



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCOS VINÍCIUS ELOY XAVIER

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ALTO
DESEMPENHO DA QUALIDADE DA ENERGIA
ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Belo Horizonte
Março de 2016

MARCOS VINÍCIUS ELOY XAVIER

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ALTO
DESEMPENHO DA QUALIDADE DA ENERGIA
ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte
Março de 2016

X3s

Xavier, Marcos Vinícius Eloy.

Sistema de monitoramento de alto desempenho da qualidade da energia elétrica [manuscrito] / Marcos Vinícius Eloy Xavier. – 2016. 132 f., enc.: il.

Orientador: Wallace do Couto Boaventura.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 119-132.

Bibliografia: f. 115-118.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Análise harmônica - Teses. 3. Energia elétrica - Qualidade - Monitoração - Teses. 4. Wavelets (Matemática) - Teses. I. Boaventura, Wallace do Couto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

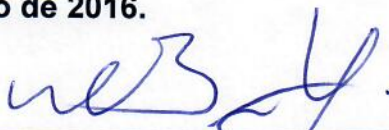
**"Sistema de Monitoramento de Alto Desempenho
da Qualidade de Energia Elétrica"**

Marcos Vinícius Eloy Xavier

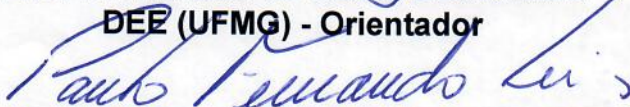
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 01 de março de 2016.

Por:



**Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG) - Orientador**



**Prof. Dr. Paulo Fernando Seixas
DELT (UFMG)**



**Prof. Dr. Victor Flores Mendes
DEE (UFMG)**



**Prof. Dr. Lenin Martins Ferreira Moraes
DELT (UFMG)**

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me guiado durante toda essa caminhada.

Agradeço a minha família e especial minha mãe, Vânia Maria Eloy, meu pai José Gonçalves Xavier e minha irmã Ana Paula Eloy Xavier, pela força durante toda essa caminhada.

Ao professor Wallace do Couto Boaventura pela orientação, pelos ensinamentos e por acreditar em meu trabalho.

Aos professores Luis Guilherme Monteiro, Selênio Rocha Silva (*In Memoriam*) e Wilson Negrão por ter me incentivado a entrar no Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Aos meus educadores, por terem ajudado a trilhar o caminho até chegar neste momento.

Aos meus companheiros Allan Cupertino, Alcy Monteiro, Adriano Freitas, João Paulo Gomes, Carlos Eduardo, Renato Senra, Paulo Amaral, Vitor Cardoso, Guilherme Viana, Natália Alcântara, Nicole Foureaux, Márcio Melquíades, Ivan Magela, Marcos Rosa, Welbert Rodrigues, Jean Diniz, Thiago Costa, Douglas Chagas e Arismar pela amizade durante esse período e por toda ajuda durante esta jornada.

À Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade e por fornecer estrutura adequada para a realização do mestrado

À CEMIG e CNPq, pelo apoio financeiro

Resumo

A qualidade da energia se tornou um dos temas mais discutidos nos sistemas de energia elétrica nos últimos anos. As principais justificativas para o interesse neste tema são o aumento de cargas sensíveis a perturbações nos parâmetros da rede e a maior de integração dos processos na indústria, onde a falha de algum componente pode ocasionar paradas na produção. Além disto, observa-se a maior conscientização dos consumidores de energia elétrica, os quais passam a demandar energia de melhor qualidade, e o aumento de cargas não-lineares, que são fontes de poluição harmônica para o sistema de energia. O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma plataforma desenvolvida na controladora CompactRIO da National Instruments utilizando como ferramenta de programação o software LabVIEW. O objetivo desta plataforma é monitorar e detectar perturbações que possam ocorrer no sistema de energia. As ferramentas para análise e detecção dos distúrbios são a transformada rápida de Fourier (FFT), para monitoramento dos harmônicos do sistema, e a transformada Wavelet para detecção das variações de tensão de curta duração (VTCD's). Ao perceber uma variação de tensão de curta duração ou uma violação nos limites de conteúdo harmônico, o sistema implementado registra o evento e seu horário para análise posterior. A plataforma também grava todo o sinal no domínio do tempo de forma contínua. O pós-processamento é realizado utilizando as amostras do sinal gravado. O usuário pode escolher quantos ciclos pré e/ou pós distúrbio deseja-se reconstruir para a sua análise. O desempenho da plataforma foi validado a partir de testes de afundamentos de tensão, interrupção momentânea e distorção harmônica.

Abstract

The quality of electric power has become one of the most discussed topics in electrical power systems in recent years. The main reasons for such interest are the increasing in loads that are sensitive to electric disturbances and the greater integration of industry processes, where the failure of any component can lead to stop in production. In addition, there is greater awareness of electricity consumers, which demand better energy quality and the increase in non-linear loads that are sources of harmonic pollution to the power system. This study aims to present a platform developed on the CompactRIO controller from National Instruments using as a programming tool LabVIEW software. The objective of this platform is to monitor and detect disturbances that might occur in the power system. The tools for analysis and detection of disturbances are the fast Fourier transform (FFT), for monitoring system harmonics, and Wavelet transform for the detection of short-duration voltage variations (SDVF). Upon realizing a short duration voltage variation or a violation in the limits of harmonic content, the implemented system records the event and its time for later analysis. The platform also records the entire signal in the time domain, continuously. Post-processing is performed using the samples of the recorded signal. The user can choose how many cycles pre and/or post-disturbance one wishes to reconstruct for the analysis. The performance of the platform was validated through tests involving voltage sags, interruption and harmonic distortion.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura geral de um equipamento de medição harmônicos	26
Figura 2 – Grupos de harmônicos e interharmônicos	28
Figura 3 – Subgrupo de harmônicos e interharmônicos	28
Figura 4 – Composição do PRODIST	32
Figura 5 – Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação .	38
Figura 6 – Analisador da Qualidade da energia FLUKE 435 Série II	41
Figura 7 – Medidor de Qualidade da Energia PQube 3	42
Figura 8 – ENA – Elcom Network Analyzer ENA450.EB	44
Figura 9 – Diferença entre sinais de tempo contínuo e tempo discreto	47
Figura 10 – Amostragem de um sinal contínuo $x(t)$ por um trem de impulsos $p(t)$	48
Figura 11 – Trem de impulsos no domínio do tempo (a) e no domínio da frequên- cia (b)	49
Figura 12 – Efeito no domínio da frequência da amostragem no domínio do tempo: (a) espectro no domínio do tempo, (b) espectro da função de amos- tragem, (c) espectro do sinal amostrado $\omega_s > 2\omega_m$, (d) espectro do sinal amostrado com $\omega_s < 2\omega_m$	50
Figura 13 – Processo para análise de um sinal de tempo contínuo pela Transfor- mada Discreta de Fourier	53
Figura 14 – Representação da análise de um sinal de tempo contínuo pela TFD: (a) Transformada de Fourier do sinal de entrada de tempo contínuo; (b) Resposta em frequência do filtro anti-aliasing; (c) Transformada de Fourier da saída do filtro anti-aliasing; (d) Transformada de Fourier do sinal amostrado; (e) Transformada de Fourier da janela; (f) Trans- formada de Fourier do sinal janelado e as amostras de frequências obtidas utilizando a FFT	55
Figura 15 – Aplicação de janelas de ponderação na identificação do conteúdo espectral de um sinal composto por duas ondas senoidais: (a) Janela retangular; (b) Janela de Barlett; (c) Janela de Hann; (d) Janela de Hamming; (e) Janela de Blackman; (f) Janela de Kaiser,	57
Figura 16 – Diferenças das técnicas de Processamento de Sinais: Domínio do tempo, domínio da frequência (Transformada de Fourier), Transfor- mada de Fourier Janelada e Análise de Wavelet	59
Figura 17 – Decomposição do sinal em wavelets com diferentes escalas e posições	62
Figura 18 – Resultado da Transformada Wavelet Contínua de um determinado sinal	63
Figura 19 – Processo de filtragem e dizimação na Transformada de Wavelets Discreta	65

Figura 20 – Cálculo da TWD	67
Figura 21 – Exemplo de TWD em um sinal de sistema de energia	68
Figura 22 – Sistema integrado NI cRIO	71
Figura 23 – Chassis Compact Rio 9075	72
Figura 24 – Arquitetura de um chip FPGA	73
Figura 25 – Módulo de medição de tensão NI 9242	74
Figura 26 – Terminais de medição do módulo NI 9242	75
Figura 27 – Módulo de medição de corrente NI 9227	77
Figura 28 – Circuito interno de medição de uma canal do módulo NI 9227	77
Figura 29 – Painel Frontal e Diagramas de Bloco do LabVIEW	78
Figura 30 – Visão Geral do Algoritmo da Plataforma de Monitoramento	80
Figura 31 – Projeto em LabVIEW	81
Figura 32 – Painel Frontal do VI 'Set cRIO TIme'	82
Figura 33 – VI FPGA	83
Figura 34 – Transferência de Arquivo através de uma DMA FIFO	84
Figura 35 – Configuração do Filtro Notch	86
Figura 36 – Processo de Compilação para um ' <i>bitfile</i> '	88
Figura 37 – Resumo da Compilação do VI FPGA	88
Figura 38 – Painel Frontal do VI Host	90
Figura 39 – Detecção de Distúrbio através da Transformada Wavelet	91
Figura 40 – Método de detecção de violações de correntes harmônicas	93
Figura 41 – Arquivo de gravação dos 7 canais, organizado em grupos	95
Figura 42 – VI FTP e FileZilla Server	96
Figura 43 – Painel Frontal do VI de Pós Processamento	98
Figura 44 – Medição do efeito do ruído nas medição. O teste foi realizado curto-circuitando os canais de tensão e corrente separadamente	101
Figura 45 – Circuito para Teste na Plataforma de Monitoramento da Qualidade da Energia	102
Figura 46 – Painel Frontal do programa em Labview destacando o momento da mudança de tensão no sistema	103
Figura 47 – Interrupção Momentânea da Fase C	104
Figura 48 – Teste de Afundamento de Tensão da Plataforma de Monitoramento	105
Figura 49 – Gráfico revelando a queda de tensão provocada pelo aumento da resistência do reostato	106
Figura 50 – Afundamento de Tensão Provocado Para Validação da Plataforma	107
Figura 51 – Detecção de Afundamento de Tensão Curto e Brando na Fase C	108
Figura 52 – Bancada de Teste para Identificação de Distorção Harmônica de Corrente	108

Figura 53 – Diagrama de Ligação da Bancada de Teste para Identificação de Distorção Harmônica	109
Figura 54 – Forma de onda de corrente drenada por 6 lâmpadas incandescentes de 60 W	109
Figura 55 – Forma de onda de corrente drenada por 6 lâmpadas incandescentes de 60W e 3 lâmpadas fluorescentes de 15W	110
Figura 56 – Forma de onda de corrente drenada por 3 lâmpadas incandescentes de 60W e 6 lâmpadas fluorescentes de 15W	110
Figura 57 – Forma de onda de corrente drenada por 6 lâmpadas fluorescentes de 15W	111
Figura 58 – Forma de onda de corrente drenada por 9 lâmpadas fluorescentes de 15W	111
Figura 59 – Diagrama de Blocos do VI Set cRIO Time	120
Figura 60 – Inicialização do VI Host	122
Figura 61 – Leitura dos Canais de Tensão e Análise de Wavelet	123
Figura 62 – Leitura dos Canais de Corrente e análise de Fourier	124
Figura 63 – Sub VI de comparação das correntes harmônicas até a ordem 25 de acordo com a norma da IEC 61000-3-2	125
Figura 64 – Indicação dos distúrbios de qualidade da energia	126
Figura 65 – Estrutura Case para a construção da lista de distúrbio	127
Figura 66 – Diagrama de Blocos do VI FTP	129
Figura 67 – Seleção da lista de distúrbio e do distúrbio de análise	130
Figura 68 – Determinação do arquivo a ser aberto e da janela a ser apresentada ao analista	131
Figura 69 – Detalhe da parte final do diagrama de blocos do VI de Pós Processamento, detalhando as análises do canais V_a , V_b , V_c e I_a	132

Lista de tabelas

Tabela 1 – Visão Geral da Norma IEC 61000	24
Tabela 2 – Subdivisão da Parte 3 da Norma IEC 61000-3	25
Tabela 3 – Requisitos de Precisão para Corrente, Tensão e Potência segundo norma 61000-4-7	29
Tabela 4 – Limites de distorção de tensão	30
Tabela 5 – Limites de distorção de corrente para sistemas de 120V a 69 kV . .	31
Tabela 6 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127 V)	33
Tabela 7 – Terminologia Aplicável às Formulações do Cálculo de Valores de Referência para as Distorções Harmônicas.	34
Tabela 8 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)	35
Tabela 9 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) - ímpares não múltiplas de 3	35
Tabela 10 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) - ímpares múltiplas de 3	36
Tabela 11 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) - Pares	36
Tabela 12 – Terminologia das Flutuações de Tensão	37
Tabela 13 – Valores de referência dos indicadores de <i>Flicker</i>	39
Tabela 14 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração	39
Tabela 15 – Comparação entre os sistemas de monitoramento comerciais existentes	45
Tabela 16 – Frequências de amostragem disponíveis no módulo de medição NI 9242	76
Tabela 17 – Limite de Emissão de Correntes Harmônicas em equipamentos com corrente menor que 16A por fase - Harmônicos Impares	92
Tabela 18 – Limite de Emissão de Correntes Harmônicas em equipamentos com corrente menor que 16A por fase - Harmônicos Pares	92
Tabela 19 – Comparação entre os formatos de dados existentes	94
Tabela 20 – Resolução de Medição Esperada pelos Módulos de Medição	101

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/D	Analógico/Digital
AMR	Análise Multiresolução
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
CBEMA	Computer and Business Equipment Manufactures Association
CIGRÉ	International Council on Large Electric Systems
cRIO	CompactRIO
DHI	Distorção Harmônica de Corrente
DHT	Distorção Harmônica de Tensão
DIT	Distorção Individual de Tensão
DTT	Distorção Total de Tensão
EA	Energia Ativa
EMC	Electromagnetic Compatibility
ER	Energia Reativa
FD	Fator de Desequilíbrio
FFT	Fast Fourier Transform
fp	Fator de Potência
FPGA	Field Programmable Gate Array
FT	Fator de Transferência
FTP	File Transfer Protocol
FXP	Fixed-Point
GQEE	Grupo de Qualidade da Energia Elétrica
Hz	Hertz

IEC	Internacional Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
ITIC	Information Technology Industry Council
LIT	Linear e Invariante no Tempo
NEMA	National Electrical Manufactures Association
NI	National Instruments
ONS	Operador Nacional do Sistema Eléctrico
Pamp;D	Pesquisa e Desenvolvimento
Plt	Severidade de Longa Duração
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Eléctrica no Sistema Eléctrico Nacional
Pst	Severidade de Curta Duração
RIO	Reconfigurable Input and Output
RMS	Root mean square
SGL	Single Precision Float
SIN	Sistema Interligado Nacional
TFD	Transformada Discreta de Fourier
TL	Tensão de Leitura
TW	Transformada Wavelet
TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWD	Transformada Wavelet Discreta
VI	Virtual Instruments
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	A Importância da Qualidade da Energia	16
1.2	O Projeto P&D entre CEMIG D e UFMG	18
1.3	Objetivos	19
1.4	Metodologia	19
1.5	Organização do Trabalho	20
2	NORMAS E EQUIPAMENTOS SOBRE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ENERGIA	21
2.1	Normas Internacionais de Qualidade da Energia	22
2.1.1	IEC	23
2.1.2	IEEE	30
2.2	Normas Nacionais Sobre Qualidade da Energia	31
2.2.1	PRODIST	32
2.2.1.1	Tensão em regime permanente	33
2.2.1.2	Fator de Potência	33
2.2.1.3	Harmônicos	34
2.2.1.4	Desequilíbrio de Tensão	36
2.2.1.5	Flutuação de Tensão	37
2.2.1.6	Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)	39
2.3	Sistemas de Monitoramentos Existentes	39
2.3.1	Analisador da Qualidade da Energia FLUKE 435 Série II	40
2.3.2	PQUBE 3	41
2.3.3	ENA – Elcom Network Analyzer	42
2.4	Considerações Finais	45
3	FERRAMENTAS DE ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA	46
3.1	Teorema da Amostragem	46
3.2	A Transformada de Fourier	50
3.2.1	Parâmetros de Especificação da FFT	56
3.3	A Transformada Wavelet	58
3.3.1	Transformada Wavelet Contínua	61
3.3.2	Transformada Wavelet Discreta e Análise Multiresolução	63
3.4	Considerações Finais	68
4	A PLATAFORMA DE MONITORAMENTO	70

4.1	A controladora NI Compact RIO 9075 (NI cRIO-9075)	71
4.1.1	Processador Real Time	72
4.1.2	FPGA	73
4.2	Módulo de Medição de Tensão NI 9242	73
4.3	Módulo de Medição de Corrente NI 9227	76
4.4	O Software LabVIEW	78
4.5	O Algoritmo Proposto	79
4.5.1	Set cRIO Time	81
4.5.2	VI FPGA	82
4.5.2.1	Cálculo do Indicador de Distorção Harmônica e de Desequilíbrio de Tensão	85
4.5.2.2	Compilação	87
4.5.3	VI Host	89
4.5.3.1	Detecção de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)	91
4.5.3.2	Detecção de violação de limites de correntes harmônicas	91
4.5.4	Organização dos dados para a gravação	93
4.5.5	VI FTP	95
4.5.6	VI de Pós-Processamento	97
4.6	Considerações Finais	98
5	VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA	100
5.1	Efeito do ruído de medição	100
5.2	Teste de Identificação de Variação de Tensão do Sistema	102
5.3	Identificação de Interrupção Momentânea Tensão	103
5.4	Identificação de Afundamento de Tensão	104
5.5	Identificação de Distorção Harmônica	108
5.6	Considerações Finais	111
6	CONCLUSÃO	113
	Referências	115
	ANEXOS	119
	ANEXO A – VI SET CRIO TIME	120
	ANEXO B – VI HOST	121
B.1	Inicialização do VI	121
B.2	Detecção de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)	122
B.3	Detecção de violações dos limites de correntes harmônicas	123
B.4	Lista de Distúrbios	125

ANEXO C – VI FTP	128
ANEXO D – VI DE PÓS-PROCESSAMENTO	130

1 Introdução

O monitoramento da qualidade da energia é o processo de coleta, análise e interpretação de dados de medição em informações úteis. A coleta geralmente é realizada através da medição contínua de tensão e corrente ao longo de um período prolongado. Os processos de análise e interpretação eram tradicionalmente realizados manualmente, ou seja, requeriam a observação e o conhecimento do analista para a análise correta do sistema a ser monitorado. Porém, com os recentes avanços em processamento de sinais e em áreas da inteligência artificial é possível projetar e implementar sistemas inteligentes que analisam e interpretam dados medidos em informações úteis automaticamente, com o mínimo de intervenção humana (DUGAN et al., 2002).

A criação de sistemas de monitoramento da qualidade da energia está sendo impulsionada pela demanda em melhorar a qualidade da energia fornecida. Muitos clientes industriais e comerciais têm equipamentos que são sensíveis às perturbações de energia e, portanto, necessitam monitorar a qualidade da energia elétrica que está sendo fornecida. Por isso, as concessionárias de energia e até os próprios consumidores estão implementando programas de monitoramento da qualidade da energia (DUGAN et al., 2002).

Os objetivos do monitoramento devem ser claramente definidos antes da realização do processo de coleta dos dados. Estes, serão determinantes na escolha dos equipamentos de monitoramento. Isto porque os problemas de qualidade da energia abrangem uma ampla variedade de fenômenos que incluem desde impulsos de alta frequência, causados por descargas atmosféricas, até problemas de distorção harmônica, causados por cargas não lineares (DUGAN et al., 2002).

1.1 A Importância da Qualidade da Energia

A qualidade da energia elétrica é uma característica de um sistema elétrico que se apresenta isento ou com número restrito de distúrbios manifestados através de desvios de tensão, em sua forma de onda, amplitude, frequência ou fase angular, que podem ocasionar falha ou operação inadequada de um equipamento do consumidor (BOLLEN, 2000).

A qualidade da energia elétrica tornou-se um dos temas mais discutidos nos sistemas de energia nos últimos anos tanto por parte das concessionárias de eletricidade, como dos consumidores. As principais razões do aumento desta preocupação são:

- Maior conhecimento pelos consumidores da questão da qualidade da energia. Os consumidores estão mais bem informados sobre interrupções, variações de tensão de curta duração e, portanto, estão exigindo mais das concessionárias de energia (DUGAN et al., 2002; MAIA, 2011);
- Os equipamentos utilizados atualmente, principalmente os baseados em circuitos eletrônicos analógico-digitais, estão cada vez mais sensíveis às variações dos aspectos da energia elétrica (MAIA, 2011; DUGAN et al., 2002);
- A proliferação do emprego de cargas com relação tensão-corrente não linear nos setores comercial e residencial, a exemplo dos computadores e aparelhos eletroeletrônicos (MAIA, 2011);
- Maior interligação dos processos industriais, onde a falha de qualquer componente pode ocasionar uma parada de produção trazendo inúmeros prejuízos financeiros (DUGAN et al., 2002);
- O estabelecimento de normalização nacional e internacional no tema tem conduzido a uma mudança de postura de diversas empresas e a definição de responsabilidades, penalizações e processos jurídicos (DUGAN et al., 2002);
- A entrada da geração distribuída nas redes de distribuição de energia, principalmente as tecnologias que utilizam como interface o inversor de frequência, pode levar ao aumento das distorções harmônicas de baixa ordem devido à redução da frequência de ressonância do sistema causada pela presença de capacitores que são utilizados para filtragem de harmônicos de alta ordem gerados pelo próprio inversor (CORGOZINHO et al., 2014). Além disto, a alta penetração da geração distribuída na rede pode levar os perfis de tensão para níveis que ultrapassem os limites recomendados (SOUZA, 2014).

Para mensurar a relevância deste tema na atualidade, vários são os estudos sobre o impacto financeiro que os problemas de qualidade da energia trazem para as empresas e para a sociedade. O trabalho de (MAIA, 2011) cita alguns casos específicos:

- Controle de tráfego aéreo: perda de controle em um grande aeroporto pode custar US\$15.000/minuto;
- Indústria automotiva: interrupções momentâneas custam em torno de US\$10 milhões/ano;
- Estados Unidos (EUA): US\$50 bilhões por ano foram gastos como resultado de interrupções por qualidade da energia;

- Vale do Silício - Califórnia EUA: um determinado fabricante perdeu mais de US\$3 milhões em um único dia;
- O Prejuízo em uma industria alimentícia no Brasil devido a qualidade da energia foi de R\$ 840.000,00 em 2010.

Diante do exposto, vislumbra-se que o tema “Qualidade da Energia Elétrica”, passa a exigir uma ação integrada das partes envolvidas, ou seja, concessionárias, consumidores e fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos, que na maioria das vezes, assessorados por instituições de ensino e pesquisa, desenvolvem estudos objetivando conhecer os perfis operacionais dos equipamentos e consequente mitigação dos efeitos de um fornecimento de energia elétrica inadequada (MAIA, 2011).

1.2 O Projeto P&D entre CEMIG D e UFMG

Em agosto de 2011, a Agência Nacional de Energia Elétrica lançou um edital cuja proposta era desenvolver arranjos técnicos e comerciais para projetos de geração de energia elétrica através de fonte solar, de forma integrada, buscando criar condições para o desenvolvimento de base tecnológica e infraestrutura técnica para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética nacional.

Com o intuito de contribuir com essa iniciativa, um grupo de professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG (DEE/UFMG), e a CEMIG Distribuição S. A. (Cemig D), através do acordo firmado no projeto de P&D CEMIG D-713, criaram o projeto intitulado “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção da Geração Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”.

A proposta do projeto é identificar gargalos técnicos e econômicos da geração solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica no Brasil. Para tanto, propõe-se a concepção e implantação de uma usina piloto de desempenho técnico-econômico otimizado com realização de pesquisas específicas sobre o desempenho de sistemas, seus impactos positivos e negativos na rede de distribuição e estudos complementares. Um dos focos do projeto está na proposição de melhorias no marco regulatório e no regime tributário para este tipo de sistema.

O presente trabalho está inserido nas atividades de pesquisa deste projeto envolvendo pesquisas específicas sobre o desempenho dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede e aborda uma plataforma de monitoramento de alto desempenho da qualidade da energia elétrica injetada pelos inversores dos sistemas fotovoltaicos.

É um sistema de monitoramento complementar aos sistemas de monitoramento comerciais propostos para a usina piloto e traz como diferencial a possibilidade de realizar uma análise minuciosa sobre os aspectos relativos a qualidade da energia.

Dentre as principais características nas quais plataforma proposta se diferencia das plataformas de monitoramento comerciais, pode citar: *i)* a alta resolução na aquisição dos dados, *ii)* processamento rápido sem perda de dados, *iii)* detecção em tempo real das variações das tensões de curta-duração e *iv)* violações nos índices de distorções harmônicas e por fim, *v)* gravação dos dados de medição dos canais de tensão e corrente para pós-processamento.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma plataforma de monitoramento de alto desempenho da qualidade da energia elétrica.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Detectar em tempo real variações de tensão de curta duração que possam ocorrer na rede;
- Detectar violações dos índices de distorção harmônica total e individual de tensão e corrente;
- Detectar desequilíbrios de tensão;
- Gravar todos os dados no domínio tempo para uma análise posterior.

1.4 Metodologia

O trabalho consiste na concepção e implementação computacional de uma plataforma de monitoramento da qualidade da energia elétrica. A pesquisa se inicia com uma análise das características e funcionalidades dos sistemas de monitoramento comerciais existentes atualmente. Com esta análise, identifica-se características e funcionalidades que permitem um monitoramento complementar aos sistemas de monitoramento existentes, com maior nível de detalhes sobre os distúrbios de qualidade da energia elétrica. Em seguida, seleciona-se as técnicas matemáticas que permitem a análise dos problemas de qualidade da energia de forma eficaz e que atenda às normas nacionais e internacionais sobre o tema.

Com as condições de contorno definidas, o passo seguinte é a definição do *hardware* e *software* compatíveis com as demandas da proposta para a plataforma de monitoramento. Foi selecionado o *hardware* CompactRIO 9075 da National Instruments e o *software* LabVIEW. Por fim, realiza-se a implementação das rotinas de detecção de eventos e pós-processamento, além dos testes de validação da plataforma proposta neste trabalho.

1.5 Organização do Trabalho

O trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos. O Capítulo 1 apresenta a contextualização, as justificativas que motivam o presente trabalho e seus objetivos.

O Capítulo 2 realiza uma abordagem sobre as principais normas, internacionais e nacionais, sobre a qualidade da energia elétrica. Neste capítulo são apresentados e classificados os principais indicadores de qualidade da energia, assim como as faixas aceitáveis destes indicadores. O Capítulo 3 apresenta as duas principais ferramentas da área de processamento de sinais utilizadas no desenvolvimento deste trabalho: a transformada de Fourier e a transformada Wavelet. Estas ferramentas permitem que o sistema de monitoramento transforme os dados de tensão e corrente medidos em indicadores sobre o estado da qualidade da energia. Estes indicadores calculados a partir das medições são comparados com os indicadores das normas para identificação dos momentos em que o sistema está operando com algum problema na qualidade da energia.

O Capítulo 4 especifica e fornece as características do *hardware* e *software* escolhidos para a elaboração da plataforma. Além disto, descreve com detalhes o processo de detecção de distúrbios, gravação dos dados de medição e pós-processamento. O Capítulo 5 apresenta resultados de medições realizadas em laboratório para a validação da plataforma. Foram realizadas medições de interrupção momentânea, afundamento de tensão e de distorção harmônica. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros.

2 Normas e Equipamentos Sobre Monitoramento da Qualidade da Energia

Para a construção de um sistema de monitoramento da qualidade da energia elétrica é necessário conhecer a condição nominal de operação de um determinado sistema elétrico e estabelecer as faixas aceitáveis de operação em torno desta condição nominal. Estes limites são especificados em várias normas de instituições internacionais e nacionais sobre qualidade da energia. As normas também definem o limite de emissão de distúrbios que um determinado equipamento ou sistema pode emitir para outro sistema elétrico. Além disto, as normas sobre qualidade da energia elétrica (QEE) padronizam os métodos de medição e especificam a classe de exatidão requerida pelos instrumentos de medição, permitindo assim uma comparação eficaz entre diversos sistemas de monitoramento existentes.

Neste capítulo, serão apresentadas as principais normas e recomendações sobre a qualidade da energia. No âmbito das normas internacionais, será apresentada a família de normas da IEC 61000, em especial as normas IEC 61000-4-7 e 61000-4-30. A norma IEC 61000-4-7 define o procedimento de medição de correntes e tensões harmônicas, enquanto que a norma IEC 61000-4-30 define o procedimento de medição dos outros parâmetros da qualidade da energia como variações de tensão de curta duração e cintilação (flicker). Além das normas IEC, as recomendações IEEE 519/2014 e IEEE 1159/2009 do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) merecem destaque pois estabelecem limites e práticas recomendadas para o monitoramento dos parâmetros elétricos de tensão e corrente relacionados à qualidade da energia elétrica em regime permanente. No âmbito nacional, será destacado o módulo 8 do PRODIST referente à QEE.

No fim deste capítulo, após a apresentação das principais normas sobre o tema, são apresentados alguns sistemas de monitoramento comerciais da qualidade da energia elétrica. Todos eles utilizam como referência as normas sobre QEE para a metodologia de cálculo e apresentação dos resultados para o usuário. Os analisadores de qualidade da energia apresentados neste capítulo serão o analisador FLUKE 435 Série II, um dos analisadores mais utilizados comercialmente em sistemas elétricos de potência, o PQube que apresenta uma solução de monitoramento de baixo custo e o ENA ELCOM que apresenta uma plataforma de monitoramento construída no hardware CompactRIO da National Instruments, o qual foi utilizado para o desenvolvimento do sistema de monitoramento deste trabalho.

2.1 Normas Internacionais de Qualidade da Energia

Há uma tendência nos últimos anos em unificar as normas sobre qualidade da energia de cada país. Os esforços nesse sentido partiram justamente dos órgãos que historicamente têm suportado a maior parte da documentação normativa, como o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) nos Estados Unidos e o CIGRÉ (International Council on Large Electric Systems) na Europa. No entanto, esta unificação deve acontecer no longo prazo, portanto o que se têm hoje são normas nacionais ou recomendações internacionais (DECKMANN; POMILIO, 2010).

No âmbito internacional, inúmeras instituições estão trabalhando para o estabelecimento de conceitos, índices e objetivos para qualidade da energia nos mais variados setores. Alguns exemplos de organizações que atuam em seus campos específicos são:

- CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*): O CENELEC prepara padrões voluntários que facilitam o comércio entre os países, a criação de novos mercados, a redução dos custos de conformidade e o desenvolvimento de um mercado único europeu. O CENELEC sempre que possível também colabora para adoção de normas internacionais através da sua estreita colaboração com a International Electrotechnical Commission (IEC), conforme o acordo Dresden (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION, 2015);
- ITIC (*Information Technology Industry Council*): É uma organização de intermediação para a indústria de tecnologia da informação nos Estados Unidos. Quando ainda possuía outro nome, (Computer and Business Equipment Manufacturers Association, CBEMA) elaborou uma curva de suportabilidade de equipamentos elétricos frente a distúrbios na rede (SANTOS, 2011);
- NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*): É a associação de fabricantes equipamentos elétricos, fundada em 1926 e sediada em Rosslyn, Virginia, Estados Unidos. Tem cerca de 400 membros. Suas empresas fabricam um conjunto diversificado de produtos, incluindo produtos de transmissão e distribuição de energia, sistemas de iluminação, automação industrial e sistemas de controle e sistemas de imagens de diagnóstico médico. NEMA fornece um fórum para o desenvolvimento de normas técnicas de interesses da indústria e dos consumidores, defende políticas do setor legislativo, realiza coletas, análises e divulgação de dados da indústria (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2015);

- ANSI (*American National Standards Institute*): O Instituto supervisiona a criação, promulgação e uso de milhares de normas e diretrizes que afetam diretamente os negócios em quase todos os setores: desde dispositivos acústicos, a produção leiteira e pecuária, distribuição de energia, e muitos mais. ANSI também está ativamente envolvida na avaliação das competências de organizações que determinam as normas (AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, 2015);
- ISO (*International Organization for Standardization*): ISO é uma organização internacional independente, não-governamental com uma adesão de 162 organismos nacionais de normalização. A ISO tem como objetivo criar normas que facilitem o comércio e promovam boas práticas de gestão e o avanço tecnológico, além de disseminar conhecimentos (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2015; SANTOS, 2011).

Existem duas instituições que merecem destaque na área de qualidade da energia. A IEC e o IEEE. Abaixo segue uma descrição mais detalhada destas duas instituições.

2.1.1 IEC

A IEC é uma organização sem fins lucrativo, não governamental, criada em 1906 em Londres. Os membros da IEC são os comitês nacionais que nomeiam peritos e delegados vindos da indústria, órgãos governamentais, associações e universidades para participarem do trabalho de avaliação técnica e avaliação de conformidade da IEC. O objetivo da IEC é promover a cooperação internacional em todas as questões relativas a normalização nos campos elétrico e eletrônico. Para este efeito e para além de outras atividades, a IEC publica normas internacionais. A IEC colabora estreitamente com a Organização Internacional de Normalização (ISO), de acordo com as condições determinadas por acordo entre as duas organizações (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002).

Os documentos apresentados têm a forma de recomendações para uso internacional e são publicadas sob a forma de normas, especificações técnicas, relatórios técnicos ou guias, e estes são aceitos pelos comitês nacionais (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002).

O conjunto de normas da família IEC 61000 referente à EMC (Electromagnetic Compatibility) são extremamente importantes e abrangem assuntos relativos a qualidade da energia. Em suma, a EMC descreve a capacidade dos sistemas elétricos e eletrônicos de funcionar corretamente quando próximos um do outro, ou seja, avalia-se a emissão de distúrbios e quão imune a estes, um equipamento deve ser (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2015; SANTOS, 2011). A estrutura da

série de normas IEC 61000 (excluindo os itens 7 e 8 que estão em aberto) é dividido conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Visão Geral da Norma IEC 61000

Norma IEC 61000
Parte 1 - Geral
Considerações Gerais, definições e terminologias
Parte 2 - Ambiente
Descrição, classificação e métodos de quantificação do ambiente onde o equipamento será utilizado
Parte 3 - Limites
São fornecidos limites de emissão e de imunidade para equipamentos.
Parte 4 - Técnicas de Teste e Medição
Fornecer diretrizes para o projeto de equipamentos de medição e monitoramento da qualidade da energia além dos procedimentos de teste dos equipamentos
Parte 5 – Diretrizes de instalação e de mitigação
Diretrizes para a instalação de equipamentos; métodos e dispositivos de mitigação
Parte 6 – Normas Genéricas
Inclui padrões específicos para uma categoria de equipamentos ou para certos ambientes
Parte 9 - Diversos

Fonte: International Electrotechnical Commission

Devido à importância da norma IEC 61000, os limites e as diretrizes para o projeto dos equipamentos de medição, parte 3 e 4 da norma respectivamente, serão considerados na construção da plataforma de monitoramento. A parte 3 trata dos limites de emissão de distúrbio dos equipamentos para rede. Ela se subdivide em 8 subdivisões, como mostrado na Tabela 2. Os limites de emissões de correntes harmônicas e variações de tensão de curta duração serão utilizados neste trabalho como indicadores do estado da qualidade da energia.

Tabela 2 – Subdivisão da Parte 3 da Norma IEC 61000-3

Numeração	Nome
IEC 61000-3-2	Limites para emissões de correntes harmônicas (corrente de entrada do equipamento ≤ 16 A por fase)
IEC 61000-3-3	Limites das variações de tensão, das flutuações de tensão e flicker em sistemas de alimentação de baixa tensão, para equipamentos com corrente nominal < 16 A por fase e não sujeitos a ligação condicional
IEC/TS 61000-3-4	Limites para emissões de correntes harmônicas em sistemas de alimentação de baixa tensão para equipamentos com corrente nominal superior a 16 A
IEC/TS 61000-3-5	Limites das flutuações de tensão e flicker em sistemas de alimentação de baixa tensão para equipamentos com corrente nominal superior a 75 A
IEC / TR 61000-3-6	Avaliação dos limites de emissão para a conexão de instalação com distorção em sistemas de média, alta e extra alta tensão.
IEC/TR 61000-3-7	Avaliação dos limites de emissão para conexão de instalações com flutuação de tensão em sistemas de média, alta e extra alta tensão
IEC 61000-3-8	Sinalização em instalações elétricas de baixa tensão - Níveis de emissão, bandas de frequência e os níveis de interferências electromagnéticas
IEC 61000-3-12	Limites para correntes harmônicas produzidas por equipamento ligado a sistema de baixa tensão público com entrada de corrente > 16 A e ≤ 75 A por fase.

