes características:

- TWD multiresolução;
- *Wavelet* mãe Haar (por ser de implementação mais simples);
- Algoritmo desenvolvido em linguagem C.

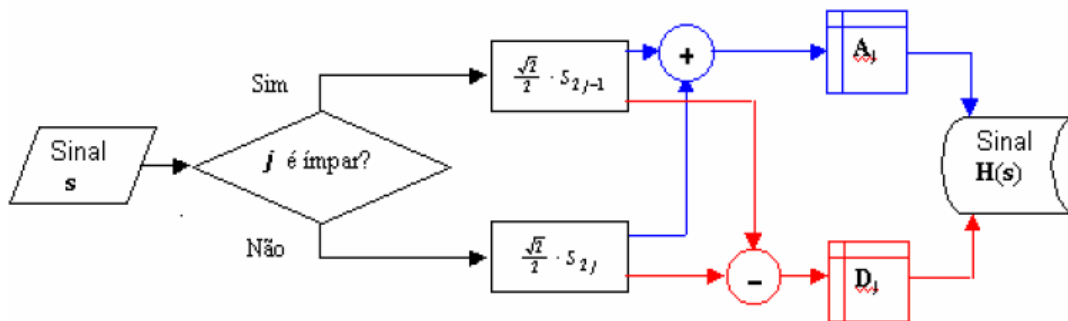
A TWD multiresolução seguiu a estrutura apresentada na Figura 53. Já a utilização da *wavelet* mãe de Haar corresponde à multiplicação matricial conforme Equação 21:

$$\begin{array}{ccc}
 S_0 & W & TWD \\
 \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \\ \vdots & \vdots \\ k_{n-1} & k_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_0 & c_0 \\ c_1 & -c_1 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} a_m & d_m \\ a_m & d_m \\ \vdots & \vdots \\ a_m & d_m \end{bmatrix}
 \end{array} \quad (21)$$

Onde  $c_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}$  e  $c_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}$  (coeficientes *wavelet* de Haar).

Para a implementação do algoritmo embarcado, o fluxograma apresentado na Figura 54 teve que ser seguido. Neste fluxograma a função de Haar é aplicada ao sinal  $S$  e dois subsinais são gerados. O sinal  $H(s)$  representa os coeficientes *wavelet* resultantes da aplicação da Transformada *Wavelet* Haar.

**Figura 54** – Diagrama de Fluxo da TWD



Fonte: Adaptado de Pazos (2006).

Por exemplo, para um sinal  $S = [4, 2, 5, 5]$ , aplicando o fluxograma acima, tem-se os coeficientes de aproximação  $A_1$  (EQUAÇÃO 22) e de detalhe  $D_1$  conforme Equação 23:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \left( \frac{\sqrt{2}}{2} (S[0] + S[1]) \right), \left( \frac{\sqrt{2}}{2} (S[2] + S[3]) \right) \\
 A_1 &= \left( \frac{\sqrt{2}}{2} (4 + 2) \right), \left( \frac{\sqrt{2}}{2} (5 + 5) \right) = [4.24, \quad 7.07]
 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \left( \frac{\sqrt{2}}{2} (S[0] - S[1]) \right), \left( \frac{\sqrt{2}}{2} (S[2] - S[3]) \right) \\
 D_1 &= \left( \frac{\sqrt{2}}{2} (4 - 2) \right), \left( \frac{\sqrt{2}}{2} (5 - 5) \right) = [1.41, \quad 0]
 \end{aligned} \quad (23)$$

Por fim, a Figura 55 apresenta um exemplo de algoritmo para análise TWD por Haar. É possível observar que a lógica de código deste algoritmo segue os conceitos descritos pelo fluxograma da Figura 54.

**Figura 55** – Exemplo de algoritmo para análise TWD

<pre> n: número da amostragem for j from 1 to n do read x[n] end do: for j from 1 to n do read S[n] end do:  LF = [ <math>\frac{\sqrt{2}}{2}</math>  <math>\frac{\sqrt{2}}{2}</math> ] HF = [ <math>\frac{\sqrt{2}}{2}</math>  <math>-\frac{\sqrt{2}}{2}</math> ]  for j from 1 to <math>\frac{n}{2}</math> do H[j,1] = LF[1] · S[2j-1] + LF[2] · S[2j] end do: for j from <math>\frac{n}{2}+1</math> to n do H[j,1] = HF[1] · S[2j-1-n] + HF[2] · S[2j-n] end do: for j from 1 to n do HS[j] = [ x[n], H[j,1] ] end do: </pre>	<p><i>Domínio</i>: <math>[0, 1]</math></p> <p><i>Partição</i>: <math>x_0 = 0 &lt; x_1 &lt; \dots &lt; x_n = 1</math></p> <p><i>Sinal Discreta</i>: <math>S = \{ S_j \mid j = 1, \dots, n \}</math></p>
---	--

Fonte: Adaptado de Pazos (2006).

Com base nestes dados, foi desenvolvido um algoritmo em Linguagem C, para análise multiresolução a partir da aplicação da *wavelet* mãe de Haar. A escolha da Linguagem C se deve pela sua portabilidade para qualquer plataforma, seja um sistema computacional de propósito geral, um sistema embarcado mais específico, e até mesmo um sistema microcontrolado como o dsPIC.

Como resultado final, tem-se um algoritmo que possibilita a aplicação da TWD multiresolução em qualquer plataforma que suporte um compilador C. Neste trabalho, o código apresentado no Apêndice B é utilizando tanto pela interface de usuário em PC (Computador Pessoal) como pelo SE MINI2440.

O código descrito na Listagem 2 tem como resultado um vetor de coeficientes *wavelet* chamado *vec* (linha 40) e representado na Figura 53 como o vetor *C*. Este vetor corresponde aos coeficientes de aproximação mais os coeficientes de detalhe ( $An + cD1 + \dots + cDn$ ), onde *n* representa o nível de decomposição.

**Listagem 2** – Trecho de código em C para análise TWD (algoritmo de Mallat)

```

25     // algoritmo de Mallat TWD Haar Multiresolução
26     int j=0;
27     while(j<LEVEL)
28     {
29         j++;
30         w/=2;
31
32         for(i=0;i<w;i++) // laço para aplicação da wavelet haar
33         {
34             vecp[i] = (vec[2*i] + vec[2*i+1])/sqrt(2.0);
35             vecp[i+w] = (vec[2*i] - vec[2*i+1])/sqrt(2.0);
36         }
37
38         for(i=0;i<(w*2);i++)
39             // coeficientes wavelet cAn + cD1 + ... +cDn
40             vec[i] = vecp[i];
41
42     }

```

Fonte: Do autor.

Já o trecho de código da Listagem 3 tem como resultado dois vetores: um vetor denominado  $l$  (vetor  $L$  na FIGURA 53) basicamente contendo informações sobre o tamanho dos blocos que correspondem ao vetor  $vec$ ; e um vetor  $d$  contendo o “ruído”, ou seja, os coeficientes de detalhe de mais alta ordem.

**Listagem 3** – Trecho de código em C para análise TWD (intensidade de cD)

```

43     lsize = LEVEL + 2;
44
45     l[lsize-1] = SIZE;
46     int a;
47     for(a=2;a<lsize;a++)
48     {
49         l[lsize-a] = l[lsize-a+1]/2;
50         if (l[lsize-a+1]%2)
51             l[lsize-a] = l[lsize-a] + 1;
52     }
53     l[0] = l[1];
54

```

```

55     rmax = lsize;
56     nmax = rmax-2;
57     k = rmax-LEVEL;
58     first = l[k-1-1]+1;
59     last = first + l[k-1]-1;
60
61     // localização do evento (intensidade de cDn)
62     int y=0;
63     for(x=first-1; x<last; x++)
64     {
65         d[y] = vec[x];
66         y++;
67     }

```

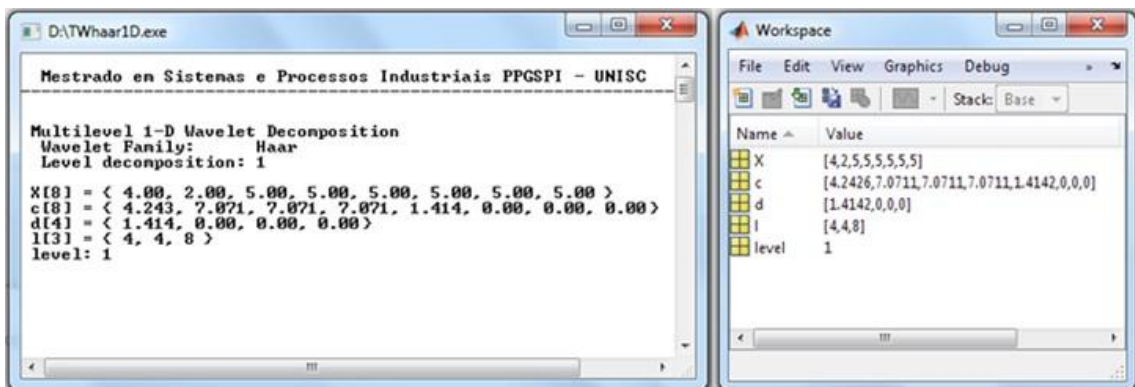
Fonte: Do autor.

### 3.5.2 Teste do algoritmo

Para comprovação do real funcionamento do algoritmo AMR desenvolvido, foi executada a comparação entre os resultados obtidos pelo algoritmo proposto e do Matlab. Inicialmente, foram feitos testes para um vetor de 8 posições, conforme descrito em Oliveira (2007), sendo que a sua decomposição ocorreu até o nível 3.

Assim, conforme Figura 56, após a aplicação do algoritmo no sinal  $X$ , temos tem-se os mesmos valores para os coeficientes de aproximação e detalhe (vetor “ $c$ ”), a mesma localização e intensidade da perturbação em “ $d$ ” e por fim os tamanhos de blocos em “ $l$ ”.

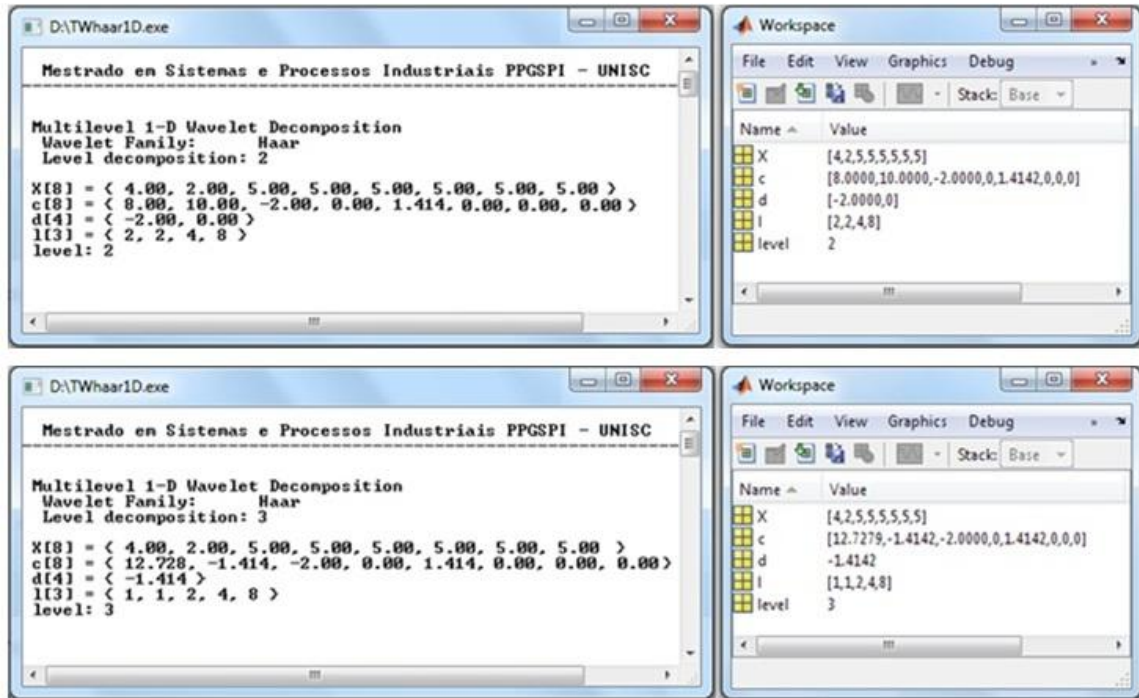
**Figura 56** – Algoritmo SE Versus Matlab (TWD Haar nível 1)



Fonte: Do autor.

A Figura 57 apresenta os resultados do algoritmo utilizando análise multinível (nível 2 e nível 3). Novamente a comparação entre os dados mostra similaridade entre os algoritmos.

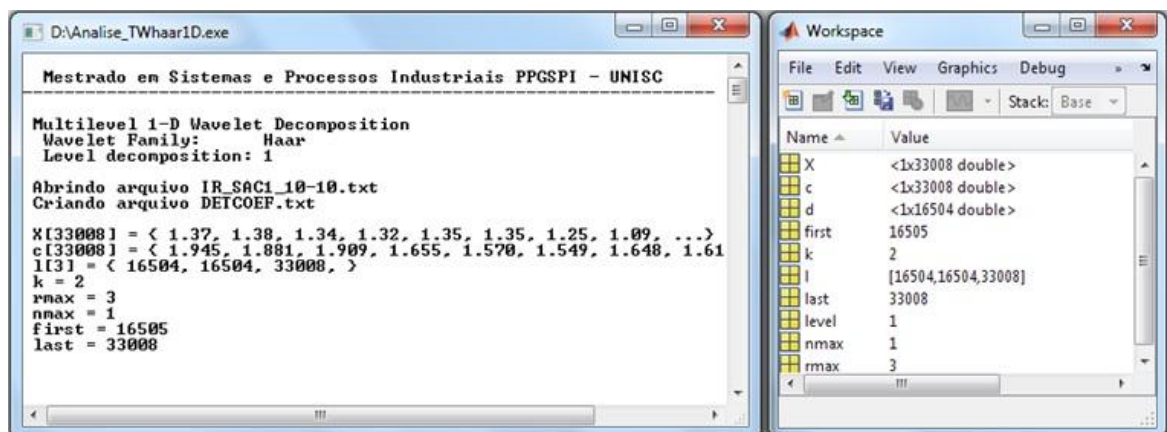
**Figura 57** – Algoritmo SE *Versus* Matlab (TWD Haar nível 2 e 3)



Fonte: Do autor.

Por fim, os dados resultantes da análise feita pelo algoritmo proposto *Vesus* Matlab para um arquivo de dados de consumo elétrico (vetor de 33000 posições). De forma análoga aos testes anteriores, têm-se os mesmos valores para os coeficientes *waletes* “c” e para os dados de decomposição “d” utilizando o nível 1 de acordo com a Figura 58.

**Figura 58** – Análise TWD para dados de consumo (Algoritmo SE *Versus* Matlab)

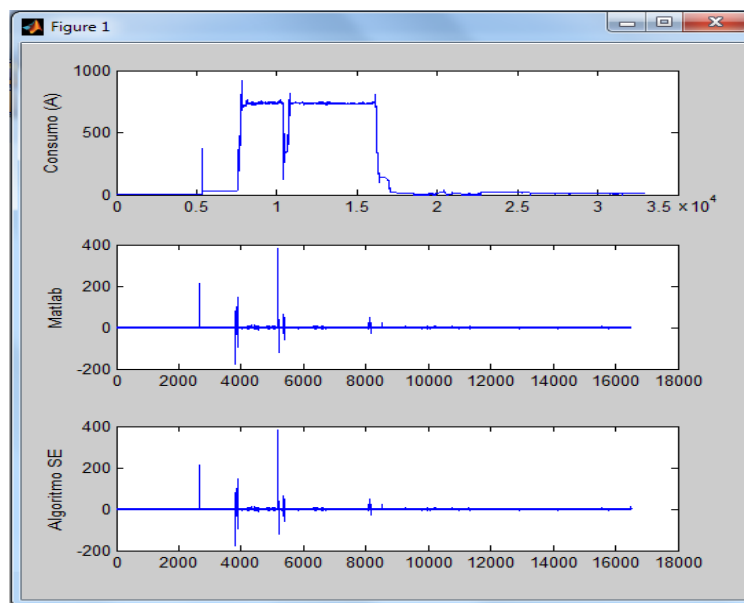


Fonte: Do autor.



Conforme a Figura 59 é possível observar a similaridade entre os gráficos dos sinais de decomposição resultantes da aplicação dos dois algoritmos. Em ambos os casos, as perturbações na curva de demanda foram apresentadas com localização e intensidade iguais.

**Figura 59** – Gráfico de saída para dados de consumo (Algoritmo SE Versus Matlab)



Fonte: Do autor, extraído do *software* Matlab®.

O algoritmo para análise *wavelet* utilizando o Matlab pode ser observado na Listagem 4, onde  $X$  (linha 68) representa os dados de entrada e  $d$  (linha 73) representa os dados de saída (coeficiente de detalhe) do algoritmo. No caso do Matlab, a análise *wavelet* é feita pelos comandos *wavedec()* e *detcoef()* (linhas 72 e 73, respectivamente).

**Listagem 4** – Algoritmo implementado no Matlab para análise TW Haar (nível 1)

```

68     X = importdata('D:\IR_SAC1_10-10.txt');
69
70     % analise TW Haar Level 1
71     level = 1;
72     [c,l] = wavedec(X,level,'haar');
73     d = detcoef(c,l,level);
74
75     subplot(311),plot(X); ylabel('Consumo (A)')
76     subplot(312),plot(d); ylabel('Matlab')
77
78     R = importdata('D:\DETCOEF.txt'); %criado pelo algoritmo SE
79     subplot(313),plot(R); ylabel('Algoritmo SE')

```

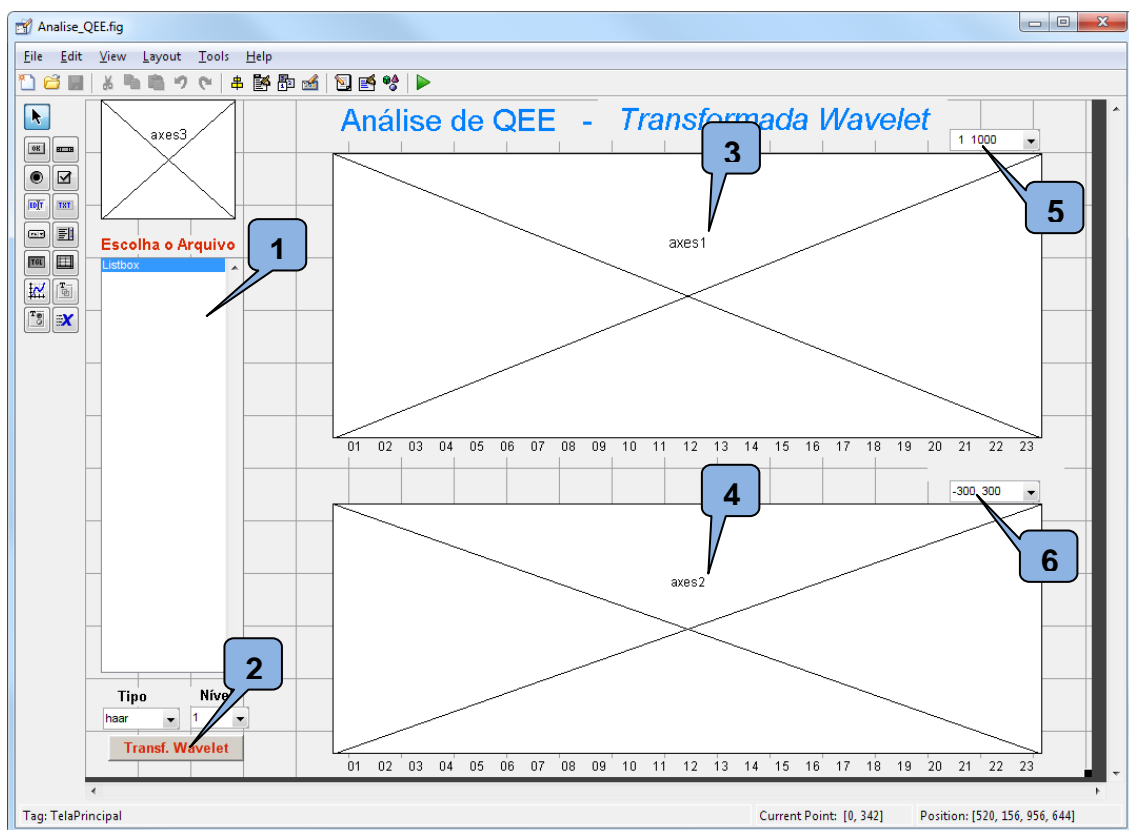
Fonte: Do autor, extraído do *software* Matlab®.