Fonte: IEC 61000

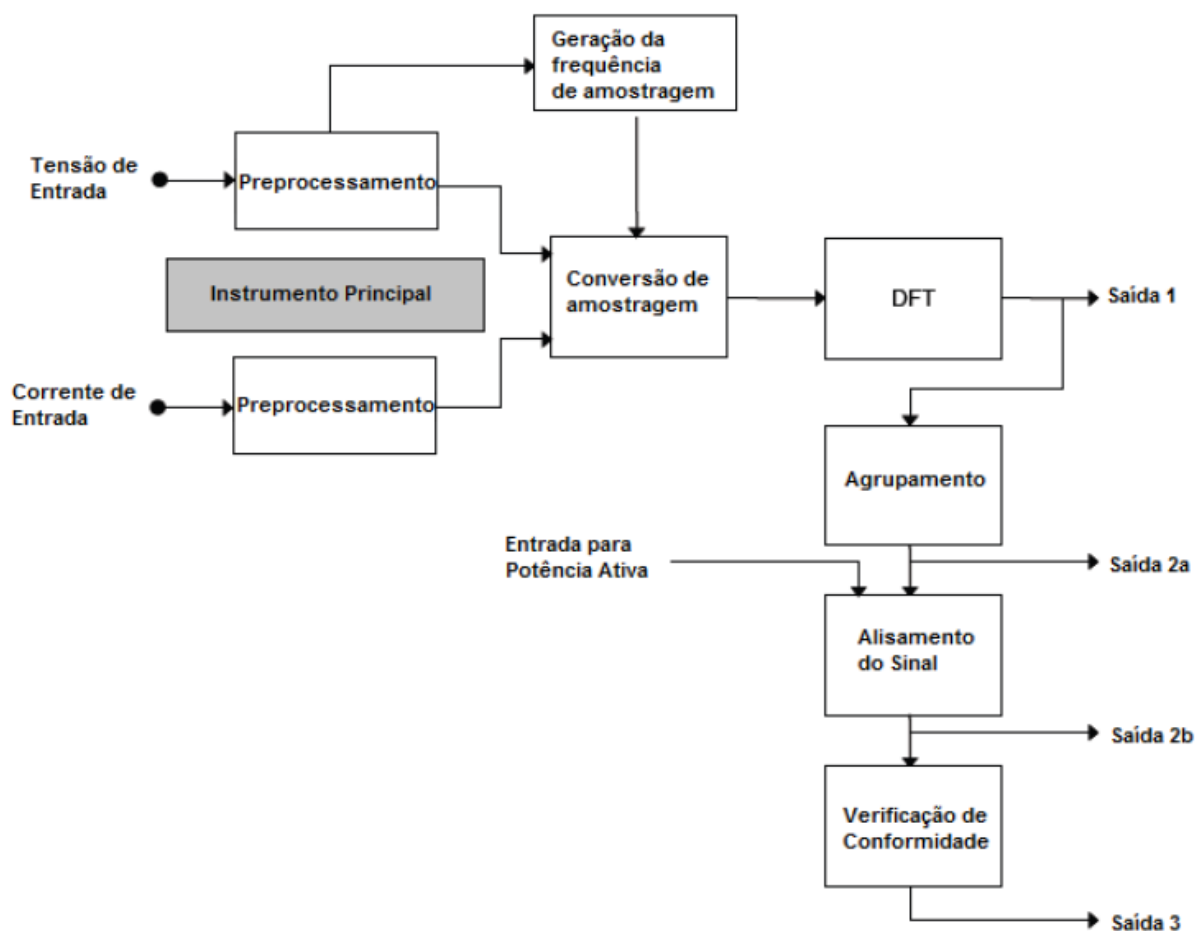
A parte 4 define as diretrizes para o projeto dos equipamentos de monitoramento da qualidade da energia. Muitas normas internacionais seguem as definições da IEC 61000-4, o que a torna como norma mais utilizada do mundo para análise de qualidade da energia (SANTOS, 2011). As subdivisões 7 e 30 da parte 4 merecem destaque.

A subdivisão 7 é aplicável a instrumentação destinada a medir componentes espectrais na faixa de frequências até 9 kHz, que são sobrepostos na componente fundamental dos sistemas de fornecimento de energia a 50 Hz e 60 Hz (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002). A IEC 61000-4-7 é a principal norma sobre distorção harmônica no mundo (SANTOS, 2011).

Segundo a IEC 61000-4-7, a estrutura genérica de um instrumento de medição de harmônicos está mostrada na Figura 1 e compreende os seguintes itens: circuitos de entrada com filtros anti-aliasing, conversores analógicos digitais incluindo uma unidade de amostragem e quantização, sincronização e uma unidade de janelamento (se

necessário), e um processador da transformada discreta de Fourier que fornece os coeficientes de Fourier a_m e b_m (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002)(SANTOS, 2011).

Figura 1 – Estrutura geral de um equipamento de medição harmônicos



Fonte: IEC 61000-4-7

A técnica de processamento de sinal estabelecida pela norma IEC 61000-4-7 para realizar o processamento do sinal de tensão e corrente proveniente do bloco de conversão e amostragem é a transformada discreta de Fourier. A janela de tempo é sincronizada em 200 milissegundos, o que representa 10 ou 12 ciclos de acordo com a frequência, 50 Hz (Hertz) ou 60 Hz respectivamente, o que corresponde a uma resolução em frequência de 5 Hz e deve ser aplicada para detectar até o 50º harmônico (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002) (SANTOS, 2011).

Um problema que pode acontecer com a utilização da FFT ocorre quando o sinal que está sendo monitorado contém componentes inter-harmônicos, ou se a frequência da componente fundamental sofre algum tipo de variação e a taxa de amostragem deixa

de ser múltipla inteira dessa frequência, fazendo com que o processo de amostragem seja assíncrono. Com isto ocorre um fenômeno chamado de espalhamento espectral, que faz com que a energia dos componentes se espalhe ao longo do espectro de frequência (MONTEIRO, 2014).

Em função deste fenômeno de espalhamento, a IEC 61000-4-7 introduziu o método de grupos e subgrupos de harmônicos e inter harmônicos que tem por objetivo agrupar a energia dos componentes espalhados ao longo do espectro de frequência e estabelecer sua amplitude. As fórmulas 2.1 e 2.2 apresentam o cálculo de grupos e subgrupos de harmônicos respectivamente, e as fórmulas 2.3 e 2.4 apresentam os cálculos de grupos e subgrupos de inter-harmônicos respectivamente (MONTEIRO, 2014; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002).

$$G_{g,h}^2 = \left(\frac{C_{k_h-6}^2}{2} + \sum_{i=-5}^5 C_{k_h+i}^2 + \frac{C_{k_h+6}^2}{2} \right) \quad (2.1)$$

$$G_{sg,h}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k_h+i}^2 \quad (2.2)$$

$$G_{ig,h}^2 = \sum_{i=1}^{11} C_{k_h+i}^2 \quad (2.3)$$

$$G_{sig,h}^2 = \sum_{i=2}^{10} C_{k_h+i}^2 \quad (2.4)$$

onde:

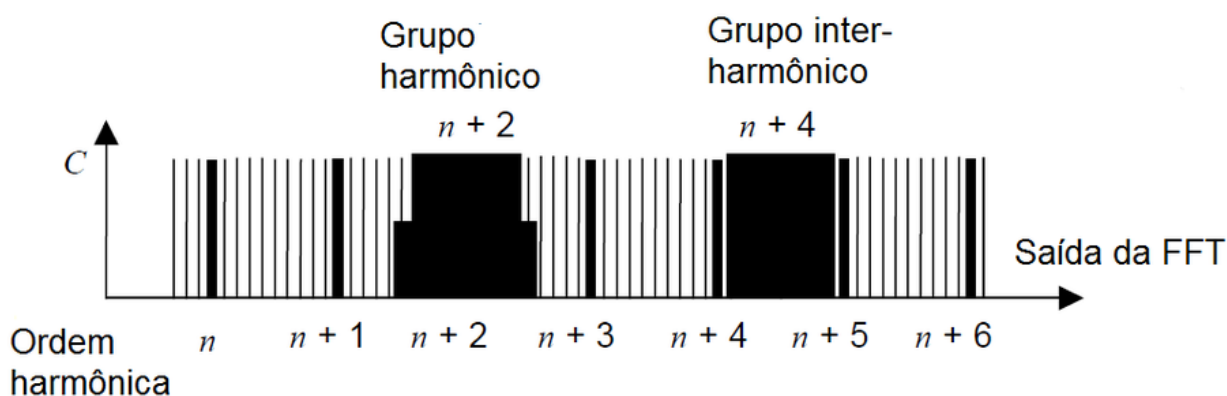
- $G_{g,h}^2, G_{sg,h}^2, G_{ig,h}^2, G_{sig,h}^2$ representam os valores quadráticos dos grupos harmônicos, subgrupos harmônicos, grupos inter-harmônicos, subgrupos inter-harmônicos;
- k_h representa o índice da componente de ordem h;
- $C_{k_h+i}^2$ representa o valor quadrático de cada passo de frequência com índice k_h .

A Figura 2 e 3 extraídas IEC 61000-4-7 exibem a representação de grupos e subgrupos de harmônicos e interharmônicos respectivamente. Para a realização do agrupamento de harmônicos são consideradas as energias de todos os componentes, além do próprio componente harmônico contido entre os 12 passos de frequência entre um harmônico e o outro. No agrupamento de harmônico há de destacar-se que os dois passos de frequências mais distantes do harmônico, tanto do lado esquerdo, como do lado direito são considerados como influência dos dois componentes harmônicos

próximos ao mesmo. Por isso a contribuição destes para o grupo é considerada como sendo a metade de sua amplitude.

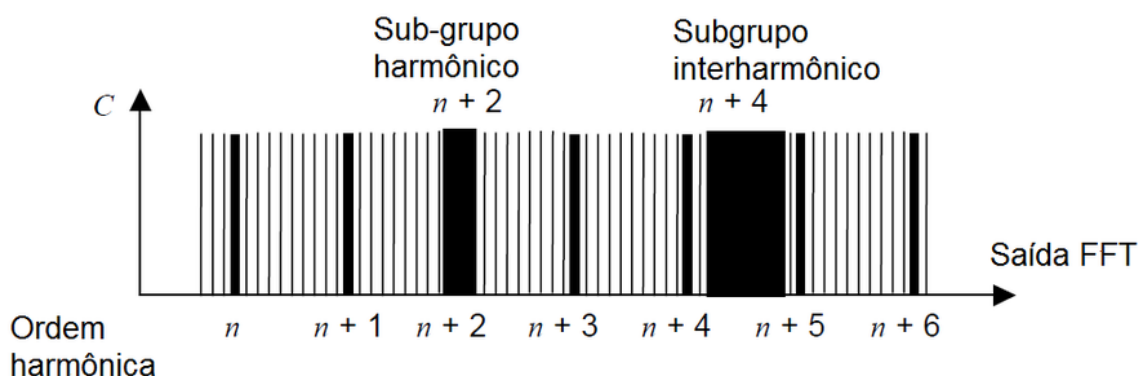
No caso dos interharmônicos, o agrupamento é realizado com todos os passos de frequência entre dois harmônicos qualquer. No subgrupo de interharmônico não são considerados os passos de frequências adjacentes aos harmônicos.

Figura 2 – Grupos de harmônicos e interharmônicos



IEC 61000-4-7

Figura 3 – Subgrupo de harmônicos e interharmônicos



A IEC 61000-4-7 também define duas classes para a instrumentação. Os instrumentos da Classe I são recomendados para medições de emissões e quando for necessário verificar a conformidade com as normas, a resolução de litígios, etc. Quaisquer dois instrumentos que estejam em conformidade com os requisitos da Classe I, quando conectado aos mesmos sinais, deve produzir resultados dentro da precisão especificada. Os instrumentos Classe II são recomendados para estudos gerais, mas também podem ser usados para as medições de emissões se os valores estão de tal modo que mesmo tendo em conta o aumento da incerteza, os limites não sejam excedidos. Na prática isto significa que os valores determinados devem ser inferiores

a 90% dos limites permitidos. A Tabela 3 mostra as os parâmetros de cada classe de medição. V_m e I_m são os valores medidos de tensão e corrente respectivamente e V_{nom} e I_{nom} são as faixa de tensão nominal e corrente nominal do instrumento de medição (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002).

Tabela 3 – Requisitos de Precisão para Corrente, Tensão e Potência segundo norma 61000-4-7

Classe	Medida	Condições	Erro Máximo
I	Tensão	$V_m > 1\% V_{nom}$	+/- 5% V_m
		$V_m < 1\% V_{nom}$	+/- 0,05% V_m
I	Corrente	$I_m > 3\% I_{nom}$	+/- 5% I_m
		$I_m < 3\% I_{nom}$	+/- 0,15% I_m
I	Potência	$P_m > 150W$	+/- 1% P_m
		$P_m < 150W$	+/- 1,5 W
II	Tensão	$V_m > 3\% V_{nom}$	+/- 5% V_m
		$V_m < 3\% V_{nom}$	+/- 0,15% V_m
II	Corrente	$I_m > 10\% I_{nom}$	+/- 5% I_m
		$I_m < 10\% I_{nom}$	+/- 0,5% I_m

Adaptado de IEC 61000-4-7

A subdivisão 30 trata dos métodos de medição da qualidade da energia elétrica. Esta norma define o desempenho desejado, incluindo o método de medição, a incerteza e faixa de valores dos parâmetros medidos, avaliações dos resultados das medições e como proceder para se fazer a integração ou agregação no tempo para os valores medidos. O objetivo desta norma é tornar idênticos os resultados obtidos por diferentes equipamentos para um mesmo fenômeno eletromagnético (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003; SANTOS, 2011).

A IEC 61000-4-30 aborda os seguintes parâmetros de qualidade da energia elétrica: frequência e magnitude da tensão de alimentação, cintilação (Flicker), afundamentos, elevações e interrupções momentâneas de tensão, tensões transitórias, desequilíbrios de tensão, tensões harmônicas, tensões inter-harmônicas, mudanças rápidas de tensão, medição de desvios superiores e inferiores de parâmetros (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003; SANTOS, 2011).

A norma também classifica as classes de equipamentos de acordo com a aplicabilidade. Em cada uma das classes e nos respectivos parâmetros a norma estabelece critérios para a determinação da incerteza de medição (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003; SANTOS, 2011).

2.1.2 IEEE

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ou IEEE, fundado nos Estados Unidos, possui mais de 430.000 membros em mais de 160 países. O IEEE publica um terço da literatura técnica do mundo em engenharia elétrica, ciência da computação e eletrônica e é líder no desenvolvimento de normas internacionais que sustentam a telecomunicação, a tecnologia da informação e produtos e serviços de geração de energia.

Na área de qualidade da energia destaca-se a IEEE-519/2014 - Recomendação prática e requisitos para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de potência. Essa recomendação estabelece limites para os parâmetros elétricos de tensão e corrente relacionados à qualidade da energia elétrica em regime permanente, onde a aplicabilidade desses limites no sistema ocorre, exclusivamente, em um determinado ponto de acoplamento comum (PAC) ao contrário da IEC 61000-3-2 que estabelece os limites dos equipamentos individualmente (SANTOS, 2011)(MONTEIRO JUNIOR, 2014). Os limites de distorção de tensão para sistemas de 120V a 69 kV são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites de distorção de tensão

Tensão no barramento do PAC	Harmônicos Individuais (%)	Distorção Harmônica Total (%)
V < 1 kV	5,0	8,0
1 < V < 69 kV	3,0	5,0
69 kV < V < 161 kV	1,5	2,5
161 < kV	1,0	1,5

Adaptado de IEEE-519/2014

Para saber os limites de distorção de corrente, utiliza-se a distorção de demanda total (DDT), dada pela equação 2.5

$$DDT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2.5)$$

onde,

- I_h : Corrente referente ao harmônico de ordem h;
- I_L : Corrente de demanda máxima de carga no PAC;

Denominando-se I_{SC} como a corrente de curto-circuito no PAC os limites de distorção para corrente para sistemas de 120 V a 69 kV são dados pela Tabela 5:

Tabela 5 – Limites de distorção de corrente para sistemas de 120V a 69 kV

Distorção harmônica máxima em porcentagem de demanda máxima de corrente de carga (I_L)						
	Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)					
I_{SC}/I_L	$3 < h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h < 50$	DTT
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Adaptado de IEEE-519-2014

Outra publicação do IEEE que merece destaque é a IEEE 1159/2009 - Práticas recomendadas para o monitoramento da qualidade de energia elétrica. Ela engloba o monitoramento das características elétricas de sistemas de energia de corrente alternada monofásicos e polifásicos. Ele inclui descrições consistentes de fenômenos eletromagnéticos conduzidos que ocorrem em sistemas de potência. Esta recomendação descreve as condições nominais e os desvios destas que podem ser originadas dentro do sistema de alimentação ou da carga, ou que podem ser originadas das interações entre a fonte e a carga. Além disso, esta recomendação discute dispositivos de qualidade da energia, de monitoramento, as técnicas de aplicação e a interpretação dos resultados do monitoramento.

2.2 Normas Nacionais Sobre Qualidade da Energia

No Brasil, foi constituído um grupo de qualidade da energia elétrica (GQEE) formado por técnicos e especialistas coordenados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para chegar a um conjunto de normas e procedimentos aplicáveis tanto na rede básica como nas redes de distribuição.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização por reconhecimento da sociedade brasileira desde a sua fundação, em 28 de setembro de 1940, e confirmado pelo governo federal por meio de diversos instrumentos legais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Na área de qualidade da energia ela foi responsável pela elaboração da norma NBR IEC 61000-4-30 - "Compatibilidade Eletromagnética: Parte 4-30 - Técnicas de Medição - Métodos de Medição da Qualidade da Energia Elétrica" baseada na IEC 61000-4-30.

No entanto, a função de regulamentar e controlar a matéria do setor elétrico brasileiro é da ANEEL e do ONS. O ONS é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da ANEEL (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2015).

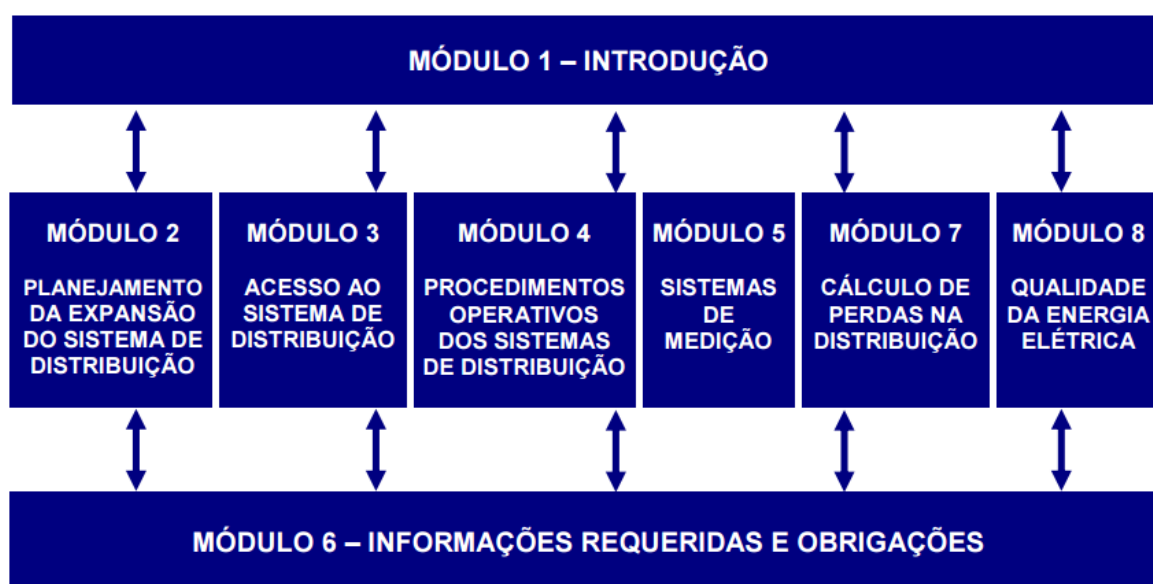
A ANEEL tem como atribuições regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 1997). Em novembro de 2009 a ANEEL publica os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) o qual será detalhado a seguir (SANTOS, 2011).

2.2.1 PRODIST

Os Procedimentos de Distribuição - PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

O PRODIST é composto de seis módulos técnicos, que abrangem as macro-áreas de ações técnicas dos agentes de distribuição, e dois módulos integradores, conforme a Figura 4:

Figura 4 – Composição do PRODIST



Fonte: ANEEL

Neste trabalho será dado o enfoque no Módulo 8 do PRODIST que é específico de Qualidade da Energia. Este módulo tem como objetivo estabelecer os procedi-

mentos relativos à QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade da tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE. Para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016). Nas próximas subseções serão tratadas os indicadores de qualidade do produto. São eles: Tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, flutuação de tensão, Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD) e variação de frequência.

2.2.1.1 Tensão em regime permanente

São estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores individuais e coletivos de conformidade da tensão elétrica, os critérios de medição, de registro e dos prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016). A Tabela 6 exibe faixas de classificação de tensões nos barramentos com tensão inferior a 1kV. A sigla *TL* se refere a tensão de leitura.

Tabela 6 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127 V)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$201 < TL < 231 / 117 < TL < 133$
Precária	$191 < TL < 202$ ou $231 < TL < 233 / 110 < TL < 117$ ou $133 < TL < 135$
Crítica	$TL < 191$ ou $TL > 233 / TL < 110$ ou $TL > 135$

Fonte: ANEEL

2.2.1.2 Fator de Potência

O valor do fator de potência (*fp*) deverá ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (*P*, *Q*) ou das respectivas energias, ativa e reativa (*EA*, *ER*), utilizando-se as seguintes fórmulas:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.6)$$

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (2.7)$$

Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

2.2.1.3 Harmônicos

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. A Tabela 7 sintetiza a terminologia aplicável às formulações do cálculo de valores de referência para as distorções harmônicas de acordo com o módulo 8 do PRODIST.

Tabela 7 – Terminologia Aplicável às Formulações do Cálculo de Valores de Referência para as Distorções Harmônicas.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h_{max}
Ordem harmônica mínima	h_{min}
Tensão fundamental medida	V_1

Fonte: ANEEL

As expressões para o cálculo da DIT_h e da DTT são:

$$DIT_h = 100 \frac{V_h}{V_1} \quad (2.8)$$

$$DTT = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \quad (2.9)$$

Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações. O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere

desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h_{min} = 25$) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

A Tabela 8 apresenta os valores de referência para as distorções harmônicas totais de acordo com a tensão nominal do barramento.

Tabela 8 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão - DTT%
$V_n < 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_n < 13,8\text{ kV}$	8
$13,8\text{ kV} < V_n < 69\text{ kV}$	6
$69\text{ kV} < V_n < 230\text{ kV}$	3

Fonte: ANEEL

Também devem ser obedecidos os valores das distorções harmônicas individuais indicados nas tabelas abaixo. A Tabela 9 refere-se aos níveis de distorção harmônica dos harmônicos ímpares não múltiplos de 3, a Tabela 10 os harmônicos ímpares múltiplos de 3 e a Tabela 11 os harmônicos pares.

Tabela 9 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) - ímpares não múltiplos de 3

Ordem	$V_n < 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n < 13,8\text{ kV}$	$13,8\text{ kV} < V_n < 69\text{ kV}$	$69\text{ kV} < V_n < 230\text{ kV}$
5	7,5	6	4,5	2,5
7	6,5	5	4	2
11	4,5	3,5	3	1,5
13	4	3	2,5	1,5
17	2,5	2	1,5	1
19	2	1,5	1,5	1
23	2	1,5	1,5	1
25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5

Fonte: ANEEL

Tabela 10 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) - ímpares múltiplas de 3

Ordem	$V_n < 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n < 13,8\text{ kV}$	$13,8\text{ kV} < V_n < 69\text{ kV}$	$69\text{ kV} < V_n < 230\text{ kV}$
3	6,5	5	4	2
9	2	1,5	1,5	1
15	1	0,5	0,5	0,5
21	1	0,5	0,5	0,5
>21	1	0,5	0,5	0,5

Tabela 11 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) - Pares

Ordem	$V_n < 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n < 13,8\text{ kV}$	$13,8\text{ kV} < V_n < 69\text{ kV}$	$69\text{ kV} < V_n < 230\text{ kV}$
2	2,5	2	1,5	1
4	1,5	1	1	0,5
6	1	0,5	0,5	0,5
8	1	0,5	0,5	0,5
10	1	0,5	0,5	0,5
12	1	0,5	0,5	0,5
>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL

2.2.1.4 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. O valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 2% (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016). A expressão para o cálculo do desequilíbrio é:

$$FD = 100 \frac{V_-}{V_+} \quad (2.10)$$

onde:

- FD : Fator de Desequilíbrio
- V_- : Magnitude da tensão de seqüência negativa (RMS);
- V_+ : Magnitude da tensão de seqüência positiva (RMS);

2.2.1.5 Flutuação de Tensão

A flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. A determinação da qualidade da tensão de um barramento do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão.

A terminologia e os indicadores das flutuações de tensão são apresentadas na Tabela 12:

Tabela 12 – Terminologia das Flutuações de Tensão

Identificação da Grandeza	Símbolo
Severidade de Curta Duração	<i>Pst</i>
Severidade de Longa Duração	<i>Plt</i>
Valor diário do indicador <i>Pst</i> que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de 24 hs	<i>PstD95%</i>
Valor semanal do indicador <i>Plt</i> que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos.	<i>PltS95%</i>
Fator de Transferência	<i>FT</i>

Fonte: ANEEL

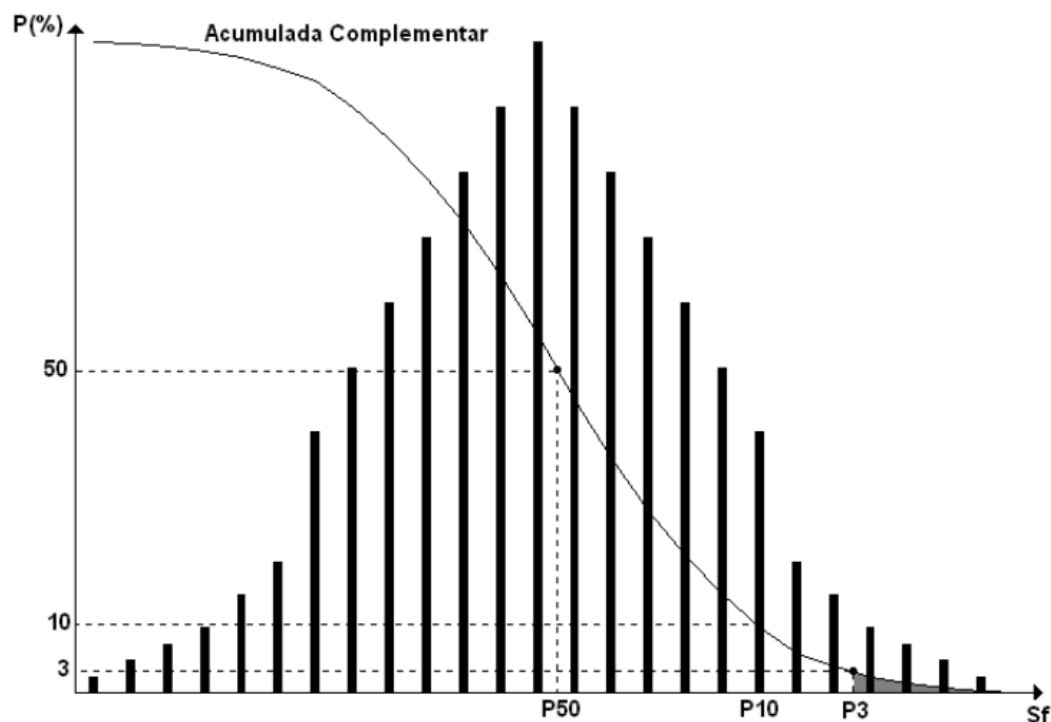
As expressões para o cálculo *Pst* e *Plt* são:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (2.11)$$

onde:

- *Pi*: (*i* = 0,1; 1; 3; 10; 50) corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante *i*% do tempo obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas da IEC (*International Electrotechnical Commission*): IEC 61000-4-15 *Flickermeter* – Functional and Design Specifications. A função de distribuição acumulada complementar é mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação



Fonte: ANEEL

Complementarmente, o indicador P_{lt} corresponde a um valor representativo de doze amostras consecutivas de P_{st} , como estabelecido pela expressão 2.7.:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3} \quad (2.12)$$

Estes valores são derivados da medição e processamento das tensões dos barramentos, traduzidas em níveis de sensação de cintilação luminosa, com posterior classificação em faixas de probabilidade de ocorrência.

De acordo com as orientações das normas, o indicador P_{st} representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos. De modo semelhante, a grandeza P_{lt} expressa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas, através da composição de 12 valores consecutivos de P_{st} . Ao longo de 24 horas de medição deve ser obtido um conjunto de valores de P_{st} que, devidamente tratado, conduzirá ao $P_{stD95\%}$. Ao final de uma semana de medição considera-se como indicador final o maior valor dentre os sete valores encontrados.

De modo análogo, obtém-se ao longo de uma semana de registro um conjunto de valores representativos de P_{lt} , o qual, tratado estatisticamente, deve ser conduzido

ao valor de $PltS95\%$. Os valores de referência estão na Tabela 13:

Tabela 13 – Valores de referência dos indicadores de Flicker

Valor de Referência	PstD95%	PltS95%
Adequado	< 1 p.u. / FT	< 0,8 p.u. / FT
Precário	1 p.u. – 2 p.u. / FT	0.8 – 1.6 p.u. / FT
Crítico	> 2 p.u. / FT	> 1,6 p.u. / FT

Fonte: ANEEL

O FT deve ser calculado pela relação entre o valor do $PltS95\%$ do barramento do sistema de distribuição e o valor do $PltS95\%$ do barramento da tensão secundária de baixa tensão de distribuição eletricamente mais próximo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

2.2.1.6 Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)

Variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016). As variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 14:

Tabela 14 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

Variações de Tensão de Curta Duração		
	Momentânea	Temporária
Interrupção	Valor eficaz menor que 0,1 pu e duração menor que 3 segundos	Valor eficaz menor que 0,1 pu e duração entre 3s e 3 minutos
Afundamento de Tensão	Valor eficaz entre 0,1 pu e 0,9 pu e duração entre 1 ciclo e 3 segundos	Valor eficaz entre 0,1 pu e 0,9 pu e duração entre 3s e 3 min.
Elevação de Tensão	Valor eficaz maior que 1,1 pu e duração entre 1 ciclo e 3 segundos	Valor eficaz maior que 1,1 pu e duração entre 3s e 3 minutos

Variações de Tensão de Curta Duração

Fonte: ANEEL

2.3 Sistemas de Monitoramentos Existentes

Os sistemas de monitoramento comerciais devem seguir as recomendações das normas sobre qualidade da energia. Assim, dois equipamentos diferentes instalados num mesmo sistema devem apresentar os mesmos resultados ou resultados com uma diferença aceitável. Por isso, as normas estabelecem níveis de precisão, formas de medição, ferramentas de cálculos e formas de agregação dos resultados. Seguir as orientações das normas garante a transparência e a confiabilidade das medições.

No mercado existem diversos fabricantes de analisadores de qualidade da energia com diferentes funções, objetivos e preços. Nas próximas seções, serão apresentados alguns hardwares de monitoramento comerciais como o FLUKE, PQUBE e ENA – Elcom Network Analyzer.

2.3.1 Analisador da Qualidade da Energia FLUKE 435 Série II

Este analisador de qualidade da energia possui faixa de medição de tensão de 1 até 1000V com resolução de 0,01V. A faixa de medição de corrente pode variar de 0,5A até 6000A com resolução de 0,1 A. Possui taxa de amostragem de 500 amostras por ciclo (30.000 amostras por segundo) e conversor analógico de 16 *bits*. Realiza medições de diversos parâmetros elétricos de tensão, corrente e potência. Este analisador mede harmônicos até a 50ª ordem e calcula a distorção harmônica total de tensão e corrente de acordo com a norma IEC 61000-4-7. Calcula outros indicadores de qualidade da energia como afundamentos, flutuações de tensão e desequilíbrios de tensão.

Este equipamento atende todos os requisitos previstos no módulo 8 do PRO-DIST, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30 e a recomendação IEEE 519/2014. A Figura 6 apresenta uma foto do medidor Fluke. O medidor Fluke apresenta outras características como:

- Medição da eficiência do inversor de energia: mede simultaneamente a energia de saída CA e a energia de entrada CC para sistemas eletrônicos de energia.
- Captura dados rápidos de valor RMS, exibem meio-ciclo e formas de onda para caracterizar a dinâmica do sistema elétrico (inicializações de gerador, variação de UPS, etc.).

- Calcula perda de energia: Medições clássicas de potência ativa e reativa, desequilíbrio e potência harmônica, são quantificados para identificar os custos fiscais de perdas de energia.
- Possui classificação de segurança mais alta do setor: 600 V CAT IV/1000 V CAT III classificado para uso na entrada da rede elétrica.
- Mede todas as três fases e o neutro: Com quatro sondas de corrente flexíveis inclusas com design avançado fino e flexível para caber nos menores espaços.
- Tendência automática: Toda medida é sempre gravada automaticamente, sem a necessidade de nenhuma configuração.
- Monitora dez parâmetros de qualidade de energia em uma tela de acordo com o padrão EN50160 de qualidade de energia.
- Possui função de registrador (logger): para configurar qualquer condição de teste com memória para até 600 parâmetros em intervalos definidos pelo usuário.
- Visualização de gráficos e geração de relatórios: Com o software de análise fornecido.
- Duração da carga da bateria: Operação contínua de 7 horas para cada carga de bateria Li-ion.

Figura 6 – Analisador da Qualidade da energia FLUKE 435 Série II

Fluke

2.3.2 PQUBE 3

O PQUBE 3 é outra ferramenta muito utilizada para a análise da qualidade da energia. Ele apresenta como vantagens não ter a necessidade de softwares ou licenças. Para utilizar o PQube, o usuário necessita apenas de um editor de texto, browser da web ou um programa como o Excel (QENERGIA, 2016).

O PQube 3 possui uma interface amigável, baixo custo, compacto e realiza automaticamente relatório de qualidade da onda de tensão. Para utilizar o PQube 3 o usuário necessita apenas de ligar o equipamento na rede e este começará a gravar imediatamente. Funciona com ou sem INTERNET: caso tenha rede Ethernet pode utilizar o módulo opcional ETH1 e receber e-mails sempre que ocorrer um evento, bem como procurar os eventos gravados e analisar as tendências. Caso não tenha rede Ethernet, o PQube 3 grava todos os eventos em cartão SD. O PQube 3 inclui um cartão SD de 2GB com o qual é possível gravar até 2 anos de dados. Inclui diversas medidas de qualidade da energia como sobretensões, afundamentos, interrupções, variações de frequência, impulsos de alta frequências, energia ativa, energia aparente e harmônicos (POWER SENSORS LIMITED, 2016).

A frequência de amostragem do PQube 3 é de 512 amostras por ciclo (Analisa

15360 Hz), conversor analógico digital de 16 *bits* e tem uma faixa de medição de 0 até 900 Vac. A resolução da medição atende a norma IEC 61000-4-30 Classe A. Este analisador mede harmônicos até a 50ª ordem e calcula a distorção harmônica total de tensão e corrente de acordo com a norma IEC 61000-4-7 (POWER SENSORS LIMITED, 2016). A Figura 7 exibe a foto do PQube 3.

Figura 7 – Medidor de Qualidade da Energia PQube 3



Power Sensors Limited

2.3.3 ENA – Elcom Network Analyzer

ENA - Elcom Network Analyzer é instrumento de medição modular de qualidade da energia com capacidade de medição e análise de parâmetros da rede de energia elétrica e de qualidade da energia de acordo com normas internacionais válidas IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15, EN 50160, e IEC61000-4- 30. Os produtos ENA são baseados em computadores ou no hardware especial CompactRIO executando o *firmware* do instrumento. A classe de exatidão dos analisadores ENA são totalmente em conformidade com a norma IEC 61000-4-30, classe A. A frequência de amostragem deste sistema é de 9,6 kS/s, o seu conversor analógico digital tem uma resolução de 16 *bits* e memória de 512 MB para gravação de dados.

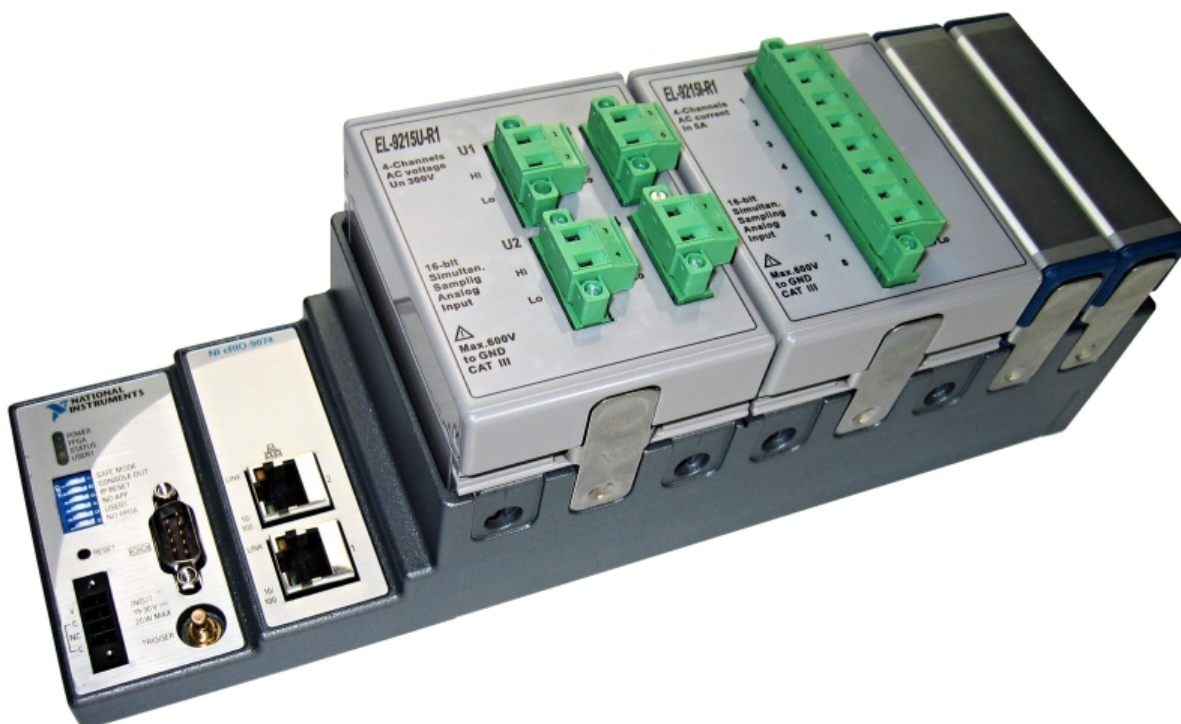
Ele possui as seguintes funcionalidades:

- Análise harmônica a partir da FFT;
- Análise vetorial;
- Análise de fluxo de potência;

- Análise de *Flicker*;
- Análise de tensão de acordo com a norma EM 50160;
- Análise de componentes simétricas do sistema trifásico;
- Análise de impedância do sistema de potência;
- Monitoramento do valor RMS de meio período;
- Gravação de transitório;
- Gravação de distúrbio (armazenagem de meio período)

A Figura 8 apresenta um analisador de qualidade de energia ENA450.EB, construído com o hardware cRIO da National Instruments.

Figura 8 – ENA – Elcom Network Analyzer ENA450.EB



National Instruments, 2016

A Tabela 15 compara especificações técnicas dos três sistemas de monitoramento da qualidade da energia abordado neste capítulo. A resolução do conversor analógico digital dos três sistemas é de 16 *bits* e todos eles atendem as normas IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30.

A faixa de medição é variável de acordo com o uso de acessórios como pinças amperimétricas no caso do FLUKE 425 Série II e do uso de transformadores de corrente e de transformador de potencial no caso do PQube e do ENA ELCOM.

Tabela 15 – Comparação entre os sistemas de monitoramento comerciais existentes

Característica	FlukeF435 Série II	PQube	ENA ELCOM
Frequência de Amostragem	30.000 kS/s	30.720 kS/s	9.600 kS/s
Resolução do conversor analógico-digital	16 <i>bits</i>	16 <i>bits</i>	16 <i>bits</i>
Faixa de medição de tensão	Até 1000 V	Até 900 V	Até 250 V
Faixa de medição de corrente	Até 6000 A	5 A	6A
Memória	Até 32 Gb	Até 2 Gb	512 Mb
Atende a norma IEC 61000-4-7	SIM	SIM	SIM
Atende a norma IEC 61000-4-30	SIM	SIM	SIM

Dados da Pesquisa

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentadas as principais normas internacionais e nacionais sobre a qualidade da energia elétrica. O conhecimento destas normas é importante, pois padronizam métodos de medição e parâmetros de identificação de distúrbios, os quais são utilizados em diversos sistemas de monitoramento comerciais atualmente para a análise harmônica, de variações de tensão de curta duração, *Flicker* e outros problemas relativos ao tema da qualidade da energia.

Foram apresentados também três sistemas de monitoramento comerciais para o leitor conhecer um pouco mais sobre as suas características, especificações, objetivos e métodos de cálculo. O conhecimento apresentado neste capítulo será importante para definir a parametrização da plataforma de monitoramento proposta neste trabalho a ser apresentada no capítulo 4, e os diferenciais desta plataforma em relação aos demais sistemas de monitoramento existentes.

No próximo capítulo serão apresentadas a fundamentação teórica das duas principais ferramentas de cálculo utilizadas para o cálculo de parâmetros relativos à qualidade da energia deste trabalho. São a transformada rápida de Fourier (FFT) e a transformada Wavelet.

3 Ferramentas de Análise da Qualidade de Energia

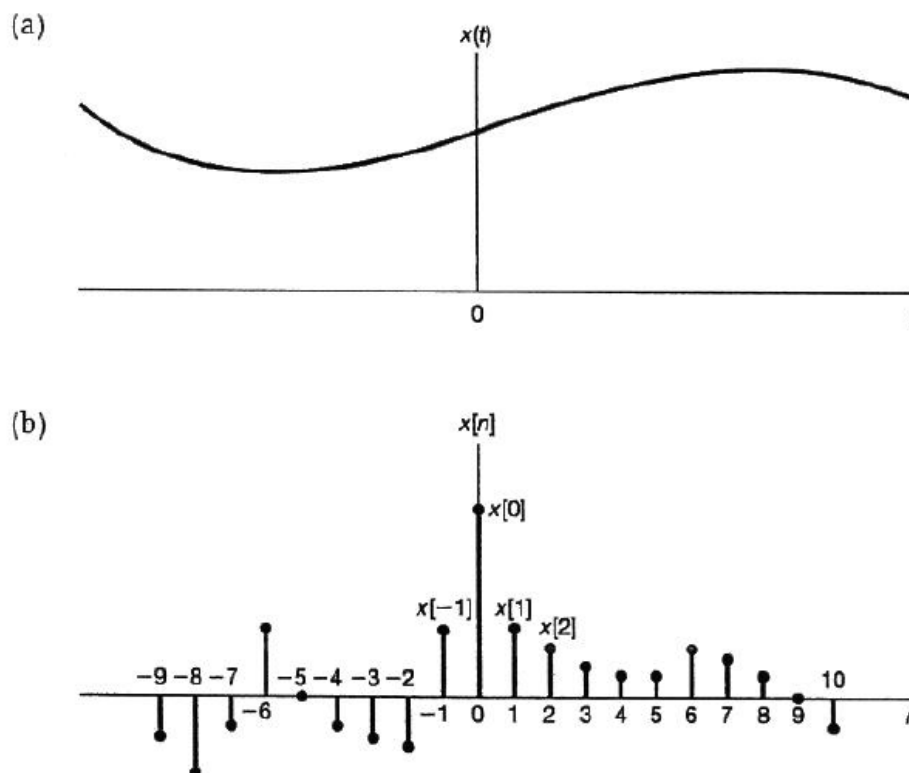
No capítulo 2 foram apresentadas as principais normas referentes à QEE. As normas estabelecem os métodos de medição e os indicadores de qualidade que um sistema elétrico deve ter. Estes indicadores são obtidos através do tratamento dos dados de medição de tensão e corrente, obtendo indicadores, como por exemplo, valor RMS, distorção harmônica total (DHT), fator de desequilíbrio, etc.

A manipulação dos dados de medição é realizada em dispositivos computacionais que tradicionalmente operam com sinais digitais. Entretanto, as variáveis medidas são sinais analógicos. O primeiro passo é a conversão do sinal real analógico em um sinal digital que represente com fidelidade as características do sinal analógico real. Isto é realizado através da correta amostragem do sinal que será abordada na seção 3.1. Para a conversão em indicadores de qualidade são utilizadas neste trabalho duas ferramentas matemáticas: a transformada rápida de Fourier e a transformada Wavelet, que serão descritas na seção 3.2 e 3.3 respectivamente. A transformada de Fourier é uma transformada integral que representa uma função em termos de funções exponenciais complexas. A transformada Fourier é muito utilizada para transformar um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência e assim realizar análises harmônicas. Esta ferramenta está presente em praticamente todos os sistemas de monitoramento da qualidade de energia existentes comercialmente. A transformada Wavelet é uma técnica matemática que começou a ser utilizada mais recentemente e será utilizada para a detecção de variações de tensão de curta duração pois permite detectar variações anormais no sinal com excelente precisão no domínio do tempo.

3.1 Teorema da Amostragem

Os sinais descrevem uma grande variedade de fenômenos físicos. Eles podem ser divididos entre sinais de tempo contínuo e sinais de tempo discreto. Nos sinais de tempo contínuo a variável independente é contínua e sinais de tempo discreto são definidos somente em instantes discretos. A Figura 9, retirada de (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010), mostra a diferença de sinais de tempo contínuo e tempo discreto. Observe que o sinal (a) é definido para todo t , enquanto que o sinal (b) é definido somente para valores inteiros da variável independente.

Figura 9 – Diferença entre sinais de tempo contínuo e tempo discreto



Fonte: Oppenheim, 2010

O teorema da amostragem diz que sob certas condições um sinal de tempo contínuo pode ser completamente representado por seus valores ou amostras uniformemente espaçadas no tempo. O teorema da amostragem é a ponte entre sinais de tempo contínuo e sinais de tempo discreto. Esta ligação entre estas duas classes de sinais é importante pois a maioria dos sinais encontrados na natureza são sinais contínuos. Entretanto, a evolução da tecnologia digital nas últimas décadas resultou em sistemas de tempo discreto de baixo custo, portáteis, programáveis e facilmente reproduzíveis. Portanto, é importante reproduzir um sinal de tempo contínuo em um sistema de tempo discreto (SILVA, 2013)(OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

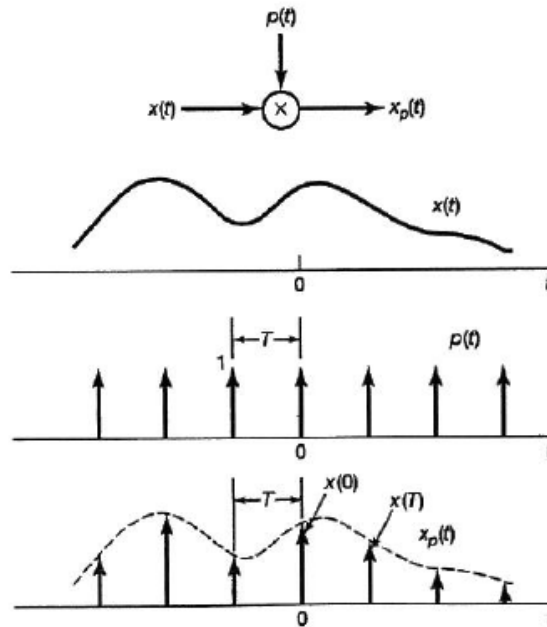
A amostragem é realizada multiplicando um sinal de tempo contínuo por um trem de impulsos periódico. O trem de impulsos periódico $p(t)$ é conhecido como função de amostragem, o período T , como período de amostragem e a frequência fundamental $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$ é a frequência de amostragem. Portanto, um sinal de tempo contínuo $x(t)$ se torna um sinal amostrado $x_p(t)$ conforme mostrado nas equações 3.1, 3.2 e na Figura 10.

$$x_p(t) = x(t)p(t) \quad (3.1)$$

, onde

$$p(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(nT)\delta(t - nT) \quad (3.2)$$

Figura 10 – Amostragem de um sinal contínuo $x(t)$ por um trem de impulsos $p(t)$



Fonte: Oppenheim, 2010

No domínio da frequência temos que:

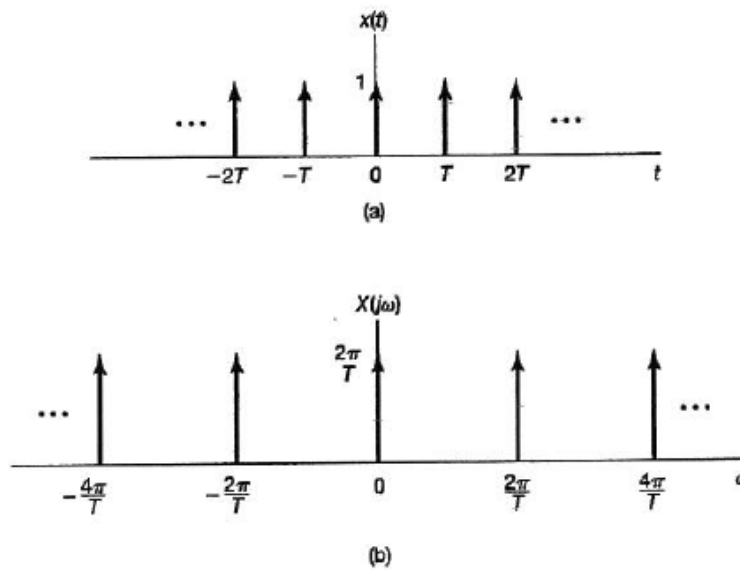
$$X_p(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\theta) Pj(\omega - \theta) d\theta \quad (3.3)$$

o trem de impulsos tem a seguinte representação no domínio da frequência

$$P(j\omega) = \frac{2\pi}{T} \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(\omega - \frac{2k\pi}{T}) \quad (3.4)$$

Assim, a Transformada de Fourier de um trem de impulsos periódicos com período T no domínio do tempo é um trem de impulsos deslocados do período $\frac{2\pi}{T}$ no domínio da frequência conforme mostra Figura 11.

Figura 11 – Trem de impulsos no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b)



Fonte: Oppenheim, 2010

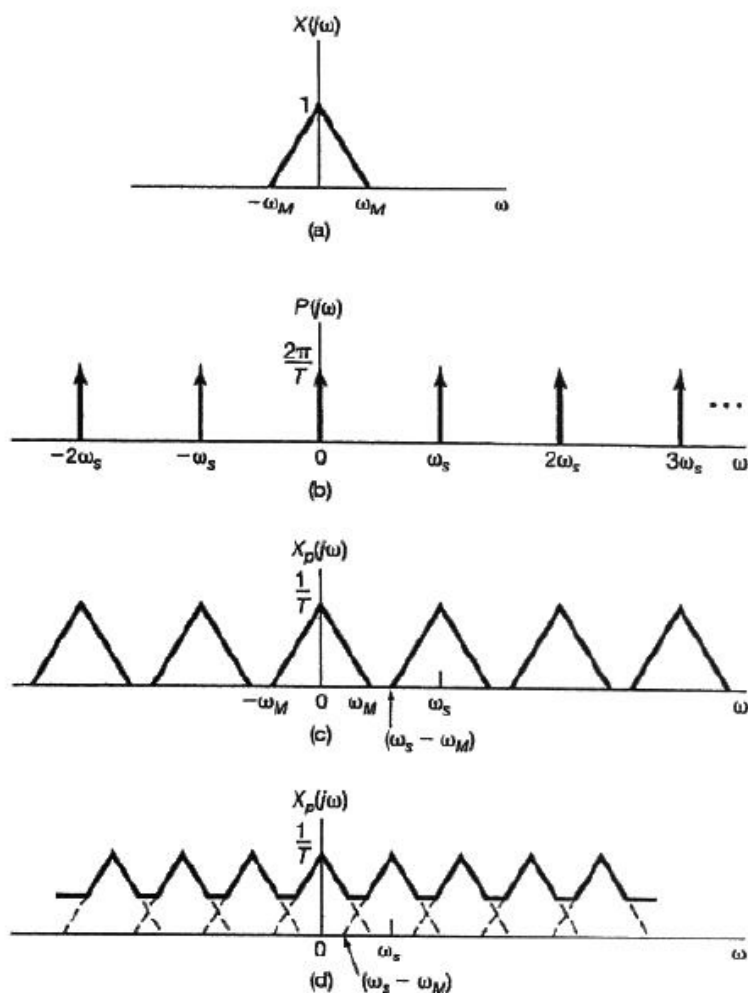
Como a convolução com um impulso simplesmente desloca um sinal, ou seja $[X(j\omega) * \delta(\omega - \omega_0) = X(j(\omega - \omega_0))]$, portanto

$$X_p(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{-\infty}^{\infty} X(j(\omega - k\omega_0)) \quad (3.5)$$

Portanto X_p é uma função de ω periódica que consiste de uma sobreposição de réplicas deslocadas de $X(j\omega)$ multiplicadas por $1/T$.

No entanto deve-se tomar cuidado para que estas réplicas não se sobreponham uma às outras, fenômeno este conhecido como *aliasing*. Para isto não ocorrer, a frequência de amostragem ω_s deve ser superior a duas vezes a maior frequência presente no sinal ω_m . Este é chamado de Teorema de Nyquist. A Figura 12 resume todos os aspectos discutidos nesta seção.

Figura 12 – Efeito no domínio da frequência da amostragem no domínio do tempo: (a) espectro no domínio do tempo, (b) espectro da função de amostragem, (c) espectro do sinal amostrado $\omega_s > 2\omega_m$, (d) espectro do sinal amostrado com $\omega_s < 2\omega_m$



Fonte: Oppenheim, 2010

3.2 A Transformada de Fourier

O trabalho de Fourier tem grande impacto em várias áreas da matemática, ciência e engenharia. O desenvolvimento da análise de Fourier envolveu vários cientistas e diversos fenômenos físicos. A utilização de somas trigonométricas é datada pelo menos da época dos babilônicos que usavam idéias desse tipo para prever eventos astronômicos (OPPENHEIM; WILLISKY, 2010).

A história moderna sobre a análise no domínio da frequência começa em 1748 quando Leonhard Paul Euler examinou o movimento de uma corda vibrante. Euler observou que a configuração de uma corda vibrante em algum ponto no tempo é a mesma configuração em tempo subsequente. Para tal é necessário que a configuração desta corda seja uma combinação linear dos seus modos normais, ou seja é uma

combinação linear das frequências nas quais a corda oscilará. Euler ainda mostrou que com os coeficientes da combinação linear de um determinado tempo, é possível calcular os coeficientes em um tempo posterior. Porém o próprio Euler descartou o uso das séries trigonométricas no estudo de cordas vibrantes (OPPENHEIM; WILLISKY, 2010).

Daniel Bernoulli em 1753 demonstrou com bases na física que todos os movimentos físicos de uma corda poderiam ser representados por uma combinação linear dos modos normais. Porém ele não conseguiu provar este fato matematicamente e suas idéias não foram aceitas. Joseph-Louis Lagrange, em 1759 criticou fortemente o uso das séries trigonométricas no estudo de cordas vibrantes, pois segundo Lagrange é impossível representar sinais com descontinuidades usando séries trigonométricas (OPPENHEIM; WILLISKY, 2010).

Somente meio século depois, Jean Baptiste Joseph Fourier publicou uma obra onde ele observou que séries senoidais harmonicamente relacionadas eram úteis na representação da distribuição de temperatura de um corpo. Além disso ele afirmou que qualquer sinal periódico poderia ser representado por tal série. No entanto, os argumentos matemáticos de Fourier ainda eram imprecisos e só em 1829 Dirichlet conseguiu condições precisas para as idéias de Fourier. Portanto, apesar de Fourier ter a clara percepção do potencial para estas representações de séries ele não contribuiu efetivamente para sua teoria matemática. Fourier também teve o mérito de obter uma representação para sinais aperiódicos; não como somas ponderadas de senoidas harmonicamente relacionadas, mas como integrais ponderadas de senóides que não são todas harmonicamente relacionadas. Esta extensão da série de Fourier é chamada de Transformada de Fourier (OPPENHEIM; WILLISKY, 2010).

Fourier publicou seu trabalho em 1822 no livro intitulado “*Theorie Analytique de la Chaleur*” (Teoria matemática de condução do calor), 15 anos depois de ter seu artigo recusado por Lagrange que mantinha sua convicção das limitações das séries trigonométricas.

Na década de 60 houve uma descoberta importantíssima para a aplicação da transformada de Fourier. Um algoritmo chamado de Transformada Rápida de Fourier ou em inglês “Fast Fourier Transform” (FFT) foi descoberto independentemente por Cooley (COOLEY; LEWIS; WELCH, 1969) e Tukey. Este algoritmo também pode ser encontrado nas anotações de Gauss. A importância deste algoritmo é o fato que ele se mostrou perfeitamente adequado para implementação digital, o que reduziu o esforço para o cálculo das transformadas, permitindo a viabilidade de implementação de muitas idéias utilizando os conceitos do trabalho de Fourier (OPPENHEIM; WILLISKY, 2010).

3.1.1. Definições relacionadas com a análise de frequência

Segundo o trabalho de Fourier, um sinal periódico pode ser descrito por uma soma infinita de senos e cossenos. Embora isto não seja totalmente verdade, uma classe muito ampla de sinais periódicos que são de interesse na prática podem ser representados pela série de Fourier (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010). Portanto têm-se:

$$x(t) = x(t + T_0) \quad (3.6)$$

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)) \quad (3.7)$$

A equação 3.6. é a condição para um determinado sinal ser periódico. O menor T_0 diferente de zero que satisfaz essa condição é chamado de período fundamental de $x(t)$. O sinal $x(t)$ é periódico com período fundamental $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$, onde ω_0 é chamada de frequência fundamental do sinal. A equação 3.7 mostra a decomposição de um sinal em senóides e cossenóides.

Utilizando a relação de Euler, pode-se escrever a equação 3.7 como uma soma de exponenciais complexas:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} \quad (3.8)$$

onde j é o número imaginário $\sqrt{-1}$ e C_n são coeficientes da série de Fourier. Os coeficientes da série podem ser obtidos da seguinte forma:

$$C_n = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (3.9)$$

A equação 3.8 é chamada de equação de síntese e a equação 3.9 de equação de análise. Estas equações eram de conhecimento de Euler e Lagrange desde meados do séculos XVIII, porém eles descartaram esta linha de raciocínio sem analisar o quão vasto seriam os sinais periódicos que poderiam ser assim analisados (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010). Uma das principais razões para o uso da série de Fourier é o fato de que as exponenciais complexas serem autofunções dos sistemas lineares e invariantes do tempo (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

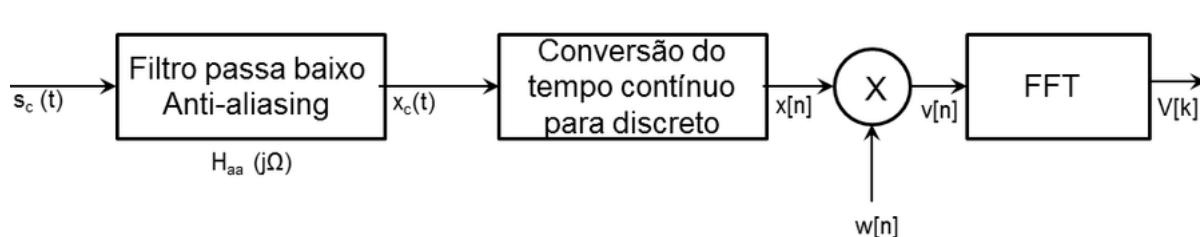
Os coeficientes da série são números complexos que representam a contribuição de cada harmônico na constituição do sinal $x(t)$. O módulo do coeficiente quantifica a intensidade do harmônico e a fase do coeficiente mostra o deslocamento angular necessário até a componente atingir seu valor máximo (SILVA, 2013).

Para sinais aperiódicos o período fundamental tende ao infinito, ou seja, $T_0 \rightarrow \infty$ e portanto a frequência fundamental tende a zero. Portanto, o intervalo entre as

frequências se torna infinitesimalmente próximas e a série de Fourier toma a forma de uma integral. O espectro de coeficientes resultantes nessa representação é chamada de Transformada de Fourier. Na verdade, os próprios sinais periódicos podem ser representados utilizando a Transformada de Fourier, pois consistem em impulsos localizados nas frequências harmônicas e com áreas proporcionais aos coeficientes correspondentes da série de Fourier (SILVA, 2013).

Para a implementação em recursos computacionais é necessário uma versão discreta da Transformada de Fourier. Esta transformada pode ser derivada a partir da contínua através da amostragem e janelamento do tempo, seguido de amostragem na frequência (SILVA, 2013). A Figura 13, retirada de (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998) mostra os passos básicos da aplicação da Transformada Discreta de Fourier em sinais de tempo contínuo.

Figura 13 – Processo para análise de um sinal de tempo contínuo pela Transformada Discreta de Fourier



Fonte: Oppenheim

Um filtro anti-aliasing é utilizado para eliminar ou minimizar os problemas de sobreposição das réplicas no espectro de frequência. Este filtro praticamente elimina todo espectro de frequências do sinal medido que esteja fora da banda de interesse, ou seja, elimina frequências $\omega_m < \omega_s/2$. A Figura 14 (a), (b), (c) revela o espectro do sinal original, espectro do filtro antialiasing e o espectro do sinal após a filtragem $x_c(t)$. Após a filtragem, o sinal é enviado a um conversor analógico-digital (A/D) onde o sinal em tempo contínuo é transformado em uma sequência. Observe que na Figura 14 (c) têm-se pouca informação útil para frequências acima da frequência de corte do filtro. Uma vez que $H_{aa}(j\Omega)$ não pode ser ideal, os componentes de Fourier da entrada da banda de passagem e da banda de transição também serão modificados pela resposta em frequência do filtro. A conversão de $x_c(t)$ para sequências de amostras $x[n]$ é representada no domínio da frequência pela replicação periódica e normalização da frequência conforme explicado na seção 3.1 e mostrado novamente na Figura 14 (d). Finalmente, a sequência $x[n]$ é multiplicada por uma janela de duração finita uma vez que entrada da TFD deve ser uma sequência finita $v[n] = w[n]x[n]$. O efeito no

domínio da frequência é uma convolução

$$V(e^{j\omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X e^{j\theta} W(e^{j(\omega-\theta)}) d\theta \quad (3.10)$$

A Figura 14(e) apresenta a transformada de Fourier de uma janela típica. Existem diversas janelas, cada uma para uma determinada aplicação. A janela retangular por exemplo, é a janela que apresenta lóbulo central mais estreito, porém lóbulos laterais mais altos. A atenuação entre o lóbulo central e os lóbulos laterais é cerca de 13 dB. O uso de outras janelas tem por objetivo atenuar os lóbulos laterais o que causa um efeito colateral de alargar o lóbulo central.

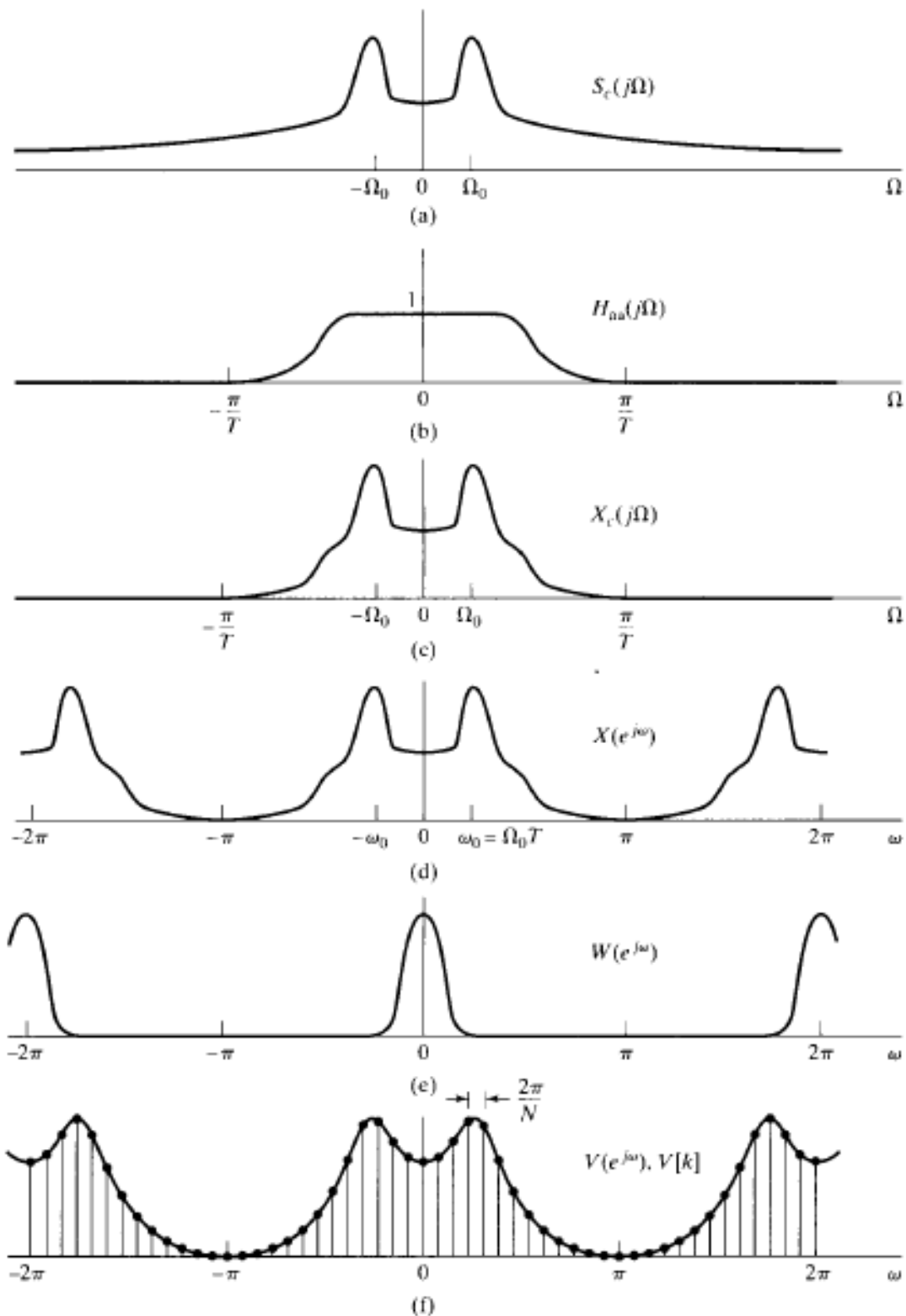
O resultado da operação $v[n] = w[n]x[n]$ é:

$$V[k] = \sum_0^{N-1} v[n] e^{-j(2\pi/N)kn}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.11)$$

$V[k]$ que é a Transformada de Fourier discreta da sequência finita $v[n]$ corresponde a amostras igualmente espaçadas da transformada de Fourier $v[n]$ conforme a Figura 14(f) apresenta. O resultado da convolução de $W(e^{j\omega})$ com $X(e^{j\omega})$ altera o conteúdo espectral original produzindo $V(e^{j\omega})$.

O aumento na duração da janela de observação implica em aumento da resolução na frequência e diminui um efeito conhecido com *leakage* (vazamento) que deforma o espectro do sinal. Entretanto, a implementação direta do cálculo da TDF resulta em aproximadamente N^2 operações complexas, desta forma, aumentar o número de amostras, implica em aumentar bastante o custo computacional. O Algoritmo FFT - Fast Fourier Transform surge como um método de computar a TDF mais rapidamente e com menor custo computacional, realizando cerca de $N \log_2(N)$ operações (SILVA, 2013). Esse algoritmo, em sua formulação básica, exige que o número de amostras N seja uma potência inteira de 2, $N = 2^i$, com $i \geq 10$ por exemplo (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2002).

Figura 14 – Representação da análise de um sinal de tempo contínuo pela TFD: (a) Transformada de Fourier do sinal de entrada de tempo contínuo; (b) Resposta em frequência do filtro anti-aliasing; (c) Transformada de Fourier da saída do filtro anti-aliasing; (d) Transformada de Fourier do sinal amostrado; (e) Transformada de Fourier da janela; (f) Transformada de Fourier do sinal janelado e as amostras de frequências obtidas utilizando a FFT



3.2.1 Parâmetros de Especificação da FFT

Para o correto uso da FFT o usuário deve especificar corretamente os parâmetros da FFT. Os quatro principais parâmetros são: Frequência de amostragem (f_s), número de pontos (N), janela de ponderação utilizada (Wp) e a utilização de *Zero-padding* (Zp).

Conforme mostrado na seção 3.1, o teorema de *Nyquist* exige que a frequência de amostragem seja no mínimo duas vezes a frequência máxima que existe no sinal para não ocorrer o *aliasing*. Dessa forma a frequência de amostragem determina a banda de frequências que pode-se analisar.

O número total de pontos influencia na resolução espectral obtida. Note que:

$$\Delta f = \frac{1}{T_t} = \frac{1}{TN} = \frac{f_s}{N} \quad (3.12)$$

, onde T_t é o tempo total de amostragem

Desta forma um aumento no número de pontos analisados, para um mesma frequência de amostragem, implica em um aumento no tempo total de amostragem e portanto, uma maior resolução espectral.

Quando se utiliza a transformada de Fourier, é necessário extrair um determinado número de amostras do sinal. A maioria dos conversores A/D não fazem amostragem por trem de impulsos; de fato eles utilizam uma estrutura conhecida como amostrador de ordem zero. Esta estrutura retém o valor da amostra anterior até a próxima amostragem.

Um conceito importante que justifica a utilização das janelas de ponderação é a amostragem síncrona e a amostragem assíncrona. Na amostragem síncrona, o sinal utilizado no cálculo da transformada de Fourier contém um número inteiro de ciclos das frequências a serem analisadas. Nesta situação, os pontos calculados coincidem com o máximo do lóbulo central da *sinc* e com os pontos onde ela se anula. Por outro lado, quando a amostragem é assíncrona, não necessariamente é utilizado um número inteiro de ciclos o que resulta num descompasso no resultado da DFT, efeito esse conhecido como vazamento espectral. Neste fenômeno, os lóbulos laterais da *sinc* são interpretados como componentes harmônicas do sinal original.

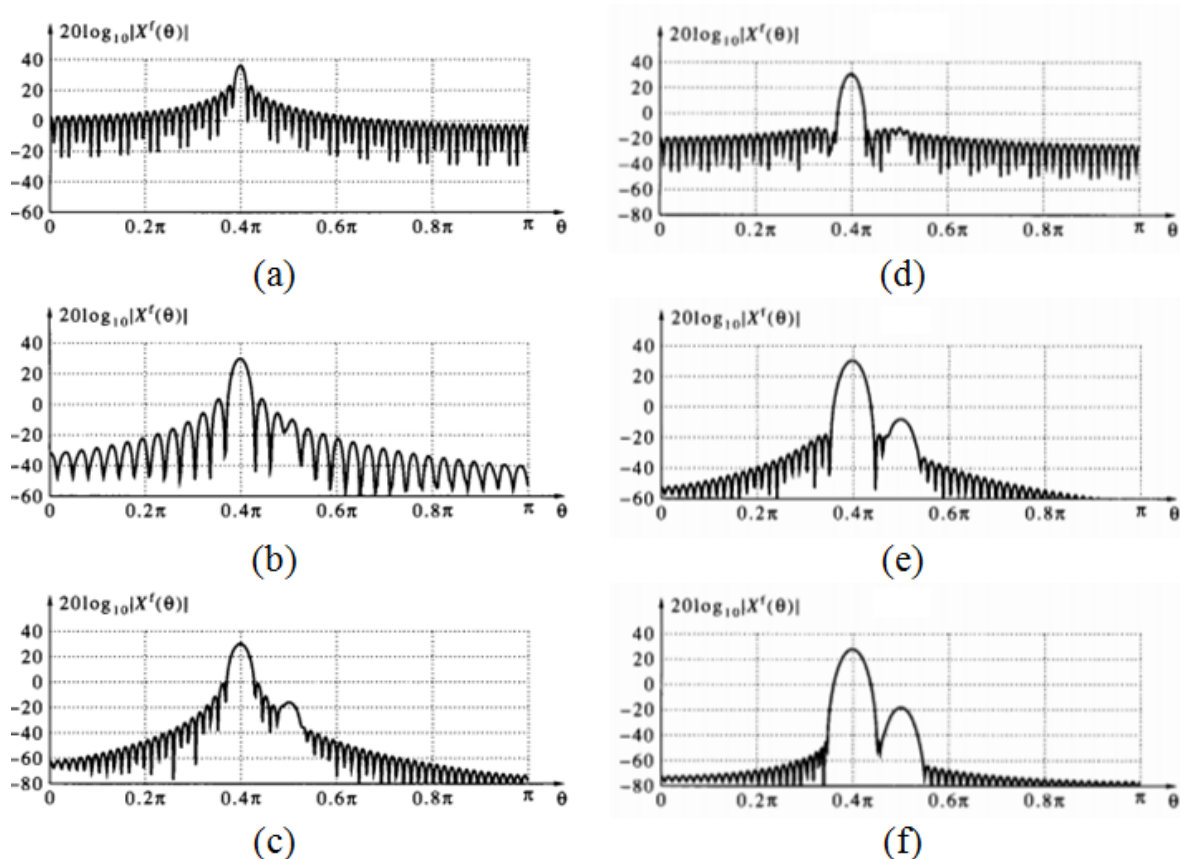
Desta forma, se a amostragem realizada não for síncrona ou se as frequências do sinal original estão muito próximas podem aparecer distorções. Estas distorções resultam da “mistura” do lóbulo central de uma determinada frequência com os lóbulos laterais de outra frequência.

De fato, na maioria das aplicações é utilizada uma janela retangular, ou seja, uma parte do sinal é extraída sem qualquer ponderação. A grande questão é que para

uma janela retangular a diferença entre o lóbulo central e os lóbulos laterais é algo em torno de 13 dB. Nesta situação, uma janela de ponderação é uma função cujo espectro tente a alargar o lóbulo central e abaixar os lóbulos laterais de forma que estes influenciem menos no resultado final.

A Figura 15 retirada de (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998) revela a aplicação de vários tipos de janela em um sinal composto por duas ondas senoidais. Observa-se que na Figura 15 (a) a janela quadrada impede a visualização da segunda componente do sinal. Isto se deve ao fato dos lóbulos laterais da primeira estarem se superpondo ao lóbulo central da segunda. Em seguida foram utilizadas várias topologias de janelas que permitiram de forma melhor ou pior identificar a segunda componente do sinal.