### 3.6 Interface Gráfica Matlab - GUIDE

Outra ferramenta disponível pelo Matlab e utilizada neste trabalho foi a *toolbox* denominada GUIDE (*GUI Design Environment*). O GUIDE possibilita a criação de interfaces gráficas amigáveis para interação com o usuário, pois disponibiliza de objetos que podem ser configurados e reutilizados de forma a facilitar o desenvolvimento da aplicação.

Assim, para a análise dos dados coletados no processo industrial (tensão e corrente elétrica), a fim de detectar eventos de QEE e traçar o modelo de EE, a seguinte interface foi criada, conforme Figura 60.

**Figura 60** – *Toolbox* GUIDE – Tela de desenvolvimento da aplicação gráfica



Fonte: Do autor, extraído do *software* Matlab®.

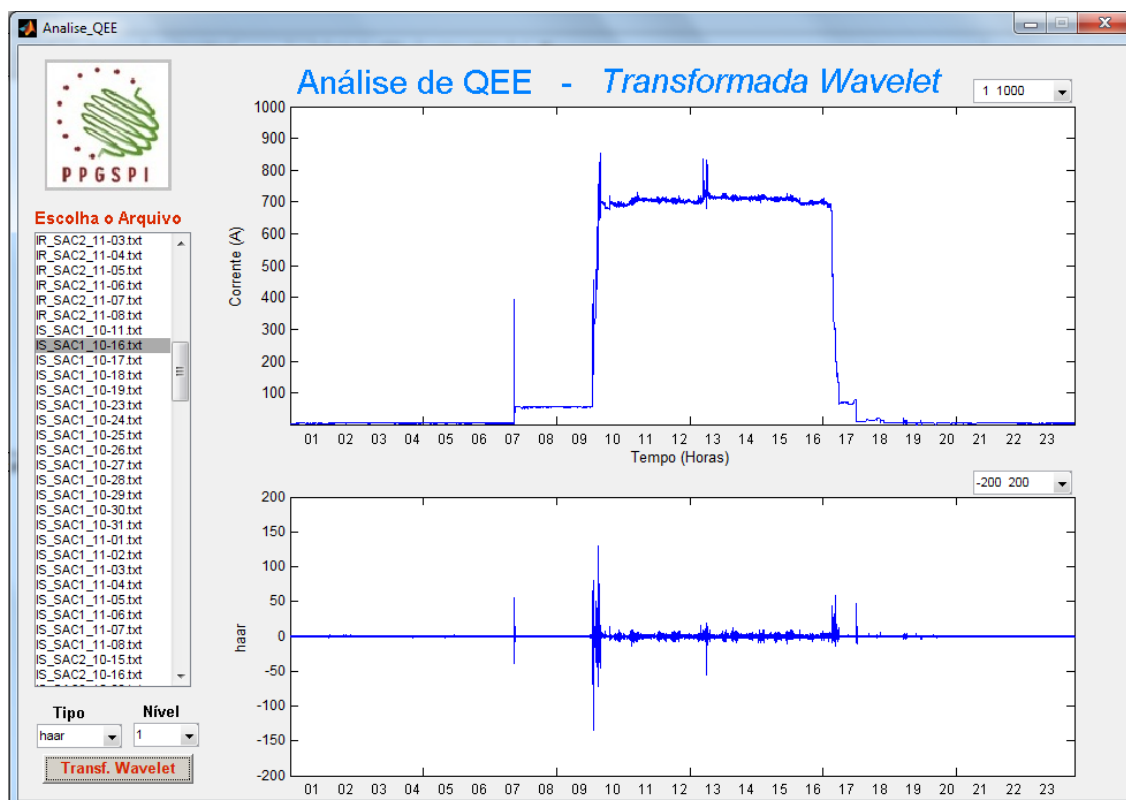
Abaixo segue a descrição de cada campo e funcionalidade que o aplicativo contém:

- 1) Campo para seleção do arquivo contendo os dados de consumo ou tensão de um dia de coletas (período de 24 horas);
- 2) Possibilita a escolha do tipo de Transformada *Wavelet* a ser utilizada bem como seu nível de decomposição;

- 3) Área onde são mostradas as informações (de tensão ou de corrente) em forma de gráfico;
- 4) Área onde são mostrados os dados de saída correspondentes a análise TWD, mais especificamente a localização do evento (perturbação) e sua intensidade;
- 5) Seleciona a escala para o gráfico de corrente / tensão;
- 6) Seleciona a escala (nível de intensidade) dos dados de saída após a aplicação da transformada.

Esta interface possibilita a análise tanto de padrões de QEE quanto determinar o comportamento do consumo durante o período analisado (24 horas neste caso). A Figura 61 demonstra a análise de QEE por TWD, em que se aplica a *wavelet* mãe Haar nível 1, para os dados coletados no dia 31 de outubro.

**Figura 61** – Tela inicial do software de Análise de QEE e EE



Fonte: Do autor, extraído do *software* Matlab<sup>®</sup>.

Outra funcionalidade do GUIDE é permitir a execução de comandos que em geral estão disponíveis a partir do console do Matlab. Desta forma, é possível criar funções matemáticas complexas e integradas à aplicação gráfica, restando ao usuário final apenas as funcionalidades básicas da interface criada.

Por exemplo, na interface para a análise de QEE, é necessário que o usuário informe ao programa apenas: o arquivo a ser analisado, o nível de decomposição, e qual será a *wavelet* mãe utilizada. Assim, fica a critério do usuário decidir qual das famílias *wavelets*, e o nível de decomposição, que devem ser utilizadas.

O Matlab inclui um grande número de *wavelets* mãe que podem ser usadas para a análise tanto contínua quanto discreta, como mostra a Tabela 3.

**Tabela 3** – Famílias *Wavelets* disponíveis no Matlab

<b>Wavelet Family Short Name</b>	<b>Wavelet Family Name</b>
'haar'	Haar wavelet
'db'	Daubechies wavelets
'sym'	Symlets
'coif'	Coiflets
'bior'	Biorthogonal wavelets
'rbio'	Reverse biorthogonal wavelets
'meyr'	Meyer wavelet
'dmey'	Discrete approximation of Meyer wavelet
'gaus'	Gaussian wavelets
'mexh'	Mexican hat wavelet
'morl'	Morlet wavelet
'cgau'	Complex Gaussian wavelets
'shan'	Shannon wavelets
'fbsp'	Frequency B-Spline wavelets
'cmor'	Complex Morlet wavelets

Fonte: Adaptado de (MISITI et al., 2012).

A escolha da *wavelet* é ditado pelas características do sinal e a natureza da aplicação. É necessário compreender as propriedades da análise e síntese das transformadas *wavelets*, assim é possível escolher uma *wavelet* que é otimizada para a aplicação em estudo.

Porém, como descrito no referencial teórico deste trabalho (ver seção 2.5.5), as *wavelet* mãe mais utilizadas em análise de qualidade de energia são as de Haar, as Daubechies e as Symlets.

### 3.7 Considerações finais

Este capítulo abordou o desenvolvimento do sistema de monitoramento e análise de QEE em sistemas industriais, dividindo-se em três áreas: desenvolvimento do hardware; desenvolvimento do software e sua integração; e por fim os métodos de análise multiresolução, disponíveis no Matlab ou criados pelo autor conforme as necessidades encontradas no decorrer do projeto.

O projeto do hardware foi desenvolvido primeiro, seguindo os conceitos previamente estudados, onde foram levantadas as características necessárias para que o sistema efetue as tarefas de aquisição e discretização dos sinais. Ferramentas de simulação foram utilizadas para auxiliar nesta etapa do projeto, como o Simulink, Proteus e PSIM.

Com o hardware concluído, foi iniciada a implementação dos softwares, tanto dos algoritmos de DSP quanto do sistema embarcado. A utilização do dsPIC se mostrou uma opção viável, desde que respeitando suas limitações, principalmente o tempo de conversão AD. A implementação do software para a aplicação do SE MINI2440 se mostrou flexível de acordo com as necessidades do projeto, visto as características da plataforma escolhida, possuindo interfaces de IOs, protocolos de comunicação já implementados, possibilitando a rápida integração com o dsPIC.

Por fim, a implementação de recursos para a análise por TWD, tanto pelo Matlab quanto pelo SE, possibilitou uma análise mais aprofundada dos dados coletados (e armazenados em arquivos pelo MINI2440) pelos dispositivos de aquisição.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o período em que o sistema desenvolvido manteve-se coletando dados (parâmetros elétricos) de um processo industrial. Assim, fez-se necessário um estudo de caso, onde o sistema proposto e desenvolvido foi instalado em uma indústria de beneficiamento de tabaco. Desta forma, a seção 4.1 deste capítulo relata o cenário de estudo deste trabalho, descrevendo o processo industrial e como ocorre o consumo e distribuição da energia elétrica. A seção 4.2 descreve a instalação e calibração do sistema de aquisição. A seção 4.3 aborda as análises efetuadas a partir dos dados coletados apresentando os resultados obtidos. Por fim, na seção 4.4, são apresentadas as considerações finais.

### 4.1 Cenário de estudos

Para o estudo de caso foi executado o monitoramento da qualidade e consumo de energia elétrica em um processo de beneficiamento de tabaco na empresa da *CTS Brazil Tabaccos*, situada na cidade de Vera Cruz – RS. Escolheu-se este cenário de estudos pelo alto consumo de energia em seus processos, bem como a grande quantidade de elementos de potência instalados, como motores de indução trifásicos, caldeiras, reatores, entre outros.

O processo em que o sistema de monitoramento foi instalado corresponde a linha de beneficiamento do fumo, e se caracteriza pelas seguintes cargas elétricas:

- Possui mais de 280 motores de indução, a maioria trifásico;
- Aproximadamente 250 motores possuem partida direta;
- Os outros 32 motores são controlados por inversores de frequência;
- Uma caldeira para vapor aquecido;
- Casa de Pó, composto de sistemas de ventilação e vácuo.

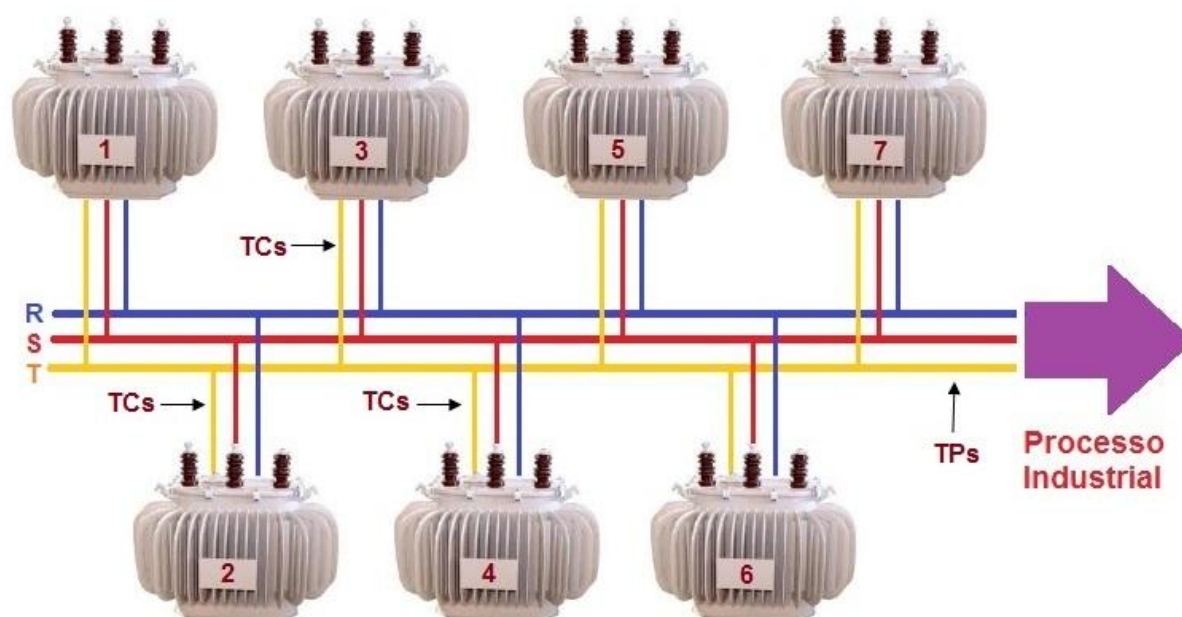
Toda a energia necessária para o funcionamento da linha de beneficiamento provém de uma das três subestações de alta tensão presentes na empresa. Esta subestação é descrita na seção a seguir.

### 4.1.1 Subestação

Uma subestação<sup>7</sup> é uma instalação elétrica de alta potência, contendo equipamentos para transmissão e distribuição de energia elétrica, além de equipamentos de proteção e controle. Também é responsável por rebaixar a tensão proveniente da concessionária, geralmente em 13.200 Volts para a tensão de funcionamento dos equipamentos industriais ( $230^8 V_{CA}$  para a tensão de fase). Este rebaixamento é feito utilizando transformadores.

No caso da subestação que alimenta a linha de beneficiamento do tabaco, esta possui 7 transformadores rebaixadores conectados a um único barramento, ou seja, todos os transformadores estão conectados em paralelo, como mostra a Figura 62.

**Figura 62 – Subestação de Alta Tensão**



Fonte: Do autor.

Desta forma tem-se um único valor de tensão para cada fase, visto que todos os transformadores estão conectados no mesmo potencial elétrico (mesmo ponto), porém têm-se correntes distintas em cada um dos transformadores, cada uma destas correntes dependendo da potência do transformador.

<sup>7</sup> Conjunto de instalações elétricas em média ou alta tensão que agrupa os equipamentos, condutores e acessórios, destinados à proteção, medição, manobra e transformação de grandezas elétricas (PRODIST, 2010).

<sup>8</sup> A tensão nominal monofásica é de 220 V, porém neste estudo de caso ela se encontrava com valor de 230 V.

A Figura 63 apresenta a sala de controle da subestação, onde é possível observar os quadros de comando, utilizados para conectar e desconectar cada um dos transformadores ao barramento principal.

**Figura 63** – Sala de comando da subestação



Fonte: Do autor, extraída da empresa CTS Brazil Tabaccos.

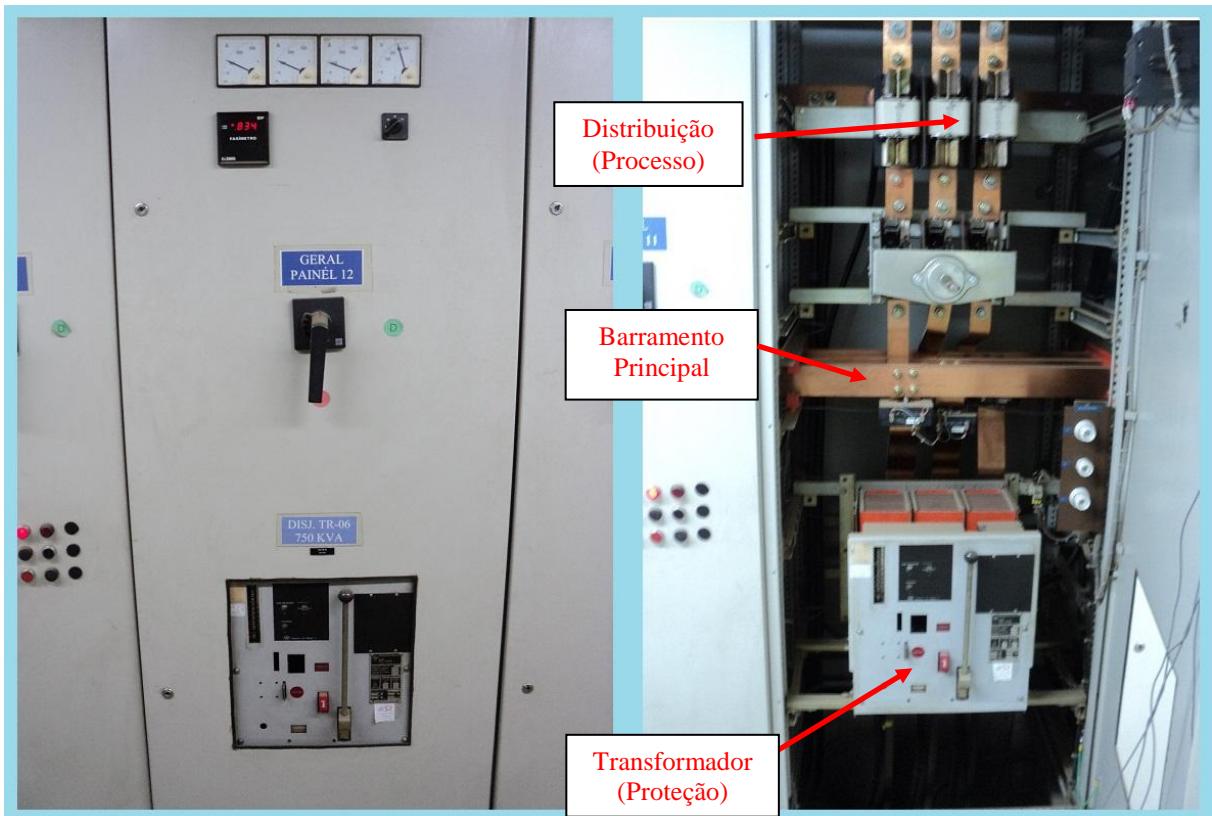
Além das chaves seccionadoras utilizadas para conectar cada um dos transformadores ao barramento principal, o quadro de comando contém amperímetros para monitoração da corrente fornecida que circula por cada uma das fases destes transformadores. Internamente também encontram-se os bancos de capacitores, utilizados para correção do fator de potência, geralmente usados quando a linha está em operação.

Na Figura 64 podem ser vistos os sistemas de proteção (fusíveis, chave seccionadora e disjuntor) presentes em um dos painéis, além dos amperímetros e do fasímetro. Uma das chaves seccionadoras conecta a linha de produção ao barramento principal enquanto a outra é responsável por conectar ou desconectar os transformadores ao barramento. Esta última também tem a função de proteger o sistema em caso de curto ou sobre-tensão, desarmando o transformador automaticamente.

Ainda nesta ilustração encontram-se os transformadores de corrente (TC 2000/5A, por exemplo), utilizados para monitoração das correntes de cada uma das fases do transformador.



**Figura 64** – Quadro de comando e sistema de proteção de um transformador

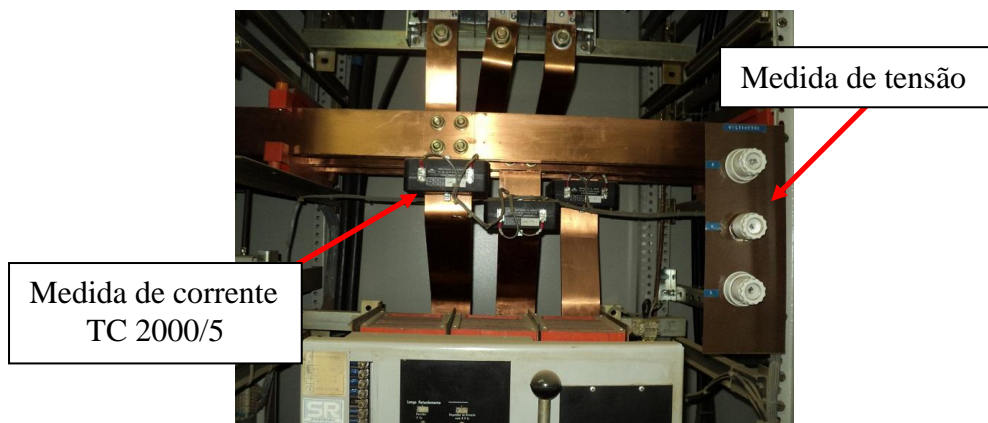


Fonte: Do autor, extraída da empresa CTS Brazil Tabaccos.

## 4.2 Instalação do SAD

A monitoração das correntes que circulam em cada uma das três fases do transformador (denominadas fase R, fase S e fase T) é feita por sensores de corrente, ou TCs, interligados aos amperímetros analógicos, como apresentado na Figura 65.

**Figura 65** – TCs presentes na saída dos transformadores



Fonte: Do autor, extraída da empresa CTS Brazil Tabaccos.