Figura 15 – Aplicação de janelas de ponderação na identificação do conteúdo espectral de um sinal composto por duas ondas senoidais: (a) Janela retangular; (b) Janela de Barlett; (c) Janela de Hann; (d) Janela de Hamming; (e) Janela de Blackman; (f) Janela de Kaiser,



Fonte: Oppenheim

O quarto parâmetro é o *Zero-Padding*. Esta é uma técnica que permite revelar mais pontos da transformada de Fourier sem amostrar um novo conjunto de dados. Isto é feito acrescentando zeros ao sinal janelado. Isto permite aumentar o número

e, portanto melhorar a visualização do espectro e identificar possíveis interações entre os lóbulos centrais de uma *sinc* com os lóbulos laterais de outra. Apesar de melhorar a visualização, esta técnica não melhora a resolução espectral, pois se as duas senóides estão se superpondo esta estratégia não é capaz de separá-las.

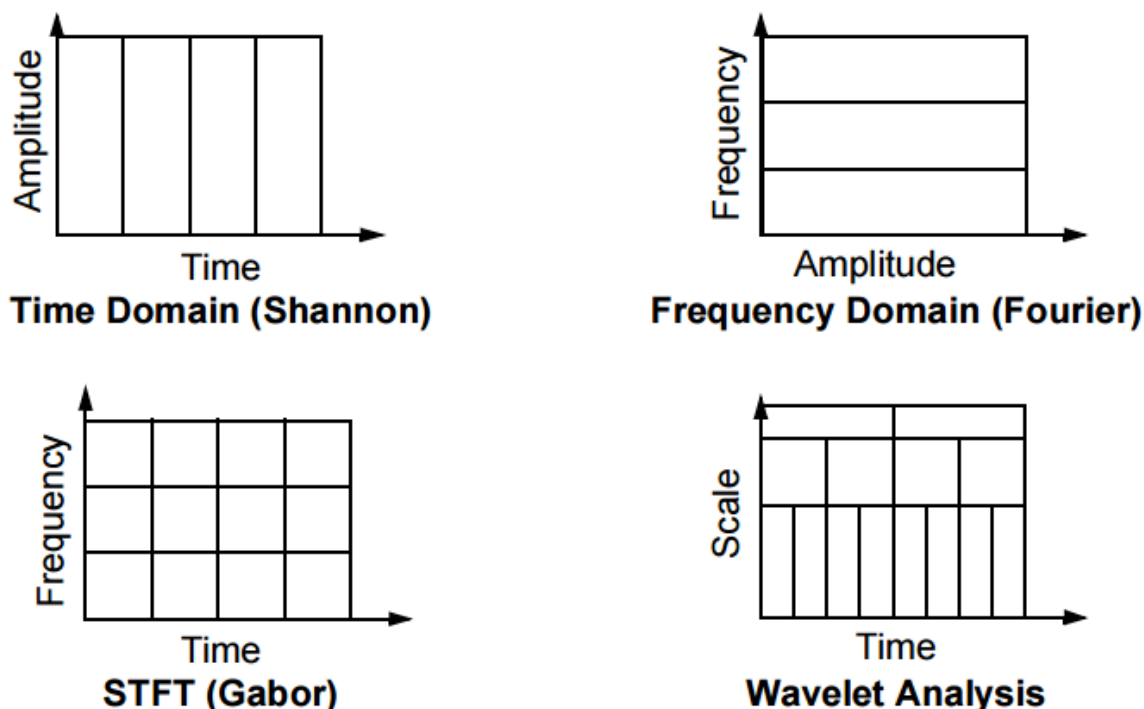
3.3 A Transformada Wavelet

A transformada de Fourier é a ferramenta mais utilizada para a análise de sinais. Ela divide as informações contidas em um sinal em diferentes frequências através de funções de bases senoidais. No entanto, esta técnica perde as informações referentes ao domínio do tempo quando o sinal é transformado para frequência. Quando o sinal não possui variações significativas no domínio do tempo (sinal semi-estacionário), as informações perdidas utilizando a transformada de Fourier não são significativas. No entanto, quando os sinais não são estacionários a transformada de Fourier não é uma ferramenta eficaz (MISITI et al., 1996; ARRUDA, 2003).

Uma tentativa de superar esta deficiência da transformada de Fourier foi descrita por Dennis Garbor em 1946, que adaptou a transformada de Fourier para analisar apenas um pequena porção de tempo do sinal o que originou a Short-Time Fourier Transform (STFT) que faz o mapeamento de um sinal unidimensional em duas dimensões (tempo e frequência). Porém este método tem pouca precisão pois o método utiliza uma janela de dados fixa (MISITI et al., 1996; ARRUDA, 2003).

Neste cenário, surge a Transformada de Wavelet (TW) como uma nova ferramenta para análise de sinais utilizando funções chamadas Wavelet mãe. Ela é uma técnica de janelamento variável que permite informações simultâneas nos domínios do tempo e da frequência. Ela permite o uso de uma janela de tempo maior para analisar as informações de baixa frequência e uma janela menor para informações de alta frequências. A Figura 16 mostra como são fornecidas as informações dos sinais de acordo com cada ferramenta de processamento de sinais (ARRUDA, 2003).

Figura 16 – Diferenças das técnicas de Processamento de Sinais: Domínio do tempo, domínio da frequência (Transformada de Fourier), Transformada de Fourier Janelada e Análise de Wavelet



Fonte: MISITI, 1996

Observe que a análise Wavelet não usa uma região de tempo-frequência, mas sim uma região de tempo-escala.

O tema Wavelet é relativamente novo. O nome Wavelet só foi dado na década de 80 (DAUBECHIES, 1992). O tema Wavelet surgiu pela primeira vez no início do século XX, mais precisamente em 1909 quando o matemático húngaro Alfred Haar publicou no apêndice de sua tese de doutorado um estudo sobre o tema de análise escalonada (ARAÚJO, 2007).

As wavelets de Haar, embora de suporte compacto (anulam-se completamente fora de um intervalo finito de tempo) não são diferenciáveis (ARAÚJO, 2007). As Wavelets de Haar ficaram no anonimato por muitos anos até que nos anos 30, vários grupos trabalhando independentemente, pesquisaram a representação de funções usando uma base com escala variável. Naquela ocasião, usando a base de Haar, Paul Levy mostrou que estas funções sendo usadas como base, ofereciam melhores resultados quando comparados com os resultados obtidos com a utilização das funções bases de Fourier no estudo dos pequenos e complicados detalhes do movimento Browniano (ARRUDA, 2003).

Por muitos anos, a Wavelet de Haar foi a única única base ortonormal de wave-

lets conhecida. No início da década de 80, Alex Grossman e Jean Morlet introduziram as wavelets tal e qual são conhecidas atualmente. Yves Meyer construiu umas das primeiras wavelets não triviais e suaves, ou seja, continuamente diferenciáveis embora não fossem de suporte compacto. Somente em 1985, Stephane Mallat deu as wavelets um grande impulso ao ligar a teoria de wavelets em seu trabalho de processamento digital de imagens e, inspirado nos resultados Yves Meyer utilizou suas wavelets para verificar o incremento de detalhes em uma imagem. Ele desejava sair de uma imagem grosseira até uma imagem de maior resolução. Esta técnica é denominada de Análise Multiresolução (AMR) (LIMA, 2003)(ARAÚJO, 2007).

Na década de 90, Ingrid Daubechies construiu o arcabouço de wavelets de suporte compacto mais utilizado atualmente (DAUBECHIES, 1992; ARAÚJO, 2007; LIMA, 2003; ARRUDA, 2003).

As aplicações da transformada Wavelet para análise da qualidade da energia elétrica são inúmeras. Destaca-se o trabalho de (SANTOSO et al., 1996) que utilizou a transformada Wavelet e a análise multiresolução para decompor um sinal distorcido em outros sinais que representem o conteúdo de baixas frequências (aproximação) e o conteúdo de altas frequências (detalhes).

(L.ANGRISANI; M.D'APUZZO; A.TESTA, 1998) combinou uso da transformada Wavelet contínua com a análise multiresolução para detectar distúrbios da qualidade de energia elétrica. A detecção é realizada através da família de wavelets Morlet e da técnica de análise multiresolução para extrair a componente fundamental. Assim, os distúrbios podem ser detectados, localizados e estimados, mesmo com a presença de ruídos.

(KOPPARAPU; CHANDRASEKARAN, 1998) utilizou a família de wavelets Daubechies com análise multiresolução para a detecção de problemas em um sistema elétrico de potência. Para a análise dos casos de chaveamento e transitórios impulsivos foram utilizados o 1º e o 2º nível de decomposição via análise multiresolução para detecção dos mesmos. Para as variações de tensão de curta duração e ruídos, o sinal foi decomposto em mais níveis para a análise mais precisas destes eventos. Após a detecção, calcula-se o valor RMS e a curva de desvio padrão em cada nível do sinal em análise, de modo que estes podem ser utilizados como parâmetros para a classificação dos distúrbios.

No Brasil, destacam-se os trabalhos de (ARRUDA, 2003) e (RODRIGUES, 2008) que propuseram um algoritmo desenvolvido no software Matlab que detecta e localiza os distúrbios utilizando a transformada Wavelet discreta e a análise multiresolução com a família de wavelets Daubechies de ordem 4. Após a detecção e localização dos distúrbios, o sinal é classificado de acordo com o valor RMS exibindo um relatório final ao usuário.

3.3.1 Transformada Wavelet Contínua

Wavelets significam ondas pequenas. A wavelet é uma forma de onda de duração limitada que tem uma média nula. Comparando as wavelets com as ondas senoidais, que são a base da análise de Fourier, as senóides não têm duração limitada, são suaves e previsíveis enquanto que as wavelets tendem a serem irregulares e assimétricas (MISITI et al., 1996).

A Transformada Wavelet pode ser vista como um mecanismo para decompor sinais, permitindo analisar os dados em diferentes domínios de frequências com a resolução de cada componente amarrada à sua escala. O princípio mais geral na construção das wavelets é o uso de dilatações e translações. Esta é a razão pela qual elas podem distinguir as características locais de um sinal em diferentes escalas e, por translações, elas cobrem toda a região na qual o sinal é estudado. Na análise de sinais não-estacionários, a propriedade de localização das wavelets nos mostra suas vantagens sobre a transformada de Fourier (LIMA, 2003).

A família das funções ψ denominadas de Wavelets mãe, com escalas variáveis, são obtidas pela fixação de $p > 0$, chamado de fator de normalização e para todo $a \in \mathfrak{R}$ e $a \neq 0$:

$$\psi_a(t) = |a|^{-p} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \quad (3.13)$$

Para pequenas escalas (pequenos valores de a), $\Psi_a(x)$ possui alta freqüência, e para grandes valores de a , $\Psi_a(x)$ possui baixa freqüência. Com o objetivo de localizar no tempo as funções $\Psi_a(x)$ introduz o fator $b \in \mathfrak{R}$.

$$\psi_{a,b}(t) = \psi_{a,b}(t-b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.14)$$

Condições para que Ψ seja uma wavelet mãe é que esta deve possuir média zero, decair a zero e pertencer ao espaço que contenha todas as funções com energia finita (ARRUDA, 2003). As funções wavelets $\Psi_{a,b}(t)$ são definidas da seguinte forma:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.15)$$

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

A variável t pode corresponder a tempo ou espaço, geradas a partir das operações de dilatação (fator de escala a) e translação (fator b) da mesma função ψ de-

nomizada de wavelet mãe. A partir de uma wavelet mãe $\psi(t)$, e utilizando estas duas operações, gera-se uma família de wavelets.

Assim como na Transformada de Fourier, existem duas formas da Transformada Wavelet: a Transformada Wavelet Contínua (TWC) e a Transformada Wavelet Discreta (TWD).

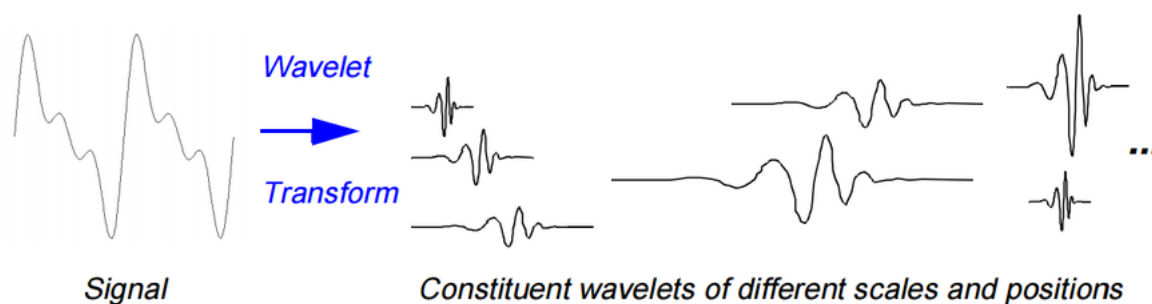
A TWC de um sinal $f(x)$ considerando a Wavelet mãe $\Psi(x)$ é definida como:

$$TWC(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (3.16)$$

dx

Na equação 3.16 observe que o sinal unidimensional $f(x)$ é decomposto em uma nova função em um espaço bidimensional em escala a e translação pela transformada Wavelet. O coeficiente TWC (a,b) representa o quão bom corresponde o sinal original com a wavelet mãe. Multiplicando cada coeficiente pela wavelet mãe adequada, se reconstrói o sinal original (MISITI et al., 1996). A Figura 17 mostra a decomposição de um sinal em diferentes wavelets com diferentes escalas e posições.

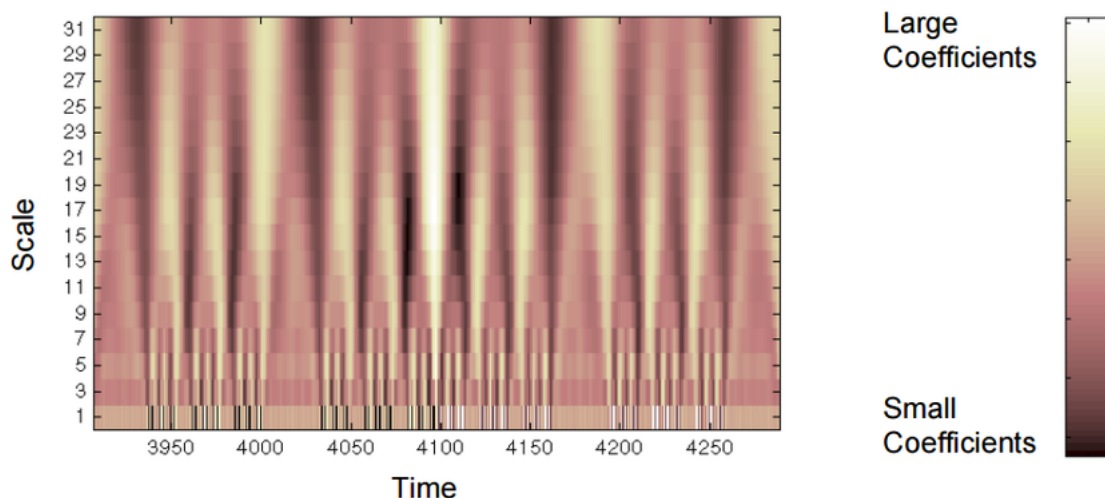
Figura 17 – Decomposição do sinal em wavelets com diferentes escalas e posições



MISITI, M., MISITI, Y., OPPENHEIM, G. and POGGI,

O resultado da Transformada Wavelet contínua é mostrado na Figura 18. Você terá os coeficientes produzidos em diferentes escalas de diferentes seções do sinal. O eixo x representa a posição ao longo do sinal (tempo), o eixo dos y representa a escala, e a cor em cada ponto XY representa a magnitude do coeficiente de wavelet C . Estas são as parcelas de coeficientes gerado pela as ferramentas gráficas (MISITI et al., 1996).

Figura 18 – Resultado da Transformada Wavelet Contínua de um determinado sinal



Fonte: .(Michel Misiti et al., 1996)

A TWC então apresenta uma relação de tempo-escala ao contrário da análise de Fourier que apresenta uma análise de tempo-frequência. É importante compreender que o fato de que a análise wavelet não produzir uma visão em tempo-frequência de um sinal não é uma fraqueza, mas uma força da técnica. Não é só uma maneira diferente de ver os dados, é uma forma muito natural para visualizar dados provenientes de um grande número de fenômenos naturais (MISITI et al., 1996).

Note que as escalas dos coeficientes plotados (como rótulos para o eixo y) são executado a partir de 1 a 31. Lembre-se que as escalas mais altas correspondem as ondas “esticadas”. Quanto mais esticada a wavelet, maior é a parte do sinal que ela está sendo comparada, e, assim, mais “grosseiras” as características do sinal a ser medido pelos coeficientes wavelet. Assim, existe uma correspondência entre escalas wavelet e frequência como revelada pela análise wavelet:

- Baixa escala $a \Rightarrow$ wavelet comprimida \Rightarrow wavelet rapidamente mudando detalhes \Rightarrow altas frequências .
- Alta escala $a \Rightarrow$ wavelet esticada \Rightarrow wavelet mudando lentamente, características grosseiras \Rightarrow baixas frequências.

3.3.2 Transformada Wavelet Discreta e Análise Multiresolução

Para se obter a Transformada Wavelet Discreta (TWD), os valores a (fator de escala) e b (fator de translação) devem ser discretos. Portanto deve se discretizar os parâmetros a e b . Como a largura da Wavelet muda com a mudança da escala, precisa-se correlacionar as discretizações dos fatores a e b . Para se obter a correta

relação entre o fator de escala e a discretização no tempo, deve se observar uma importante propriedade das Wavelets que é a invariância sob mudança de escala (fator a). Isto significa que ao mudar a escala da função f e ao mesmo tempo, mudar a escala do espaço de variação da função pelo mesmo fator, a forma da Wavelets não muda (ARRUDA, 2003). Assim:

$$f_{a_0}(x) = (a_0)^{-\frac{1}{2}} f\left(\frac{x}{a_0}\right) \quad (3.17)$$

$$TWC_{(a_0 a, a_0 b)}(f) = TWC_{(a, b)}(f) \quad (3.18)$$

Com essa propriedade a TWD pode ser escrita da seguinte forma:

$$TWD_{m, n} = |a_0^m|^{-\frac{1}{2}} \sum f(n) \psi\left(\frac{x - n_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (3.19)$$

onde ψ é a wavelet mãe e os parâmetros a e b relativos a função da TWC, são funções dos parâmetros inteiros m e n ($a = a_0^m$) e $b = n b_0 a_0^m$

a_0 é o passo de dilatação e

b_0 é o fator de translação.

Uma maneira eficiente de implementar a TWD usando filtros foi desenvolvida em 1988 por Mallat. O algoritmo Mallat é na verdade um esquema clássico conhecida na comunidade de processamento de sinal tal como um codificador de sub-banda de dois canais. Este algoritmo de filtragem muito prática produz uma ‘Transformada Wavelet Rápida’ (MISITI et al., 1996).

Este algoritmo decompõe em diversas escalas um sinal $x[n]$ discreto como uma combinação linear de funções ortogonais finitas, chamadas de Escala (ϕ) e Wavelet (ψ), conforma apresenta a equação 3.20. (RODRIGUES, 2008).

$$x[n] = \sum_{k=0}^{\frac{n}{2^j}-1} R_{j,k}[n] \phi_{j,k}[n] + \sum_{t=1}^j \sum_{k=0}^{\frac{n}{2^j}-1} S_{t,k}[n] \psi_{t,k}[n] \quad (3.20)$$

, sendo

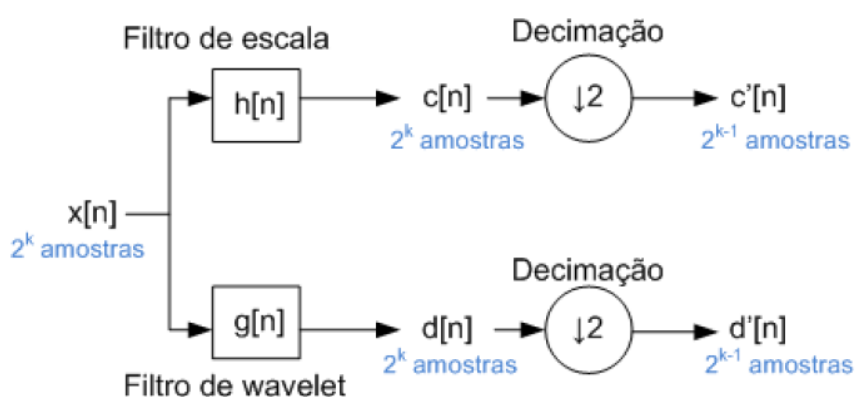
$$\phi[n] = \sum_k h[k] \phi(2n - k) \quad (3.21)$$

$$\psi[n] = \sum_k g[k] \phi(2n - k) \quad (3.22)$$

onde j é o nível de decomposição, n é o n -ésimo componente do sinal $x[n]$, k é o k -ésimo elemento dos filtros, $h[k]$ filtros passa-baixa, $g[k]$ filtro passa-alta que formam um par de QMF (Quadrature Mirror Filter). $R_{j,k}$ e $S_{j,k}$ são os produtos escalares da função x com as funções de escala (ϕ) e wavelet (ψ) respectivamente.

Assim, o procedimento de cálculo da TWD se inicia com a definição da função de escala, os filtros de escala e wavelets associados. Um sinal $x[n]$ com N amostras, sendo $N = 2^k$ amostras (com $k \in \mathfrak{R}$) e cujo o espectro de frequências é limitado em frequências a f_b Hz obtido com um frequência de amostragem f_s Hz ao ser submetido ao processo de filtragem resultará em dois novos sinais $c[n]$ e $d[n]$ chamados de aproximação e detalhes respectivamente. O sinal $c[n]$ será limitado em faixa a $\frac{f_b}{2}$ Hz enquanto $d[n]$ terá o espectro limitado ao intervalo $[\frac{f_b}{2}, f_b]$. Como $c[n]$ e $d[n]$ apresentaram largura de banda igual à metade da largura de banda de $x[n]$, eles podem ser amostrados a uma frequência igual a $\frac{f_s}{2}$, ou seja pode-se dobrar o período de amostragem. Como o tamanho da janela de observação temporal é fixo, o efeito de dobrar o período de amostragem pode ser obtido dizimando o sinal (retirando metade de suas amostras). Como a dizimação resulta na redução da frequência de amostragem, pode-se dizer que alterou-se a escala de representação do sinal (SILVA, 2013). A Figura 19 retirada de (SILVA, 2013) apresenta o processo descrito neste parágrafo.

Figura 19 – Processo de filtragem e dizimação na Transformada de Wavelets Discreta



Fonte: SILVA, 2013

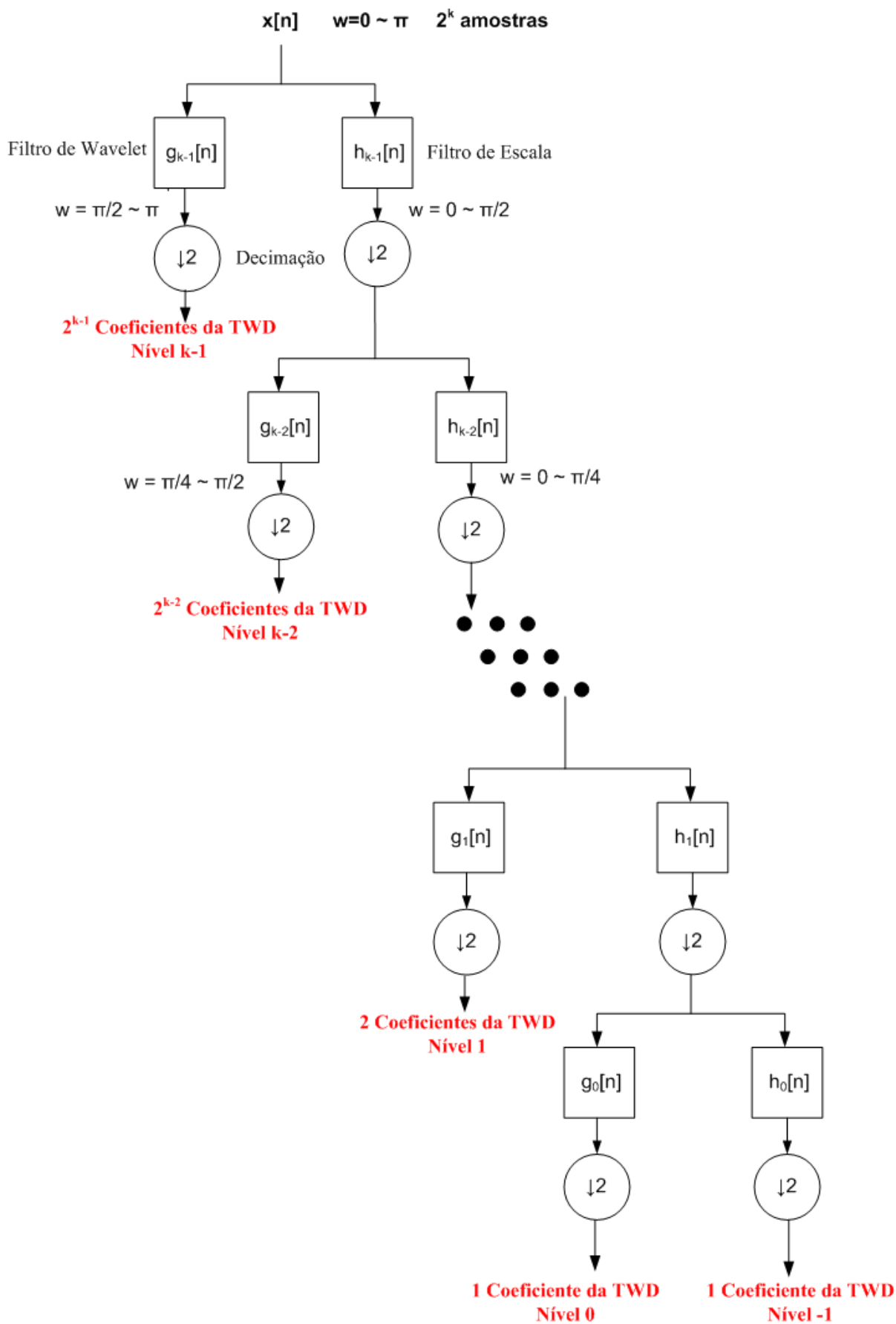
O resultado da primeira filtragem corresponde ao nível $k-1$, o resultado da segunda, ao nível $k-2$ e assim sucessivamente. Na última filtragem, existirão dois coeficientes: um que é resultado da filtragem pelo filtro de escala e um que resulta da filtragem pelo filtro de wavelets. O primeiro representa a média do sinal e alguns autores o tratam como coeficiente do nível -1 . Enquanto que o segundo é tratado como coeficiente do nível 0 . A cada novo nível, o sinal resultante da filtragem pelo filtro de escala é novamente filtrado e em seguida decimado, gerando novos coeficientes (SILVA, 2013).

A Transformada de Wavelet Discreta do sinal é obtida concatenando todos os coeficientes obtidos, iniciando do nível $k-1$ até os níveis 0 e -1 . O sinal transformado apresenta o mesmo número de coeficientes (amostras) que o sinal original. O resultado da Transformada de Wavelets Discreta é mostrado na equação 3.23, onde d_k representa os coeficientes do nível k e c_0 representa o coeficiente do nível -1 (SILVA, 2013).

$$TWD(x) = [d_{k-1}|d_{k-2}|d_{k-3}|\dots|d_1|d_0|c_0] \quad (3.23)$$

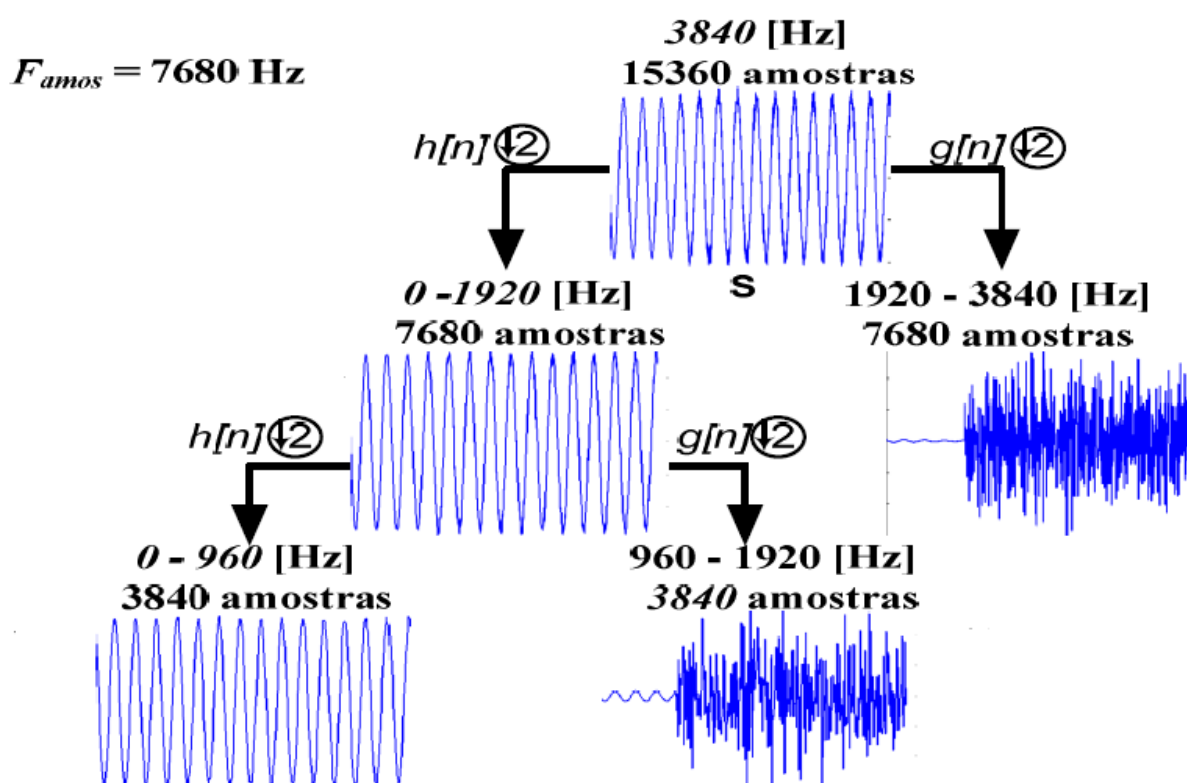
A Figura 20 retirada de (SILVA, 2013) mostra o cálculo da TWD para k níveis de decomposição.

Figura 20 – Cálculo da TWD



A Figura 21 retirada de (RODRIGUES, 2008) mostra o exemplo da TWD em um sinal elétrico. No nível k-1 observa-se uma atenuação dos ruídos na versão de aproximação em comparação ao sinal original. Estes ruídos estão na versão de detalhes do nível k-1. No nível k-2 a atenuação dos ruídos é maior e assim por diante. Observe a redução de amostras de cada janela em cada etapa do cálculo evidenciando a análise multiresolução.

Figura 21 – Exemplo de TWD em um sinal de sistema de energia



Fonte: RODRIGUES, 2008

3.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou as ferramentas de processamento de sinais que foram utilizadas na modelagem da plataforma de monitoramento proposta neste trabalho. Primeiramente, foi apresentado o teorema de amostragem que é a técnica de conversão de um sinal analógico real em um sinal digital. O teorema de amostragem garante que o sinal digital represente com fidelidade as características do sinal analógico real. Esta conversão é importante, pois com sinais digitais é possível realizar cálculos computacionais com extrema rapidez e sem interferência das condições ambientais, ao contrário do que acontece com os sinais analógicos.

Após apresentar os cuidados com a amostragem de sinais, o Capítulo 3 apresentou a primeira ferramenta de processamento de sinais utilizada neste trabalho: a

transformada de Fourier. A transformada de Fourier é uma ferramenta muito utilizada para análises da qualidade da energia, principalmente de distorções harmônicas. Ao representar um sinal por seu espectro de frequências, a transformada de Fourier permite ao usuário analisar o sinal por outra perspectiva. A transformada de Fourier é a técnica recomendada na norma IEC 61000-4-7 de análise harmônica e está presente em praticamente todos os dispositivos de monitoramento da qualidade da energia existentes no mercado.

A segunda técnica apresentada neste capítulo é a transformada Wavelet. A transformada Wavelet é uma ferramenta complementar a transformada de Fourier que permite obter informações simultâneas de tempo e frequência de um sinal. Graças a esta característica, esta ferramenta será utilizada para a detecção e localização das variações de tensão de curta duração. Assim, estas duas ferramentas fornecem um diagnóstico sobre indicadores de qualidade da energia referente a dois problemas bem comuns de qualidade da energia: distorções harmônicas e variações de tensão de curta duração.

No Capítulo 4 será apresentada a plataforma de monitoramento elaborada neste trabalho. Serão apresentadas as características da plataforma de monitoramento de alto desempenho, o hardware escolhido para o desenvolvimento da plataforma e os algoritmos dos programas desenvolvidos.

4 A Plataforma de Monitoramento

No Capítulo 3, apresentou-se uma descrição da Transformada de Fourier e da Transformada Wavelet, que foram as ferramentas adotadas para a construção da plataforma de alto desempenho proposta. A característica de alto desempenho dada a esta plataforma se refere aos seguintes aspectos:

- Aquisição de dados com resolução do conversor de 24 *bits*;
- Processamento dos dados com confiabilidade e rapidez, sem a perda de qualquer amostra;
- Detecção em tempo real de variações de tensão de curta duração; de violações de distorção harmônica de tensão e de limites de harmônicos individuais de corrente;
- Detecção em tempo real de desequilíbrio de tensão;
- Gravação contínua das amostras do sinal durante todo o período de monitoramento para posterior análise.

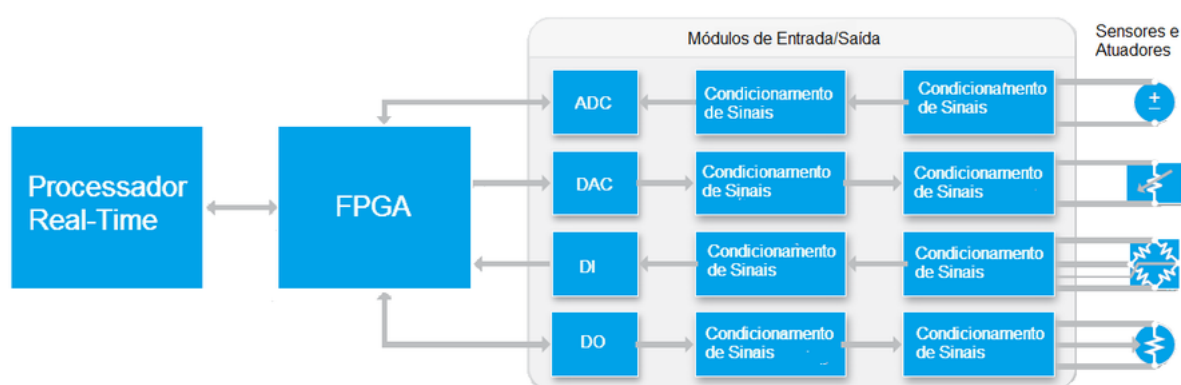
Para alcançar os objetivos do monitoramento, o hardware escolhido foi a plataforma cRIO da National Instruments (NI). Esta plataforma trabalha em conjunto com o ambiente de desenvolvimento gráfico NI LabVIEW, e proporciona a capacidade de criar sistemas embarcados de controle e monitoramento com excelente produtividade (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016). As principais características deste hardware são:

- **Controle avançado:** Permite desenvolver diversos tipos de sistemas de controle, desde um simples controle proporcional-integral-derivativo (PID) a controles dinâmicos avançados (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016);
- **Medições analógicas com elevada taxa de aquisição:** taxas de amostragem de até 100 kHz (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016);
- **Processamento e análise de sinais:** Possui poderosas ferramentas para executar facilmente o processamento avançado de sinais, análise de frequência e processamento digital de sinais. Alguns exemplos são a transformada rápida de Fourier (FFT), análise em tempo-frequência, som e vibração, análise de wavelets, ajuste de curvas, e o projeto e simulação de controle (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016);

- **Hardware robusto e confiável:** O CompactRIO é especialmente projetado para aplicações em ambientes agressivos e lugares de difícil acesso. Conta com certificações industriais para condições extremas e valores nominais de operação para ambientes industriais severos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016);
- **Plataforma de prototipagem modular e flexível:** O CompactRIO tem diversas controladoras, chassis reconfiguráveis e módulos de E/S da série C com troca a quente da National Instruments, que lhe dão a flexibilidade necessária para ir do protótipo à implementação em uma mesma plataforma (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

A Figura 22 resume o sistema integrado da NI. Os módulos de medição são compostos por terminais de entrada ou saída, sistema de condicionamento de sinais e conversores digitais/analógicos ou analógicos/digitais. Os terminais de entrada ou saída destes módulos de medição são ligados ao chip FPGA para os cálculos dos loops de alta prioridade. Os resultados destes cálculos são transferidos para o processador Real-Time através de um barramento de alta velocidade.

Figura 22 – Sistema integrado NI cRIO



Fonte: National Instruments

Por todas as características citadas acima, a plataforma cRIO se mostrou um hardware adequado para atingir os objetivos deste trabalho. Nas seções seguintes, segue a descrição detalhada da controladora utilizada, além dos módulos de medição de tensão e corrente utilizados.

4.1 A controladora NI Compact RIO 9075 (NI cRIO-9075)

O sistema integrado NI cRIO-9075 combina um processador de tempo real e um FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) reconfigurável em um único chassis para aplicações embarcadas de controle e monitoramento de máquinas. Esse sistema possui um processador industrial de tempo-real de 400 MHz e um FPGA LX25 integrados,

além de quatro *slots* para módulos de E/S da série C. Quando a aplicação exigir maior robustez, ele oferece uma faixa de temperatura de operação de -20 a 55 °C, com alimentação na faixa de 9 a 30 Vcc. O cRIO-9075 possui 128 MB de DRAM para operação embarcada e 256 MB de memória não volátil para *data logging*. Com a porta Ethernet de 10/100 Mbit/s, é possível estabelecer comunicação programada por software pela rede. Além disso, os servidores de arquivos (FTP) e Web (HTTP) integrados permitem o interfaceamento com páginas HTML, arquivos e a interface de usuário de aplicações LabVIEW embarcadas. A Figura 23 é uma foto dessa controladora.

Figura 23 – Chassis Compact Rio 9075



National Instruments

4.1.1 Processador Real Time

O sistema embarcado CompactRIO possui um processador industrial de 400MHz Freescale MP5200 que deterministicamente executa sua aplicação do LabVIEW Real-Time no confiável sistema operacional real-time (RTOS) Wind River VxWorks. O LabVIEW tem funções internas para transferir dados entre o FPGA e o processador de tempo real dentro do sistema embarcado CompactRIO. Existem mais de 600 funções internas no LabVIEW para montar algum sistema embarcado de múltiplas tarefas para controle, análise, data logging e comunicação de tempo real. Também é possível integrar códigos C/C++ existente com o código LabVIEW Real-Time para ganhar tempo de desenvolvimento.

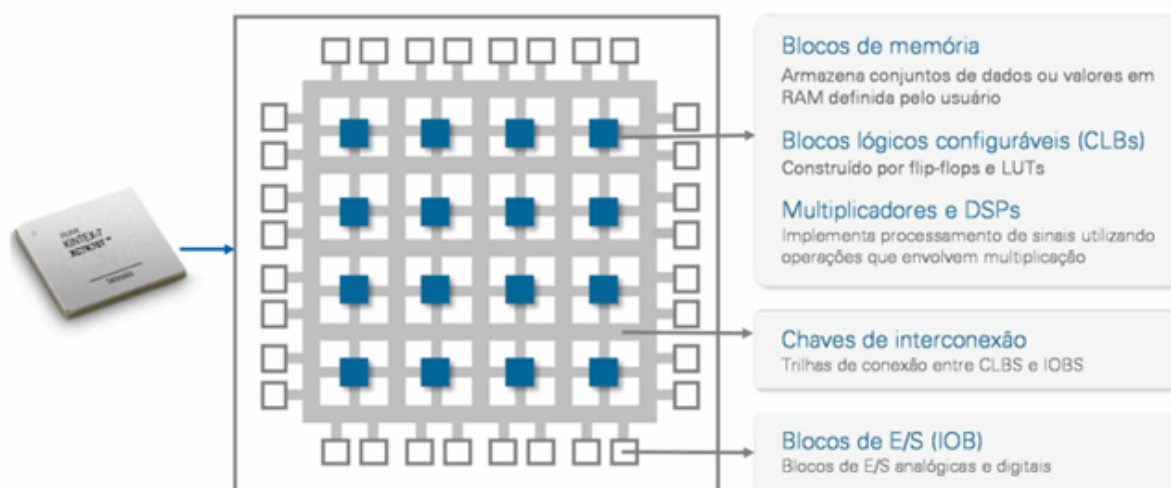
4.1.2 FPGA

O FPGA (*Field Programmable Gate Array*) ou em português Arranjo de Portas Programável em Campo é um circuito integrado projetado para ser configurado por um consumidor ou projetista após a fabricação – de onde advém a expressão “programável em campo”. O circuito interno é inteiramente configurado conforme aplicação em *software*.

As vantagens do uso do FPGA são inúmeras das quais pode-se destacar o paralelismo, ou seja, realiza tarefas em paralelo ao contrário de tarefas que são executadas em sistemas operacionais que são realizadas sequencialmente. Outra vantagem é a confiabilidade e comportamentos determinísticos uma vez que os cálculos são executados diretamente no hardware e a possibilidade de reconfigurar o chip para criação ou alteração de tarefas específicas.

Os principais blocos que constituem um chip FPGA são os blocos de memória que armazenam conjunto de dados em RAM definidos pelo usuário; Bloco Lógicos Configuráveis (CLB) constituídos por *flip-flops* e tabelas *Look Up Table* (LUT); blocos multiplicadores e DSP para implementação de processamento de sinais; chaves de interconexão que fazem a conexão entre os blocos CLB's e os blocos de entrada e saída. Esta arquitetura é mostrada na Figura 24.

Figura 24 – Arquitetura de um chip FPGA



Fonte: National Instruments

4.2 Módulo de Medição de Tensão NI 9242

O módulo de entrada analógica série C NI 9242 tem um intervalo de medição de $250 V_{rms}$ para monitoramento da qualidade de energia. Ele suporta os níveis de tensão de trabalho de $250 V_{rms}$ fase-neutro e $400 V_{rms}$ fase-fase. É possível também executar análise transitória e harmônica com amostragem simultânea de alta velocidade

a 50kS/s (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014b). As medições deste módulo são feitas em 24 *bits*. A Figura 25 exibe este módulo de medição de tensão.

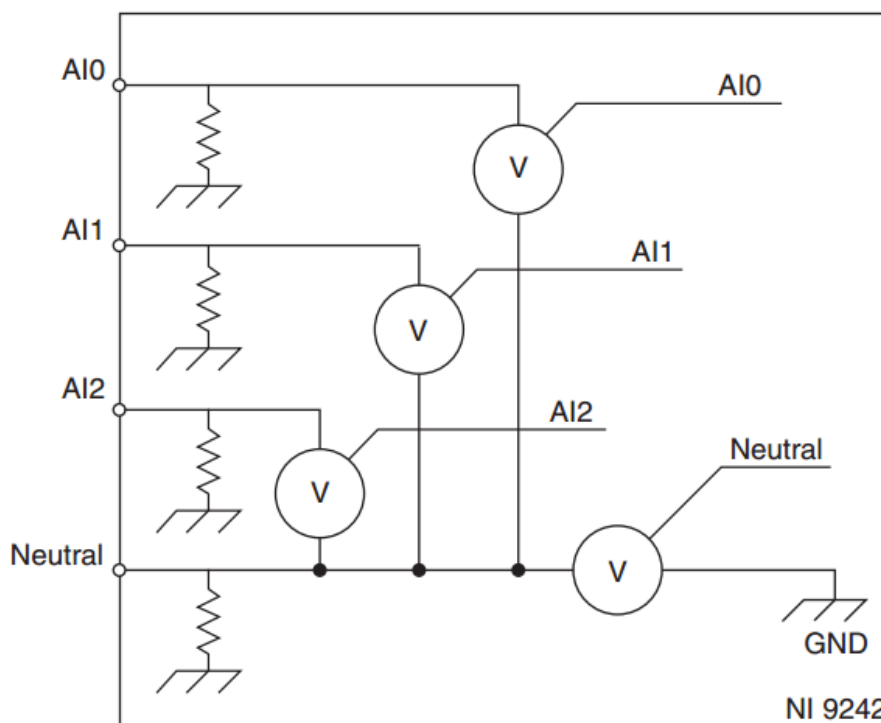
Figura 25 – Módulo de medição de tensão NI 9242



Fonte: National Instruments

O NI 9242 oferece três canais para medidas entre o sinal e o canal neutro e entre o terminal neutro e o terra do chassis. Com essa configuração é possível conectar configurações de medição simples ou trifásicas em estrela ou delta. A Figura 26 apresenta o circuito interno de ligações deste módulo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014b).

Figura 26 – Terminais de medição do módulo NI 9242



Fonte: National Instruments

O NI 9242 usa uma combinação de filtragem analógica e digital para fornecer uma representação precisa em 24 *bits* dos sinais da banda passante enquanto rejeita os sinais fora da banda.

A frequência de uma base de tempo principal (f_m) controla a taxa de amostragem (f_s) do NI 9242. O NI 9242 inclui uma base de tempo interna principal, com uma frequência de 12,8 MHz, mas o módulo também pode aceitar uma base de tempo mestre externa ou exportar a sua própria base de tempo mestre. Para sincronizar a taxa de dados de uma NI 9242 com outros módulos que utilizam bases de tempo mestres para controlar a amostragem, todos os módulos devem partilhar uma única fonte principal de base de tempo.

A equação 4.1. fornece as taxas do NI 9242 de dados disponíveis:

$$f_s = \frac{f_m/256}{n} \quad (4.1)$$

onde n é um número inteiro de 1 a 31. Assim as frequências de amostragem disponíveis neste módulo são apresentadas na Tabela 16:

Tabela 16 – Frequências de amostragem disponíveis no módulo de medição NI 9242

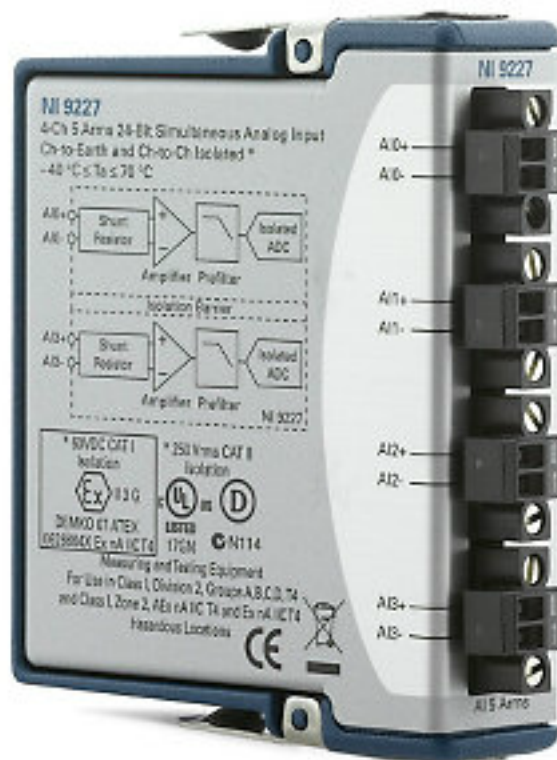
n	f_s (kS/s)	n	f_s (kS/s)
1	50.000	17	2.941
2	25.000	18	2.778
3	16.667	19	2.632
4	12.500	20	2.500
5	10.000	21	2.381
6	8.333	22	2.273
7	7.143	23	2.174
8	6.250	24	2.083
9	5.556	25	2.000
10	5.000	26	1.923
11	4.545	27	1.852
12	4.167	28	1.786
13	3.846	29	1.724
14	3.571	30	1.667
15	3.333	31	1.613
16	3.125		

Dados da Pesquisa

4.3 Módulo de Medição de Corrente NI 9227

O módulo de medição da série C NI 9227 é um módulo de medição analógico de correntes até $5A_{rms}$ e 14A de corrente de pico, com 4 canais isolados. A medição deste módulo é em 24 *bits*. O módulo permite o uso de transformadores de corrente para medição de correntes maiores, desde que obedeça o limite de $5 A_{rms}$ na entrada do módulo de medição. A Figura 27 mostra uma foto deste módulo.

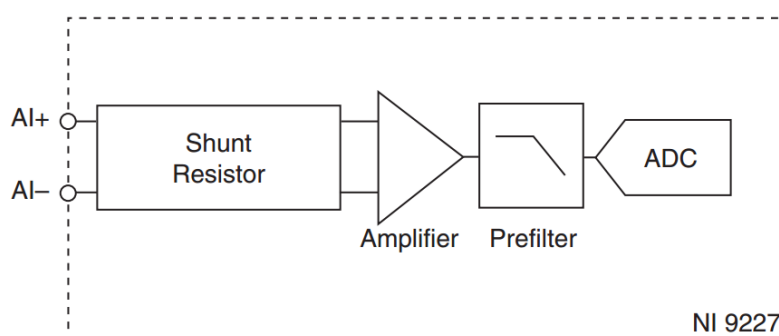
Figura 27 – Módulo de medição de corrente NI 9227



Fonte: National Instruments

O circuito interno de um canal de medição é mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Circuito interno de medição de uma canal do módulo NI 9227



Fonte: National Instruments

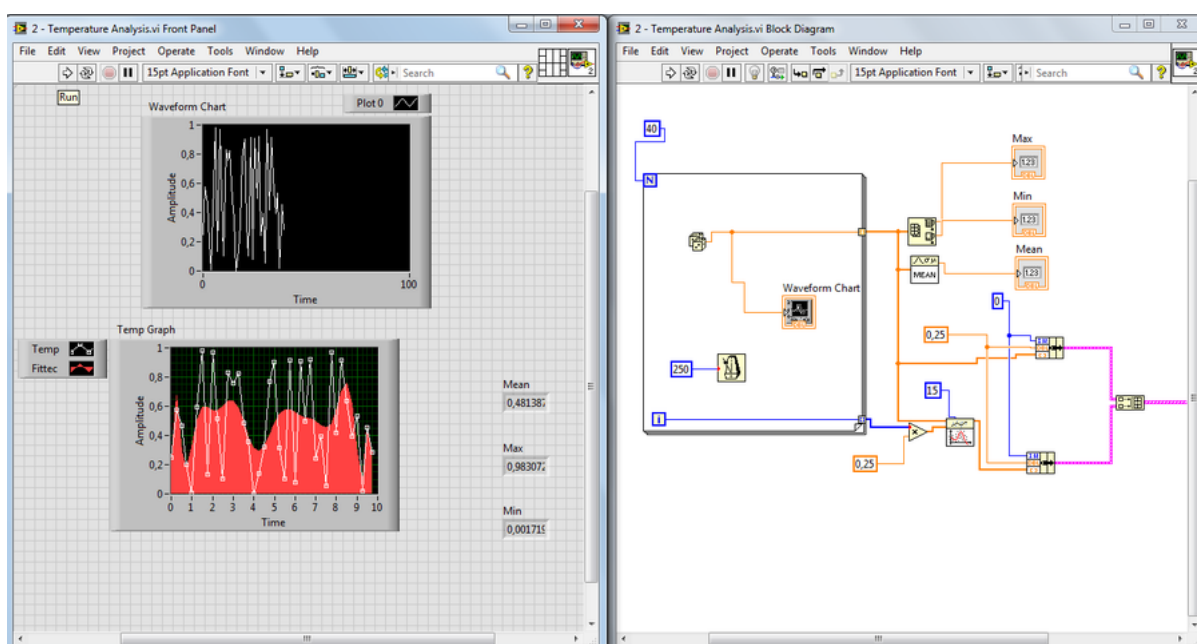
Este módulo possui os mesmos elementos de filtragem do módulo NI 9242 e também as mesmas taxas de amostragem detalhadas na Tabela 16.

4.4 O Software LabVIEW

LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica que utiliza ícones, em vez de linhas de texto, para criar aplicações. Em contraste às linguagens de programação baseadas em texto, em que instruções determinam a execução do programa, o LabVIEW utiliza programação baseada em fluxo de dados, onde o fluxo dos dados determina a execução (National Instruments, 2001).

Em termos básicos, a utilização desta ferramenta se dá através de duas janelas principais: o painel frontal e o diagrama de blocos. No painel frontal, é construída a interface de usuário, onde LEDs, botões de liga/desliga, gráficos podem ser usados para controlar e monitorar variáveis relevantes para a aplicação. O diagrama de blocos é onde se constrói o código do programa, as funcionalidades da aplicação a ser desenvolvida e os algoritmos de controle ou análise e processamento de sinais. A Figura 29 ilustra os dois ambientes descritos. Na janela da esquerda encontra-se o painel frontal com os gráficos e indicadores para o usuário e na janela da direita o diagrama de blocos onde o código foi escrito (AMARAL JÚNIOR, 2014).

Figura 29 – Painel Frontal e Diagramas de Bloco do LabVIEW



Dados da Pesquisa

Os programas elaborados no LabVIEW são chamados de *Virtual Instruments* (VI) que traduzindo para o português significa instrumento virtual. Um instrumento virtual consiste de um computador industrial ou estação de trabalho (*Workstation*) equipado com um poderoso software aplicado, hardware com custo otimizado, como placas *plug-in* e *drivers*, que juntos desempenham as funções dos instrumentos tradi-

onais (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

LabVIEW é uma parte integrante da instrumentação virtual porque ele fornece um ambiente de desenvolvimento de aplicações de fácil uso, projetado especificamente para atender às necessidades dos engenheiros e pesquisadores. Através de suas poderosas funcionalidades, o LabVIEW pode ser facilmente integrado a uma grande variedade de plataformas de hardware ou software (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

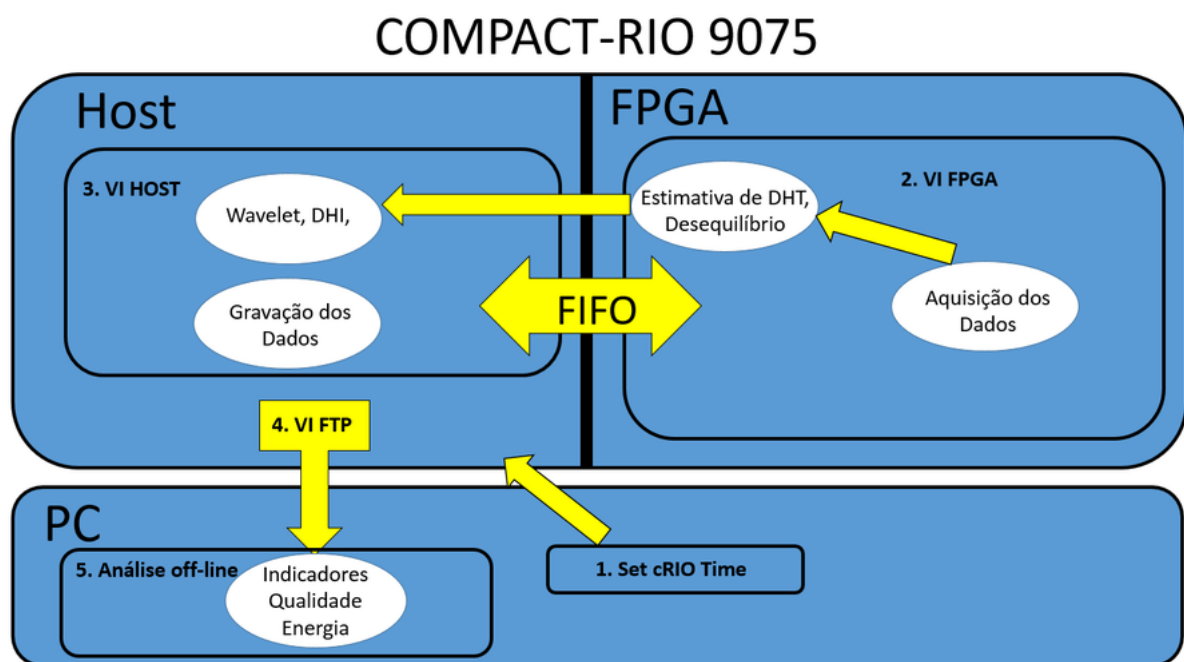
4.5 O Algoritmo Proposto

O presente trabalho tem por objetivo analisar os aspectos de qualidade da energia de um sistema trifásico. Portanto serão analisados os 3 canais de tensão (V_a , V_b e V_c) e 4 canais de corrente (I_a , I_b , I_c e I_{neutro}). É importante ressaltar que os hardwares embarcados têm recursos de memória, processamento e espaço em disco bem mais limitados do que um computador comum. Portanto, ao desenvolver e testar as aplicações, deve-se monitorar os recursos do hardware para garantir que o mesmo não alcance os limites que cause efeitos colaterais indesejáveis.

A Figura 30 apresenta um resumo do algoritmo proposto neste trabalho. Observe a presença de dois hardwares: a controladora NI Compact RIO 9075 e um computador. O computador deve possuir instalado o software LABVIEW, o módulo LABVIEW Real-Time, o módulo LABVIEW FPGA e os *drivers* NI RIO. Nos hardwares são processados cinco VI's desenvolvidos neste trabalho:

- a) Set cRIO Time: Sincroniza o horário da controladora cRIO com o horário do computador;
- b) VI FPGA: Executado dentro do chip FPGA, realiza a aquisição de dados e calcula os indicadores de desequilíbrio de tensão e de distorção harmônica de tensão;
- c) VI Host: Executado no processador Real-Time, registra as violações dos índices de correntes harmônicas e as variações de tensão de curta duração;
- d) VI FTP: Transfere os dados de aquisição da controladora para o computador para o pós-processamento;
- e) VI Análise Off-line: Realiza o pós processamento, informando ao usuário os principais indicadores de qualidade da energia sobre o sinal como DHT, forma de onda e valor RMS.

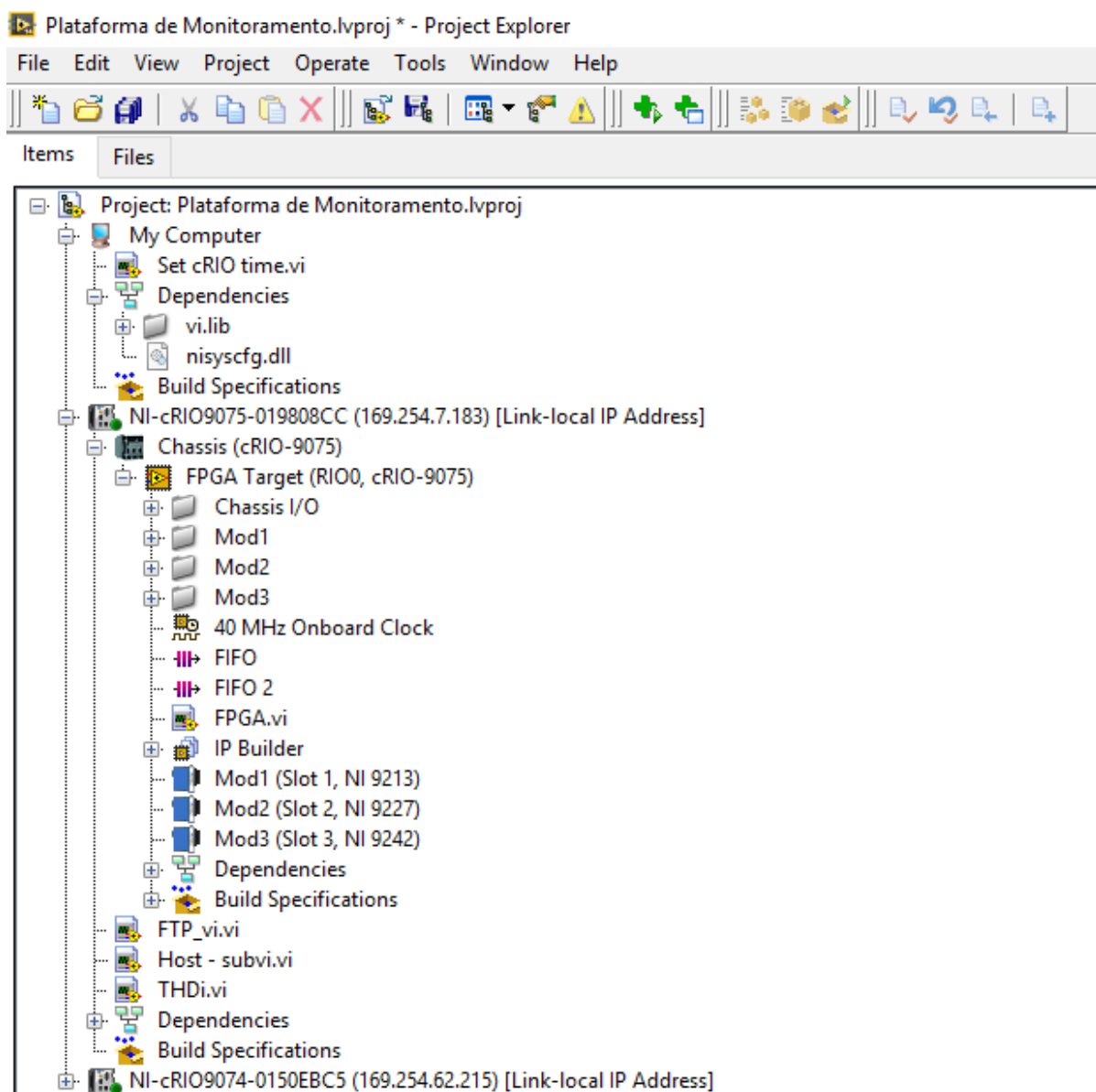
Figura 30 – Visão Geral do Algoritmo da Plataforma de Monitoramento



Elaboração Própria

No LabVIEW é necessário unir todos estes Vis em um único ambiente. A forma de interligar todos estes VIs é através de um projeto. O LabVIEW já fornece vários templates de vários tipos de projetos. Neste trabalho optou-se por usar o template “LabVIEW FPGA Control on CompactRIO”. A Figura 31 exibe a tela do Projeto em LabVIEW. Observe na hierarquia que no projeto “Plataforma de Monitoramento” existem dois hardwares: o “My Computer” que representa o computador onde a cRIO está conectada e o NI-cRIO9075 que representa a controladora. Observe que dentro do hardware ‘My Computer’ existe o VI ‘Set cRIO Time’, que é executado neste hardware. Dentro da controladora NI-cRIO9075 existe o chassis e dentro do chassis o dispositivo FPGA. No dispositivo FPGA pode-se observar o VI FPGA, as FIFO’s e os módulos de medição conectados no chip FPGA. Também se observa dentro do dispositivo FPGA a aba ‘Build Specification’ que é onde se realiza a compilação do programa em LabVIEW para um arquivo de *bit*. Este processo será melhor explicado no tópico 4.5.3. Dentro da controladora são executados ‘Host’ e ‘FTP’ e um subvi denominado ‘THDi’ que é executado dentro do VI ‘Host’. Este VI será melhor explicado no tópico 4.5.4.

Figura 31 – Projeto em LabVIEW



Dados da Pesquisa

Esta foi uma explicação breve e um overview do processo de cálculo da plataforma de monitoramento. Nos subtópicos abaixo, há uma descrição detalhada de cada VI projetado.

4.5.1 Set cRIO Time

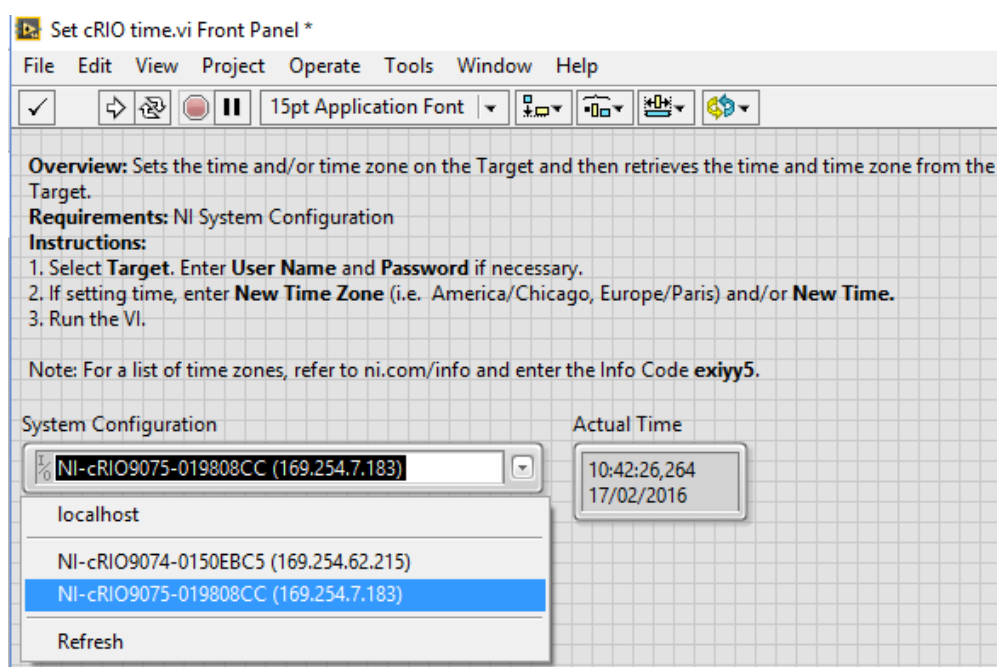
Nas análises sobre a qualidade da energia é imprescindível conhecer com precisão as datas e os horários dos eventos. Esta informação é importante para auxiliar no diagnóstico do distúrbio ocorrido. Entretanto, na inicialização do sistema, o relógio interno da cRIO se inicia na 0h do dia 1º de janeiro de 1970. Portanto o VI "Set cRIO

Time” tem por objetivo redefinir a hora da controladora para o horário do computador conectado a ela, possuindo assim, a mesma base de tempo.

A fim de tornar a leitura agradável e objetiva, os detalhes de construção de algumas partes dos VIs desenvolvidos estão nos anexos. Assim, o leitor que deseja conhecer um pouco mais sobre a construção destes VIs, pode consultar os detalhes ao fim da dissertação. Os detalhes do diagrama de bloco do VI Set cRIO Time estão no anexo A.

A Figura 32 exibe o painel frontal mostrado ao usuário. Observe a aba ‘System Configuration’ que permite escolher qual o hardware será configurado e a aba “Actual Time” que exibe a hora corrente da controladora.

Figura 32 – Painel Frontal do VI ‘Set cRIO Time’



Dados da Pesquisa

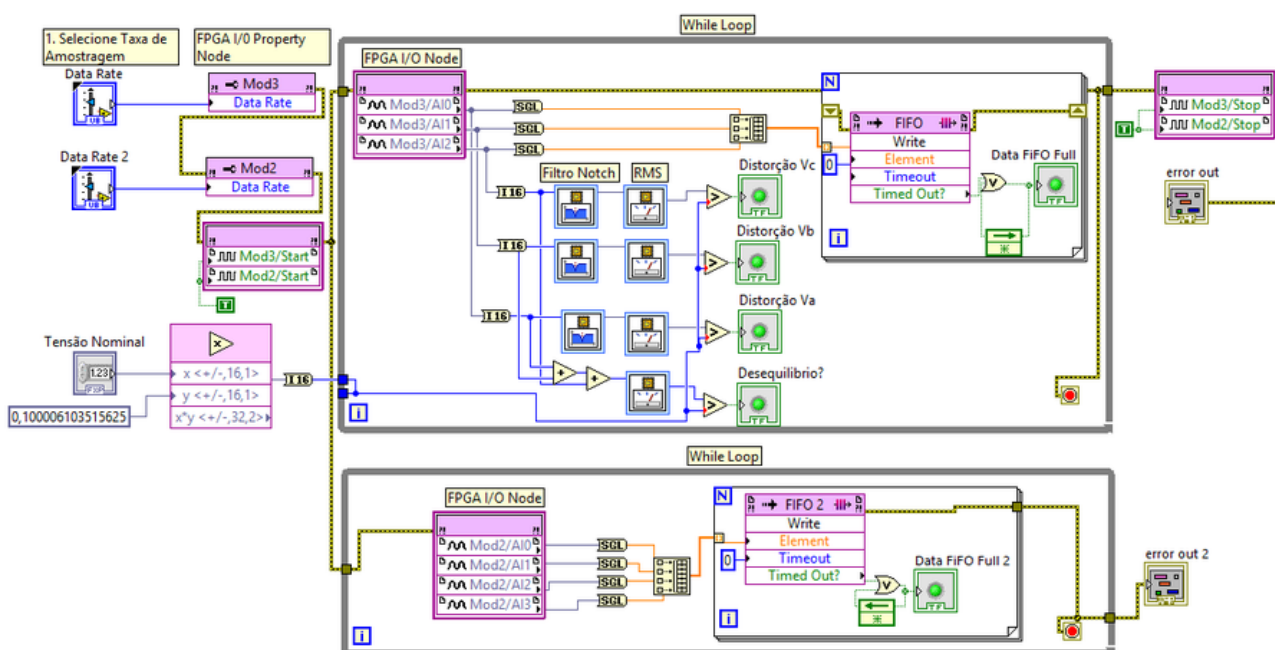
4.5.2 VI FPGA

Após a sincronização do horário da controladora com o computador auxiliar, o próximo passo é aquisição de dados. Esta etapa é executada no VI FPGA, que além de realizar a aquisição de dados, calcula os indicadores de desequilíbrio de tensão e de distorção harmônica de tensão. A Figura 33 apresenta o diagrama de bloco do VI FPGA. O processo se inicia com a configuração da taxa de amostragem dos módulos de medição NI 9227 e NI 9242. As taxas de amostragens disponíveis são aquelas apresentadas na Tabela 16. Esta configuração é realizada utilizando o bloco ‘FPGA I/O Property Node’ que é o responsável por obter ou definir propriedades em um item de entrada/saída ou hardware no dispositivo FPGA. Neste bloco, seleciona-se a

propriedade 'Data Rate'. Este parâmetro estará disponível para o usuário no painel frontal do VI FPGA. Este parâmetro também estará disponível no VI Host executado no processador Real-Time através da função 'Read/Write/Control'. Esta função permite ler, escrever ou controlar qualquer propriedade do VI FPGA no VI Host.

Após a configuração da frequência de amostragem, o próximo passo é inicializar os módulos de medição através do bloco 'FPGA I/O Node'. Após a inicialização dos módulos, o fluxo de dados segue para duas estruturas 'While Loop', representado na Figura 33 como um retângulo que envolve o código que está inserido neste. Esta estrutura executa o código continuamente, até que uma determinada condição dê o comando para interromper o processo. Dentro destas estruturas estão inseridos os blocos de aquisição de dados. O 'While Loop' superior faz a aquisição dos dados de tensão e o 'While Loop' inferior executa a aquisição dos dados de corrente.

Figura 33 – VI FPGA



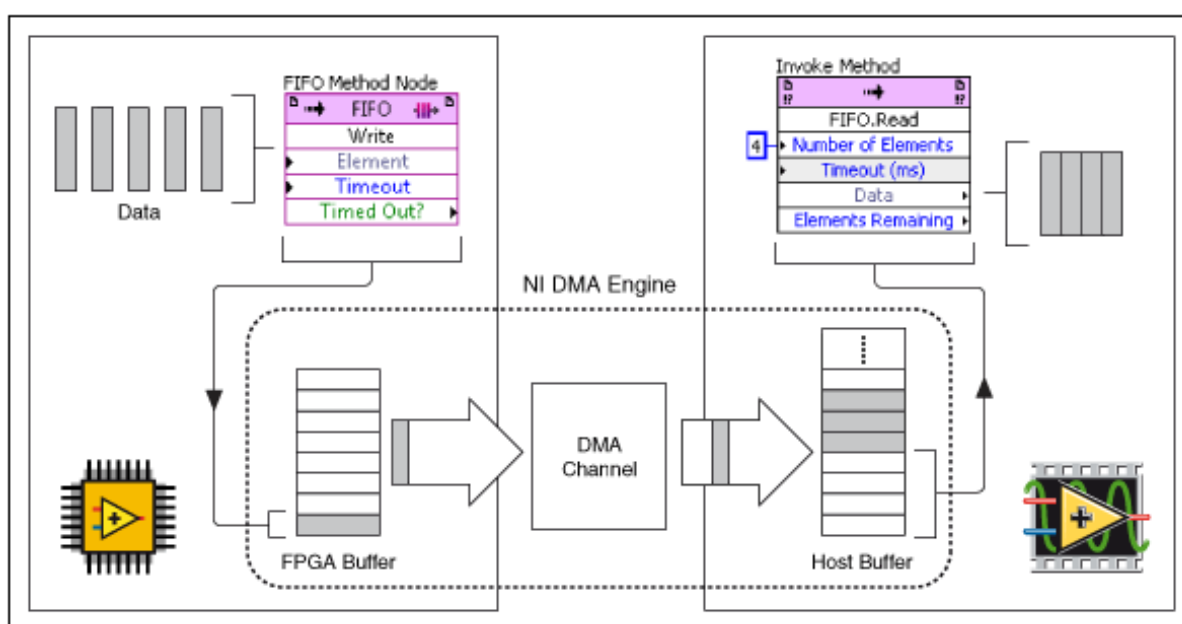
Dados da Pesquisa

O tipo de dados fornecidos pelos módulos de medição NI 9242 e NI 9227 são do tipo FXP (Fixed-Point, ou em português ponto fixo). Entretanto, em muitas aplicações é necessário converter dados de ponto fixo para uma representação em ponto flutuante. Esta conversão dos dados geralmente é realizada no VI Host. Entretanto, se a conversão for feita no FPGA, a velocidade de processamento no VI Host pode melhorar em até 40% (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015a). O efeito colateral é utilizar mais recursos FPGA. Visando a maior velocidade de cálculos no VI Host, optou-se por

realizar a conversão em ponto flutuante no VI FPGA através do bloco SGL (Single Precision Float). Após esta conversão, os dados são transformados em uma matriz de 4 linhas, onde cada linha representa as amostras de um determinado canal. O motivo da construção desta matriz é a possibilidade de enviar os dados do VI FPGA para o VI Host utilizando apenas um canal DMA (Direct Memory Access). Isto é importante, uma vez que o número de canais DMA disponíveis em uma determinada controladora são limitados. A cRIO 9075 por exemplo, possui apenas 5 canais, impossibilitando assim o uso de 1 canal DMA para cada canal de medição. O canal DMA não envolve o processador do Host e portanto, é o método mais rápido disponível para transferência de grandes quantidades de dados entre o FPGA e o Host (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

Uma FIFO é uma estrutura de dados que contém elementos na ordem em que são recebidas e fornece acesso a esses elementos utilizando a política do 'First In, First Out', ou seja, primeiro que entra, é o primeiro que sai. Esta transferência é realizada através dos canais DMA de cada controladora. A Figura 34 apresenta a estrutura de transferência de dados via FIFO.