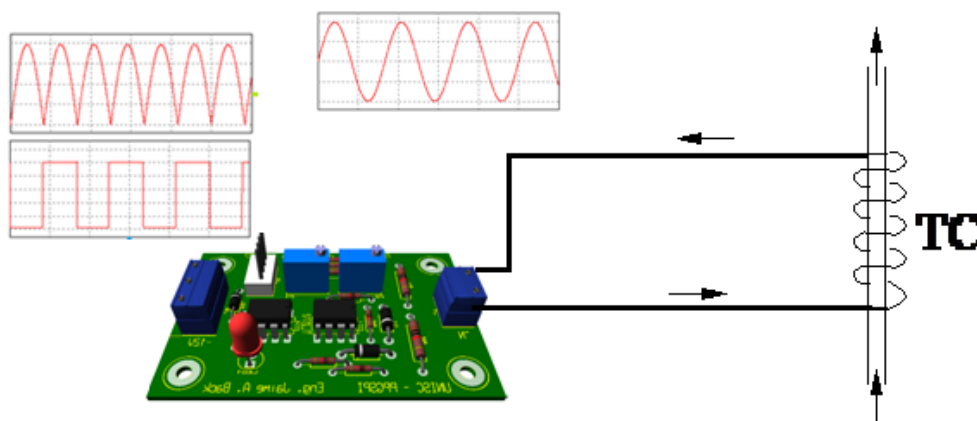
Estes sensores, além de possibilitar a leitura das correntes que circulam nas três fases do transformador, estão conectados à controladores de FP permitindo seu ajuste.

Em relação à instalação do SAD, esta tarefa basicamente correspondeu à interligação destes TCs as entradas das placas de condicionamento de sinal, para leitura da corrente. Para a leitura da tensão, foi utilizado um transformador rebaixador com o primário conectado entre fase e neutro e o secundário em outra placa condicionadora. Cada uma destas etapas é descritas a seguir:

#### 4.2.1 Leitura da corrente

Como descrito na seção 2.4.1.1, o TC deve ser conectado a uma carga de baixa resistência ôhmica, a fim de existir uma queda de tensão proporcional a corrente que por ele circula. Neste caso, os TCs foram ligados aos condicionadores de sinal, conforme Figura 66.

**Figura 66** – Instalação série do condicionador ao amperímetro e ao TC



Fonte: Do autor.

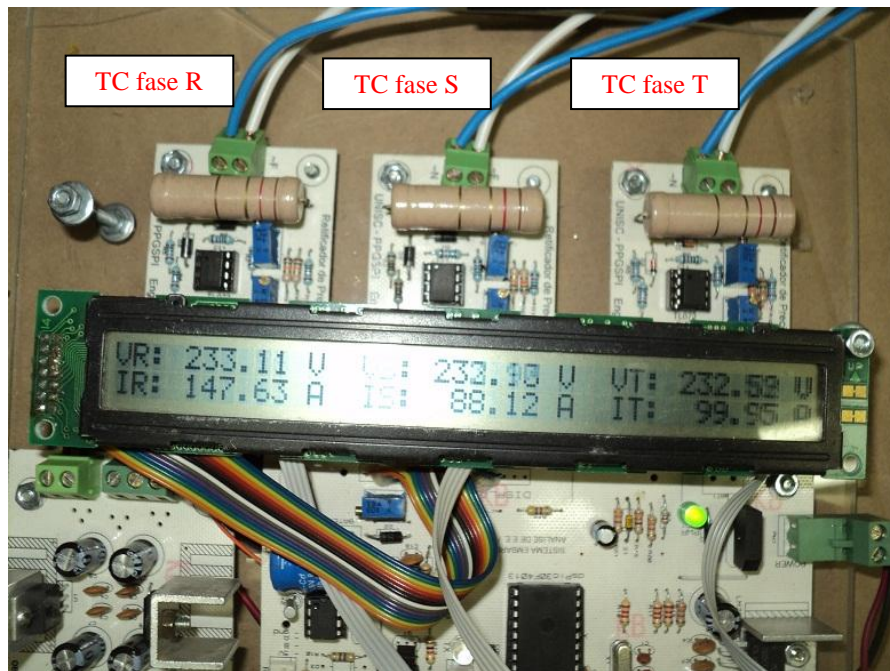
As placas condicionadoras do sinal proveniente do possuem resistores de potência de valor específico, que depende da faixa de atuação do TC. Por exemplo, para os condicionadores de sinal ilustrado na Figura 66 se utilizou resistores de  $1,2 \Omega$  por  $5 \text{ W}$  de potência. Isso se justifica, pois a corrente eficaz ( $I_{\text{RMS}}$ ) média nos TCs da Figura 65 tem seu valor na faixa de  $2 \text{ A}$  a  $2,5 \text{ A}$ , gerando assim uma queda de tensão de até  $3 \text{ V}_{\text{RMS}}$  em cada resistor. Este valor foi fixado como máximo, já que o limite suportado pelo conversor ADC é de  $5 \text{ V}_{\text{CC}}$ .

Desta forma, seguindo a Equação 24 (derivada da Equação 3) a tensão CC máxima na entrada do conversor é a tensão de pico ( $V_p$ ), pois trata-se de um sinal senoidal. No caso de limitar a tensão em  $3 V_{CA}$ , tem-se uma tensão CC máxima aplicada no conversor de  $4,24 V_{CC}$ .

$$V_p = V_{RMS} \times \sqrt{2} \quad (24)$$

Na ilustração da Figura 67 observa-se cada um dos condicionadores de sinal conectados aos seus respectivos TCs (TC fase R, S e T). Também é possível observar os resistores de potência utilizados na montagem.

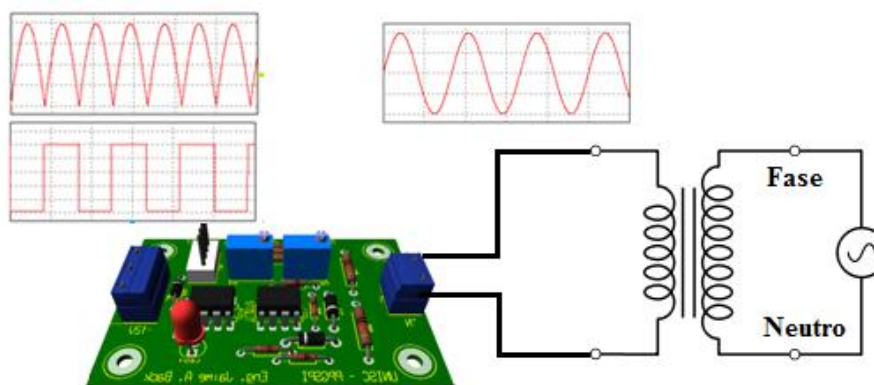
**Figura 67** – TCs conectados aos condicionadores de sinal



Fonte: Do autor.

#### 4.2.2 Leitura da tensão

A leitura da tensão é feita medindo a diferença de potencial entre cada fase do barramento principal com o neutro. Isso é possível utilizando pequenos transformadores conectados à entrada da placa de condicionamento, conforme Figura 68.

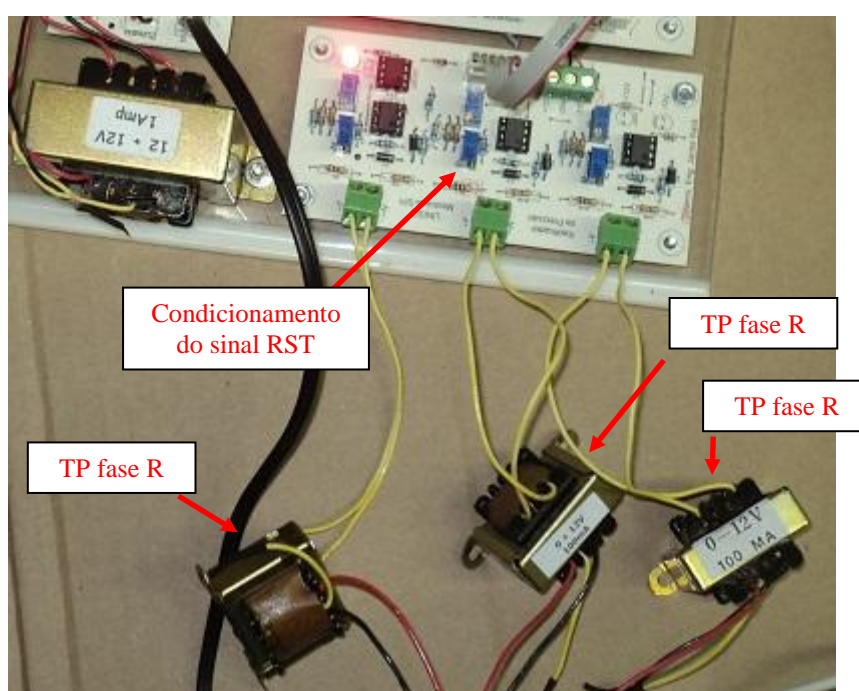
**Figura 68** – Instalação paralela do condicionador ao TP

Fonte: Do autor.

Os limites de valores aplicados na conversão AD das tensões lidas nos TPs seguem os mesmos parâmetros explicados para a leitura de corrente, sendo que o valor máximo de  $3 V_{CA}$  (ou  $4,24 V_{CC}$ ) é fixado pelo circuito divisor de tensão presente nas entradas da placa de condicionamento RST (AVEXO A), conforme Equação 25.

$$VR_2 = V_{RMS} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (25)$$

A partir desta equação encontram-se os valores de  $1000 \Omega$  para  $R_1$  e  $330 \Omega$  para  $R_2$ .

**Figura 69** – TPs conectados à placa condicionadora RST

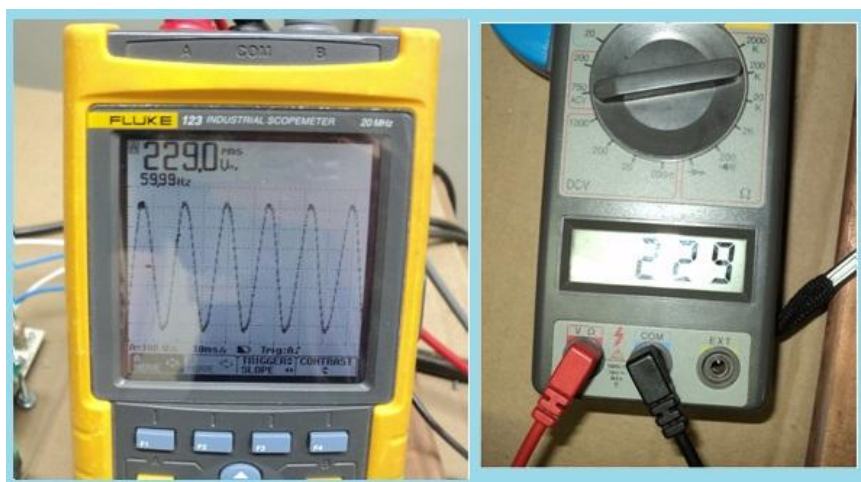
Fonte: Do autor.

Figura 69 ilustra a leitura da tensão, onde transformadores de baixa potência (220V para 12V por 100 mA) são conectados ao condicionador RST. Foi optado pela utilização destes transformadores pelo baixo custo e principalmente pela isolação entre circuito de aquisição e de potência (barramento).

### 4.2.3 Calibração do SAD

A etapa de calibração correspondeu a padronização dos valores registrados no SAD conforme mostrados pelos instrumentos de medição presentes no processo. Para a calibração do SAD foram utilizados como referência os amperímetros analógicos presentes nos quadros de comando, um amperímetro digital do tipo alicate, um multímetro e um osciloscópio digital.

**Figura 70** – Captura da tensão de fase com instrumentos comerciais

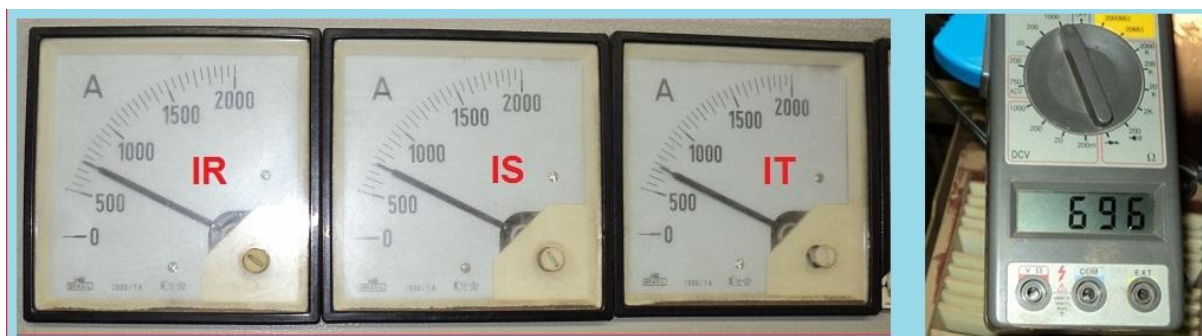


Fonte: Do autor.

Na Figura 70 observa-se o valor da tensão eficaz medida pelo osciloscópio digital e pelo multímetro, sendo que o SAD foi calibrado a partir destes valores, ou seja, foi ajustada uma variável no programa do dsPIC, correspondente ao fator de multiplicação necessário na conversão digital-analógica da leitura de tensão.

Da mesma forma, a partir das leituras apresentadas pelos amperímetros analógicos e pelo amperímetro digital (FIGURA 71), outra variável no programa do dsPIC foi ajustada, esta correspondendo ao fator de multiplicação necessário na conversão digital-analógica da leitura da corrente eficaz.

**Figura 71** – Captura da corrente de fase com instrumentos comerciais



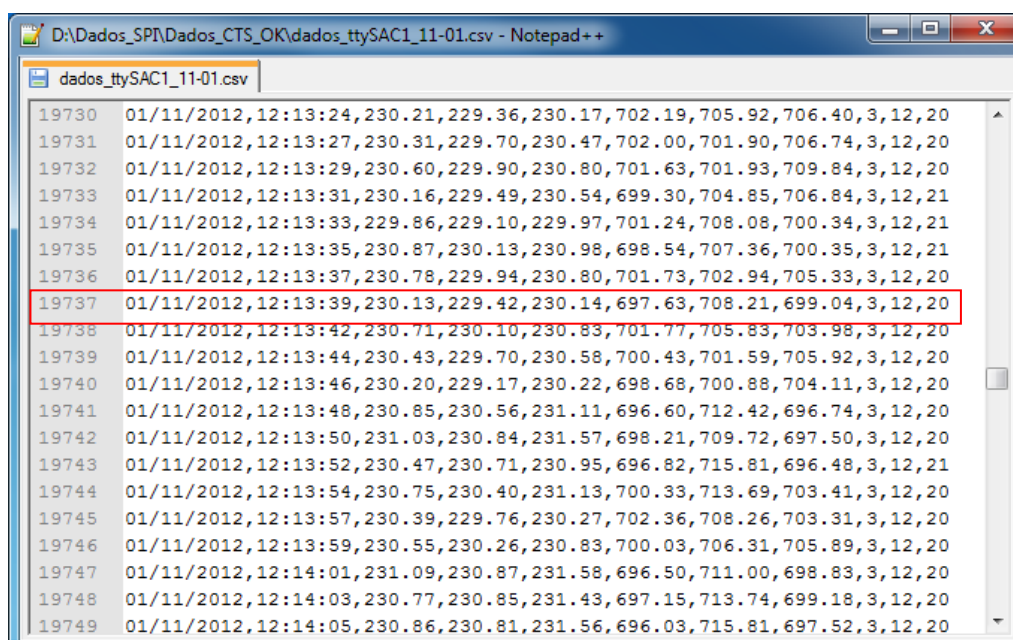
Fonte: Do autor.

As variáveis (ou definições) utilizadas pelo programa para o cálculo de conversão AD entre o valor medido e o apresentado pelo SAD são apresentadas da seguinte forma:

- #define FACTOR\_VmedDtoVrmsA 9.05 //fator para conv. da tensão
- #define FACTOR\_VDtoVA 10.5 //fator para conv. da tensão
- #define FACTOR\_ImedDtoIrmsA 2.7 //fator para conv. da corrente
- #define FACTOR\_IDtoIA 4.096 //fator para conv. da corrente

Os valores definidos para cada um dos parâmetros dependem de vários fatores, como por exemplo, os valores dos resistores utilizados, a escala de conversão, e a equação matemática utilizada pelo algoritmo, entre outros.

**Figura 72** – Arquivo salvo na *flash* com informações coletadas pelo SAD



Fonte: Do autor.

Por fim, na Figura 72 (linha 19737, por exemplo) é possível observar os valores de tensão e corrente registrados pelo SAD e armazenados em base de dados. Neste arquivo é salvo a data, horário, tensões VR, VS, VT, correntes IR, IS, IT, bem como o atraso entre tensão e corrente, para cálculo de FP.

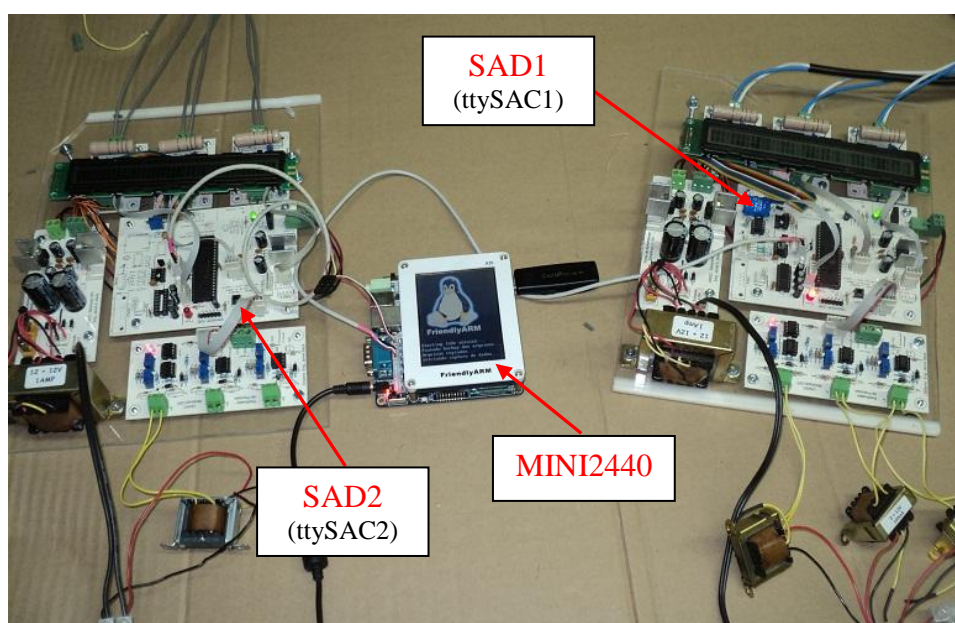
#### 4.2.4 Integração de diferentes SADs ao MINI2440

Como o cenário de estudos envolve a coleta de dados de diferentes pontos (vários transformadores), foi necessário a instalação de SADs em cada um dos pontos que se desejava efetuar a captura de informações. Assim, levantou-se uma questão muito importante e que diz respeito a que abordagem adotar para a seguinte tarefa: como armazenar dos dados discretizados pelos SADs?

Considerando a quantidade de informações coletadas por cada microcontrolador, a capacidade de operação do MINI2440, suas I/Os e seu custo, optou-se em centralizar o registro de informações em uma única plataforma embarcada. Desta forma, escolheu-se o padrão RS232 como forma de comunicação e transferência de dados entre os dispositivos.

Neste trabalho foram feitas coletas de dados em 3 dos 7 transformadores instalados em paralelo (descrito na seção 4.1.1). A Figura 73 demonstra a conexão de dois SADs ao MINI2440. Já o acesso aos dados do MINI2440 é via rede (protocolo TCP/IP).

**Figura 73** – Integração de dois SADs ao SE MINI2440



Fonte: Do autor.

O armazenamento dos dados coletados foi feito em forma de arquivo (FIGURA 72), e salvo na memória *flash* do MINI2440 (possui 2 GB de espaço), seguindo o seguinte padrão:

- Os dados enviados por cada SAD são gravados em diferentes arquivos;
- A identificação de cada arquivo segue a interface de entrada dos dados (ttySAC0, ttySAC1 ou ttySAC2) e a data de criação. Por exemplo, “dados\_ttySAC1\_11-01.csv” corresponde registros do dia 1º de outubro, das 00:00:00 até as 23:59:59, coletados pelo SAD conectado à interface ttySAC1 do MINI2440;
- As informações enviadas por cada SAD correspondem a tensão e corrente de cada fase (VR, VS, VT, IR, IS, IT) mais as defasagens, em ciclos, entre tensão e corrente em cada fase (VR/IR, VS/IS, VT/ IT). Esses dados são enviados com intervalos de 2 a 3, dependendo do nível de dados a serem processados pelo dsPIC (salvo eventos de VTCD, que eram enviados imediatamente);
- A data e hora são inseridos no arquivo pelo próprio MINI2440.

### 4.3 Análise dos dados coletados

A análise dos dados coletados ocorreu de duas formas: *online* e *offline*. A análise *online* (ou em tempo real) ocorre quando o SAD detecta eventos de curta duração, como do tipo VTCD, ou seja, elevação da tensão, afundamentos, e também picos de corrente além do limite máximo. Nestes casos, um alerta de perturbação é impresso na tela LCD do SAD, precedido da classificação do evento de QEE. Este alerta também é enviado ao MINI2440, ficando assim registrado na base de dados.

Os limites de detecção dos distúrbios como afundamento, elevação e picos de corrente seguem os dados apresentados na Tabela 1 do referencial teórico deste trabalho. Assim, no algoritmo de SAD existem as seguintes definições:

- #define Vrms\_MAX 220\*1.1 // elevação: superior a 1,1 pu
- #define Vrms\_MIN 220\*0.9 // afundamento: inferior a 0.9 pu
- #define Irms\_MAX 900 // corrente máxima na fase (10 segundos)

Outra forma de análise *online* foi a aplicação da TW Haar implementada diretamente no MINI2440 (algoritmo descrito na seção 3.5.1). Essa análise dispensa a utilização de

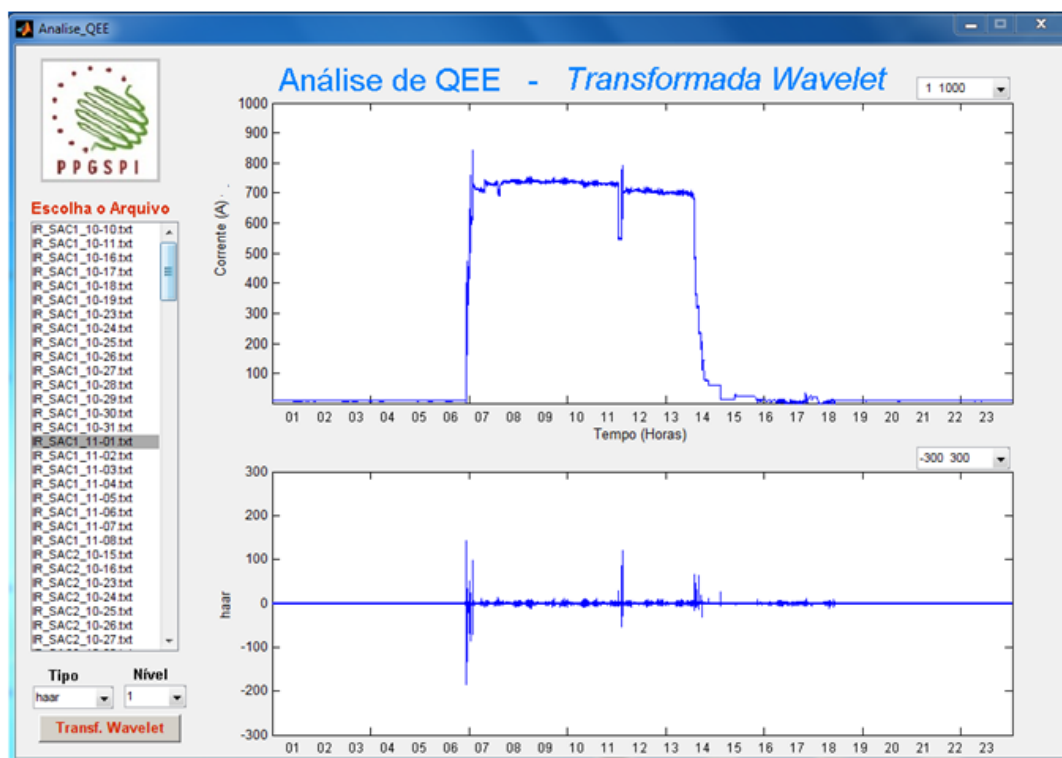


softwares externos, como o Matlab, em que o próprio SE faz a varredura nos dados que chegam do SAD a fim de detectar algum tipo de perturbação de QEE.

Já a análise *offline* corresponde às ações executadas posteriormente sobre os dados armazenados. Para tal tarefa, primeiramente os dados são manipulados (criados novos arquivos separados por tipo de grandeza) para que programas e algoritmos possam fazer a detecção de distúrbios elétricos (QEE) ou mesmo gerar o modelo de consumo (EE).

A Figura 74 ilustra a análise *offline* dos dados registrados pelo sistema no dia 1º de outubro de 2012, utilizando a interface gráfica (GUIDE) desenvolvida para esta tarefa. Na ilustração observa-se a base de dados (lista e arquivos), a área para plotagem da curva de consumo e a área para plotagem dos coeficientes *wavelet* (detecção de perturbações).

**Figura 74** – Análise do consumo de energia do dia 01/11/2012



Fonte: Do autor, extraído da aplicação.

As seções seguintes descrevem mais detalhadamente a análise *offline* dos dados coletados, bem como as ferramentas utilizadas para esta tarefa, separadas em análise de consumo (EE) e análise de perturbações (QEE).

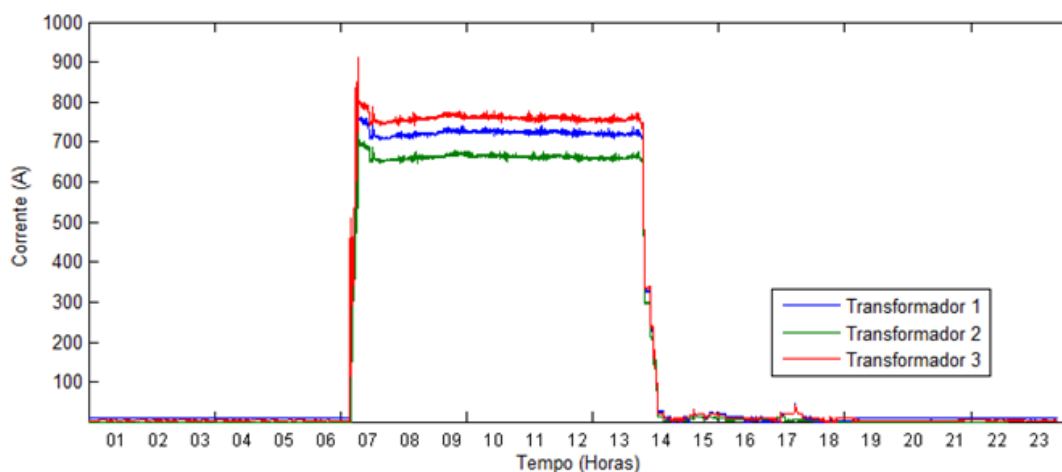
### 4.3.1 Análise de Consumo (Eficiência Energética)

A análise do consumo corresponde a verificar o comportamento do consumo de energia elétrica pelo sistema. Basicamente são dados de valor de corrente consumida em cada fase dos transformadores monitorados pelos SADs.

O sistema implementado monitorou o processo industrial por aproximadamente um mês, iniciando no dia 08/10/2012 e finalizando no dia 09/11/2012. Neste período, a empresa operava em turno único, com horário de funcionamento das 06:20 até 13:30.

Os dados coletados neste período foram posteriormente analisados, permitindo a verificação da QEE bem como traçar o modelo de consumo (EE) do processo. A Figura 75 demonstra o comportamento da demanda energética monitorada e registrada em um dos turnos. Neste caso, verifica-se a similaridade entre as três curvas, que representam o funcionamento de três dos sete transformadores instalados na subestação.

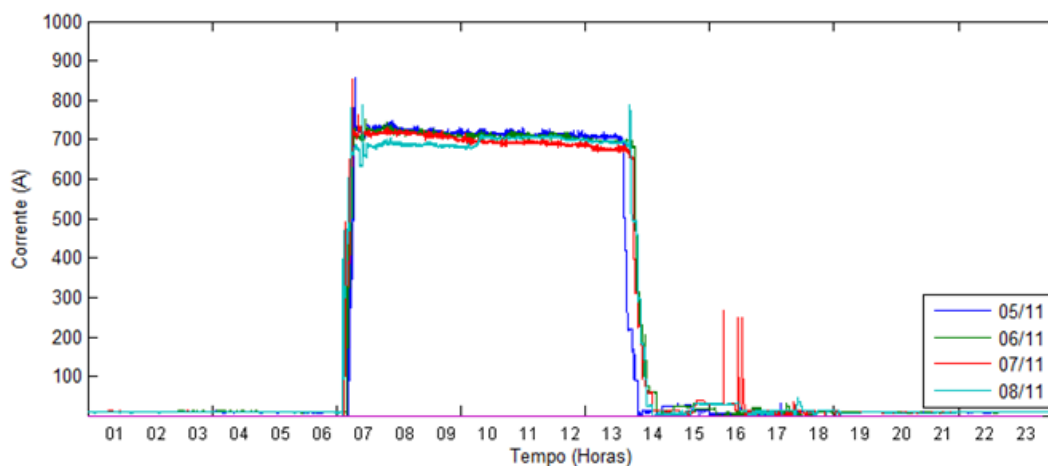
**Figura 75** – Gráfico com as correntes IR de três transformadores



Fonte: Do autor.

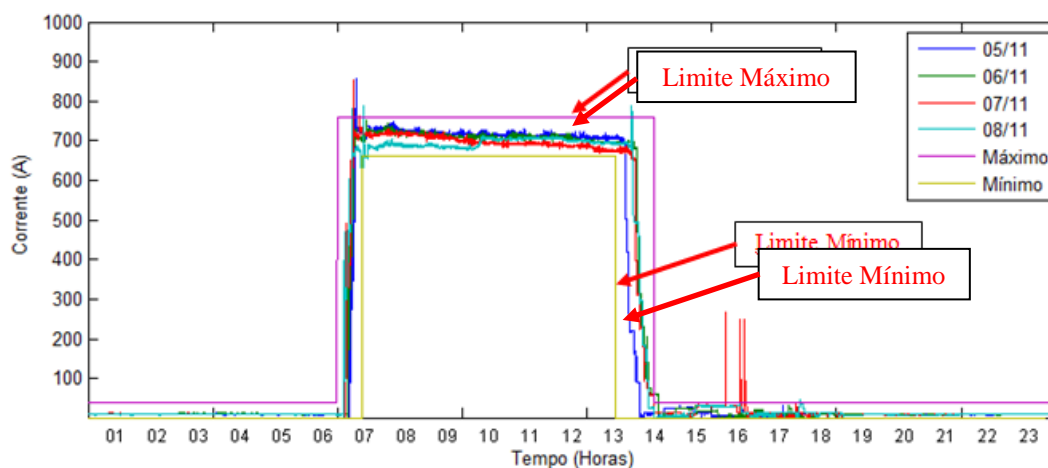
### 4.3.2 Modelo de Consumo

O modelo de consumo pode ser levantado a partir da comparação entre as curvas de demanda registradas durante o período de estudo. A Figura 76 ilustra essas curvas, onde são apresentados os dados de consumo de 4 dias (05/11 06/11, 07/11 e 08/11). Na figura é possível observar a semelhança entre as todas as curvas.

**Figura 76** – Gráfico com as correntes IR de diferentes dias

Fonte: Do autor.

É possível observar também o comportamento da curva de consumo, tendo seu pico inicial perto das 06:30 da manhã, se mantendo constante até o final do turno, próximo das 14:00 da tarde. É importante salientar o fato de que a empresa trabalha em turno único, e observando novamente a figura, verifica-se uma demanda de aproximadamente 9 horas, correspondendo ao horário de início e término deste turno.

**Figura 77** – Gráfico do modelo de consumo

Fonte: Do autor.

Desta forma, foi determinado que o modelo de consumo com dois limites de operação (limite mínimo e limite máximo), conforme Figura 77:

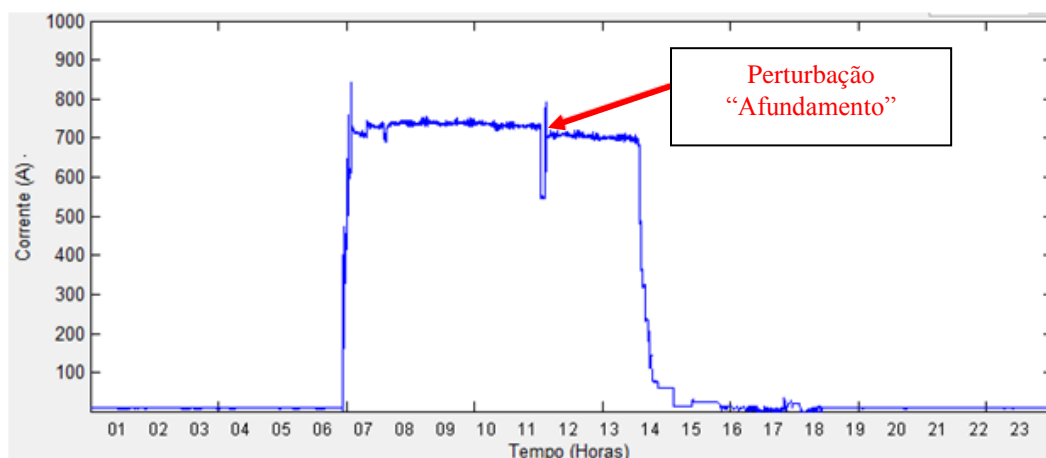
- O primeiro limite (linha em violeta) corresponde ao início da operação da linha, e tem seu início por volta das 06:20, tendo como limite de corrente 760 A. Seu término está estipulado para 14:00;
- O segundo limite (linha em amarelo), corresponde a corrente mínima consumida pelo sistema quando em pleno funcionamento, estando estipulada em 660 A. Seu início se dá às 07:00, ou seja, neste horário todos os motores e dispositivos já devem estar ligados. O fim do processo, ou o desligamento dos motores e máquinas, tem seu início às 13:00.

Assim, qualquer evento de corrente que ultrapasse esses dois limites, por mais de 1 minuto, indica uma perturbação ou funcionamento fora da normalidade.

### 4.3.3 Análise de perturbações na corrente

As perturbações na corrente são analisadas a partir dos valores de consumo, ou seja, valores eficazes de corrente (Irms) de cada uma das fases dos transformadores monitorados. Estas perturbações correspondem a eventos abruptos, que ocorrem instantaneamente, modificando o comportamento e a curva de consumo do sistema. Pode-se citar como exemplo o acionamento de grandes cargas, como motores de indução por partida direta, gerando picos de corrente várias vezes a corrente nominal. Da mesma forma, o desligamento de dispositivos também causa diminuição repentina da corrente, ou afundamentos.

**Figura 78** – Análise do consumo diário com perturbação

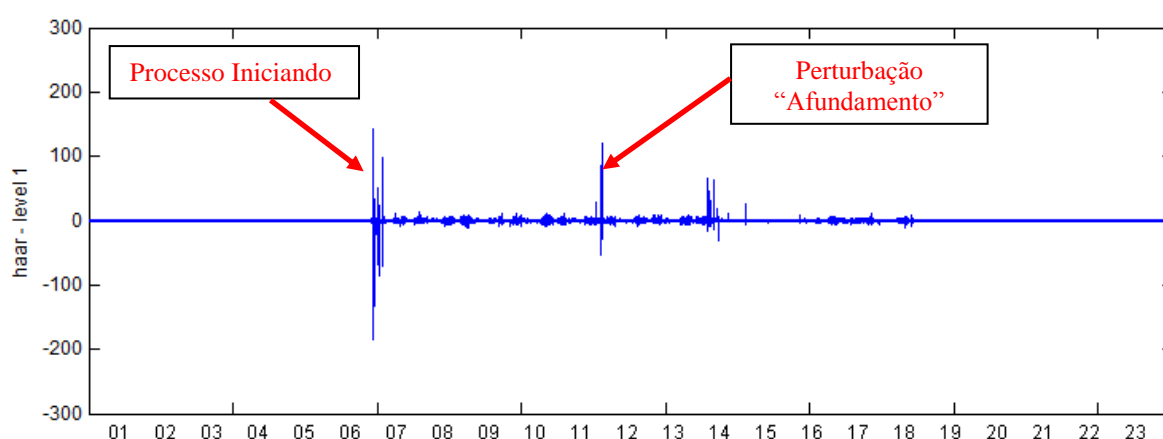


Fonte: Do autor, extraído da aplicação gráfica.

A Figura 78 apresenta a curva de consumo do processo durante 24 horas. Nele é possível observar o acionamento das cargas até a estabilização do processo. Porém, observa-se um afundamento na corrente, causado pelo *reset* de um dos equipamentos da linha.

Com base no gráfico da Figura 78, é aplicada a TWD de modo a localizar os distúrbios de corrente. Como resultado tem-se o gráfico ilustrado pela Figura 79, correspondendo ao ruído presente na curva de consumo após a análise TWD utilizando *wavelet* mãe de Haar. Para esta análise, os pontos mais importantes do gráfico são os saltos de maior amplitude, que indicam os momentos em que houveram mudanças abruptas na curva de consumo.

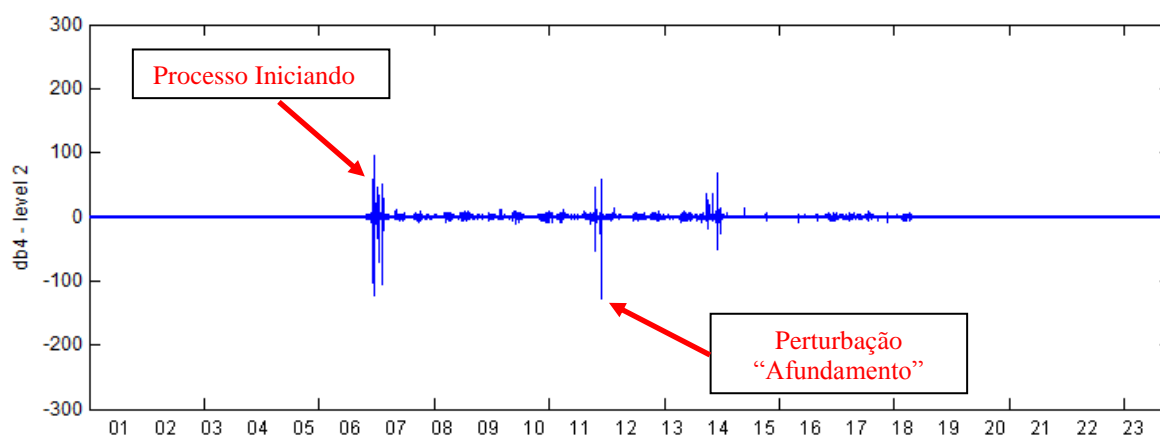
**Figura 79** – Análise por TWD – *wavelet* mãe Haar nível 1



Fonte: Do autor, extraído da aplicação gráfica.

Já o gráfico ilustrado na Figura 80 apresenta a análise TWD utilizando *wavelet* mãe db4 nível 2. Neste gráfico percebe-se a detecção das perturbações (variações abruptas), em que o afundamento também foi sinalizado com mais energia no espectro de saída *wavelet*.

**Figura 80** – Análise por TWD – *wavelet* mãe db4 nível 2



Fonte: Do autor, extraído da aplicação gráfica.

Isso se justifica conforme Santoso, Grady e Powers (2000), em seu trabalho, em que eventos abruptos são mais facilmente detectados por *wavelets* compactas, como a db4 e a db6.

Com base na curva representada pela Figura 78, diferentes tipos de *wavelets* mãe foram aplicadas neste sinal. A partir dos gráficos de resposta, foram identificados os parâmetros de sensibilidade (amplitude de 0 a 400) e os de ruído, em diferentes níveis de decomposição. Destes parâmetros foi criada a Tabela 4, que faz um comparativo entre os resultados de análise TWD, como segue:

**Tabela 4** – Comparação entre as famílias de TW

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Sensibilidade	Ruído
haar	150	200	300	400	Alta	Alto
dmev	70	180	250	250	Alta	Baixo
coif1	160	180	220	240	Média	Baixo
coif2	80	100	300	400	Média	Alto em N4
coif3	80	100	250	250	Alta em 3 e 4	Alta em N4
coif4	100	120	310	340	Alta	Médio
coif5	90	110	280	200	Media	Alto
db2	100	300	220	240	Alta	Baixo em N2
db3	90	240	300	280	Alta	Alto em N4
db4	100	100	300	300	Alta em 2	Alto em 3 e 4
sym2	100	300	200	240	Alta em 4	Alto em N4
sym3	100	300	200	300	Baixo em 4	Alto em N4
sym7	80	250	250	250	Alta em 4	Alto em N4

Fonte: Do autor, extraído da aplicação gráfica.