Figura 34 – Transferência de Arquivo através de uma DMA FIFO



National Instruments, 2012

Neste VI também é inserido um indicador de FIFO *Overflow*. Isto acontece quando o Host não consegue executar todas funções no tempo adequado e o Buffer da FIFO começa encher até um nível limite. No caso no VI FPGA, conforme mostrado na Figura 33, são colocados dois indicadores deste tipo: 'Data Fifo Full' e 'Data Fifo Full2', sendo um para cada FIFO.

Cada bloco no LabVIEW tem um terminal de erro. Ele é utilizado para propagar um código de erro no VI até chegar num indicador apropriado para o usuário. Na Figura 30 todos os terminais de erro são interligados afim de garantir que o usuário saiba qual problema esteja acontecendo na execução do VI. Estes blocos indicadores são o “erro out” e “erro out 2”. Além disto, os terminais de erro são ligados nas condição de parada dos ‘*While Loops*’, o que garante que qualquer erro no VIs se interrrompa o processamento do dados até a correção deste erro. No final do código, após os ‘*While Loops*’, é inserido um bloco ‘FPGA I/O’ para interromper a aquisição dos dados.

4.5.2.1 Cálculo do Indicador de Distorção Harmônica e de Desequilíbrio de Tensão

No VI FPGA é realizada ainda uma análise de distorção harmônica e de desequilíbrio de tensão. A distorção harmônica de tensão é dada pela equação 2.8 apresentada no capítulo 2 e exibida novamente abaixo:

$$DTT = 100 \frac{\sqrt{(\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2)}}{V_1}$$

O numerador desta equação pode ser chamado de valor eficaz das tensões harmônicas. Uma forma alternativa de reescrever a equação 2.8, é como uma diferença entre o valor eficaz do sinal medido e a sua componente fundamental. Assim, pode-se escrever:

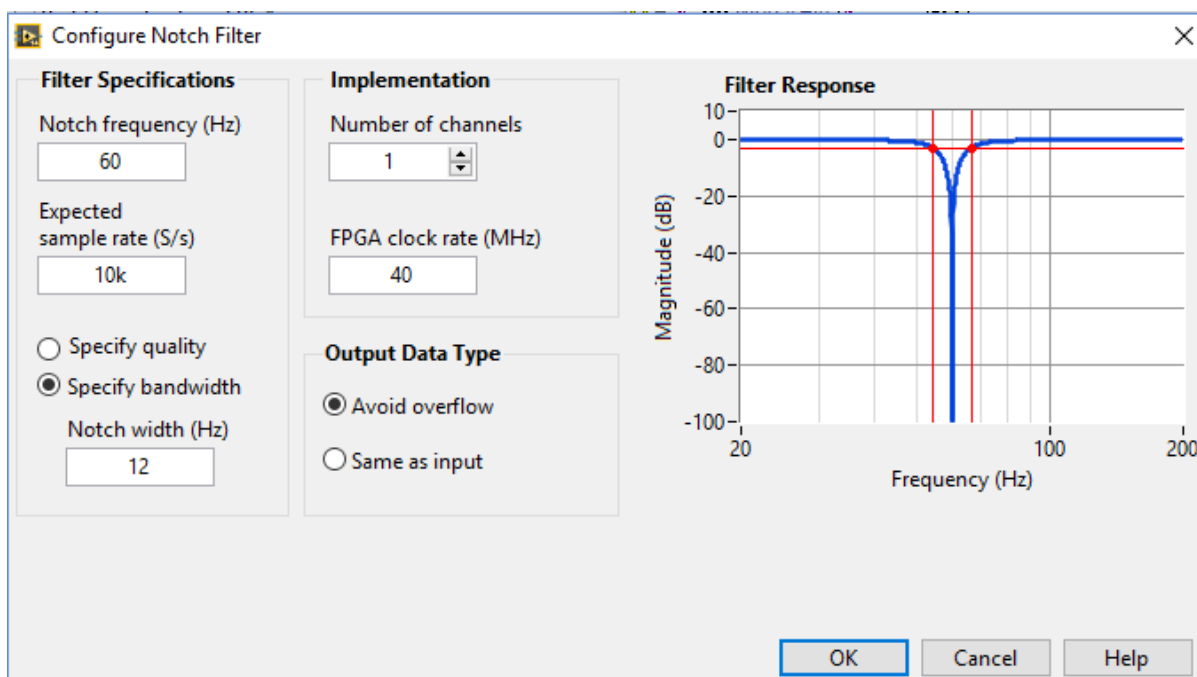
$$V - V_1 = \sqrt{(\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2)} \quad (4.2)$$

Portanto, a distorção total de tensão pode ser escrita desta forma:

$$DTT = 100 \frac{V - V_1}{V_1} \quad (4.3)$$

A implementação é realizada através do uso de três filtros *notch*. Este filtro tem por objetivo eliminar uma determinada componente de frequência. A Figura 35 exhibe a janela de configuração deste filtro. Observe que a resposta em frequência do filtro foi definida na frequência de 60 Hz e a largura de banda de 12 Hz.

Figura 35 – Configuração do Filtro Notch



Dados da Pesquisa

Após a filtragem da componente de 60 Hz, é calculado o valor RMS (Root mean square) do sinal restante. Espera-se que o valor RMS deste sinal filtrado esteja dentro dos limites estabelecidos pelas normas. Estes limites estão definidos na Tabela 6 (apresentada no Capítulo 2) que define o limite de distorção harmônica como uma porcentagem da tensão nominal do barramento. Em um barramento com tensão nominal menor que 1 kV por exemplo, o limite é de 10% da tensão nominal da rede analisada.

O desequilíbrio de tensão é identificado observando a componente de sequência zero do sinal. Este método de detecção de desequilíbrio é realizado com base no Teorema de *Fortescue*, que constitui-se em uma transformação linear de componentes de fase em um novo conjunto de componentes, chamadas de componentes simétricas. As componente simétricas são compostas por três fasores:

- Componente de Sequência Zero: consiste em três fasores de iguais magnitude e fase angular;
- Componente de Sequência Positiva: consiste em três fasores de igual magnitude e defasados de 120° e na mesma seqüência de fases do sistema original;
- Componente de Sequência Negativa: consiste em três fasores de igual magnitude e defasados de 120° e em seqüência de fases contrária à do sistema original.

A matriz de transformação de componentes de fase para componentes simétricas é:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a + V_b + V_c \\ V_a + aV_b + a^2V_c \\ V_a + a^2V_b + aV_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Uma das primeiras conclusões ao analisar a matriz de transformação acima é que em sistemas equilibrados, a tensão de sequência zero é nula. Esta é a idéia do método utilizado. Conforme mostrado na Figura 33, o valor da sequência zero é calculado somando-se as amostras das três tensões e depois calcula-se o valor RMS. Na seção 2.2.1.4, foi apresentado o limite de 2% de desequilíbrio de tensão segundo o PRODIST da ANEEL. No entanto, esta regra não se aplica a redes de baixa tensão. Assim, o valor de referência será 2% da tensão nominal da rede a ser analisada. Na seção 2.2.1.4, o cálculo de desequilíbrio proposto no PRODIST é realizado pela relação entre a sequência negativa e a sequência positiva. Entretanto, como este cálculo requer uma utilização elevada de recursos do FPGA, neste trabalho a detecção de desequilíbrio foi realizada somente com a análise da sequência zero.

4.5.2.2 Compilação

O processo de execução de uma aplicação diretamente no hardware requer que o código seja sintetizado em um arquivo *bit* ('*bitfile*'). Este processo denomina-se compilação. O processo de compilação para o dispositivo FPGA pode durar minutos ou até algumas horas dependendo da complexidade do código.

A Figura 36 exibe as etapas do processo de compilação. O primeiro passo no processo de compilação é a geração de arquivos intermediários. Para este processo, o LabVIEW analisa o diagrama de blocos e converte o código para uma forma que o compilador possa utilizar. Se houver qualquer inconsistência no VI, como por exemplo, incompatibilidade entre os blocos aparece uma mensagem de erro para o usuário. Após esta etapa inicial, os arquivos intermediários entram no compilador, onde o código é analisado, sintetizado, mapeado (divide a lógica da aplicação entre os blocos de construção físicos no FPGA) e por fim segue para a etapa de 'localização e rotas'. Esta etapa atribui a lógica para blocos de construção físicos no FPGA e as rotas de ligações entre os blocos lógicos para atender às restrições espaciais e temporais da compilação. Ao final deste processo o compilador cria dados binários onde o LabVIEW salva dentro de um arquivobit (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014a).

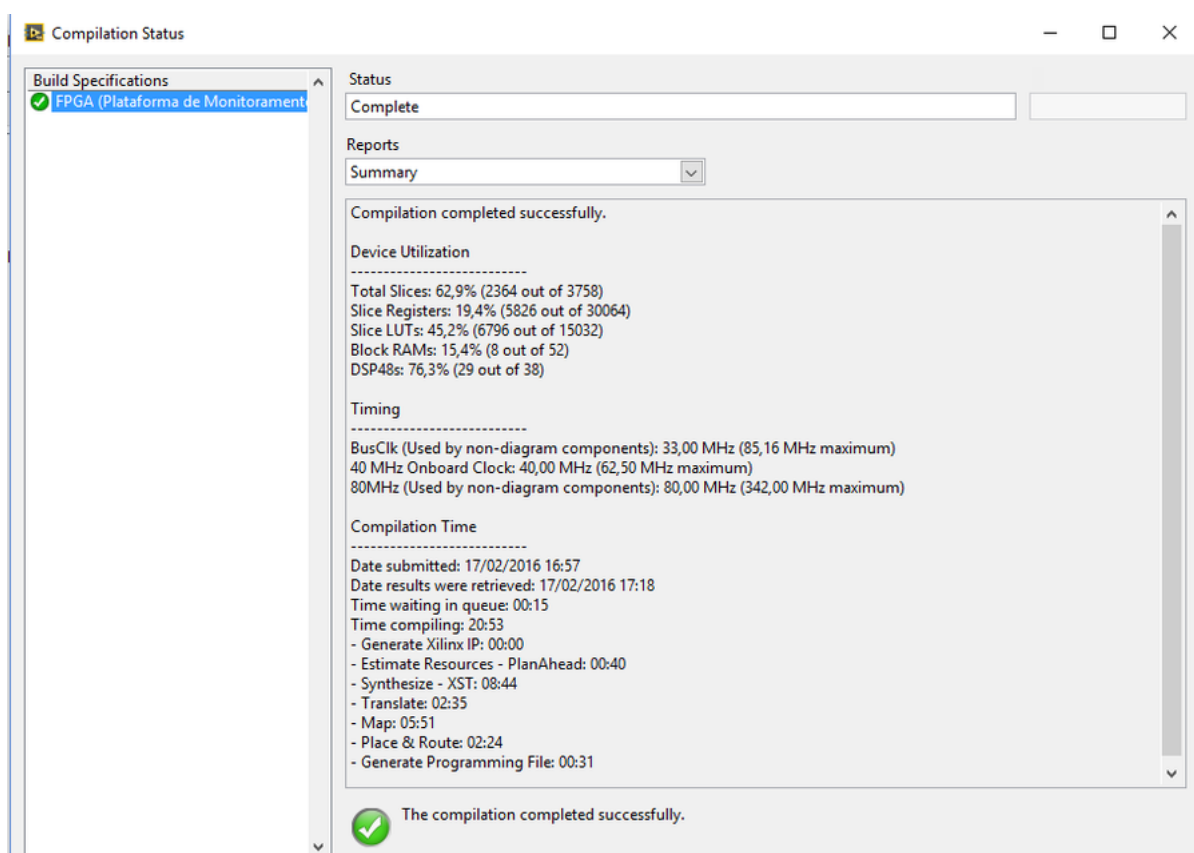
Figura 36 – Processo de Compilação para um 'bitfile'



Fonte: National Instruments, 2016

Ao fim da compilação, é fornecido ao usuário um resumo de todo o processo de compilação. A Figura 37 exibe a tela de resumo obtido na compilação do VI FPGA descrito na Figura 33. Na parte superior são fornecidas as informações do uso dos recursos do chip FPGA. Observe que, por exemplo, os blocos de DSP tiveram 76,3% de utilização. Esta é uma das justificativas de não realizar a análise de distorção harmônica de corrente no chip FPGA. O chip FPGA não tem recursos suficientes para o cálculo das distorções harmônicas de tensão e corrente. Por isso, a análise de distorção harmônica de corrente será realizada no VI Host.

Figura 37 – Resumo da Compilação do VI FPGA



Dados da Pesquisa

O segundo conjunto de informações diz a respeito aos parâmetros de tempo-

rização. Em suma, o compilador analisa se o VI FPGA consegue executar todas as funções no clock do FPGA. O terceiro conjunto de informações, apresenta o tempo de execução de cada uma das etapas explicadas anteriormente.

4.5.3 VI Host

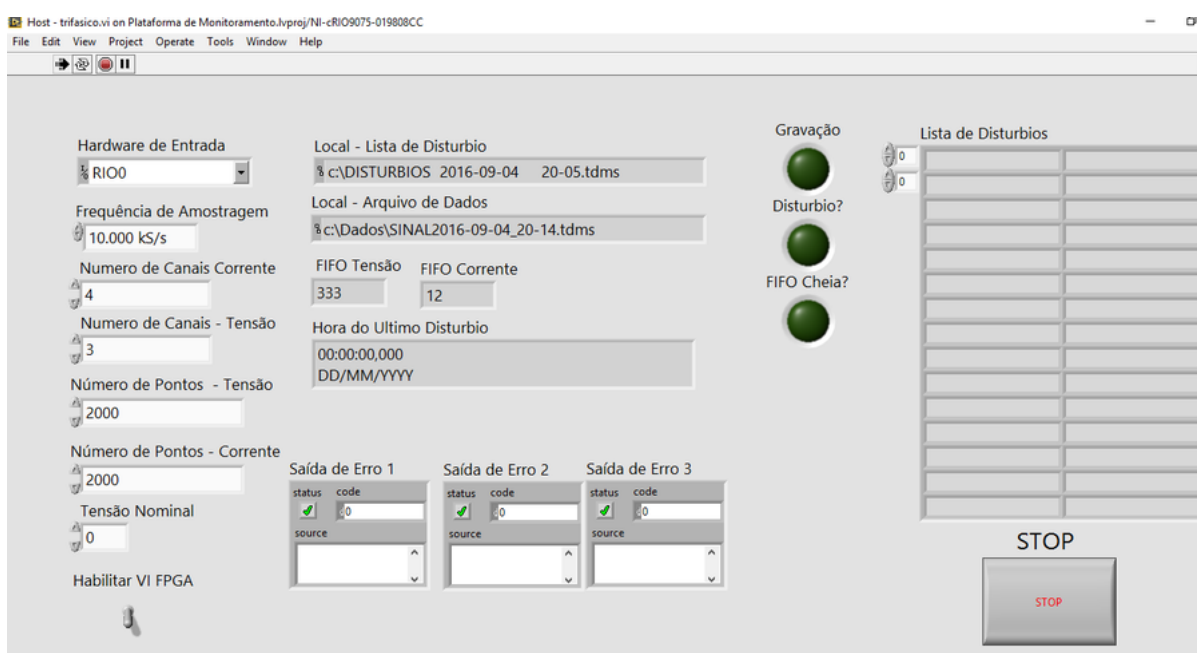
O Vi Host é o VI responsável por receber os dados vindos do VI FPGA, bem como os indicadores de distúrbio referentes a desequilíbrio e distorção harmônica de tensão. Além disto, o VI Host realiza análise de distorção harmônica de corrente e de variações de tensão de curta duração. A Figura 38 apresenta o painel frontal do VI Host. Os parâmetros que devem ser configurados são:

- Hardware de entrada: Determina qual hardware está o VI FPGA que realizará a aquisição de dados;
- Frequência de amostragem: Configura quantas amostras serão adquiridas por segundo. É um parâmetro importante, pois conforme mostrado na seção 3.2.1, a frequência de amostragem determina a banda de frequências que pretende-se analisar. Segundo o módulo 8 do PRODIST, o cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica. Assim, a frequência de amostragem mínima para análises de distorções harmônicas é 3.000 Hz. Neste trabalho, como pretende-se analisar harmônicos de frequências mais elevadas (até a 75ª ordem), a frequência de amostragem escolhida será de 10.000 Hz.
- Número de Canais: Especifica quantos canais de medição de tensão e correntes serão analisados. Neste trabalho serão analisados três canais de tensão (V_a , V_b , V_c) e quatro canais de corrente (I_a , I_b , I_c e I_n);
- Número de Pontos: Especifica o número de pontos do buffer de armazenamento. Conforme apresentado no Capítulo 2, a norma IEC 61000-4-7 estabelece uma janela de tempo de 200 ms. Assim, como a frequência de amostragem foi definida em 10.000 Hz, número de pontos do buffer deve ser 2.000 para atender aos requisitos da norma.
- Tensão Nominal: Parametriza a tensão de fase nominal do sistema a ser analisado. Importante sua especificação para determinar o limite aceitável da distorção harmônica de tensão e de desequilíbrio de tensão.
- Chave “Habilitar VI FPGA”: Ao colocar a chave na posição “ligado”, o VI Host habilita as detecções de distorção harmônica de tensão e de desequilíbrio de tensão que são realizados no VI FPGA.

No painel frontal ainda são apresentados os seguintes indicadores:

- Local - Lista de Distúrbios: Indica o endereço onde a lista com os horários dos distúrbios será gravada;
- Local - Arquivo de Dados: Indica o endereço em que estão sendo salvos os arquivos de dados;
- FIFO Tensão e FIFO Corrente: Informa o número de amostras dentro das FIFO's. Importante verificar o status da FIFO para não permitir que as amostras se acumulem e interrompa o processo de cálculo. Caso isto ocorra, um LED indicativo de FIFO Cheia acenderá.
- Hora do último distúrbio: Indica a data e o horário do último distúrbio ocorrido;
- Saídas de Erros: Indica se houve algum erro durante a execução do VI;
- LEDs indicativos: Existem 3 LED's indicativos no VI Host. O primeiro é o LED indicativo de gravação de dados. Toda vez que um arquivo de dados é gravado na memória da cRIO, este LED acenderá. O segundo LED é o indicativo de distúrbio. Sempre que ocorrer um distúrbio, este LED acenderá. O terceiro LED só acende se uma das duas FIFO's encher.
- Lista de Distúrbios: Apresenta a lista de horários dos distúrbios.

Figura 38 – Painel Frontal do VI Host

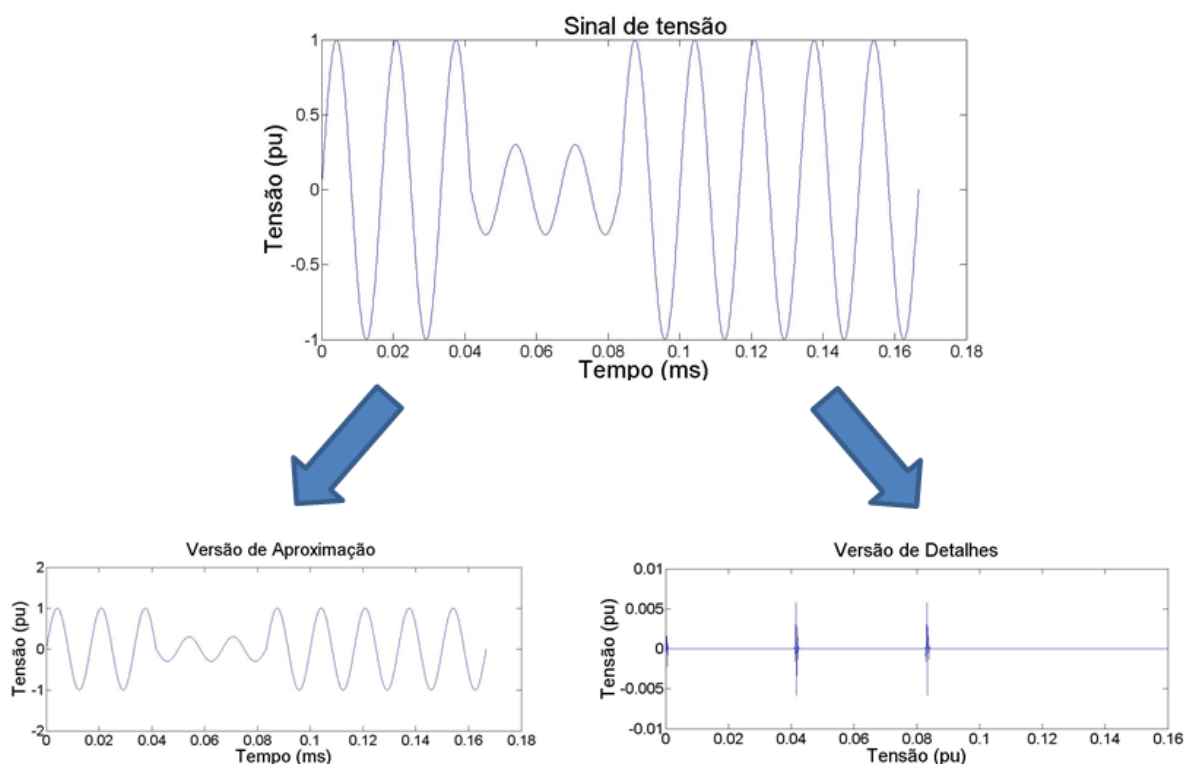


Os detalhes de construção do diagrama de blocos deste VI está apresentado no Anexo B com a explicação detalhada dos blocos utilizados.

4.5.3.1 Detecção de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)

Na seção 3.3 foi realizada uma abordagem sobre a transformada Wavelet. Graças as características de distinguir características locais dos sinais e fornecer informações simultâneas de tempo e frequência, esta ferramenta foi utilizada na detecção das VTCD's. O método de detecção é baseado na transformada de Wavelet discreta apresentada na Figura 39. Na Figura 39, está a simulação de um afundamento de tensão no meio da janela de amostragem. A técnica da TWD realiza uma filtragem digital do sinal seguida por uma decomposição por um fator de 2 que divide o sinal em versões de aproximações (baixas frequências) e em versões de detalhes (altas frequências). Observe que no momento do início e do fim do distúrbio surgem componentes de alta frequência. O surgimento destas altas frequências é utilizado para detectar uma alteração na característica do sinal, detectando a VTCD.

Figura 39 – Detecção de Distúrbio através da Transformada Wavelet



Dados da Pesquisa

4.5.3.2 Detecção de violação de limites de correntes harmônicas

No Capítulo 2 foram apresentadas as principais normas sobre qualidade de energia existente. Uma das mais importantes é a família de normas da IEC 61.000. A

parte 3-2 trata dos limites de emissão de correntes harmônicas em equipamentos com corrente de entrada menor que 16 A por fase. Estes limites estão apresentados nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 – Limite de Emissão de Correntes Harmônicas em equipamentos com corrente menor que 16A por fase - Harmônicos Impares

Harmônicos Impares	
Ordem	Corrente (A)
3	2,3
5	1,14
7	0,77
9	0,4
11	0,33
13	0,21
13<h<39	0,15 X 15/h

Adaptado de IEC-61000-3-2

Tabela 18 – Limite de Emissão de Correntes Harmônicas em equipamentos com corrente menor que 16A por fase - Harmônicos Pares

Harmônicos Pares	
Ordem	Corrente (A)
2	1,08
4	0,43
6	0,3
8<h<40	0,23 X 8/h

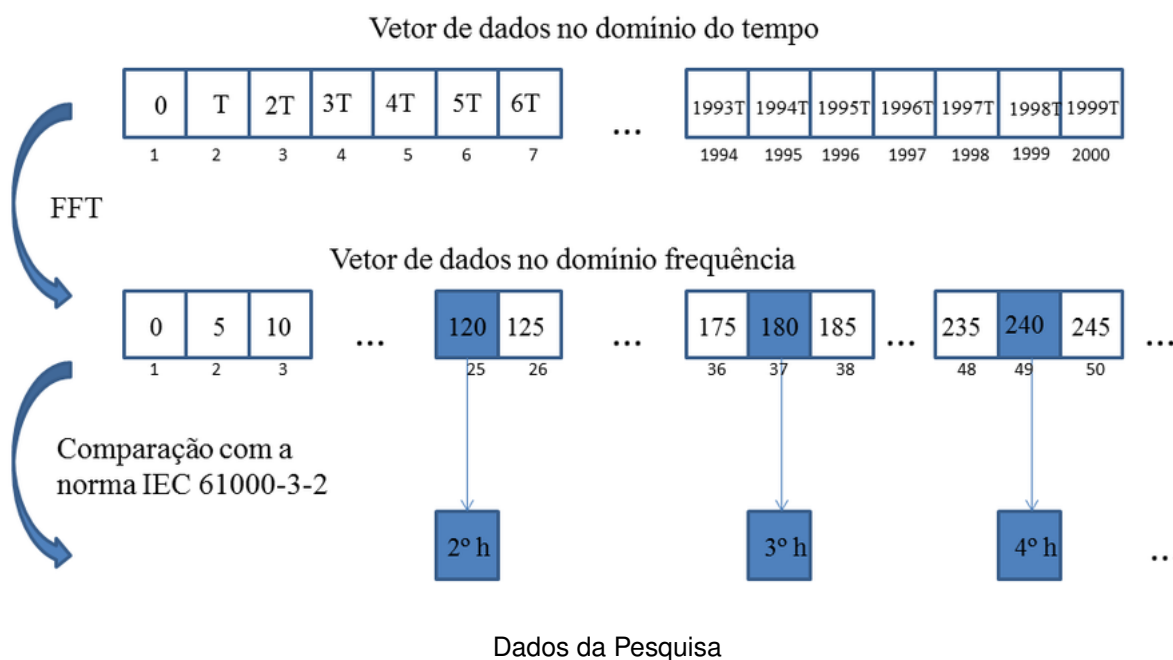
Adaptado de IEC 61.000-3-2

A Figura 40 ilustra todo o processo de detecção proposto neste trabalho. A norma IEC 61000-4-7 define que para análises de distorções harmônica, a janela deve possuir um tempo de amostragem de 200 ms. Como a frequência de amostragem foi definida em 10 kHz, o vetor de dados de cada janela possui 2.000 elementos. A FFT transforma um vetor de dados no domínio do tempo em um vetor de dados no domínio da frequência. O passo seguinte é conhecer a posição de cada componente harmônico no vetor resultante da FFT para a correta comparação com os limites estabelecidos pela norma IEC 61.000-3-2. A posição de cada harmônico depende da resolução espectral. A resolução espectral é o inverso do tempo total de amostragem, conforme apresentado na seção 3.2.1. Portanto,

$$\Delta f = \frac{1}{T_t} = \frac{1}{0,2s} = 5Hz$$

Portanto, a posição da frequência fundamental é 13 (1 referente a posição 0 + 12 posições \times 5 Hz = 60 Hz), o 2º harmônico na posição 25, o 3º harmônico na posição 37 e assim por diante.

Figura 40 – Método de detecção de violações de correntes harmônicas



4.5.4 Organização dos dados para a gravação

Diversos obstáculos podem impedir a troca ideal de informações técnicas. O mais notório é a captação indevida de informações no momento do teste, simulação ou gravação. Com demasiada frequência, os dados são armazenados sem informação descritiva, em formatos inconsistentes, criando um cemitério de informação que torna extremamente difícil localizar um conjunto de dados específico e derivar decisões deste. Para resolver este problema, a NI utiliza o formato de arquivo TDMS (Technical Data Management Streaming). O formato TDMS é próprio para aplicações para armazenamento de forma organizada, com informação descritiva e de fácil acesso (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015b). As principais vantagens do formato TDMS em relação aos outros formatos está apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Comparação entre os formatos de dados existentes

	ASCII	Binary	XML	Database	TDMS
Permutável	X		X		X
Espaço em disco pequeno		X			X
Pesquisável				X	X
Atributos Inerentes			X		X
Alta velocidade de transmissão		X			X
Suportado pela plataforma NI	X	X	X	X	X

Adaptado de National Instruments

Os arquivos TDMS são divididos em três partes: arquivos, grupos e canais. Um exemplo deste arquivo aberto no software Excel é exibido na Figura 41.

- *Arquivo* – Cada arquivo grava as medições de 1 minuto. São subdivididos em grupos. O arquivo é gravado da seguinte forma: SINAL-ano-mês-dia-hora-minuto. Ex: SINAL2015-11-17_14-54.tdms ;
- *Grupos* – Em 1 minuto, temos 300 janelas de 200 ms. Portanto, cada arquivo tem 300 grupos. Na Figura 41, os grupos são as abas das planilhas do excel ;
- *Canais* – Janela de cada canal de medição. São os dados no domínio do tempo do sinal. No presente trabalho são 7 canais.

Figura 41 – Arquivo de gravação dos 7 canais, organizado em grupos

1	Canal 1	Canal 2	Canal3	Canal4	Canal5	Canal6	Canal7
2	-139,4266357	-133,5509644	-133,5666504	0,000347137	-0,002088547	0,000207901	-0,001182556
3	-135,7276611	-129,5170898	-129,5365601	0,00028801	-0,0025177	0,000278473	-0,001207352
4	-131,8718872	-125,3845825	-125,4085693	0,00012207	-0,002342224	0,000175476	-0,001293182
5	-127,3612671	-120,7258911	-120,7462769	0,000278473	-0,002309799	0,000108719	-0,000995636
6	-122,1077881	-115,3254395	-115,3536377	0,000307083	-0,002397537	0,000148773	-0,001356125
7	-116,3955078	-109,4432983	-109,4730225	0,000246048	-0,002328873	0,000387192	-0,001110077
8	-110,1722412	-103,1260376	-103,1552124	0,000234604	-0,002220154	0,000337601	-0,00110817
9	-103,7971802	-96,71173096	-96,74237061	0,000164032	-0,002239227	5,72205E-05	-0,001375198
10	-97,55596924	-90,39233398	-90,42529297	0,000371933	-0,00245285	0,000305176	-0,001369476
11	-90,93353271	-83,7598877	-83,79016113	6,48499E-05	-0,002296448	0,000112534	-0,001340866
12	-83,91638184	-76,75976563	-76,79083252	0,000293732	-0,002241135	0,000303268	-0,0013237
13	-76,86376953	-69,70544434	-69,73736572	0,000305176	-0,002199173	0,000255585	-0,001264572
14	-69,85662842	-62,78814697	-62,82403564	0,000328064	-0,002565384	0,000185013	-0,001478195
15	-62,765625	-55,84997559	-55,88409424	0,000623703	-0,002397537	0,000120163	-0,001117706
16	-56,1348877	-49,25164795	-49,28094482	0,000295639	-0,002138138	0,000370026	-0,001211166
17	-49,48681641	-42,65093994	-42,68206787	0,000232697	-0,002124786	-5,72205E-06	-0,001335144
18	-42,81243896	-36,04382324	-36,07702637	0,000396729	-0,002191544	-0,000139236	-0,001386642
19	-36,0914917	-29,35479736	-29,39160156	0,000434875	-0,002120972	0,00025177	-0,001560211
20	-29,33172607	-22,67315674	-22,70678711	0,000228882	-0,002269745	0,000406265	-0,001205444
21	-22,70178223	-16,03613281	-16,07116699	0,000234604	-0,002305984	7,62939E-06	-0,001247406
22	-15,82904053	-9,324157715	-9,361022949	0,000171661	-0,002641678	-0,000209808	-0,001361847
23	-8,942016602	-2,593078613	-2,620666504	0,000246048	-0,002147675	0,000211716	-0,001079559
24	-2,551133317	-0,830333366	-0,830640137	0,000137703	-0,002185833	0,000137703	-0,001317070

Dados da Pesquisa

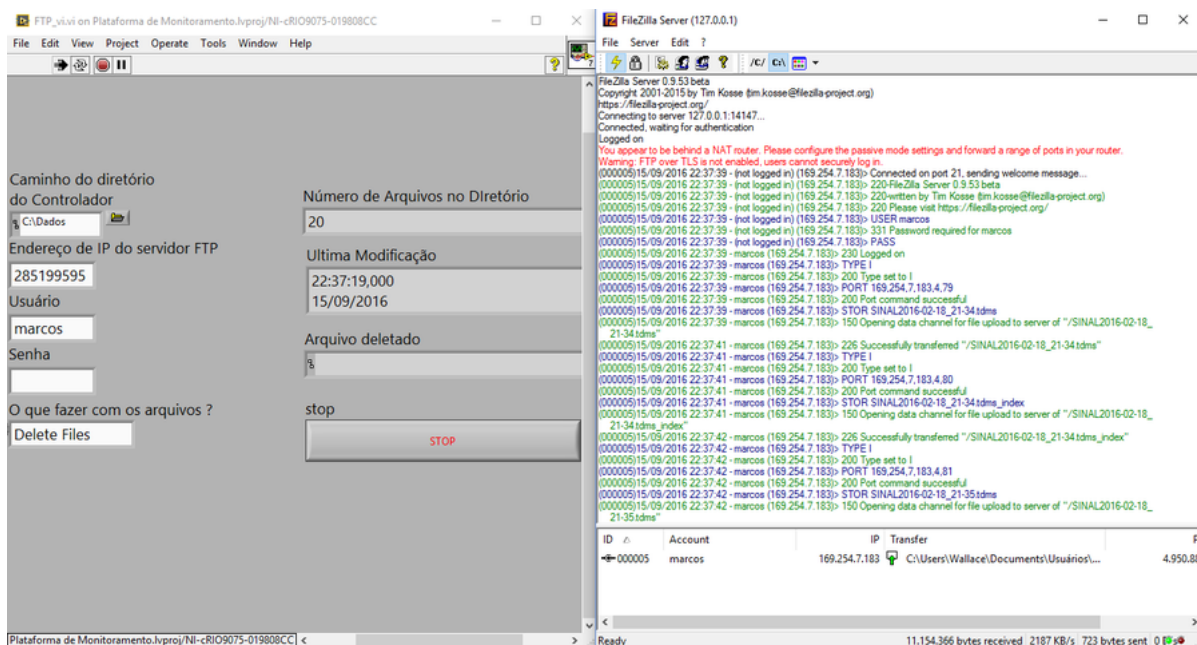
4.5.5 VI FTP

Conforme comentado no início da seção 4.5, os hardwares embarcados possuem recursos de memória limitados. Portanto, há necessidade de ter uma rotina para liberar espaço em disco, sem comprometer a velocidade de execução do algoritmo de análises de distúrbio e sem perder nenhum arquivo já gravado na memória da controladora. Para atingir este objetivo, foi desenvolvido um VI para a transmissão de arquivos via FTP (File Transfer Protocol ou em português, Protocolo de Transferência de Arquivos). O protocolo FTP é usado basicamente para manipular diretórios e arquivos em outros computadores de modo rápido e prático.

Este VI é responsável por conectar a um servidor FTP, contar e ler os arquivos do diretório, copiar os arquivos para um computador de apoio e periodicamente excluir os arquivos enviados ao computador de apoio. A conexão com o servidor FTP é realizada com auxílio do software gratuito FileZilla Server. Para tal, é necessário instalar o software FileZilla no computador de apoio e configurar uma pasta para receber os arquivos, um usuário e senha. A Figura 42 apresenta o painel frontal do VI FTP

juntamente com *software* FileZilla onde pode-se ver a transferência de arquivos entre a controladora e o computador de apoio.

Figura 42 – VI FTP e FileZilla Server



Dados da Pesquisa

Do lado esquerdo do painel frontal estão as entradas do VI FTP:

- Caminho do diretório da controladora: Indica em qual pasta estão os arquivos que se deseja transferir;
- Endereço de IP do servidor FTP (Criado pelo software FileZilla Server);
- Usuário: Indica o usuário de acesso ao servidor FTP
- Senha: Senha de acesso do usuário ao servidor FTP
- O que fazer com os arquivos?: O usuário pode escolher o que fazer com os arquivos após a transferência via FTP. As opções são: Manter os arquivos, deletar os arquivos ou deletar o diretório. O padrão utilizado neste trabalho é deletar os arquivos.

No lado direito do painel frontal estão os indicadores:

- Número de arquivos no diretório: Apresenta a contagem do número de arquivos na pasta da controladora onde estão sendo salvos os arquivos;

- Última modificação: Apresenta a data da última modificação realizada pelo VI FTP;
- Arquivo deletado: Exibe o caminho e nome do ultimo arquivo que foi deletado na controladora cRIO.

Os detalhes de construção deste VI estão no Anexo C. Após a transmissão de arquivos via FTP, o ultimo passo é o pós-processamento dos arquivos em um VI de pós-processamento que será detalhado a seguir.