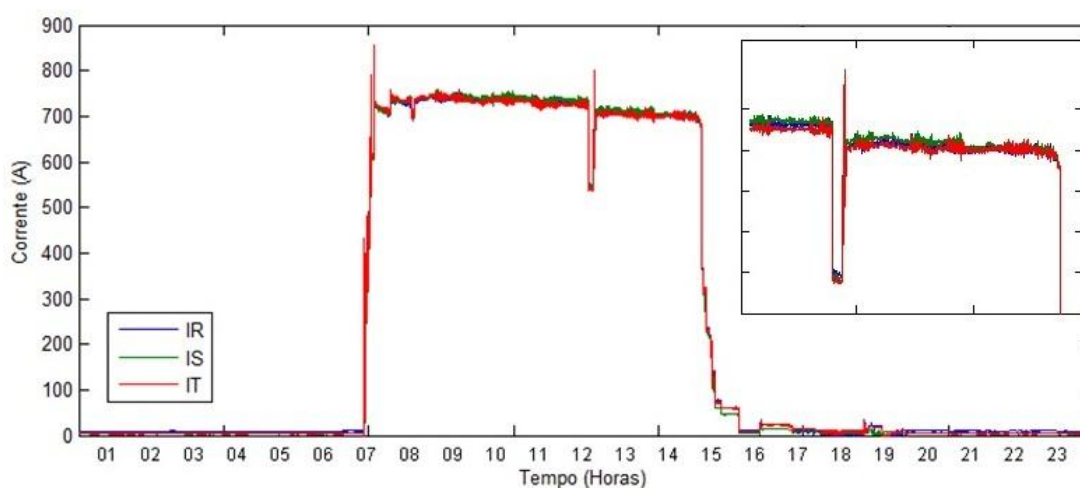
Considerando os dados da tabela, conclui-se que quanto maior o nível de decomposição, a sensibilidade a perturbações tende a ser maior. Porém aumenta-se a presença de ruídos no sinal de saída, ou seja, qualquer pequena variação no sinal de entrada pode ser considerada um evento de QEE.

Por fim, as *wavelet* mãe que se mostraram mais adequadas nesta análise foram a de haar (níveis 1 e 2), a dmev (níveis 1, 2, 3, 4), a sym2 e sym7 (níveis 1 e 2) e a db2 e db4 (para o nível 2).

#### 4.3.4 Análise de perturbações nas correntes RST

As perturbações que ocorrem na corrente geralmente são similares e incidem nas 3 fases simultaneamente, como mostra a Figura 81. Percebe-se, no detalhe, que o afundamento detectado ocorreu nas fases RST do sistema trifásico. Outro fator importante diz respeito ao balanceamento do sistema, que pode ser observado pela sobreposição das três curvas.

**Figura 81** – Correntes das fases RST (detalhe: perturbações similares)



Fonte: Do autor.

#### 4.3.5 Análise de perturbações na tensão utilizando Valor RMS

Em relação às perturbações de QEE, principalmente as que afetam a tensão elétrica do sistema, foram analisadas aquelas descritas como VTCD, mais especificamente os afundamentos e elevação da tensão, bem como as sobre-tensões.

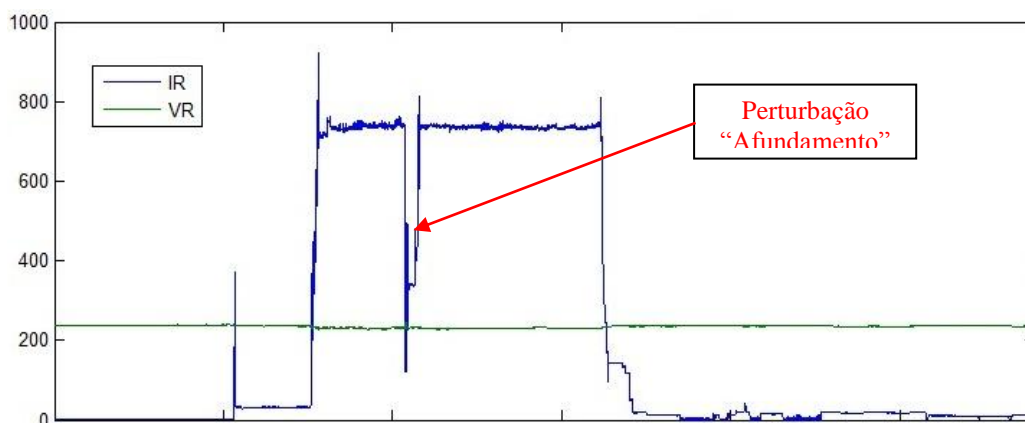
A análise dos parâmetros de QEE se baseou nos valores eficazes da tensão ( $V_{RMS}$ ), adquiridos pelos SAD e armazenados em base de dados pelo MINI2440.

Por padrão, o valor médio da tensão de linha ( $V_L$ ) encontrado no barramento principal foi 400  $V_{CA}$ . Utilizando a Equação 24 encontramos o valor de 230  $V_{CA}$  entre fase e neutro. Porém, conforme os parâmetros da Tabela 1, as VTCD tem como limites 220 V +/-22V.

$$V_{CA} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

A Figura 82 apresenta um gráfico de Tensão e Corrente *Versus* Tempo na fase R de um dos transformadores. Neste gráfico observa-se o comportamento da tensão elétrica durante um período de 24 horas e também a curva de consumo para o mesmo período. A curva de consumo, porém, apresenta um afundamento, ocorrido entre 08:30 e 09:00 da manhã.

**Figura 82** – Gráfico de Tensão e Corrente *Versus* Tempo na fase R



Fonte: Do autor.

Como descrito e apresentado pela curva do modelo de consumo (ver seção 4.3.2), a tendência da curva neste horário é manter-se próxima de 800 A, já que a linha de beneficiamento de tabaco estava em pleno funcionamento. Então, pode-se supor que algum evento ocorreu fazendo o sistema reiniciar repentinamente, pois alguns dos disjuntores de proteção do sistema de automação da linha desarmaram por sobre-tensão. Assim, ao analisar os dados coletados neste dia, identificou-se um aumento repentino na tensão do barramento principal, às 08:27:42, conforme destacado na Figura 83.

**Figura 83** – Arquivo contendo o registro de sobre-tensão

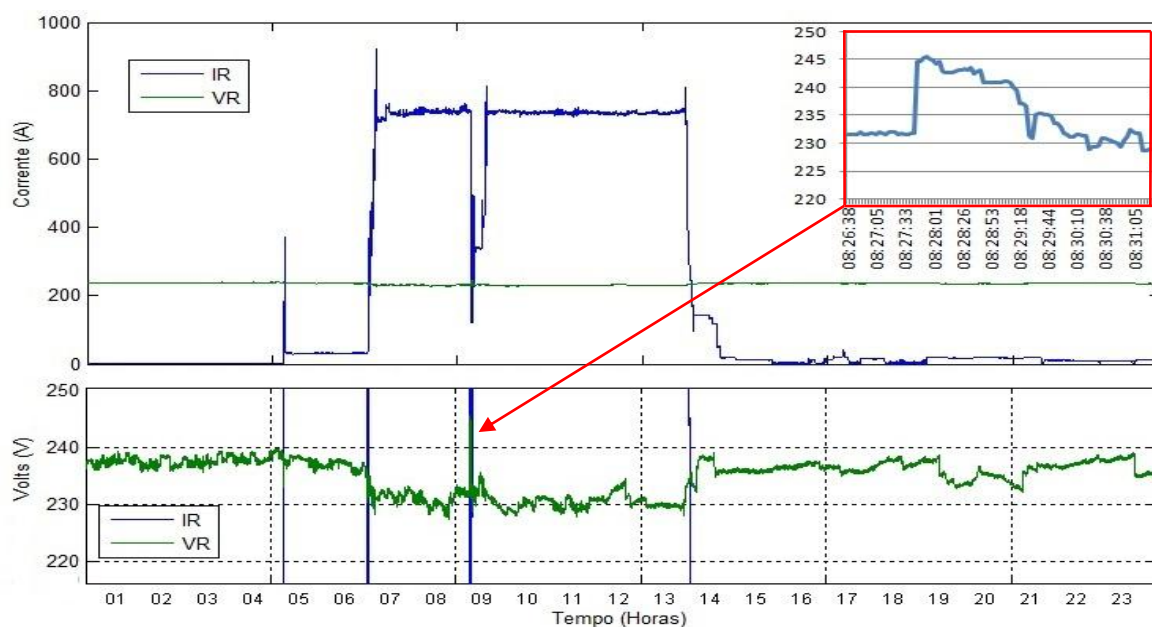
ID	Data	Hora	V1	V2	V3	I1	I2	I3	Q1	Q2	Q3
10382	10/10/2012	08:27:35	231.60	230.63	231.66	736.68	740.36	725.63	3		
10383	10/10/2012	08:27:38	231.82	230.77	231.89	735.36	739.04	724.33	3		
10384	10/10/2012	08:27:41	231.85	230.73	231.91	736.94	740.62	725.89	3		
10385	10/10/2012	08:27:42	244.78	228.69	230.96	196.34	197.32	193.39	3		
10386	10/10/2012	08:27:45	244.74	244.89	245.15	163.71	159.43	168.38	4		
10387	10/10/2012	08:27:48	244.71	244.65	245.23	152.59	134.62	131.94	5		
10388	10/10/2012	08:27:51	245.37	245.43	245.68	133.95	131.92	119.49	5		
10389	10/10/2012	08:27:55	245.55	245.39	245.75	125.10	129.70	119.27	5		
10390	10/10/2012	08:27:58	245.03	245.03	245.29	125.15	125.47	121.12	5		
10391	10/10/2012	08:28:01	244.98	245.00	245.31	121.83	124.57	121.12	5		
10392	10/10/2012	08:28:03	244.28	244.34	244.58	121.31	124.09	120.64	5		
10393	10/10/2012	08:28:06	244.64	244.75	244.93	121.09	123.42	120.97	5		
10394	10/10/2012	08:28:08	242.80	242.80	243.10	122.96	122.91	120.47	5		
10395	10/10/2012	08:28:12	242.74	242.86	242.98	122.96	123.54	121.09	5		
10396	10/10/2012	08:28:14	242.77	242.78	243.05	122.48	122.66	120.22	5		
10397	10/10/2012	08:28:17	242.71	242.77	242.98	122.81	121.85	119.42	5		

Fonte: Do autor.



Por fim na Figura 84 apresenta-se em escala mais adequada ( $200 V_{CA}$  a  $250 V_{CA}$ ) o comportamento da tensão durante o período em que ocorreu a sobre-tensão. É notável o aumento repentino da tensão elétrica até chegar a  $245 V_{CA}$ , tendo uma duração de aproximadamente 2 minutos.

**Figura 84** – Gráfico de sobre-tensão e afundamento de corrente



Fonte: Do autor.

Ainda com base na Figura 84, nota-se o tempo necessário para a reestabilização do processo, ou seja, o tempo necessário para o que comportamento da curva de consumo se ajuste ao seu modelo característica (próxima de 800 A). Neste período, que teve duração de aproximadamente 40 minutos, funcionários foram obrigados a parar suas atividades, sendo que o tabaco não pode ser beneficiado.

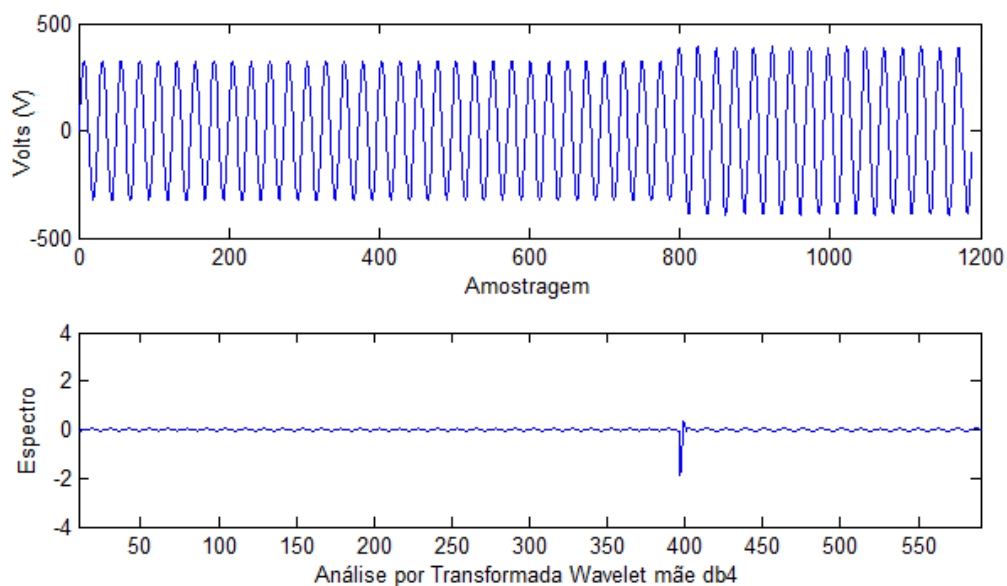
Por fim, vale ressaltar que este evento de QEE observado como uma sobre-tensão é proveniente de alguma operação realizada pela concessionária de energia elétrica. Como esta perturbação não se classifica como evento momentâneo de tensão, pois ultrapassou o limite de 1 minuto, a concessionária deveria ser responsabilizada.

#### 4.3.6 Análise de perturbações na tensão utilizando TWD

A análise de perturbações de QEE dos dados de tensão senoidal coletados pela placa dsPIC30F3012 (para uma única fase) podem ser vistos na Figura 85. Na figura é possível observar a mudança no nível espectral no momento em que a amplitude da senoide aumenta

repentinamente. Neste teste foram aplicadas diferentes *wavelets* mãe, porém a que obteve melhor resultado foi a db4, já que a haar se mostrou mais eficiente na análise da tensão eficaz.

**Figura 85** – Análise de elevação de tensão por TWD



Fonte: Do autor.

#### 4.4 Considerações finais

Este capítulo descreveu detalhadamente a instalação e calibração do sistema de monitoração de QEE e apresentou os resultados obtidos a partir da análise dos parâmetros de tensão e corrente do sistema, principalmente a aplicação das Transformadas *Wavelet*.

Pode se observar, durante a descrição deste capítulo, toda a complexidade envolvida na instalação, calibração e funcionamento do sistema de monitoração, além da análise dos dados (*online* ou *offline*), além do cuidado com a segurança, tanto dos dispositivos quanto do operador. Vale ressaltar que todo o processo de instalação e calibração do sistema foi acompanhado por um responsável técnico da empresa.

Em relação aos resultados obtidos, pode-se comprovar a eficácia do sistema para monitoração e gerenciamento de energia elétrica nos processos industriais, pois possibilitou a detecção e registro de parâmetros elétricos que antes não podiam ser observados, como por exemplo, os picos de tensão e corrente que ocorreram durante o período em que o processo foi monitorado. Por fim, a utilização de sistemas embarcados como o MINI2440 mostrou-se uma opção viável, visto suas características técnicas, sua flexibilidade de projeto, e principalmente pela robustez.

## 5 CONCLUSÃO

Com custos de produção cada vez mais elevados, torna-se indispensável que as empresas monitorem seus gastos com energia elétrica a fim de se tornarem mais competitivas e maximizarem seus lucros. Porém, os sistemas de monitoramento e registro de QEE e EE disponíveis no mercado podem representar investimentos elevados para algumas empresas, e em geral se restringem a coleta de dados em um único ponto.

A partir das tecnologias disponíveis nos tempos atuais é possível desenvolver sistemas capazes de monitorar o consumo e a qualidade da energia em diferentes pontos da empresa, possibilitando assim o uso mais consciente da energia elétrica em seus processos.

Neste contexto, o presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de monitoração e gerenciamento da energia elétrica em processos industriais. Este sistema, instalado nas dependências da CTS *Brazil Tabaccos*, na cidade de Vera Cruz – RS, foi desenvolvido a partir de estudos realizados na área de QEE, com intuito de prever ações de qualidade de serviços bem como uma Eficiência Energética eficaz.

Assim, como principal contribuição deste trabalho pode-se citar a integração de diferentes tecnologias na concepção do sistema de monitoramento proposto, desde circuitos de condicionamento e aquisição de sinais, sistemas embarcados e até mesmo as técnicas de análise. Contudo, as técnicas de detecção de distúrbios representaram as maiores contribuições, principalmente a utilização das Transformadas *Wavelets* Discreta (TWD).

Em relação às tarefas desenvolvidas neste projeto, pode-se citar o desenvolvimento de:

- Circuitos eletrônicos para o condicionamento do sinal dos sensores;
- Circuitos de aquisição de sinal e conversão analógico/digital;
- *Firmware* para os microcontroladores dsPIC30F;
- *Software* para análise e coleta de dados no sistema embarcado MINI2440;
- Integração dos sistemas de aquisição (*hardware* e *software*);
- Algoritmos para análise por Transformadas *Wavelets*;
- Interface para análise *offline* dos sinais coletados.

Ao término de todas as atividades citadas acima, e tendo assim um produto finalizado, foi possível a conclusão dos objetivos propostos neste trabalho, como por exemplo, conhecer

os distúrbios de QEE e seus efeitos, pois informações como o local e o instante em que o mesmo ocorreu estavam armazenadas e puderam ser analisadas pela interface gráfica.

Já a metodologia para a identificação de perturbações na rede elétrica, utilizando DSP e as Transformadas *Wavelet*, se mostrou eficiente para valores de tensão e corrente eficaz, bem como para eventos de longa duração. Também obteve bons resultados para detecção de eventos de curta duração, porém não se mostrou muito adequado à análise de eventos transitórios, devido principalmente às limitações na taxa de amostragem utilizada pela placa de aquisição.

A análise da demanda consumida (demanda total, por área, setor, horário) não pode ser feita para toda a empresa, já que apenas alguns setores (três) foram monitorados. Desta forma se obteve o modelo de consumo parcial, porém capaz de ilustrar o comportamento do consumo elétrico pelo processo. A justificativa para essa limitação no número de pontos a serem monitoradas se refere aos custos de implementação, altos para um projeto de pesquisa, além do fato que seriam necessários mais 6 sistemas de aquisição.

Ainda em relação ao conceito de Eficiência Energética, foi possível estimar a tendência de ocorrência de picos de consumo de energia elétrica (principalmente aqueles que podem ocasionar multa por parte da concessionária) com base nos dados de consumo coletados, contudo isso só é viável caso o sistema seja instalado em toda a empresa.

Por fim, a modelagem de uma interface de análise (*offline*) dos parâmetros elétricos coletados (em Matlab) possibilitou a detecção de distúrbios de QEE, tanto na tensão quanto na corrente elétrica, em que a utilização das *wavelets* mãe haar, db4 e sym2 se mostraram eficientes na detecção de distúrbios abruptos. Além disso, permitiu ao usuário uma visão mais clara da demanda energética da empresa, ou seja, a sua curva de consumo durante um dia.

Desta forma, o presente estudo possibilitou novas perspectivas para o desenvolvimento de trabalhos futuros. Como sugestão pode-se citar:

- A leitura de dados de consumo diretamente pelo SE MINI2440, sem a necessidade da utilização dos dsPIC;
- Fazer a integração do sistema embarcado (MINI2440 ou similar) ao sistema de automação da empresa, ou sistema supervisor;
- Estudar alternativas para aumentar a taxa de amostragem dos dados, possibilitando assim a detecção de eventos transitórios de mais alta frequência;
- Melhorar a interface de acesso aos dados bem como a manipulação das informações pelo usuário.

Durante o período de desenvolvimento deste trabalho, foi apresentado e publicado um artigo (completo) nos anais do XXXII ENEGEP (Encontro Nacional de Engenharia de Produção) realizado em Bento Gonçalves – RS, de 15 a 18 de outubro de 2012. O título do artigo é: “Proposta de um Sistema para Monitoração e Análise de Energia Elétrica em Ambientes Industriais”.

Finalizando, é importante salientar o quanto o estudo de caso realizado neste trabalho contribuiu para a validação da metodologia utilizada, uma vez que trouxe contribuições importantes para esta pesquisa, validando teorias e métodos tidos como referência e, principalmente, destacando os pontos críticos.

Sendo que ao final deste estudo foi possível concluir que o sistema de monitoramento que foi implementado atingiu resultados satisfatórios. Podendo, caso seja industrializado, ser utilizado como ferramenta de auxílio para o monitoramento e gerenciamento da energia elétrica nos processos industriais.

## REFERÊNCIAS

ARRUDA, E. F. **Análise de Distúrbios Relacionados com A Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet**. 2003. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A.; GUO, H. *Introduction to wavelets and wavelet transforms*. New Jersey, Prentice Hall, 1998.

CARRO, L.; WAGNER, F. R. **Sistemas Computacionais Embarcados**. Capítulo 2, 2003. Disponível em: <<ftp://ftp.inf.ufrgs.br/pub/flavio/cmp231/jai2003.pdf>>. Acesso em 16 dezembro de 2012.

DAUBECHIES, I. *The wavelet transform, time-frequency location and signal analysis*. *IEEE Transaction Information Theory*, v. 36, pp. 961–1005, 1990.

DELMONT, O. F. **Utilização da Transformada de Wavelet para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica**. 2003. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Material Didático – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Unicamp, Campinas, 2010. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a1.pdf>>. Acesso em 08 de dezembro de 2011.

DSPIC. *dsPIC30F Family Overview*. dsPIC® High-Performance 16-bit Digital Signal Controller. 2005. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/pci/main.asp>>. Acesso em 06 de dezembro de 2012.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*. 2nd ed., New York: McGraw Hill, 2003. 528 p.

DUQUE, C. A., RIBEIRO, M. V., RAMOS, F. R., et al. *Power Quality Event Detection Based on the Divide and Conquer Principle and Innovation Concept*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 4, pp. 2361 – 2369, Outubro 2005.

ELETRONBRAS. **Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria: estudos de caso: sumário executivo**. Brasília: CNI, 2010. 61 p. (Relatório 25) Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/pci/main.asp>>. Acesso em 06 de setembro de 2011.

EMBEDDED SYSTEMS. *Embedded Systems*. Disponível em: <[http://www.secab.org/siet/7thsem/EmbeddedSystems\\_www.revastudents.info.pdf](http://www.secab.org/siet/7thsem/EmbeddedSystems_www.revastudents.info.pdf)>. Acesso em 21 de dezembro de 2012.

FELBER, L. A. **Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica**. 2010. 137 p. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

FERNANDES, D. E. B. **Uma metodologia de gerenciamento da qualidade da energia elétrica**. 1999. 124 p. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG 1999.

FERNANDES, R. A. de S.; RABELO, R. de A. L.; SILVA, B. C.; OLESKOVICZ, M.; CARNEIRO, A. A. F. M. **Técnicas Alternativas para Processamento de Sinais no Contexto da Qualidade de Energia Elétrica**. In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau - SC. Anais do VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Agosto, 2009.

FERREIRA, D. D. **Análise de Distúrbios Elétricos em Sistemas de Potência**. 2010. 233 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

FERREIRA, J. C. **Utilização da Transformada de Wavelet para Detectar Variações Anormais de Frequência em Sistemas de Geração Distribuída**. 2009. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

FILHO, O. D. **Utilização da transformada wavelet para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica**. 2003. Dissertação de Mestrado. USP São Carlos, 2003

FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors – Physics, Designs and Applications*. 3. ed. New York: Editora LLC, 2004.

GARCIA, V. V.; KAGAN, E. L.; AMASIFEN, J. C. C.; SUEMATSU, A. K.; HAYASHI, R.; CHAVES, L. B. **Sistema de Consultoria de Qualidade de Energia Elétrica**. In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau - SC. Anais do VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Agosto, 2009.

GAOUDA, A. M. *Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.14, n.4, p.1469-1476, Oct, 1999.

GOMES, J., VELHO, L., GOLDENSTEIN, S. **Wavelets: Teoria, Software e Aplicações**. In: 21º Colóquio Brasileiro de Matemática, Rio de Janeiro, IMPA, p.216. 1997.

GU, I. Y. H.; ERNBERG, N.; STYVAKTAKIS, E. *A Statistical-Based Sequential Method for Fast Online Detection of Fault-Induced Voltage Dips*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 2, pp. 497–504, Abril 2004.

HUA, L.; BUAGUN, Z.; HONG, Z., **Recognition and Classification of Power Quality Event in Power System Using Wavelet Transform**. Proceedings of 27th Chinese Control Conference, pp. 43-46, 2008.

JUNIOR, F. P.; KAGAN, N. **Utilização de Medidores Eletrônicos de Faturamento para Detecção e Registro de Eventos que afetam a Qualidade de Energia.** In: Revista Espaço Energia, 2009.

JUNIOR, F. P. **Utilização de medidores eletrônicos de faturamento para detecção e registro de transitórios oscilatórios.** In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau. Anais da VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009.

JUNIOR, O. H. A. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Identificar e Quantificar Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica.** 2009. 188 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. *Wavelet transforms in power systems.* Part 1 General introduction to the *wavelet* transforms. *Power Engineering Journal*, p.81-87, Apr, 2000.

LEBORGNE, R. **Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamentos de Tensão.** 2003. 163 p. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

MALLAT, S. G. *A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation.* *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989.

MARAFÃO, F. P. **Contribuições para a teoria de potências instantâneas e aplicações em qualidade de energia.** 2000. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas . Faculdade de Engenharia Eletrica e de Computação - Unicamp, Campinas, 2000.

MATHWORKS, **MATLAB – The Language Of Technical Computing.** Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 14 nov. 2011

MELO, M. O. B. C. **Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia.** In: Revista Produto & Produção, vol. 9, no 3, pp. 15–25, 2008.

MINI2440. *Mini2440 / S3C2440 ARM9 Board Manual.* Disponível em: <[http://www.friendlyarm.net/dl.php?file=mini2440\\_manual.pdf](http://www.friendlyarm.net/dl.php?file=mini2440_manual.pdf)>. Acesso em 28 outubro de 2011.

MISITI, M., MISITI, Y., OPPENHEIM, G., POGGI, J. *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB®.* User's Guide, Revised for Version 2.2 (Release 13), The MathWorks, Inc., 2002.

MISITI, M., MISITI, Y., OPPENHEIM, G., POGGI, J. *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB®.* User's Guide, Revised for Version 4.10 (Release 2012b), The MathWorks, Inc., 2012.

MORAES, C. C. de.; CASTRUCCI, P. de L. **Engenharia de Automação Industrial.** 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.



NORONHA, J. C. C. **Análise Computacional de "Voltage Sags" em Consumidores com Cargas Sensíveis**. 1999. 224 p. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 1999.

OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; CARNEIRO, A. A. F. M.; ARRUDA, E. F.; FILHO, O. D.; SOUZA, S. A. **Estudo Comparativo de Ferramentas Modernas de Análise Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica**. SBA – Revista Controle & Automação, vol. 17, No. 3, pp. 331-341, 2006.

OLIVEIRA, T. C. de. **Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Software para Estudos de Afundamentos de Tensão**. 2004. 161 p. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.

OLIVEIRA, H. M. de. **Análise de Sinais para Engenheiros: Uma Abordagem via Wavelets**. Ed. Brasport. Rio de Janeiro, 2007.

OPPENHEIM, A.V.; SCHAEFER, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, NJ, 1989.

PANIGRAHI, B. K., PANDI, V. R. *Optimal feature selection for classification of power quality disturbances using wavelet packet-based fuzzy k-nearest neighbour algorithm*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 3, n. 3, pp. 296–306, Outubro 2009.

PAZOS, R. P. **Transformada Wavelet Haar**. UNISC. 2006. Disponível em: <[http://rpanta.com/downloads/material/271006\\_RPP\\_DSP04.pdf](http://rpanta.com/downloads/material/271006_RPP_DSP04.pdf)>. Acesso em 21 de dezembro de 2012.

PME, **Pequeno e Média Empresa**. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/topicos/291922/empresa-de-pequeno-porte#topicos-dicionario>>. Acesso em: 04 dez. 2012

POISSON, O.; RIOUAL, P.; MEUNIER, M. *Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 3, pp. 1039–1044, Julho 2000.

PRODIST, **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. 2010. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1877](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1877)>. Acesso em: 14 nov. 2011

RAMOS, F. R., RIBEIRO, M. V., ROMANO, J. M. T., et al. *On signal processing approach for event detection and compression applied to power quality evaluation*. in *Proc. IEEE 10th International Conference on Harmonic and Quality of Power*, pp. 133–138, 2002.

REIS, A. J. R.; SILVA, A. P. A. da. **Aplicação da Transformada Wavelet Discreta na Previsão de Carga a Curto Prazo via Redes Neurais**. Revista Controle & Automação, n. 1, Vol. 15, p. 101-108. Sociedade Brasileira de Automática - SBA, Natal/RN, 2004.

RESENDE, J.W.; PENNA, C. **Identificação de Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica Através da Transformada Wavelet**. In: Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 6. Porto Alegre. *Anais*. p.51-56. 2001.

SANTOS, C. K. S. **Caracterização de Distúrbios em Redes de Energia Elétrica Através da Transformada Wavelet de Segunda Geração.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2004.

SANTOSO, S.; GRADY, W. M.; POWERS, E. J.; et al. **Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 1, pp. 247–254, 2000.

SE. **Sistemas Embarcados.** Disponível em: <<http://xxande.blogspot.com.br/2012/09/sistemas-embarcados.html>>. Acesso em: 21 de dezembro. 2012

SILVA, C. R. C.; DESCHAMPS, E.; PÉRES, A. **Eficiência Energética na Indústria.** In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau - SC. Anais do VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Agosto, 2009.

SOLA, A. V. H.; KOVALESKI, J. L. **Eficiência energética nas indústrias: cenários & oportunidades.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Anais / XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, X International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Florianópolis, SC: UFSC. ISBN 85-88478-11-0, 2004.

SOLÓRZANO, K. M. L. **Uma Contribuição ao Estudo de Sobretensões em Sistemas Elétricos de Pequeno Porte Contendo Cargas Não - Lineares.** 2004. 103 p. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações.** 3. ed. São Paulo: Editora Érica LTDA, 2007.

UFSCAR, **Uma Cidade Chamada UFSCar.** Disponível em: <<http://www.ufscar.br/~perene/consumo.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2011

USIDA, W. F.; RODRIGUES, L. C. P.; OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V. **Análise Qualitativa no Monitoramento Automático dos Eventos de Tensão de Curta Duração.** In: Revista Controle & Automação, vol. 20, No 3, pp. 329–334, ago./set., 2008.

WOLF, W. **Computers as Components.** McGraw-Hill, 2001.

UYAR, M.; YILDIRIM, S.; GENCONGLU, M. T. **An Effective Wavelet-Based Feature Extraction Method for Classification of Power Quality Disturbance Signals.** *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1747-1755, 2008.

YANG, H.-T., LIAO, C.-C. **A de-noising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 3, pp. 353–360, Julho 2001.

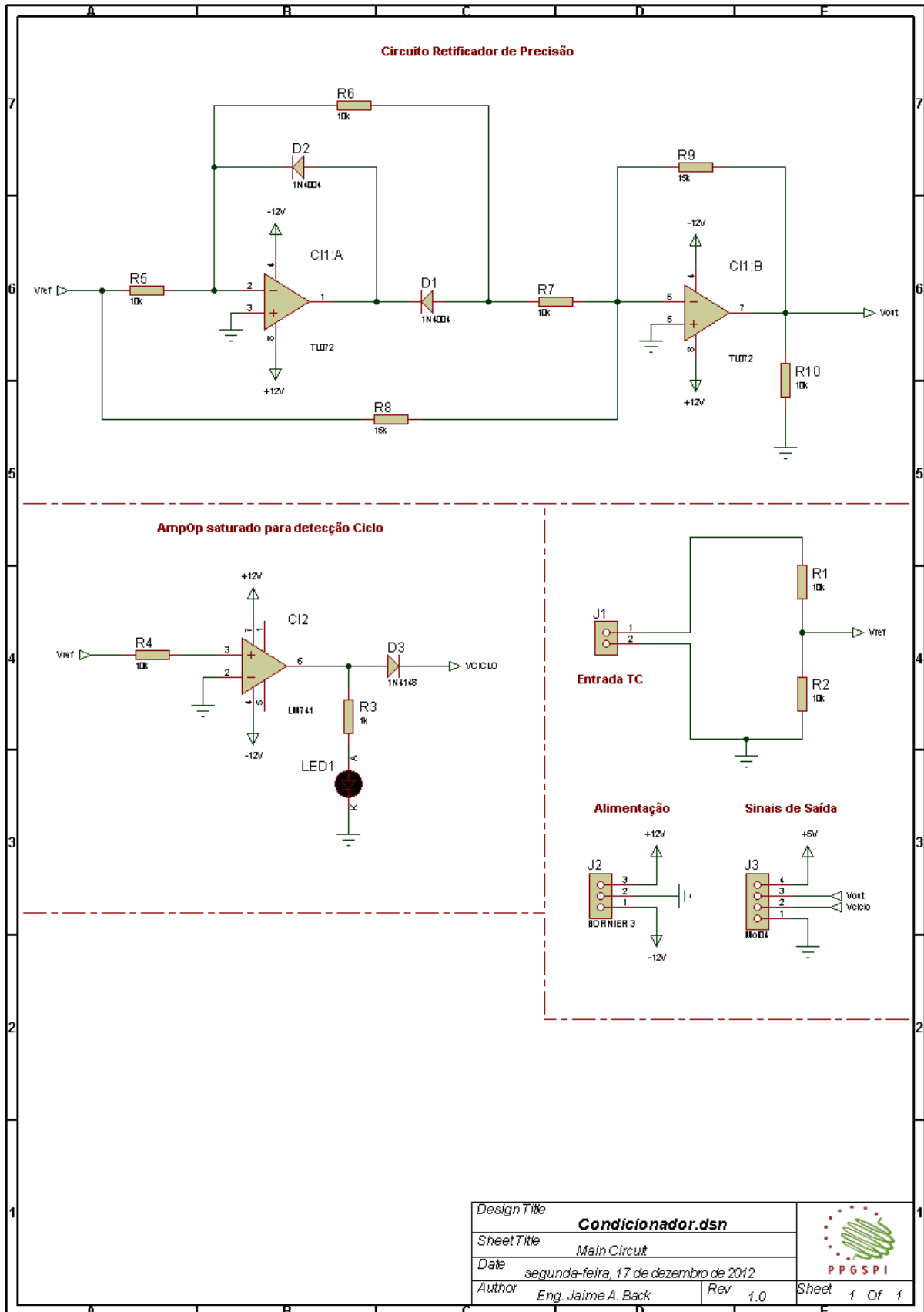
## APÊNDICE:

Diagramas esquemáticos utilizados no projeto.

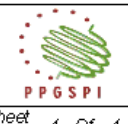
Código em Linguagem C para teste do algoritmo de Análise TWD Haar

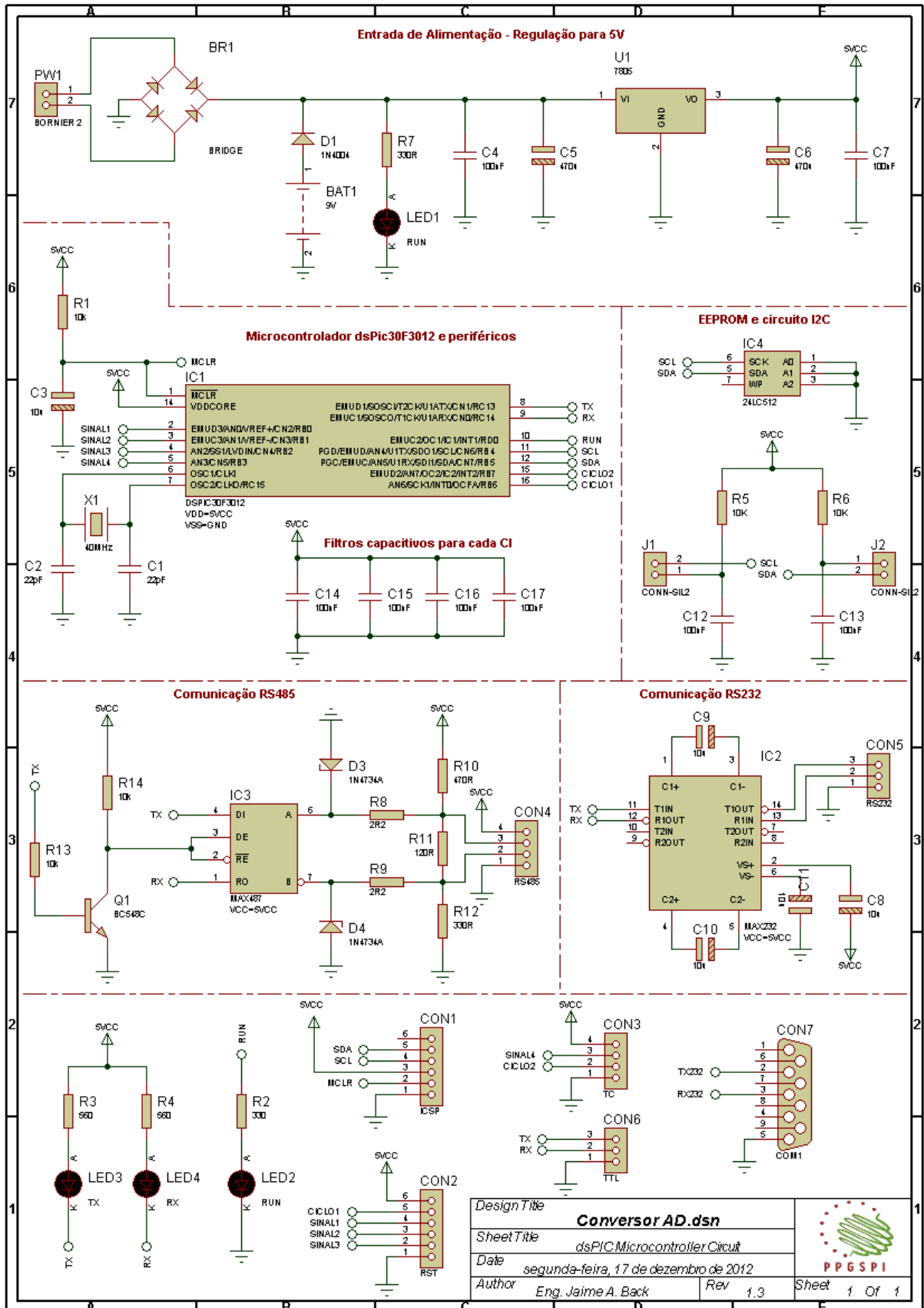
Artigo apresentado no XXXII ENEGEP

APÊNDICE A: DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS UTILIZADOS NO PROJETO

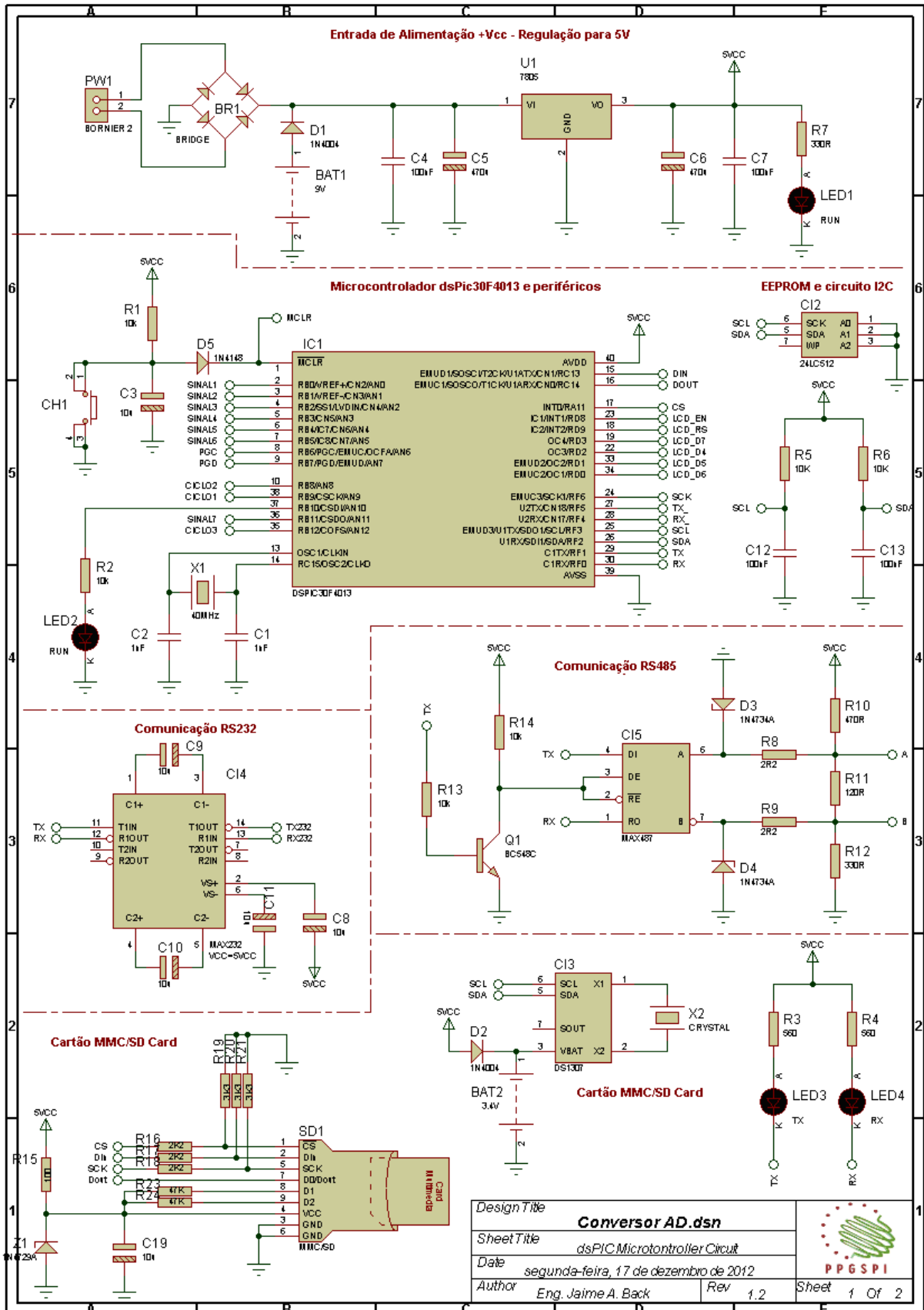


Design Title	<b>Condicionador.dsn</b>	
Sheet Title	Main Circuit	
Date	segunda-feira, 17 de dezembro de 2012	
Author	Eng. Jaime A. Back	Rev 1.0