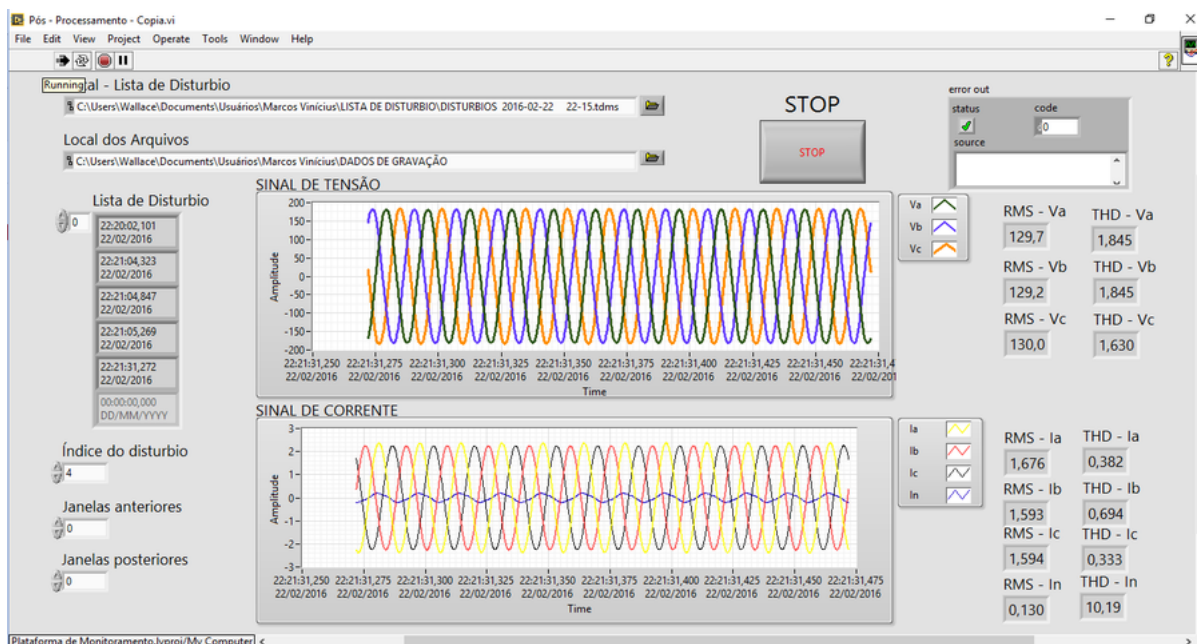
4.5.6 VI de Pós-Processamento

A etapa de pós-processamento é uma das etapas mais importantes, pois fornece o diagnóstico do sistema analisado ao usuário ou pesquisador. Assim, o analista pode extrair informações sobre a forma de onda, distorções harmônicas e valor eficaz na janela em que foi detectado a perturbação. A Figura 43 apresenta o painel frontal do VI de pós processamento. A parametrização do VI se inicia indicando o endereço da lista de distúrbios no campo “Local – lista de distúrbio”. O analista também deve indicar o diretório no qual os arquivos com os dados TDMS foram transferidos pelo VI FTP.

Ao executar o VI, o LabVIEW preenche a lista de distúrbios com a data e o horário das perturbações. Logo abaixo da lista, o analista pode selecionar o número da perturbação que deseja extrair informações. Ao selecionar o índice do distúrbio, o VI de pós-processamento pesquisa no diretório o arquivo de dados do horário em que ocorreu o distúrbio e apresenta os indicadores no painel frontal. Os indicadores apresentados são os valores eficazes das três tensões (V_a , V_b e V_c) e das correntes (I_a , I_b , I_c e I_n). Caso o analista opte, ele pode plotar selecionando janelas anteriores e/ou posteriores da janela em que a perturbação aconteceu para auxiliar no diagnóstico da possível causa da perturbação.

Os detalhes de construção do diagrama de blocos do VI de pós-processamento estão apresentado no Anexo D. Uma das vantagens desta plataforma, é a possibilidade do analista incluir outras ferramentas de análises da qualidade de energia de acordo com sua demanda. Isto é possível, pois o analista tem à sua disposição um banco de dados com as amostras do período em que a plataforma analisou determinado sistema. Como a rotina de seleção da janela de perturbação de acordo com o horário está realizada, basta o analista criar um ramo em paralelo aos cálculos de distorção harmônica e valor eficaz no diagrama de blocos.

Figura 43 – Painel Frontal do VI de Pós Processamento



Dados da Pesquisa

4.6 Considerações Finais

O Capítulo 4 tratou com detalhes sobre a plataforma de monitoramento desenvolvida. A seção 4.1. apresentou a controladora cRIO 9075 da National Instruments que possui um processador em tempo real e um chip FPGA que possibilita análises de dados com extrema velocidade e confiabilidade. Esta controladora possui interface com os módulos de medição de tensão NI 9242 e NI 9227 de medição de corrente. A faixa de medição, a resolução da medição, as frequências de amostragens disponíveis e outros detalhes foram tratados na seção 4.2 e 4.3. Na seção 4.4 foi apresentado o software LabVIEW que é a linguagem de programação utilizada para desenvolver programas (VI's) com os hardwares da National Instruments.

Com as ferramentas apresentadas, na seção 4.5 foi detalhado o algoritmo desenvolvido no LabVIEW para análise da qualidade de energia em sistemas de potência. São analisadas as VTCD's, distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão. A análise das VTCD's e de distorção harmônica foram realizadas no VI Host desenvolvido no processador em tempo real e as análises de distorção harmônica de tensão e desequilíbrio de tensão foram desenvolvidas no VI FPGA. Esta divisão possibilitou equilibrar os recursos da cRIO possibilitando diferentes análises de qualidade da energia em tempo real com alta velocidade e confiabilidade. Estas análises geram uma lista de perturbações que podem ser analisadas em um pós-processamento. Para uma análise apurada das perturbações ocorridas, a plataforma realiza a gravação das amostras para permitir a reconstrução da forma de onda de onda do momento do distúrbio. Como sistemas

embarcados tem recursos computacionais limitados, como por exemplo memória, foi desenvolvido um VI para liberar espaço na controladora 9075, exportando os arquivos para um computador de apoio.

No fim deste capítulo foi apresentado o VI de pós-processamento que fornece ao analista os indicadores de QEE, a forma de onda e a análise dos momentos anteriores e posteriores ao distúrbio. No Capítulo 5 serão apresentados testes e medições realizadas com a plataforma desenvolvida a fim de validar a sua aplicação para análises da qualidade da energia em sistemas de energia.

5 Validação da Plataforma

A validação da plataforma foi realizada no Laboratório de Engenharia de Alta Tensão e Aplicações (LEAT-A) na Universidade Federal de Minas Gerais. Os testes foram realizados a partir de um quadro distribuição com tensão de fase de 127V. Foram realizados cinco testes:

- 1) Efeito do ruído de medição;
- 2) Variação de Tensão no sistema;
- 3) Interrupção momentânea;
- 4) Afundamento de tensão;
- 5) Distorção harmônica.

A seguir serão detalhados cada um destes testes.

5.1 Efeito do ruído de medição

A análise do efeito do ruído consiste em curto-circuitar os canais de medição e realizar a aquisição de dados. Este diagnóstico tem por objetivo medir a ordem de grandeza dos ruídos e verificar se estes estão dentro da resolução esperada por cada módulo de medição. Conforme apresentado nas seções 4.2. e 4.3., o fabricante dos módulos de medição informa que a resolução dos módulos de medição é de 24 *bits*. A resolução esperada seria portanto:

$$r = \frac{2\sqrt{(2)}E_{rms}}{2^b} \quad (5.1)$$

onde:

- *r*: Resolução esperada;
- E_{rms} : Excursão de medição do módulo de medição em valor eficaz (RMS);
- *b*: Número de *bits* do módulo

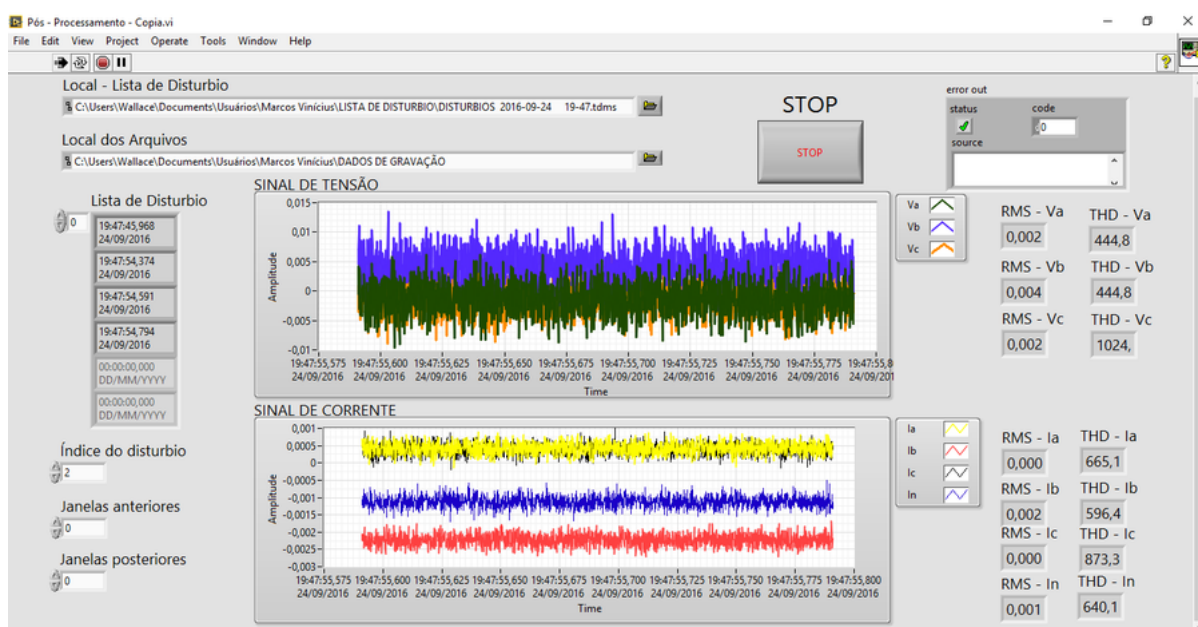
O fabricante do módulo de medição NI 9242 informa que este módulo consegue medir sobretensões de até 600 V_{rms} (Excursão total de 1697 V) e o módulo de medição de corrente, até 14A de pico (Excursão total de 28 A). Substituindo na equação 5.1. obtém-se a resolução esperada de cada módulo apresentada na Tabela 20:

Tabela 20 – Resolução de Medição Esperada pelos Módulos de Medição

Módulo	Resolução esperada
NI 9242	$1,01 \times 10^{-4}$ (V)
NI 9227	$1,67 \times 10^{-6}$ (A)

Os resultados da medição do ruídos com os canais de medição de tensão é apresentado na Figura 44:

Figura 44 – Medição do efeito do ruído nas medição. O teste foi realizado curto-circuitando os canais de tensão e corrente separadamente



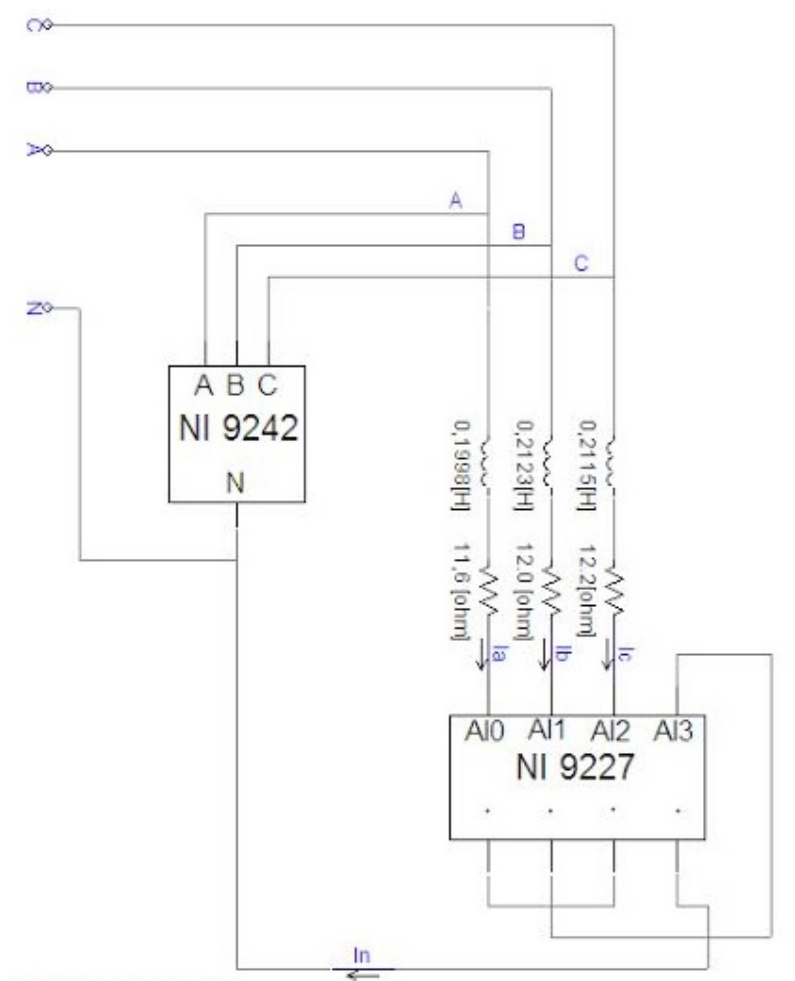
Dados da Pesquisa

O valor eficaz dos ruídos são de $4,82 \times 10^{-3}$ V, para os canais de tensão e de $2,24 \times 10^{-3}$ A para os canais de corrente, sendo inferior a resolução esperada pelos módulos de medição. Entretanto, observa-se que a resolução obtida na medição com os módulos de tensão e corrente apresentam excelente resolução, mesmo que abaixo dos 24 bits informados pelo fabricante.

5.2 Teste de Identificação de Variação de Tensão do Sistema

Os próximos testes da plataforma foram realizados utilizando o circuito mostrado na Figura 45. Da rede trifásica do LEAT-A, foram conectadas três bobinas de impedâncias diferentes. A fase A foi conectada na bobina A com indutância de 0,1998 H e resistência 11,6 Ω . A fase B foi conectada na bobina B com indutância 0,2123 H e resistência de 12,0 Ω e a fase C conectada a bobina C com indutância 0,2115 H e resistência de 12,2 Ω . Em paralelo a estas ligações é conectado o módulo de medição de tensão NI 9242 para as medições das tensões de fase. Após conectar a rede trifásica nas bobinas, o terminal de saída de cada bobina foi conectado nos canais de medição AI0, AI1 e AI2 do módulo de medição NI 9227 para a medição da corrente elétrica de cada bobina. As saídas das três correntes são conectadas conjuntamente a fim de formar a corrente de neutro que por sua vez é conectada no canal AI3 do NI 9227 e ao barramento do neutro do quadro de distribuição do LEAT-A.

Figura 45 – Circuito para Teste na Plataforma de Monitoramento da Qualidade da Energia

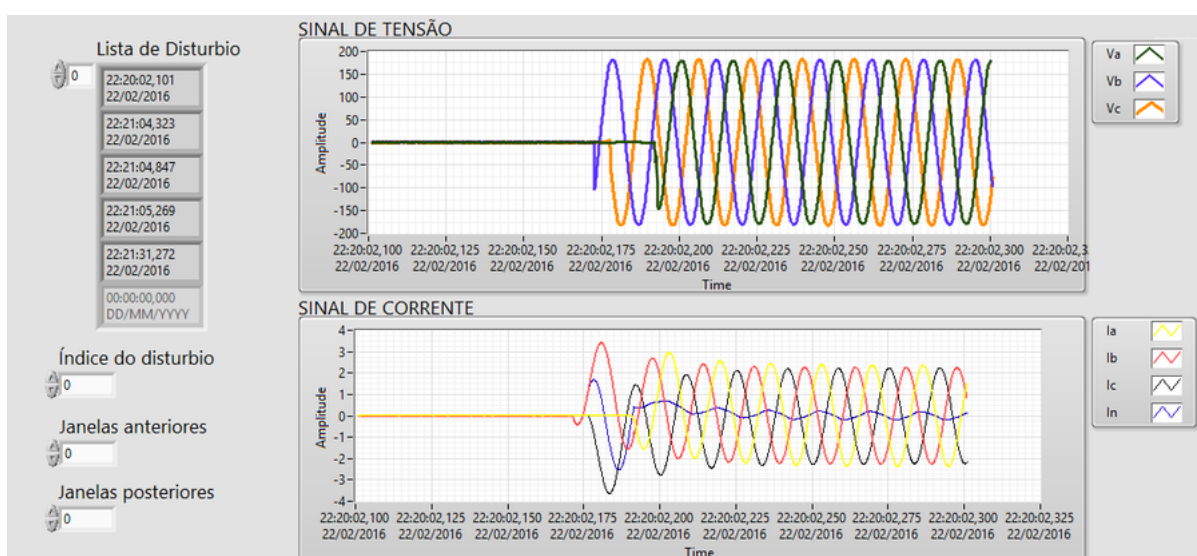


Dados da Pesquisa

O teste de detecção da variação de tensão do sistema consistiu em verificar

se a plataforma detecta a entrada de tensão nos terminais. O teste foi realizado no dia 22/02/2016. Para tal, a plataforma foi iniciada com os terminais do disjuntores desligados às 22 horas e 10 minutos. Às 22 horas e 20 minutos foi ligado os terminais do disjuntor. Como se verifica na Figura 46, a plataforma detectou na posição 0, da lista de distúrbio, o instante que os disjuntores foram ligados. A forma de onda de tensão e corrente confirmam o momento de energização do sistema. Após o fechamento dos terminais do disjuntor, a plataforma identificou mais 3 perturbações na rede até o momento do desligamento dos disjuntores

Figura 46 – Painel Frontal do programa em Labview destacando o momento da mudança de tensão no sistema

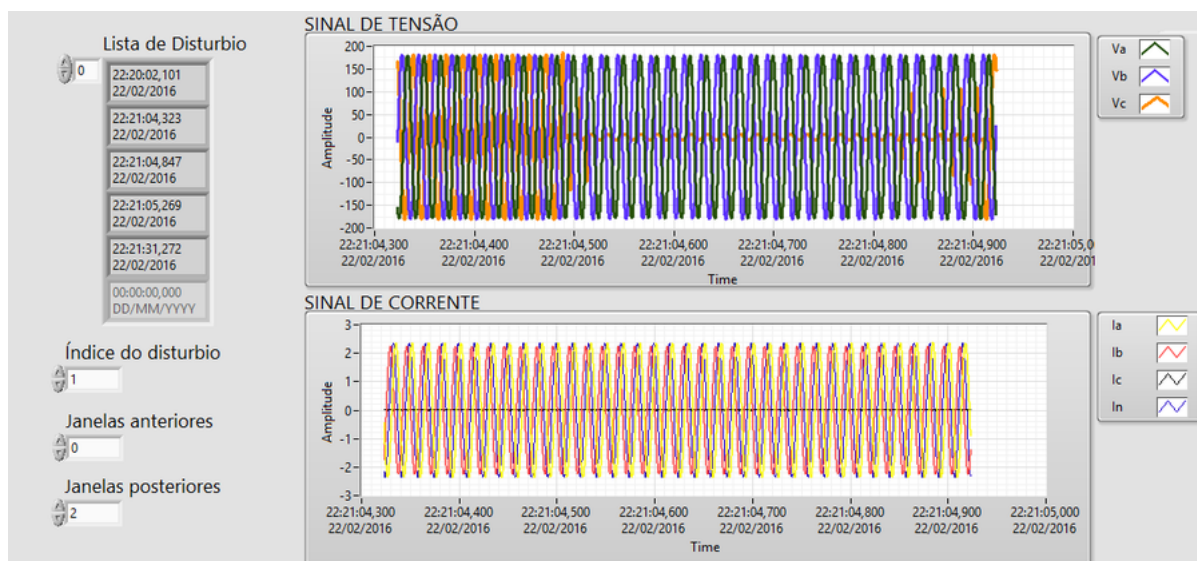


Dados da Pesquisa

5.3 Identificação de Interrupção Momentânea Tensão

Como pode ser visto na Figura 46, a plataforma detectou mais três perturbações após o fechamento do disjuntor. A Figura 47 revela uma análise da perturbação detectada logo após o fechamento dos terminais do disjuntor. Nesta análise, além da janela do distúrbio, foram reconstruídas duas janelas posteriores para auxiliar na análise do distúrbio. Observe que somente a fase C teve uma interrupção momentânea, recuperando logo depois. Provavelmente esta interrupção foi causada por uma falha de contato no disjuntor. Conforme mostrado na lista de distúrbios da Figura 46 e da Figura 47, a plataforma detectou o momento do início e do fim desta interrupção evidenciado a sua eficácia de detecção da interrupção de tensão.

Figura 47 – Interrupção Momentânea da Fase C

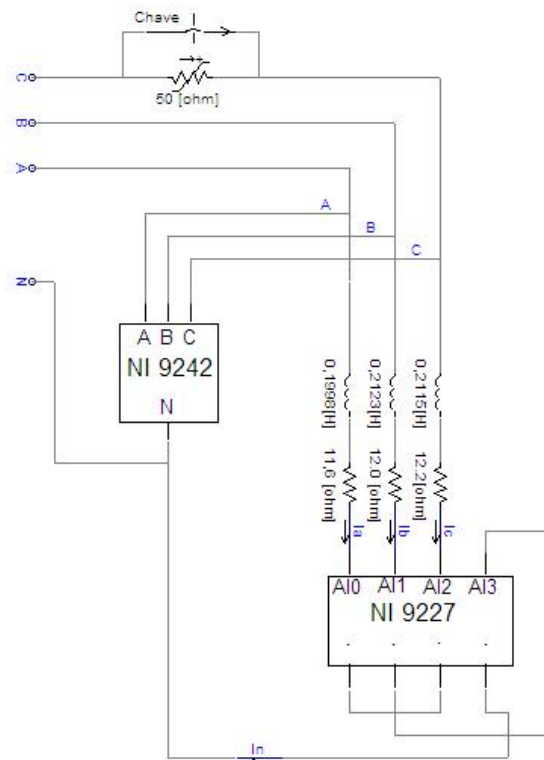


Dados da Pesquisa

5.4 Identificação de Afundamento de Tensão

Para a simulação de afundamento de tensão, inseriu-se neste circuito um resistor variável na fase C como mostrado na Figura 48. Em paralelo a este resistor foi colocado uma chave para determinar o início e o fim da simulação do afundamento. Em condições normais, com a chave ligada, o resistor não causa queda de tensão no circuito. Porém, quando a chave é desligada, toda a corrente do sistema passa através do resistor causando uma queda de tensão. Variando a resistência, modifica-se a severidade do afundamento de tensão emulado.

Figura 48 – Teste de Afundamento de Tensão da Plataforma de Monitoramento



Dados da Pesquisa

Na Figura 48 observa-se que o módulo de medição NI 9242 irá medir a tensão de fase da rede do LEAT-A menos a queda de tensão proporcionada pelo resistor variável inserido no circuito. A relação entre o aumento do valor da resistência e a queda de tensão não é linear, uma vez que o aumento da impedância causa uma diminuição no valor da corrente. Portanto, denominando-se como V_m o valor de tensão medido pelo módulo NI 9242, V_q a queda de tensão causada pelo resistor variável (R_v) e V a tensão de fase do laboratório LEAT-A, a corrente que circula pela carga é dada por:

$$I = \frac{V}{Z} \quad (5.2)$$

, onde:

Z é a impedância total do circuito. Esta impedância é dada pela soma entre a impedância da bobina e a impedância do reostato. Assim:

$$Z = R_b + R_v + j(2\pi 60)L \quad (5.3)$$

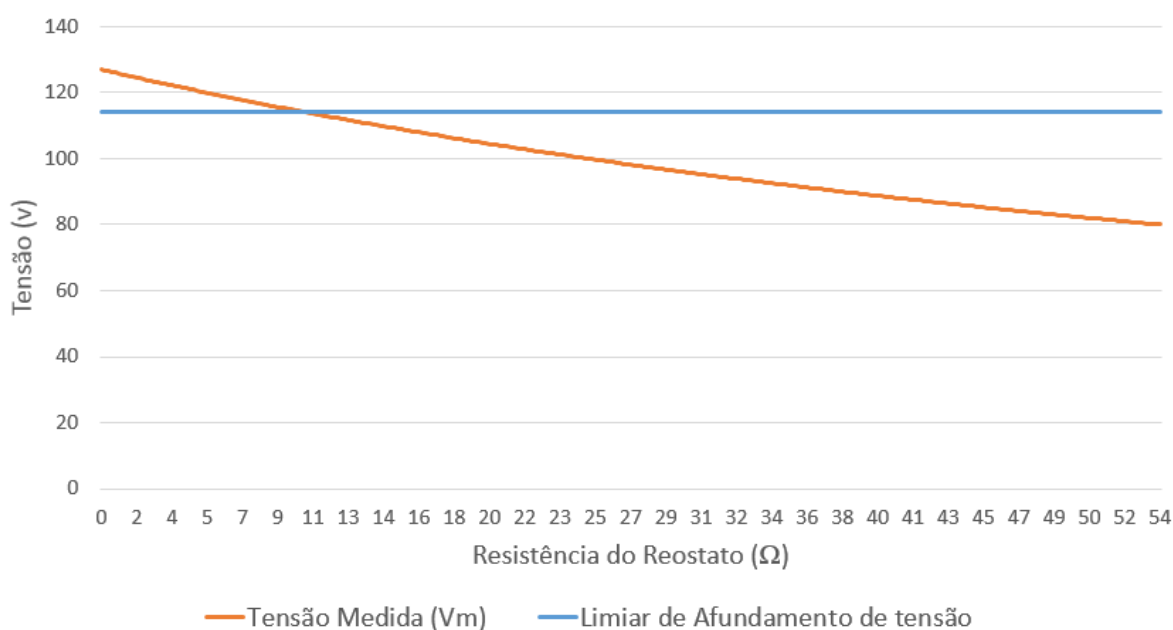
onde R_b é a resistência da bobina e L é a indutância da bobina. O valor da tensão medida portanto será:

$$V_m = V - V_q$$

$$V_m = V - R_v I \quad (5.4)$$

A Figura 49 apresenta o comportamento teórico da tensão medida de acordo com o aumento da resistência no reostato. Conforme preconiza o módulo o módulo 8 do PRODIST, abordado na seção 2.2, para ser considerado afundamento de tensão, o valor eficaz da tensão deve ser menor que 90% do valor nominal da tensão. Neste caso, como a tensão de fase nominal é 127V, o valor limiar é de 114,3V. Para emular um afundamento de tensão para 90% ou inferior é necessário colocar o reostato com uma resistência de no mínimo 10 Ohms.

Figura 49 – Gráfico revelando a queda de tensão provocada pelo aumento da resistência do reostato

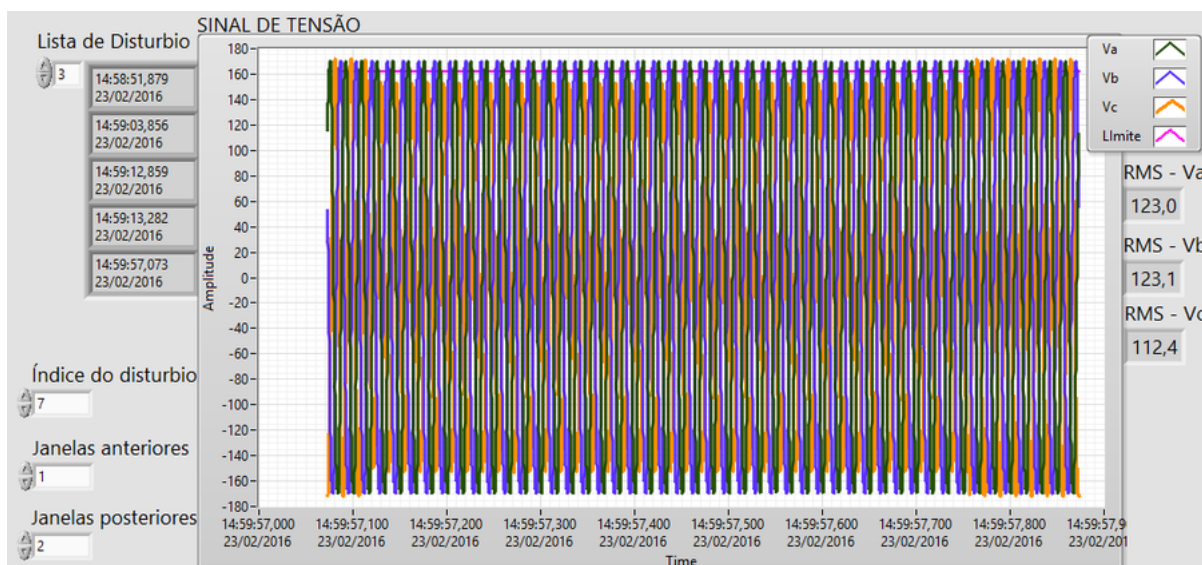


Dados da Pesquisa

Foram realizados testes variando-se a resistência do resistor e observando se a Transformada Wavelet identifica todos os instantes em que o afundamento de tensão era gerado. Em todos estes testes, a plataforma criou o alerta de distúrbio no sistema monitorado. A Figura 50 exibe o limite de detecção de afundamento de tensão, representado pela linha com valor constante no gráfico, e o comportamento das tensão

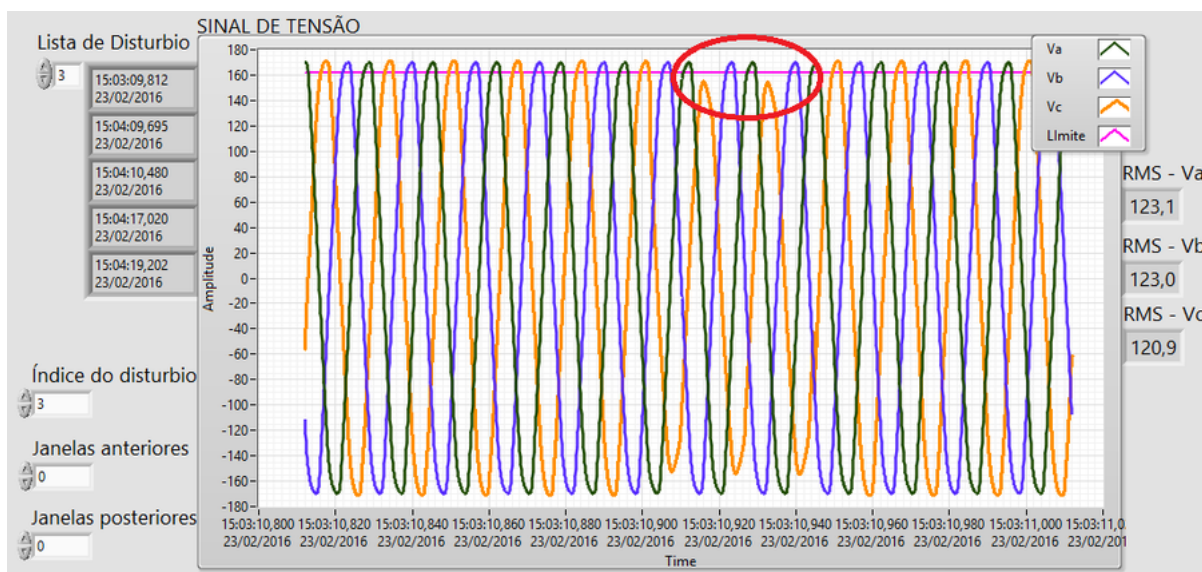
trifásica dos canais em um determinado teste com o reostato com cerca de 12 Ohms. A reconstrução contempla a janela onde o distúrbio ocorreu, uma janela anterior e mais duas janelas posteriores para exibir o momento em que o afundamento de tensão terminou. Durante a emulação do afundamento de tensão, o valor eficaz chegou a 109,3V, retornando após o distúrbio gerado para 123V. A média do valor eficaz destas janelas na fase C foi de 112,4V.

Figura 50 – Afundamento de Tensão Provocado Para Validação da Plataforma



Dados da Pesquisa

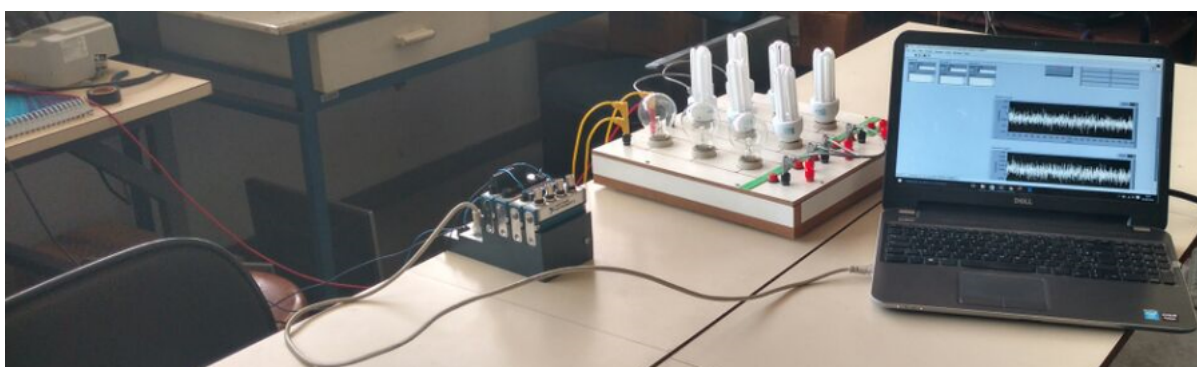
A Figura 51 exibe um outro distúrbio detectado na plataforma na fase C, durante a abertura e fechamento da chave que simula os afundamentos. Observe que mesmo sendo um afundamento extremamente curto e brando, cerca de 2 ciclos e para 80% da tensão nominal, a plataforma detectou e o listou na lista de distúrbio, mostrando assim a eficácia do método de detecção das VTCD's

Figura 51 – Detecção de Afundamento de Tensão Curto e Brando na Fase C

Dados da Pesquisa

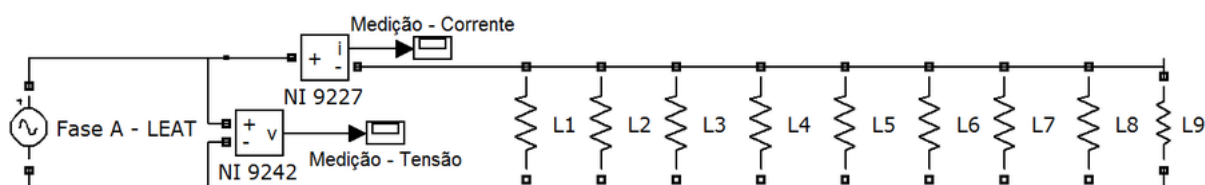
5.5 Identificação de Distorção Harmônica

O teste para identificação de distorção harmônica foi realizado com o auxílio de lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas. As lâmpadas incandescentes são cargas puramente resistivas e possuem uma relação linear de tensão e corrente, ao contrário das lâmpadas fluorescentes compactas, que por conta do circuito retificador na sua entrada, drena uma corrente com alta taxa de distorção harmônica. Para este teste, foi utilizada uma bancada conforme mostrada na Figura 52. O diagrama de ligações desta bancada está apresentado na Figura 53.

Figura 52 – Bancada de Teste para Identificação de Distorção Harmônica de Corrente

Dados da Pesquisa

Figura 53 – Diagrama de Ligação da Bancada de Teste para Identificação de Distorção Harmônica



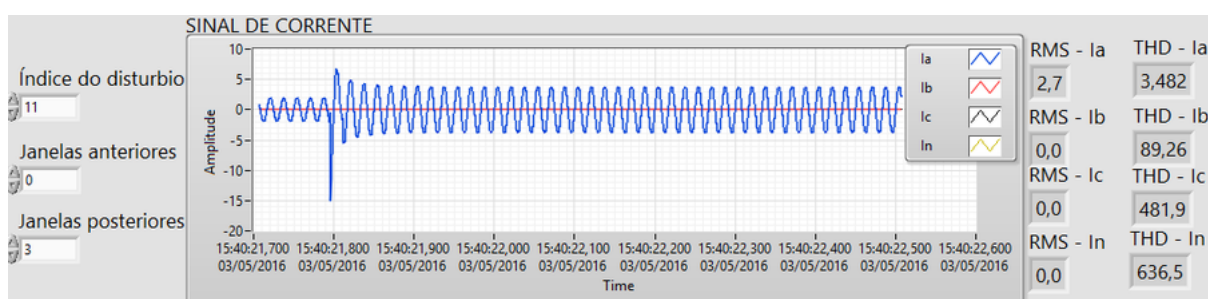
Dados da Pesquisa

As nove lâmpadas foram colocadas em paralelo, utilizando a fase A do LEAT-A. As medições de corrente e tensão foram conectadas nos módulos de medição NI 9227 e NI 9242 respectivamente. O teste consistiu em realizar as seguintes ligações na bancada:

- 1) 3 lâmpadas incandescentes de 60W;
- 2) 6 lâmpadas incandescentes de 60W;
- 3) 6 lâmpadas incandescentes de 60W e 3 lâmpadas fluorescentes de 15W;
- 4) 3 lâmpadas incandescentes de 60W e 6 lâmpadas fluorescentes de 15W;
- 5) 6 lâmpadas fluorescentes de 15W;
- 6) 9 lâmpadas fluorescentes de 15W;

Ao conectar três lâmpadas incandescentes (ligação 1), a plataforma detecta somente o instante da energização das lâmpadas. Em regime permanente, a distorção harmônica de corrente é extremamente baixa, em torno de 2 a 3%. A Figura 54 apresenta forma de onda da janela onde foi conectada mais três lâmpadas incandescentes, totalizando 6 lâmpadas incandescentes no circuito (ligação 2). Observe o valor baixo de distorção harmônica de corrente de 3,48%.

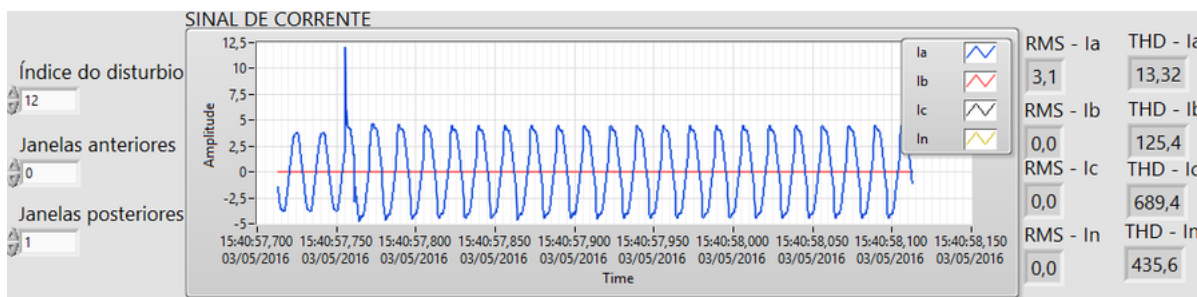
Figura 54 – Forma de onda de corrente drenada por 6 lâmpadas incandescentes de 60 W



Dados da Pesquisa

Na terceira ligação, com 6 lâmpadas incandescentes e 3 lâmpadas fluorescentes, a taxa de distorção harmônica alcançou 13,32% comprovando a expectativa de aumento da distorção da forma de onda pela entrada de cargas não lineares.