Design Title	<b>Conversor AD.dsn</b>		
Sheet Title	dsPIC Microcontroller Circuit		
Date	segunda-feira, 17 de dezembro de 2012		
Author	Eng. Jaime A. Back	Rev 1.3	
Sheet	1 Of 1		



Design Title	<b>Conversor AD.dsn</b>		 PPGSPi
Sheet Title	dsPIC Microcontroller Circuit		
Date	segunda-feira, 17 de dezembro de 2012		
Author	Eng. Jaime A. Back	Rev 1.2	
			Sheet 1 Of 2

## APÊNDICE B: CÓGIDO EM LINGUAGEM C PARA ANÁLISE TWD HAAR

```

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define LEVEL 1
#define SIZE 8

void main()
{
    char c;
    char valor[6];
    float ival;
    long int tamanho=0;

    int i=0, n=SIZE, w=SIZE;
    float vec[] = {4,2,5,5,5,5,5,5};
    float vecp[SIZE];
    float d[SIZE];

    printf("\n  Mestrado em Sistemas e Processos Industriais PPGSPI - UNISC\n");
    printf("-----\n");
    printf("\n Multilevel 1-D Wavelet Decomposition\n");
    printf(" Wavelet Family:   %s\n", "Haar");
    printf(" Level decomposition: %d\n", LEVEL);

    // inicializo o vetor vecp
    for(i=0;i<n;i++)
        vecp[i] = 0;
    printf("\n");

    printf(" X[%d] = { ", SIZE);
    for(i=0;i<n;i++)
        printf("%.02f, ", vec[i]);
    printf("}\n");

    // algoritmo TW Haar - aproximações
    int j=0;
    while(j<LEVEL)
    {
        j++;
        w/=2;

        for(i=0;i<w;i++)
        {
            vecp[i] = (vec[2*i] + vec[2*i+1])/sqrt(2.0);
            vecp[i+w] = (vec[2*i] - vec[2*i+1])/sqrt(2.0);
        }
    }
}

```

```

    for(i=0;i<(w*2);i++)
        // coeficientes wavelet cAn + cD1 + ... +cDn
        vec[i] = vecp[i];
}

printf(" c[%d] = { ", SIZE);

int x;
for(x=0;x<n;x++)
    printf("%.3f, ", vec[x]);
printf("\n");

int lsize, rmax, nmax, k, first, last, l[6];

lsize = LEVEL + 2;
l[lsize-1] = SIZE;

int a;
for(a=2;a<lsize;a++)
{
    l[lsize-a] = l[lsize-a+1]/2;
    if (l[lsize-a+1]%2)
        l[lsize-a] = l[lsize-a] + 1;
}
l[0] = l[1];

rmax = lsize;
nmax = rmax-2;
k = rmax-LEVEL;
first = l[k-1]+1;
last = first + l[k-1]-1;

// localização do evento (intensidade de cDn)
int y=0;
for(x=first-1; x<last; x++)
{
    d[y] = vec[x];
    y++;
}

printf(" d[%d] = { ", first-1);
for(x=first-1; x<last; x++)
    printf("%.3f, ", vec[x]);
printf("\n");
}

```



**APÊNDICE C: ARTIGO APRESENTADO NO XXXII ENEGEP**

XXXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
Desenvolvimento Sustentável e Responsabilidade Social: As Contribuições da Engenharia de Produção  
Bento Gonçalves, RS, Brasil, 15 a 18 de outubro de 2012.

## **PROPOSTA DE UM SISTEMA PARA MONITORAÇÃO E ANÁLISE DE ENERGIA ELÉTRICA EM AMBIENTES INDUSTRIAIS**

**Jaime Andre Back (UNISC)**

jaime.back@gmail.com

**Leonel Pablo Carvalho Tedesco (UNISC)**

leoneltedesco@unisc.br



*Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado de baixo custo voltado ao gerenciamento de energia elétrica em ambientes industriais, possibilitando a monitoração e análise da Qualidade da Energia, bem como a avaliação das demandas energéticas consumidas. Neste trabalho são abordados temas como análise da energia, o estudo da QEE, e as técnicas de conversão e classificação de distúrbios mais utilizados. Para a análise das demandas (consumo elétrico) são apresentadas ações e metodologia para melhorar a Eficiência Energética nestes processos. O sistema proposto é composto por placas de condicionamento de sinais, placa de conversão AD e sistema embarcado MINI2440 servindo de interface para apresentação dos dados coletados. No final do trabalho apresentam-se os resultados adquiridos a partir dos protótipos desenvolvidos, além da migração dos programas desenvolvidos no MATLAB® para a plataforma embarcada.*

*Palavras-chaves: Qualidade de Energia Elétrica, Eficiência Energética, Sistemas Embarcados*



## 1. Introdução

O constante crescimento econômico pelo qual passa o país tem influenciado diretamente no aquecimento do setor industrial. Isto se reflete na modernização de parques e processos industriais, os quais trazem consigo uma demanda considerável de energia elétrica. A gestão de energia elétrica é um problema que atinge a sociedade em geral e diversos segmentos da atividade humana. Tal fato influi diretamente em despesas para a sua manutenção, como também no impacto ambiental de uma região.

A *Qualidade de Energia Elétrica* (QEE) assim como a *Eficiência Energética* (EE) são dois importantes parâmetros a serem considerados quando se trata de gestão energética, se tornando uma preocupação crescente e comum às empresas de energia elétrica (concessionárias estatais, cooperativas de eletrificação) e aos consumidores de modo geral, principalmente o setor industrial (LEBORGNE, 2003; SOLÓRZANO, 2004). Desta forma, nos últimos anos, este tema tem sido alvo de inúmeras pesquisas, realizadas tanto por universidades quanto pelas próprias concessionárias de energia elétrica (FERNANDES *et al.*, 2009).

Neste cenário, pode-se dizer que a QEE está relacionada a um conjunto de alterações que podem ocorrer no fornecimento de energia elétrica, em níveis de amplitude e forma da tensão e/ou corrente elétrica. Já a EE representa as atividades socioeconômicas que objetivam um melhor consumo de energia. Tais parâmetros influenciam diretamente na eficiência dos processos industriais, impactando na preservação do meio ambiente e na economia das empresas.

Também é importante salientar a constante evolução tecnológica dos equipamentos eletroeletrônicos, cada vez mais presentes nos diversos segmentos de atividade, sejam eles industriais, comerciais ou residenciais. Esta evolução resultou em equipamentos mais sensíveis às perturbações elétricas (GARCIA *et al.*, 2009), sendo estas perturbações geradas principalmente pela aplicação da eletrônica de potência em diversos setores da indústria, como por exemplo, na automação de processos e na conversão de energia (corrente alternada para corrente contínua).

Segundo Leborgne (2003) e Oliveira (2004), as indústrias modernizaram seus parques e processos industriais, havendo a aplicação disseminada de *Acionamentos de Velocidade Variável* (AVVs), de fontes chaveadas e de sistemas controlados eletronicamente. Isto revela um aspecto importante da QEE e que diz respeito à sensibilidade destas cargas frente às variações momentâneas de tensão, geradas no sistema elétrico e resultantes de diversos fatores (curto-circuitos, acionamentos, mau dimensionamento), mesmo que localizadas em pontos remotos do sistema elétrico.

Neste contexto, o seguinte trabalho objetiva o desenvolvimento de um sistema embarcado de baixo custo voltado ao gerenciamento da energia elétrica em sistemas industriais. A análise da energia aborda o estudo da QEE e as técnicas mais utilizadas. Já a análise das demandas (consumo elétrico) corresponde às ações e metodologias para melhorar a EE em processos indústrias.

Este artigo está organizado da seguinte forma: o item 2 aborda os distúrbios elétricos e também trabalhos relacionados ao assunto. A descrição do problema, justificativa e objetivo deste trabalho estão no item 3. Já o item 4 apresenta os procedimentos metodológicos utilizados para resolução do problema. O item 5 traz o protótipo do sistema desenvolvido. O



item 6 apresenta os resultados preliminares a fim de validar o sistema desenvolvido. As considerações finais são discutidas no item 7.

## 2. Distúrbios elétricos e Trabalhos relacionados

Segundo Solórzano (2004), a QEE se refere a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos conduzidos que caracterizam a tensão e a corrente num dado tempo e local do sistema elétrico.

A QEE de um sistema elétrico é adversamente afetada por uma ampla variedade de distúrbios (FELBER, 2010), tais como: (i) variações instantâneas de tensão (surto, transitórios, oscilatórios e cortes); (ii) variações momentâneas de tensão (interrupções, subtensões, sobretensões); (iii) variações momentâneas de frequência; distúrbios ocasionados pela operação de cargas não lineares (distorção harmônica, flutuação e desequilíbrio de tensão).

A Figura 1 apresenta a maioria dos eventos (perturbações) que podem ocorrer em um sistema elétrico.

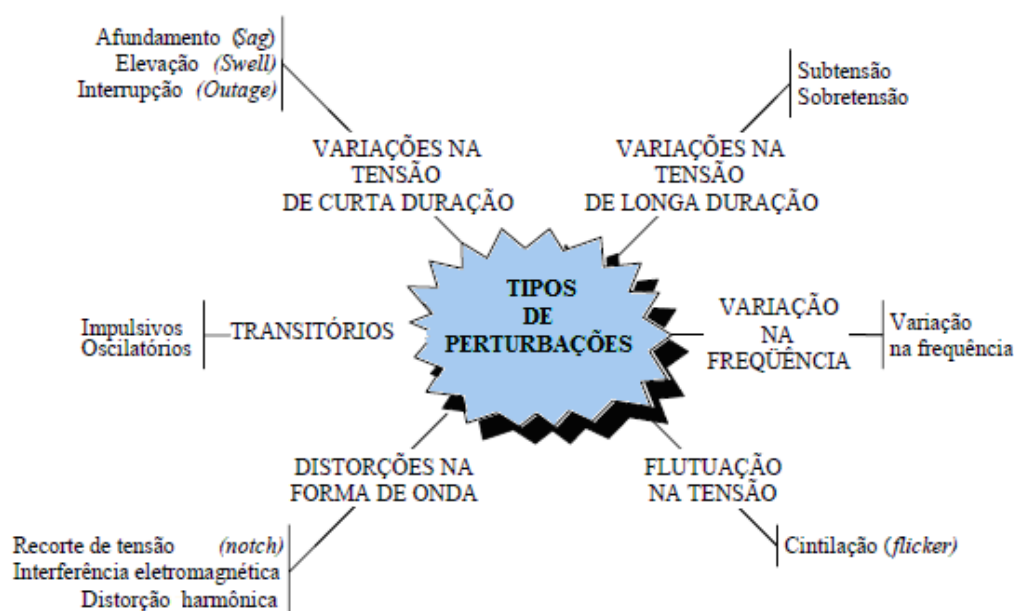


Figura 1 – Resumo dos distúrbios relacionados à Energia Elétrica (FELBER, 2010)

De acordo com Felber (2010), as perturbações na forma de onda de tensão são devido ao uso crescente de equipamentos eletroeletrônicos em consumidores industriais, que contribuem para o aumento da produção, porém traz associados problemas relacionados à qualidade da energia elétrica, tanto para as empresas distribuidoras de energia elétrica, quanto para os próprios consumidores.

Dentre as pesquisas voltadas à detecção e classificação de distúrbios relacionados à QEE muitas são baseadas em aplicações de certas ferramentas matemáticas, como *Transformadas Wavelet* (TW) e *Transformada de Fourier* (TF) (HUA *et al.*, 2008; UYAR, 2003 *et al.*).



Em (OLESKOVICZ *et al.*; 2006), realiza-se um estudo comparativo entre a TF com diversos tipos de janelas e a TW com filtro de *Daubechies*. Posteriormente os sinais processados pelas transformadas foram submetidos a uma *Rede Neural Artificial* (RNA) do tipo *MLP* (*Multilayer Perceptron*) para que esta viesse a classificar os distúrbios.

No artigo (FERNANDES *et al.*, 2009) é descrito o desenvolvimento de uma técnica para o pré-processamento de sinais, destinada à classificação dos distúrbios ocorridos em um determinado sistema elétrico de potência. Foram consideradas perturbações como afundamentos, elevações, interrupções e oscilações transitórias.

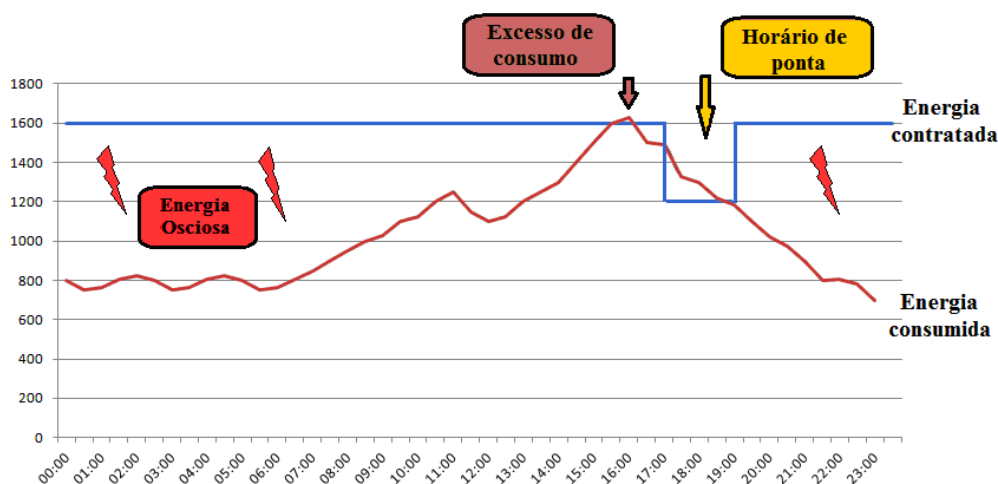
O trabalho de Junior, O.H.A. (2009) apresenta uma metodologia para análise e monitoração da qualidade da energia elétrica, através da identificação e quantificação dos distúrbios eletromagnéticos. A metodologia utiliza técnicas de DSP (*Digital Signal Processing*), possibilitando a construção de filtros digitais, a detecção de eventos e a estimativa da frequência dos sinais elétricos analisados.

Desta forma, o presente trabalho se baseia nos conceitos abordados nos trabalhos citados acima, já que estes serviram de base para as metodologias de aquisição e conversão de sinais, para o processamento dos eventos e as metodologias de gerenciamento de energia disponíveis no sistema proposto. Contudo, deseja-se agregar novas funcionalidades, utilizando tecnologias, métodos e ferramentas para sistemas embarcados de modo a melhorar o desempenho e baixar o custo de implementação do sistema.

### 3. Descrição do problema

Para Melo (2008), os fatores que influenciam na QEE podem ser originados tanto nas concessionárias como nos sistemas consumidores, e podem ser inseridos na rede elétrica através de fenômenos naturais, pelas operações técnicas da concessionária (chaveamentos e operações com banco de capacitores, manutenções) ou mesmo pelos próprios consumidores (excesso de cargas, acionamento de disjuntores, sistemas motrizes, baixo fator de potência entre outros).

Conforme SILVA *et al.* (2009), Sola e Kovaleski (2004), as indústrias são peças importantes no cenário energético, devido ao grande consumo de energia elétrica necessário em seus processos de produção. Assim, torna-se importante que as indústrias tenham um gerenciamento eficaz das demandas energéticas consumidas diariamente, evitando tanto o desperdício de energia quanto a diminuição da qualidade da mesma, tendo em vista que a energia elétrica pode chegar ao consumidor com um excelente padrão de qualidade, porém o mau gerenciamento, ou até mesmo problemas decorrentes da própria infraestrutura da empresa, impliquem em uma diminuição da sua qualidade.



**Figura 2 – Demanda contratada Versus demanda consumida**  
Adaptado de (UFSCAR, 2011)

A Figura 2 apresenta um exemplo hipotético do consumo de energia em uma empresa. Neste exemplo é possível observar que a demanda energia consumida não segue as variações da demanda contratada. Neste caso, quando o consumo está abaixo da demanda contratada, haverá perdas financeiras, pois se está pagando por uma energia que não está sendo consumida (energia ociosa). Porém, quando existe uma demanda excessiva em um determinado horário, este consumo pode ultrapassar os limites contratados, ocasionando assim cobrança de multas por excesso de consumo, principalmente no horário de ponta.

Portanto, justifica-se a importância de estudar e desenvolver um sistema (e uma metodologia) de gerenciamento de energia elétrica que atenda aos requisitos propostos, que sirva de apoio à tomada de decisão e também como uma solução eficiente em termos de EE para o setor industrial.

Para isso, é necessário avaliar as principais metodologias aplicadas atualmente, mapear detalhadamente o consumo de energia elétrica na organização a ser pesquisada, identificando os setores de maior consumo, detectando e classificando as perturbações, e por fim, disponibilizando os resultados mais rapidamente ao técnico ou gestor.

#### 4. Etapas da execução do projeto

Como este trabalho representa uma alternativa de baixo custo para o gerenciamento e análise de energia elétrica (controlar o consumo energético bem como monitorar a qualidade da energia), que atenda aos paradigmas da EE e da QEE no Brasil, é proposto um sistema que possua as seguintes funcionalidades:

- Reconheça os distúrbios de QEE no processo fabril (sistema de potência) e seus efeitos, identificando o local e o instante de tempo que o mesmo ocorreu;
- Uma metodologia para quantificar e classificar os distúrbios de QEE baseado em técnicas de DSP para a identificação de perturbações na rede elétrica;
- Análise da demanda consumida, com armazenamento em base de dados;
- Estime a tendência de ocorrência de picos de consumo de energia elétrica;
- Possua uma interface gráfica para facilitar sua utilização.

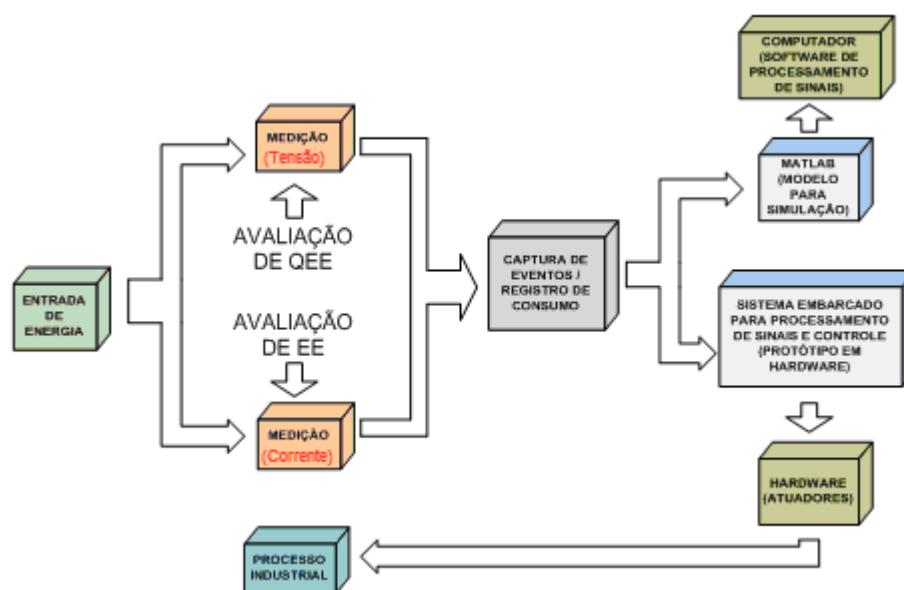


Figura 3 – Diagrama de blocos do sistema.

A Figura 3 apresenta o fluxograma do sistema desenvolvido, em que a *entrada de energia* representa a entrada de tensão geral e alimenta um ou mais processos industriais. O bloco *medição* representa o processo de aquisição de dados e será responsável pela conversão *Analogico/Digital* (AD). A *captura de eventos* é o bloco que recebe os dados já digitalizados do bloco de medição de tensão e efetua a classificação dos eventos (perturbações), podendo descrever assim o estado da QEE no processo industrial. Paralelamente são executados os registros de consumo, provenientes do bloco de medição de corrente. O *modelo* de consumo de energia do processo servirá como base para as simulações, tanto para quantificar as perturbações quanto determinar a melhor eficiência energética do processo, sendo este implementado em um *sistema embarcado*. Por fim, é desenvolvido um *sistema de gerência*, que disponibiliza através de uma interface gráfica os dados capturados no processo.

De forma mais específica, o sistema se divide em duas grandes áreas, sendo uma a *aquisição e análise* de dados e a outra o *gerenciamento e controle* dos dados coletados. As seções a seguir descrevem mais detalhadamente cada uma destas áreas.

#### 4.1. Aquisição e análise

A primeira etapa está focada na entrada do sinal, onde este deverá ser digitalizado.

Segundo o teorema da amostragem, ou *Teorema de Nyquist* (OPPENHEIM & SCHAEFER, 1989), a frequência de amostragem deve ser maior que o dobro da frequência máxima do sinal a ser amostrado.

$$f_s = 2f_M \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

$f_s$  - Frequência de amostragem em Hz

$f_M$  - Frequência máxima do sinal analógico em Hz



Uma amostragem correta deve cumprir o teorema de *Nyquist*, só respeitando esta lei se consegue fazer a amostragem do sinal sem perda de informação do mesmo. Caso não se cumpra este teorema, todas as frequências do sinal analógico que estiverem acima da frequência máxima permitida serão mal interpretadas, sendo consideradas de frequência inferior, a este efeito chama-se de *aliasing* ou subamostragem.

A conversão AD tem a função de transformar o valor analógico (amplitude) em um valor numérico correspondente (valor discreto), de modo a formar um sinal digital. Para esta etapa do projeto foi utilizado o microcontrolador dsPIC30F3012, que possui 10 canais de conversão de 12 bits cada (MICROCHIP, 2012), numa taxa de aquisição de até 12kHz.

A Figura 4 apresenta o fluxograma de aquisição de sinal. Cada um dos condicionadores de sinal possui um sensor específico para a grandeza a ser medida. No caso dos sistemas industriais, é necessário a utilização de 3 sensores de tensão do tipo *Transformador de Potencial* (TP) e 3 sensores de corrente do tipo *Transformador de Corrente* (TC). A saída de cada um dos condicionadores é conectada a um dos canais de conversão AD do microcontrolador. Após estes sinais serem discretizados, eles são enviados ao sistema embarcado via comunicação serial (RS232, RS485 ou I2C).

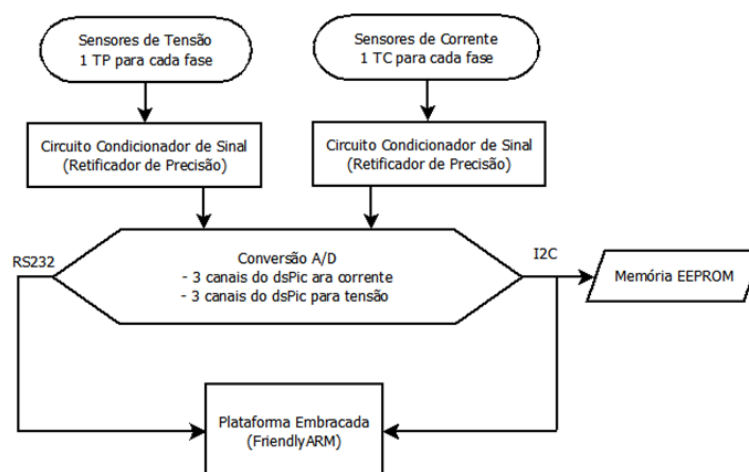


Figura 4 – Fluxograma de aquisição de dados

## 4.2. Classificação dos distúrbios

Após a etapa de aquisição e análise, os dados enviados pelo microcontrolador são processados pelo sistema embarcado para classificação dos parâmetros de QEE, principalmente, aos seguintes distúrbios (JUNIOR, F.P., 2009):

- Transitórios*: fenômenos eletromagnéticos oriundos de variações súbitas do valor instantâneo da tensão do sistema de energia elétrica. Normalmente são produzidos pelo chaveamento de bancos de capacitores ou energização de transformadores;
- Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)*: geralmente estas variações são causadas por curtos circuitos no sistema elétrico e chaveamento de grandes cargas. Eventos desta natureza geram instabilidade no sistema elétrico, causando transtornos ao processo de produção ao distorcer a forma de onda da tensão;



- c) *Distorções na forma de onda*: normalmente causadas por cargas não lineares conectadas à rede elétrica. Estas distorções são normalmente caracterizadas de acordo com o seu conteúdo espectral do desvio.

Existem diversos métodos utilizados na identificação de distúrbios elétricos. Tais métodos são executados através de funções/algoritmos que permitem extrair as características do distúrbio (GARCIA *et al.*, 2009).

O método baseado no cálculo do Valor RMS é uma das técnicas mais utilizadas para a detecção de eventos que afetam a qualidade de energia (JUNIOR, F.P., 2009). Afundamentos e elevações são definidos quando da ultrapassagem de limites considerados adequados. Deve ser utilizada uma *janela de amostragem*, de duração múltipla de meio ciclo da frequência fundamental.

O método baseado na Transformada Discreta de Fourier também analisa uma janela de sinais, os quais devem ser enquadrados em uma soma de funções trigonométricas (senoidal e cossenoidal) ou de exponenciais complexas (JUNIOR, F.P.; GARCIA *et al.*, 2009).

O método baseado na Transformada de Wavelet é utilizado para identificação de eventos isolados onde é possível separar componentes de frequência dos sinais utilizando filtros de decomposição *wavelet*. (FILHO, 2003; HUA *et al.*, 2008; GARCIA *et al.*, 2009). Através de um filtro de decomposição passa-alta, obtém-se os coeficientes de detalhe no domínio *wavelet*, e as sequências de detalhe no domínio do tempo.

### 4.3. Sistema embarcado

Os sistemas embarcados são definidos como computadores que possuem funções específicas, estando presentes em diversos ramos de atividade (CARRO, 2003). Estes sistemas podem ser vistos em áreas como telecomunicações, indústria automotiva, eletrodomésticos, eletroeletrônicos, automação industrial, agricultura, entre outras, onde seja necessário um sistema computacional para executar uma gama de aplicações específicas em um dado contexto.

O aumento da capacidade de integração de componentes em circuitos integrados observada nos últimos anos potencializou a criação de sistemas embarcados com melhor desempenho e tamanho reduzido. Tal fato possibilita a execução de instruções complexas, envolvendo cálculos com maior precisão e processamento de sinais, o que possibilita sua aplicação em análise e monitoração da tensão de fornecimento e do consumo de energia em processos industriais, a fim de disponibilizar dados de QEE e EE.

Neste projeto a plataforma de desenvolvimento utilizada foi o Mini2440, fabricada pela FriendlyARM<sup>®</sup>. Possui este nome porque utiliza um processador Samsung S3C2440, baseado no ARM9. Esta plataforma vem com 1 GB de memória RAM, interface de rede integrada, interface de comunicação serial (USB, RS232 e I2C), pinos de entrada e saída analógicos e digitais e possibilita a utilização de sistema operacional Windows, Linux e Androide (MINI2440, 2012).

A utilização do Mini2440 neste projeto justifica-se principalmente pelo baixo custo deste produto. Outros fatores são a facilidade de programação e utilização de seus periféricos, superioridade em relação aos microcontroladores mais comuns, dispensando o desenvolvimento de circuitos eletrônicos mais complexos ou até mesmo a utilização de um computador dedicado, o que acrescentaria custo demasiados ao projeto.





## 5. Protótipo desenvolvido

Para a validação do trabalho foram desenvolvidas 3 placas para condicionamento dos sinais provenientes de sensores de tensão e outras 3 para os sensores de corrente, e uma placa contendo o dsPic30F3012 para digitalizar os sinais e enviá-los ao Mini2440.

A aquisição do sinal é realizada com a utilização de TPs e TCs, correspondendo à etapa de entrada, e que são conectados à rede elétrica. Nesta etapa é necessário o condicionamento do sinal, e a retificação da tensão alternada é feita por um circuito retificador de precisão. Este circuito pode ser observado na Figura 5. As formas de onda de entrada e saída da placa de condicionamento são mostradas na Figura 6.

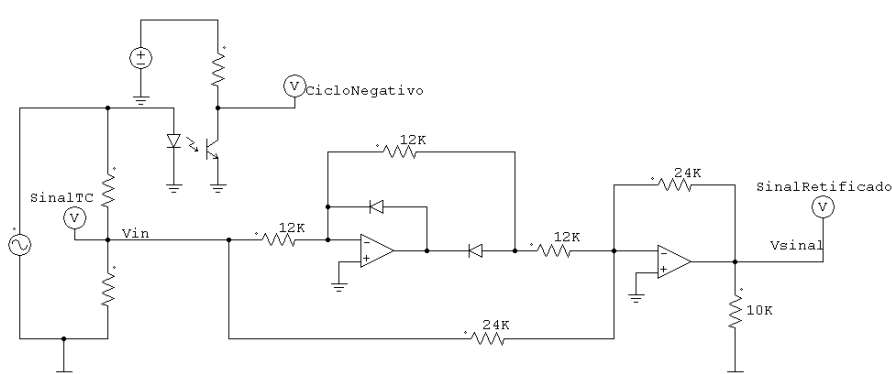


Figura 5 – Circuito condicionador (Retificador de Precisão)

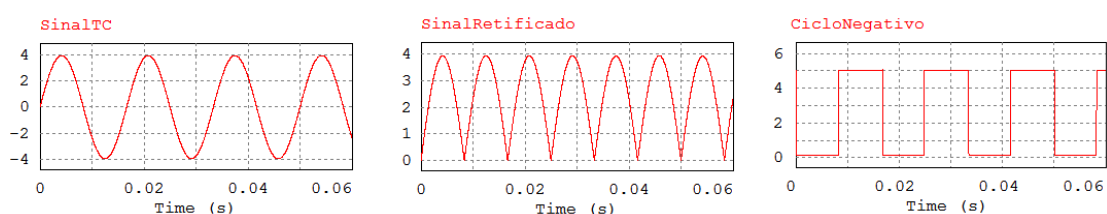


Figura 6 – Sinal de entrada (SinalTC), sinal de saída do condicionador (SinalRetificado) e sinal para informar o semiciclo negativo de cada ciclo de onda completa (CicloNegativo)

As placas condicionadoras de sinal são conectadas à placa responsável pela conversão AD, que possui 6 entradas analógicas para a discretização destes sinais. Esta placa utiliza um circuito microcontrolado para as funcionalidades de conversão AD, para comunicação serial e armazenamento em memória. A Figura 7 apresenta o circuito de aquisição dos sinais provenientes das placas de condicionamento. São utilizadas 6 entradas analógicas do dsPic, (AN0, AN1 e AN2) para os sensores de corrente e (AN3, AN4 e AN5) para os sensores de potencial. A determinação do semiciclo negativo é feito em apenas uma das fases.

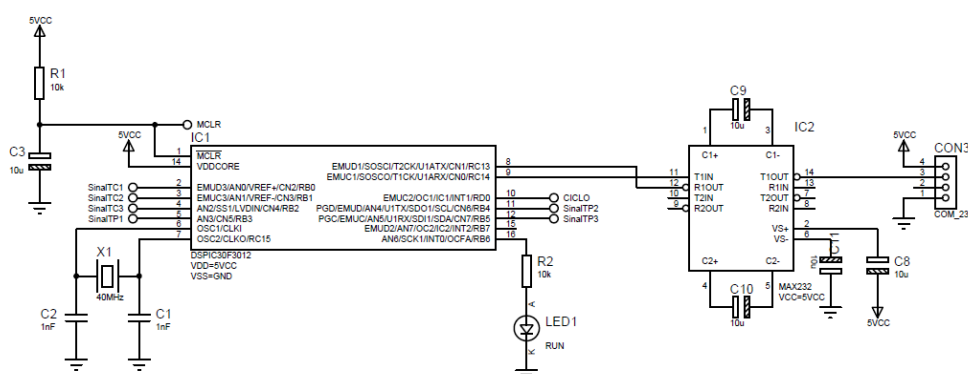


Figura 7 – Circuito de conversão AD, utilizando dsPic

Ao término da conversão, as informações (como consumo e amplitude) são armazenadas em memória. Quando estas informações são requisitadas pelo Mini2440, estas são enviadas via comunicação serial (pacotes de 600 amostras representando cada fase). Após receber estes dados, o sistema embarcado os processa permitindo assim serem visualizados em tempo real pelo aplicativo que é executado em um dos terminais do sistema operacional do sistema embarcado.

## 6. Resultados de validação

Para a validação do sistema desenvolvido, o mesmo foi conectado a um quadro de distribuição de energia que alimenta uma linha de processo industrial. Neste teste foi analisado o consumo de corrente elétrica e também os níveis de tensão em cada fase.

As informações (dados de consumo) geradas pelo microcontrolador são processadas e podem ser visualizadas em tempo real a partir de um aplicativo que é executado em um dos terminais do sistema operacional, que por sua vez executa na plataforma embarcada. Estes dados estão disponibilizados na Tabela 1.

	Fase R	Fase S	Fase T
Tensão	221,5 V	222,1 V	220,8 V
Corrente	78,0 A	73,5 A	82,4 A
Fator de Potência	0,94	0,94	0,94

Fonte: autor

Tabela 1 – Informações apresentadas pelo sistema

A Figura 8 apresenta as formas de onda do sistema trifásico, onde os dados digitalizados foram recebidos pelo Mini2440 e gravados em arquivo. Após, foi utilizado o *software* MATLAB<sup>®</sup> para efetuar a reconstrução destes sinais.

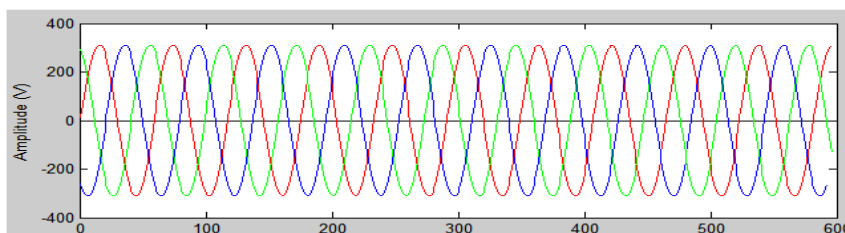


Figura 8 – Gráfico de tensão trifásica

A tensão de pico ( $V_p$ ) é calculada multiplicando-se o valor da amostra pela escala de transformação dos TCs (ou TP) e pela escala de conversão do microcontrolador (12 bits), como segue:

$$V_p = A * D * T \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

$A$  - Valor da amostra

$D$  - Escala de conversão

$T$  - Escala de transformação dos TCs

Já a tensão eficaz ( $V_{RMS}$ ) é calculada pela equação 3:

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad \text{Eq. (3)}$$

O gráfico da Figura 9 apresenta um afundamento da tensão em uma das fases. Este evento pode ser capturado pelo sistema a partir da monitoração da tensão média (*método baseado no cálculo do Valor RMS*) como descrito na seção 4.2.

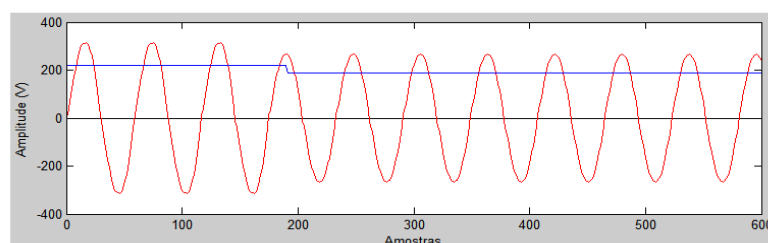


Figura 9 – Gráfico de afundamento de tensão

## 7. Conclusão

Neste trabalho, foram apresentados os resultados alcançados com o desenvolvimento de um sistema embarcado de baixo custo voltado ao gerenciamento da energia elétrica em sistemas industriais. A partir dos dados coletados foi possível observar que a integração de diferentes tecnologias, associadas a metodologias de captura e análise de sinais, resultam em ferramentas capazes de auxiliar na monitoração da Qualidade da Energia Elétrica e também



em um gerenciamento eficaz das demandas energéticas, contribuindo assim para uma melhor Eficiência Energética nos processos industriais.

Em relação aos custos de projeto, pode-se considerar que o sistema está em um patamar aceitável, uma vez que necessita de um mínimo de elementos eletrônicos, como uma fonte de alimentação e as placas de aquisição, sendo que a tarefa principal é executada pelo microcontrolador. Já o Mini2440 proporciona uma interface entre os dados coletados e o usuário final, este possuindo valor várias vezes menor a do que um computador de propósito geral.

O algoritmo desenvolvido para a análise de demanda possibilita, além da verificação da demanda consumida, a criação de perfis de consumo para cada dia ou semana, de forma a estimar picos de consumo, evitando assim ultrapassar a demanda contratada. O algoritmo para verificação QEE ainda não foi concluído, porém os dados coletados foram devidamente testados em ambiente MATLAB, o qual utiliza funções matemáticas que podem ser facilmente migradas para o ambiente embarcado.

Para trabalhos futuros, será necessário o armazenamento dos dados deste sistema com algum tipo de banco de dados, a fim de tornar essas informações acessíveis a qualquer sistema de gestão. Adicionalmente, trabalha-se com a possibilidade de se ter um sistema de análise que execute utilizando métodos de processamento paralelo e distribuído para elaboração de perfis de consumo energético.

## Referências

- CARRO, L. L. & WAGNER, F. R.** *Sistemas Computacionais Embarcados*. Jornadas de Atualização em Informática 2003. SBC, 2003.
- FELBER, L. A.** *Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica*. 2010. 137 p. Dissertação de Mestrado (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- FERNANDES, R. A. de S.; RABELO, R. de A. L.; SILVA, B. C.; OLESKOVICZ, M. & CARNEIRO, A. A. F. M.** *Técnicas Alternativas para Processamento de Sinais no Contexto da Qualidade de Energia Elétrica*, In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau - SC, Agosto, 2009.
- FILHO, O. D.** *Utilização da transformada wavelet para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica*, Dissertação de Mestrado. USP São Carlos, 2003
- MINI2440.** *Mini2440 | S3C2440 ARM9* Disponível em: <<http://www.friendlyarm.net/products/mini2440>>. Acesso em: 26 jan. 2012
- GARCIA, V. V.; KAGAN, E. L.; AMASIFEN, J. C. C.; SUEMATSU, A. K.; HAYASHI, R.; CHAVES, L. B.** *Sistema de Consultoria de Qualidade de Energia Elétrica*, In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau - SC, Agosto, 2009.
- HUA, L.; BUAGUN, Z. & HONG, Z.** *Recognition and Classification of Power Quality Event in Power System Using Wavelet Transform*, Proceedings of 27th Chinese Control Conference, pp. 43-46, 2008.
- JUNIOR, F. P.** *Utilização de medidores eletrônicos de faturamento para detecção e registro de transitórios oscilatórios*, In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau. Anais da VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009.



- JUNIOR, O. H. A.** *Desenvolvimento de uma Metodologia para Identificar e Quantificar Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica*. 2009. 188 p. Dissertação de Mestrado (PPGEE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- LEBORGNE, R.** *Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamentos de Tensão*. 2003. 163 p. Dissertação de (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.
- OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; CARNEIRO, A. A. F. M.; ARRUDA, E. F.; FILHO, O. D. & SOUZA, S. A.** *Estudo Comparativo de Ferramentas Modernas de Análise Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica*, SBA – Revista Controle & Automação, vol. 17, No. 3, pp. 331-341, 2006.
- OPPENHEIM, A.V. & SCHAEFER, R.W.** *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, NJ, 1989.
- OLIVEIRA, T. C. de.** *Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Software para Estudos de Afundamentos de Tensão*, 2004. 161 p. Dissertação de Mestrado (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.
- MELO, M. O. B. C.** *Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia*, In: Revista Produto & Produção, vol. 9, no 3, pp. 15– 25, 2008.
- MICROCHIP.** *dsPIC30F2011/2012/3012/3013 datasheet*, Disponível em: <<http://>>. Acesso em: 08 jan. 2012
- SILVA, C. R. C.; DESCHAMPS, E. & PÉRES, A.** *Eficiência Energética na Indústria*, In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau – SC, Agosto, 2009.
- SOLA, A. V. H. & KOVALESKI, J. L.** *Eficiência energética nas indústrias: cenários & oportunidades*, In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Anais / XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Florianópolis, SC: UFSC. ISBN 85-88478-11-0, 2004.
- SOLÓRZANO, K. M. L.** *Uma Contribuição ao Estudo de Sobreensões em Sistemas Elétricos de Pequeno Porte Contendo Cargas Não – Lineares*, 2004. 103 p. Dissertação de Mestrado (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004.
- UFSCAR.** *Uma Cidade Chamada UFSCar*. Disponível em: <<http://www.ufscar.br/~perene/consumo.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2011
- UYAR, M.; YILDIRIM, S. & GENCONGLU, M. T.** *An Effective Wavelet-Based Feature Extraction Method for Classification of Power Quality Disturbance Signals*, Electric Power Systems Research, vol. 78, pp. 1747-1755, 2008.