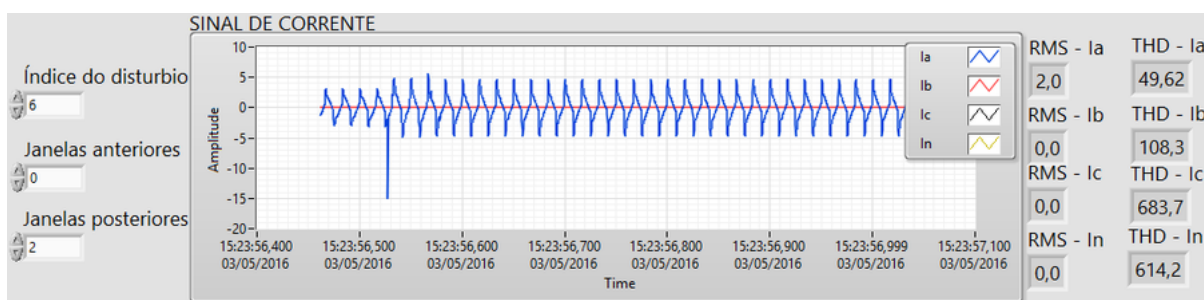
Figura 55 – Forma de onda de corrente drenada por 6 lâmpadas incandescentes de 60W e 3 lâmpadas fluorescentes de 15W



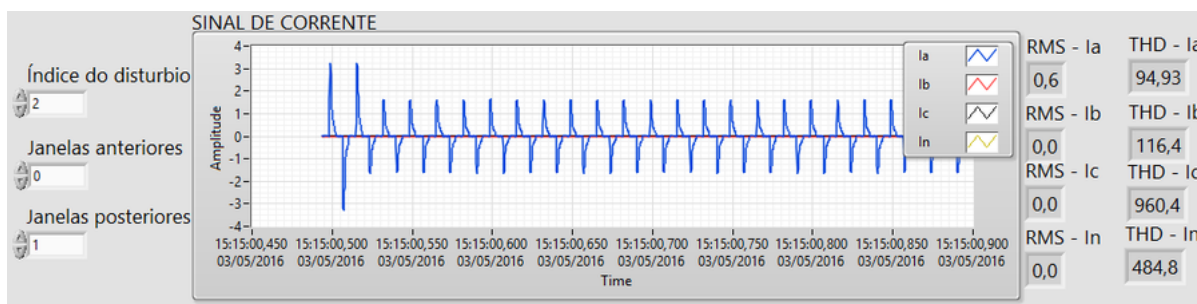
Dados da Pesquisa

As ligações 4,5 e 6 apresentam o aumento da taxa de distorção harmônica de corrente com o aumento da potência das cargas não lineares. A ligação 4, com 3 lâmpadas incandescentes e 6 lâmpadas fluorescentes apresentou uma distorção harmônica de corrente de 49,62%. As ligações 5 e 6 foram realizadas somente com lâmpadas fluorescentes, 6 e 9 lâmpadas respectivamente, e apresentaram uma taxa de distorção harmônica de 94%. As Figuras 57 e 58 apresentam a forma de onda destas duas ligações.

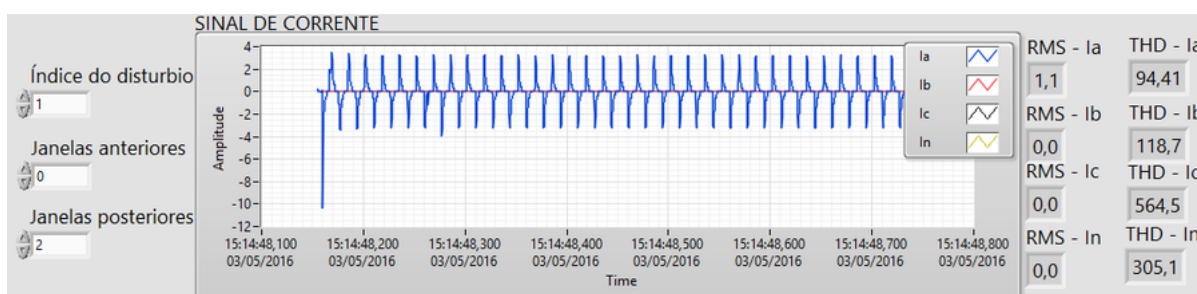
Figura 56 – Forma de onda de corrente drenada por 3 lâmpadas incandescentes de 60W e 6 lâmpadas fluorescentes de 15W



Dados da Pesquisa

Figura 57 – Forma de onda de corrente drenada por 6 lâmpadas fluorescentes de 15W

Dados da Pesquisa

Figura 58 – Forma de onda de corrente drenada por 9 lâmpadas fluorescentes de 15W

Dados da Pesquisa

Apesar das altas taxas de distorção harmônica total de corrente, em nenhum dos casos os valores de corrente harmônicas ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma IEC 61000-3-2.

5.6 Considerações Finais

O Capítulo 5 apresentou os testes e as validações da plataforma de monitoramento proposta neste trabalho. A seção 5.1 tratou do efeito do ruído nas medições dos módulos de tensão e corrente. Para este teste, os canais de medição foram curto-circuitados. A análise constatou que os ruídos estão na escala dos mV e mA.

As seções 5.2 e 5.3 abordaram os testes de variação de tensão do sistema, e de interrupção momentânea. Para estes testes, foi preparado um circuito composto por três cargas resistivas-indutivas. A plataforma se mostrou eficaz tanto no processo de detecção e de reconstrução da forma de onda. O teste de identificação de variações de tensão de curta duração foi abordado na seção 5.4. Para este teste, foi inserido no circuito uma chave e um reostato em paralelo para causar uma queda de tensão no sistema. Em todos os afundamentos de tensão emulados, a plataforma foi eficaz na detecção, inclusive em afundamentos de tensão curtos (cerca de 2 ciclos) e brandos (para 80% da tensão nominal).

No final do Capítulo 5, na seção 5.5 foi realizada uma análise sobre as taxas de distorção harmônica de corrente em uma bancada composta por lâmpadas incandescente e fluorescentes compactas. O próximo capítulo, é a conclusão do trabalho, onde o leitor poderá ter a visão geral do trabalho bem como os resultados alcançados.

6 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada a construção de uma plataforma de monitoramento de alto desempenho da qualidade da energia elétrica. Esta plataforma é útil em diversos setores como indústrias, distribuidoras de energia e universidades, pois permite uma análise detalhada sobre a qualidade de energia em um sistema de potência.

A característica de alto desempenho da plataforma é proporcionada pela resolução do conversor A/D de 24 *bits*, o processamento de dados em alta velocidade sem perda de informações e a detecção em tempo real das variações de tensão de curta duração, desequilíbrio de tensão e distorção harmônica de tensão e corrente. Adicionalmente, o sistema grava de forma contínua todos os dados de todos os canais de medição. Além disto, a plataforma desenvolvida permite a reconstrução das formas de onda dos instantes em que ocorreram perturbações. São características que complementam as informações fornecidas pelos sistemas de monitoramento de qualidade da energia comerciais que existem atualmente.

As ferramentas de cálculo utilizadas neste trabalho foram as transformadas de Fourier e a transformada Wavelet. A transformada de Fourier é a ferramenta preconizada pela norma IEC 61.000-3-2 para análises de distorções harmônicas. A transformada Wavelet é uma ferramenta de processamento sinais com uso relativamente recente, com grande desenvolvimento após a década de 80, e que permite identificações de mudanças locais no sinal extraindo informações simultâneas de tempo e frequência.

O hardware escolhido para foi a controladora Compact Rio da National instruments que combina um chip FPGA e um processador em tempo real. A utilização do chip FPGA permitiu a aquisição de dados e cálculos com alta velocidade, confiáveis, e com verdadeiro paralelismo, uma vez que os cálculos são realizado diretamente no hardware e não em um sistema operacional. Uma outra vantagem do uso do FPGA é a flexibilidade de reprogramar seu hardware no momento que desejar. No entanto, o chip FPGA possui recursos de cálculos e memória limitados, assim, um dos desafios do trabalho foi programar o chip FPGA com uma rotina que não ultrapasse a capacidade de execução de cálculo do chip FPGA. No chip FPGA são efetuadas análises de desequilíbrio de tensão e de distorção harmônica de tensão.

O processador Real-Time complementa as análises de qualidade da energia proposta neste trabalho. Neste ambiente são executadas as análises de variações de tensão de curta duração utilizando a transformada Wavelet, análise de distorção

harmônica de corrente de acordo com a norma IEC 61.000-3-2 e a gravação de dados medidos de tensão e corrente.

Na implementação do algoritmo, buscou-se uma configuração que usasse de forma equilibrada os recursos da controladora cRIO e do chip FPGA . Testes de validação foram efetuados evidenciando a correção e a adequação da plataforma de monitoramento implementada. Para a validação da plataforma, foram efetuados testes de interrupção momentânea, afundamento de tensão e de distorção harmônica, nos quais a plataforma se mostrou eficaz na detecção dos mesmos.

A etapa de pós-processamento possui uma interface gráfica intuitiva e de simples manuseio para o usuário. O usuário seleciona o índice do distúrbio de interesse, e o painel frontal apresenta a forma de onda, indicadores de valor eficaz e de distorção harmônica. O usuário também tem a opção de reconstruir janelas anteriores ou posteriores ao distúrbio o que permite avaliar com maior acuidade as causas de uma determinada perturbação.

Apesar dos resultados relevantes alcançados pelo trabalho, o autor espera que o desenvolvimento deste trabalho não se encerre com esta dissertação de mestrado. Como sugestões de trabalho futuro, inclui-se:

- Ampliar os indicadores de qualidade da energia analisados: incluir indicadores de flutuação de tensão, variação de frequência, inter-harmônicos, dentre outros;
- Criar relatórios automáticos diários, semanais e mensais sobre a qualidade da energia;
- Analisar o comportamento de outras famílias de Wavelet na detecção de distúrbios;
- Na etapa de pós-processamento classificar os distúrbios e identificar em quais canais ocorreram as perturbações.

Finalmente, o autor não espera que a plataforma desenvolvida neste trabalho substitua os sistemas de monitoramento existentes, mas sim deseja que seja uma ferramenta complementar a análises de sistemas de potência proporcionando aos analistas realizar diagnósticos mais precisos sobre falhas nos sistemas elétricos.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Acesso a Informação*. 1997. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=636&idPerfil=3&idiomaAtual=0>>. Citado na página 32.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*. Oitava. Brasília, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M~A\global\let\T1\textthreesuperior\unhbox\voidb@x{\def{\MessageBreakfor\symbol'\textthreesuperior'}\edefT1{TS1}\xdefT1/phv/m/it/12{T1/phv/m/n/12}\begingroup\escapechar\m@ne\let\MT@subst@T1/phv/m/it/12\def{\@@par}}\T1\textthreesuperior\textthreesuperiordulo1_Revisao_8.pdf>. Citado 6 vezes nas páginas 32, 33, 34, 35, 36 e 39.
- AMARAL JÚNIOR, P. A. *Medição de Qualidade da Energia Elétrica Sincronizadas via IEEE1588*. 2014 — Universidade Federal de Minas Gerais. Citado na página 78.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. *About ANSI*. 2015. Disponível em: <http://www.ansi.org/about_ansi/overview/overview.aspx?menuid=1>. Citado na página 23.
- ARAÚJO, G. A. A. de. *Wavelets Monocíclicas de Suporte Compacto Construídas a partir de Distribuições Beta*. 2007. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- ARRUDA, E. F. de. *Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet*. 2003. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo. Citado 6 vezes nas páginas 58, 59, 60, 61, 64 e 123.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT - Conheça a ABNT*. 2015. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/abnt/conheca-a-abnt>>. Citado na página 31.
- BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. New York, USA: IEEE Press, 2000. Citado na página 16.
- COOLEY, J. W.; LEWIS, P. A. W.; WELCH, P. D. The Fast Fourier Transform and Its Applications. *IEEE*, United States, v. 12, n. 1, p. 27 – 34, March 1969. Citado na página 51.
- CORGOZINHO, I. M. et al. Análise da Interação Harmônica em Sistemas Elétricos de Distribuição com Alta Penetração de Sistemas Fotovoltaicos. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 17.
- DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. New Jersey: Springer, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. *Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica*. [S.l.], 2010. Citado na página 22.

DUGAN, R. et al. *Electrical Power Systems Quality*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION. *Who we are*. 2015. Disponível em: <<http://www.cenelec.eu/aboutcenelec/whoweare/index.html>>. Citado na página 22.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA. *O que é ISO?* 2015. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/responsabilidade_social/o-que-iso.asp>. Citado na página 23.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *61000-4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. Geneva, Switzerland, 2002. Citado 6 vezes nas páginas 23, 25, 26, 27, 29 e 54.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *61000-4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. Genebra, 2003. Citado na página 29.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Structure of IEC 61000*. 2015. Disponível em: <http://www.iec.ch/emc/basic_emc/basic_61000.htm>. Citado na página 23.

KOPPARAPU, C.; CHANDRASEKARAN, A. A study on the Application of Wavelet Analysis to Power Quality. In: *Proceedings of the Thirtieth Southeastern Symposium on*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 350 – 353. Citado na página 60.

L.ANGRISANI; M.D'APUZZO; A.TESTA. A Measurement Method Based on the Wavelet Transform for Power Quality Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Itália, v. 13, n. 4, p. 990 – 998, october 1998. Citado na página 60.

LIMA, P. C. de. *Wavelets: Teoria, Algoritmos e Aplicações*. Belo Horizonte, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 61.

MAIA, R. M. *Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia*. 2011. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

MISITI, M. et al. *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB*. [S.l.], 1996. Citado 5 vezes nas páginas 58, 61, 62, 63 e 64.

MONTEIRO, H. L. M. *Cálculos de Harmônicos e Inter-Harmônicos Baseados na Norma IEC 61000-4-7*. 2014. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. Citado na página 27.

MONTEIRO JUNIOR, A. *Modelagem da Usina Fotovoltaica do Estádio do Mineirão para Estudos de Propagação Harmônica*. 2014. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Citado na página 30.

- NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. *About the National Electrical Manufacturers Association*. 2015. Disponível em: <<http://www.nema.org/About/pages/default.aspx>>. Citado na página 22.
- National Instruments. *Manual de treinamento do LabVIEW Básico I*. [S.l.], 2001. Citado na página 78.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *Instrumentação Virtual*. 2009. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/4752/pt/>>. Citado na página 79.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *Avoiding Buffer Errors in DMA Applications (FPGA Module)*. 2011. Disponível em: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371599G-01/lvfgaconcepts/fpga_dma_fifo_buffer_size/>. Citado na página 121.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *Transferring Data Using Direct Memory Access (FPGA Module)*. 2012. Disponível em: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371599H-01/lvfgaconcepts/fpga_dma_communication/>. Citado na página 84.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *LabVIEW FPGA Compilation Process: From Run Button to Bitfile*. 2014. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/9381/en/#toc5>>. Citado na página 87.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *User Manual and Specification NI 9242*. [S.l.], 2014. Citado na página 74.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *LabVIEW FPGA Floating-Point Data Type Support*. 2015. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/14188/en/>>. Citado na página 83.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *The NI TDMS File Format*. 2015. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3727/en/>>. Citado na página 93.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *Por que escolher a compact RIO?* 2016. Disponível em: <<http://www.ni.com/compactrio/whychoose/pt/>>. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 71.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *O ONS*. 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/institucional/o_que_e_o_ons.aspx>. Citado na página 32.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. *Discrete-Time Signal Processing*. Second. New Jersey: Prentice Hall, 1998. ISBN 0-13-754920-2. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 57.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. *Sinais e Sistemas*. Segunda. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2010. ISBN 978-85-7605-504-4. Citado 5 vezes nas páginas 46, 47, 50, 51 e 52.
- POWER SENSORS LIMITED. *PQUBE 3*. 2016. Disponível em: <<http://www.powersensorsltd.com/PQube3.php>>. Citado na página 42.
- QENERGIA. *PQube – O analisador de qualidade de energia de alta precisão Low-Cost*. 2016. Disponível em: <<http://www.qenergia.pt/content/index.php?action=detailfo&rec=370>>. Citado na página 41.
- RODRIGUES, L. C. P. *Técnicas para a Detecção, Classificação e Localização no tempo das Variações de Tensão de Curta e Longa Duração*. 2008. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo. Citado 4 vezes nas páginas 60, 64, 68 e 123.

SANTOS, M. de N. N. *Monitoração e Análise de Grandezas da Qualidade da Energia Elétrica em Processos Industriais Utilizando Instrumentação Virtual*. 2011. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. Citado 7 vezes nas páginas 22, 23, 25, 26, 29, 30 e 32.

SANTOSO, S. et al. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Texas, v. 11, n. 2, p. 924 – 930, April 1996. Citado na página 60.

SILVA, D. H. de J. *Processamento de Sinais Para Monitoramento de Vibrações em Unidades Geradoras Hidrelétricas*. 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Citado 6 vezes nas páginas 47, 52, 53, 54, 65 e 66.

SOUZA, M. E. M. de. *Inserção de Microgeração Distribuída nas Redes de Baixa Tensão: Implantação de Telhados Solares - Estudo de caso Real*. 2014. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais. Citado na página 17.

Anexos

ANEXO A – VI Set cRIO Time

O diagrama de blocos do VI set cRIO Time é apresentado na Figura 59. Da esquerda para a direita, o primeiro bloco ‘System Configuration’ seleciona qual sistema o usuário deseja configurar. Assim, o usuário pode escolher entre diferentes controladora, aquela que ele deseja configurar. Após o usuário escolher o sistema que deseja configurar, o fluxo de dados segue para o bloco ‘Initialize Session’ que inicializa qualquer VI de configuração do sistema para coletar informações de um destino especificado. Com a sessão aberta, o próximo passo é definir a hora do sistema. Para tal, utiliza-se o bloco Get Date/Time que obtém a hora e o fuso horário do computador que está sendo executado o VI. Com a informação da hora do sistema, este dado é enviado ao bloco ‘Set Time’ que define a hora da controladora. Em alguns casos, esta mudança da hora do sistema requer uma reinicialização da controladora. Esta reinicialização é realizada através da estrutura “Case” e o bloco “Restart”.

Figura 59 – Diagrama de Blocos do VI Set cRIO Time

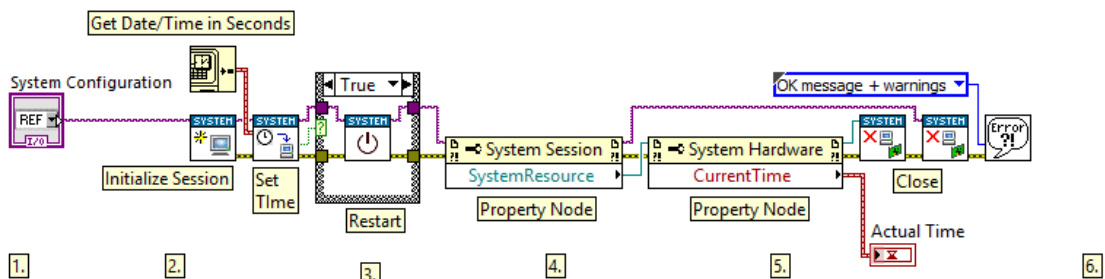


Diagrama de Blocos VI Set cRIO Time

Depois da mudança da hora do sistema e da reinicialização do sistema, o VI exibe ao usuário qual é a hora corrente da controladora. Este passo é importante para o usuário determinar se a mudança ocorreu efetivamente ou ocorreu algum erro na troca do horário da controladora. Esta aferição acontece através do bloco ‘Property Node’ que lê uma propriedade de uma determinada referência. O primeiro ‘Property Node’ chamado “System Resource” recupera os dados do sistema da cRIO e o segundo ‘Property Node’ fornece o dado específico da hora corrente do hardware. Esta informação é exibida ao usuário no painel frontal através do bloco ‘Actual Time’. Finalmente, o último passo é fechar a “System Resource” e a sessão inicializada no bloco ‘Initialize Session’.

ANEXO B – VI HOST

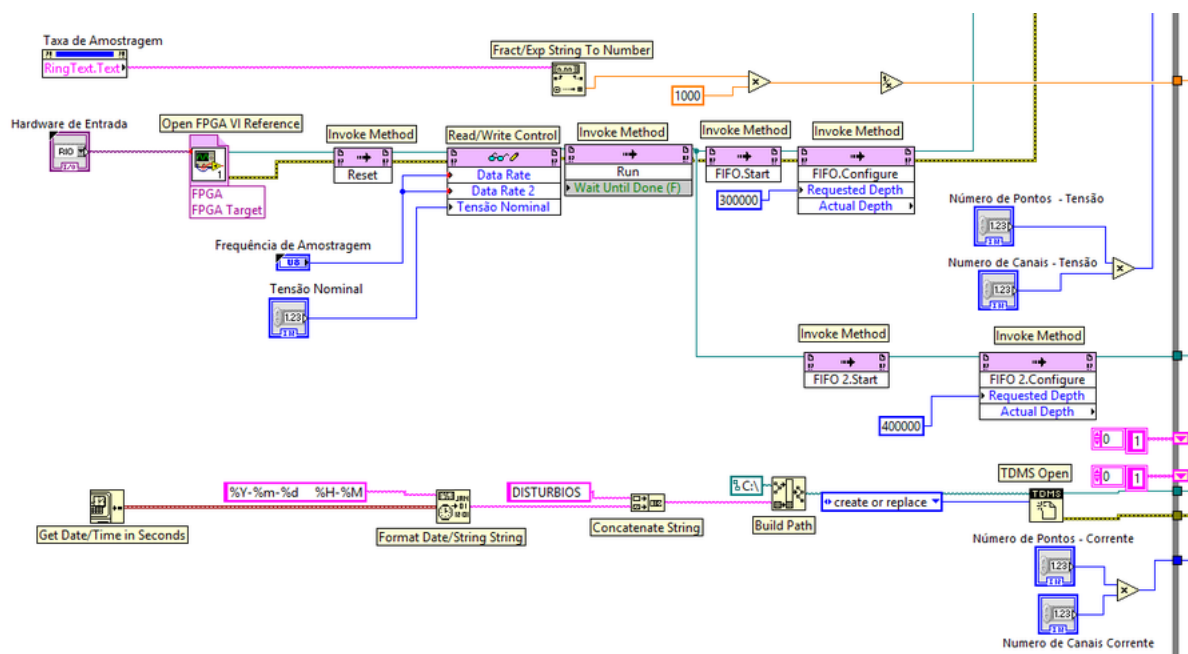
Neste anexo é apresentado com detalhes o diagrama de blocos do VI Host. Para melhor compreensão do leitor, a descrição deste VI será através de suas subpartes e no fim será mostrada como estas subpartes se interagem.

B.1 Inicialização do VI

A etapa de inicialização do VI Host é responsável por configurar a aquisição de dados e os dados do sistema a ser analisado. O primeiro passo, é indicar ao VI Host qual dispositivo FPGA ele deve estabelecer conexão. Esta tarefa é realizada através do bloco 'Open FPGA VI Reference'. Após esta indicação para o VI Host, existe um bloco de 'Invoke Method' que é responsável por resetar o VI FPGA. Assim, o fluxo de dados segue para a função 'Read/Write Control', que tem objetivo configurar a frequência de amostragem no VI FPGA conforme explicado na seção 4.5.2. Com a frequência de amostragem ajustada, utiliza-se um outro bloco 'Invoke Method' que envia o comando 'Run' para o VI FPGA.

Uma ação importante é inicializar as estruturas FIFO e configurar o tamanho do buffer desta. A National Instruments recomenda utilizar cinco vezes o número de elementos que serão lidos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011). Assim, como se deseja trabalhar com uma frequência de 10 kHz e uma janela de 200 ms conforme estabelece a norma IEC 61000-4-7, têm-se que cada canal deve ler 2000 amostras a cada interação. Assim o Buffer da FIFO foi definido em 30.000 elementos para a FIFO do Canal de tensão e de 40.000 elementos para a FIFO 2 sobre corrente, uma vez que são 3 canais de tensão e 4 canais de corrente.

Figura 60 – Inicialização do VI Host



Inicialização do VI Host

Outra tarefa realizada na etapa de inicialização do VI Host, mostrada na parte superior da Figura 60, é o cálculo do intervalo de tempo dt entre as amostras. Este dado é calculado como inverso da frequência de amostragem. Como é um parâmetro fixo em uma determinada aquisição de dados, é interessante que este seja calculado fora do While Loop, o que evita que o processador Real-Time refaça este cálculo a cada passo interação. Nesta etapa, também há a inicialização de uma matriz de zeros que será responsável pelo preenchimento inicial da lista de distúrbios.

Finalmente, na parte inferior da Figura 60 ocorre a inicialização do arquivo .tdms referente a lista de distúrbios. Para facilitar a busca no pós-processamento, quando o usuário executar o VI Host, o nome do arquivo gerado será o nome “DISTURBIO” seguido da data e hora do momento inicial da execução.

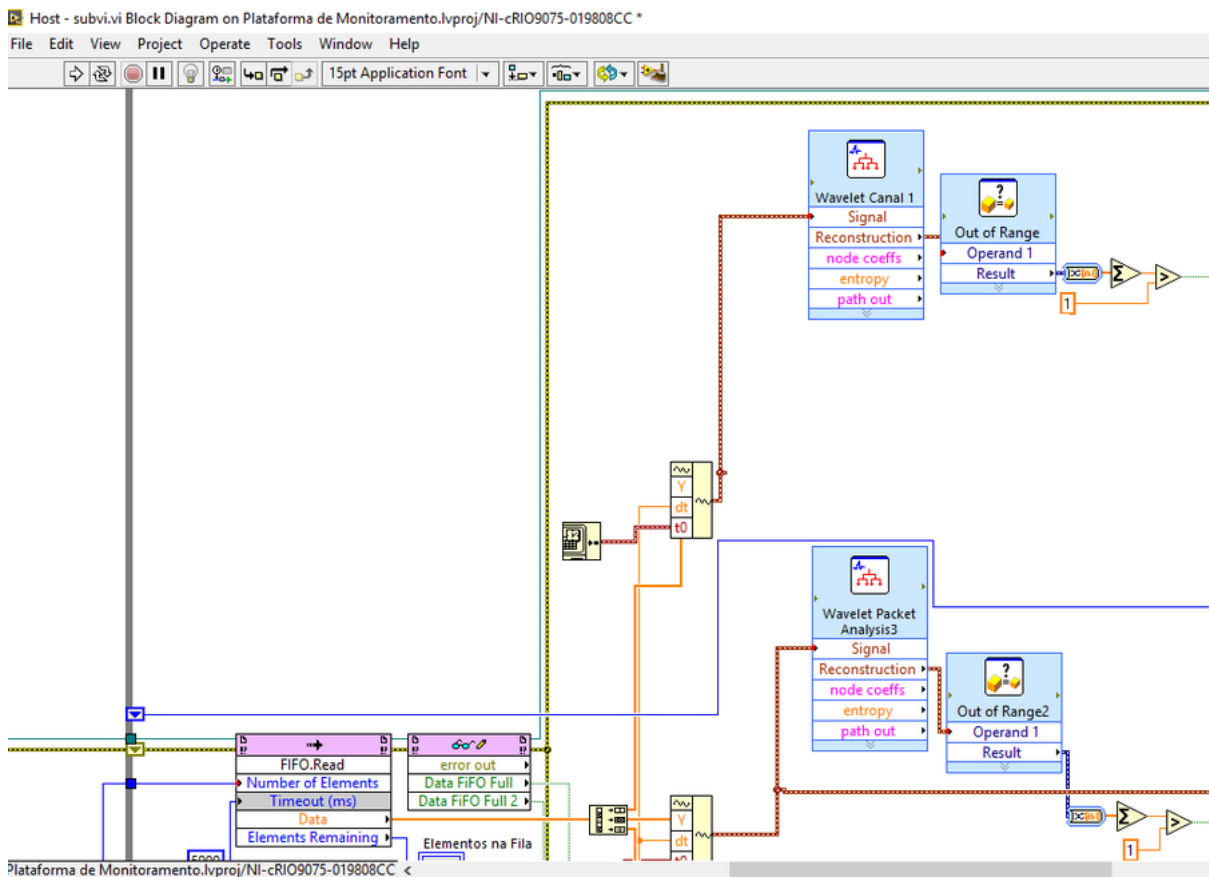
B.2 Detecção de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)

Os parâmetros definidos no início do VI Host são enviados a uma estrutura ‘While Loop’ que executará o código até o momento que ocorrer um erro ou o usuário desejar interromper. A primeira função deste Loop é realizar a leitura dos dados vindos através do canal DMA pela FIFO. Para tal, a FIFO deve ser alimentada pela referência do arquivo FPGA, pelo número de elementos a ser lido, e pelo indicador ‘Timeout’. Este indicador especifica o tempo de espera por espaço disponível, quando a FIFO está cheia. Após a leitura dos arquivos, a matriz de 3 linhas referentes aos canais

de tensão e a matriz de 4 linhas referentes as medições dos canais de corrente são separadas e cada canal é submetido a um processo de análise.

A Figura 61 exibe o *print screen* do diagrama de blocos do VI Host focalizando a parte do processamento dos canais de tensão. Observe que após a leitura e separação da matriz em canais, os dados são enviados em um bloco ‘cluster’ onde são agrupados as amostras medidas pelo módulo NI 9242, o intervalo dt entre as amostras e a hora de início da medição. O resultado deste cluster é submetida a análise de da Transformada Wavelet Discreta conforme demonstrado na seção 3.3. A família de Wavelet escolhida neste trabalho é a família Daubechies de ordem 4, pois esta apresenta melhores resultados em detectar distúrbios da qualidade da energia conforme dissertado por (RODRIGUES, 2008; ARRUDA, 2003).

Figura 61 – Leitura dos Canais de Tensão e Análise de Wavelet



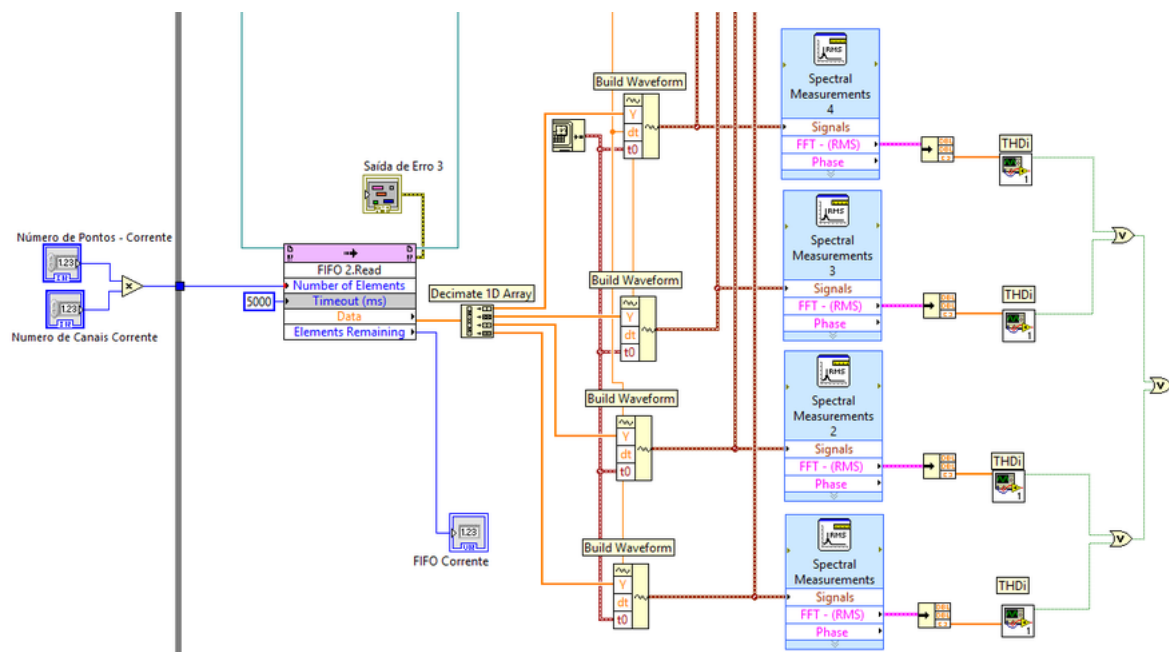
Dados da Pesquisa

B.3 Detecção de violações dos limites de correntes harmônicas

Os detalhes do diagrama de blocos da análise de violações dos limites de correntes harmônicas são apresentados na Figura 62. A figura detalha a análise dos canais de corrente. O cluster de dados é submetido ao bloco “Spectral Measurement”,

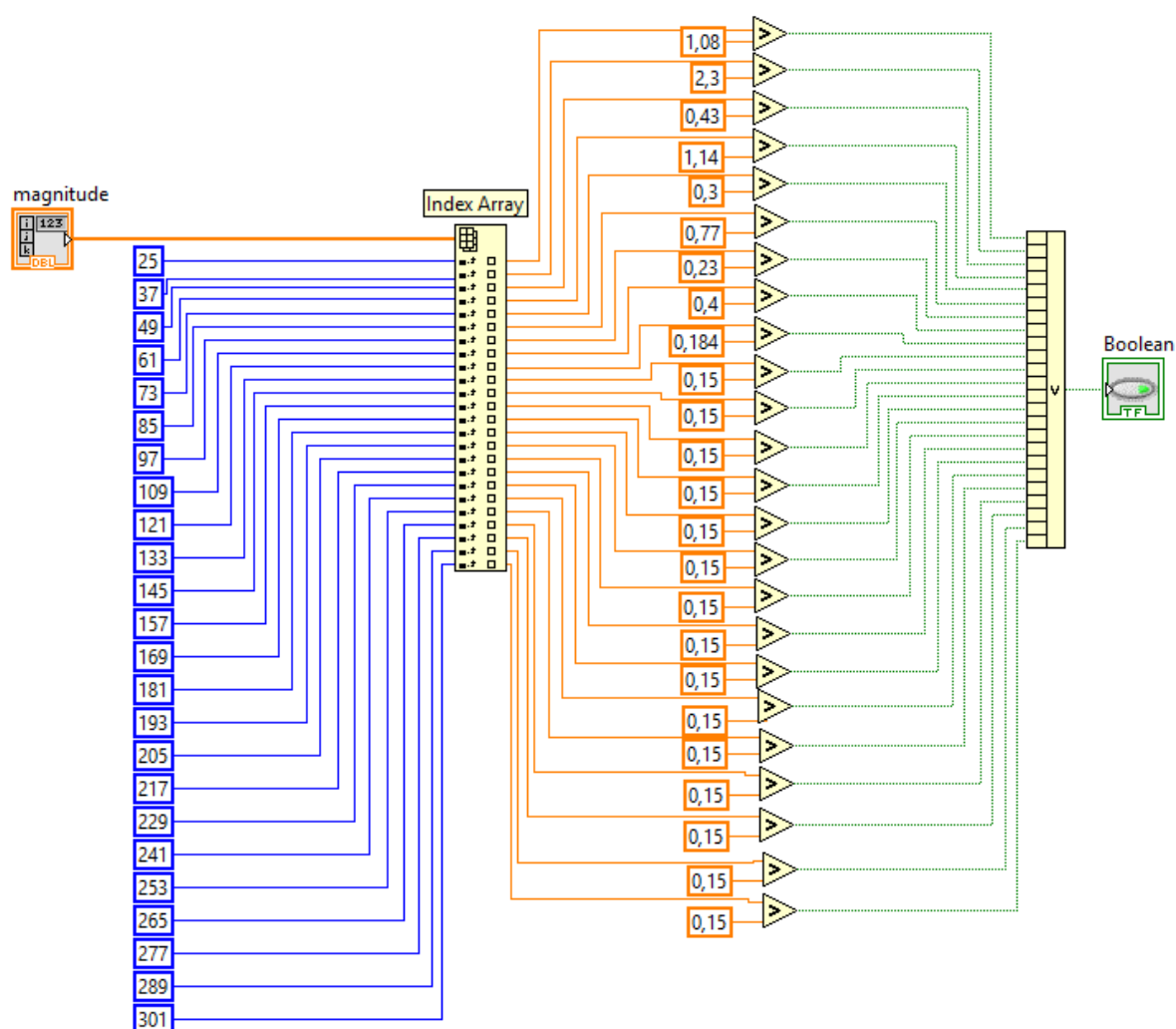
onde se calcula a transformada de Fourier com base no algoritmo da FFT. O resultado é submetido a um subVI denominado de THDi que compara a corrente de cada harmônica com os limites estabelecidos pela norma IEC 61000-3-2. Na Figura 63, este subVI é detalhado. Observe que o vetor de entradas da FFT é submetido a um bloco denominado 'index Array' que retira do vetor os valores das posições indicadas no lado esquerdo. Cada posição desta é referente a uma ordem harmônica.

Figura 62 – Leitura dos Canais de Corrente e análise de Fourier



Dados da Pesquisa

Figura 63 – Sub VI de comparação das correntes harmônicas até a ordem 25 de acordo com a norma da IEC 61000-3-2

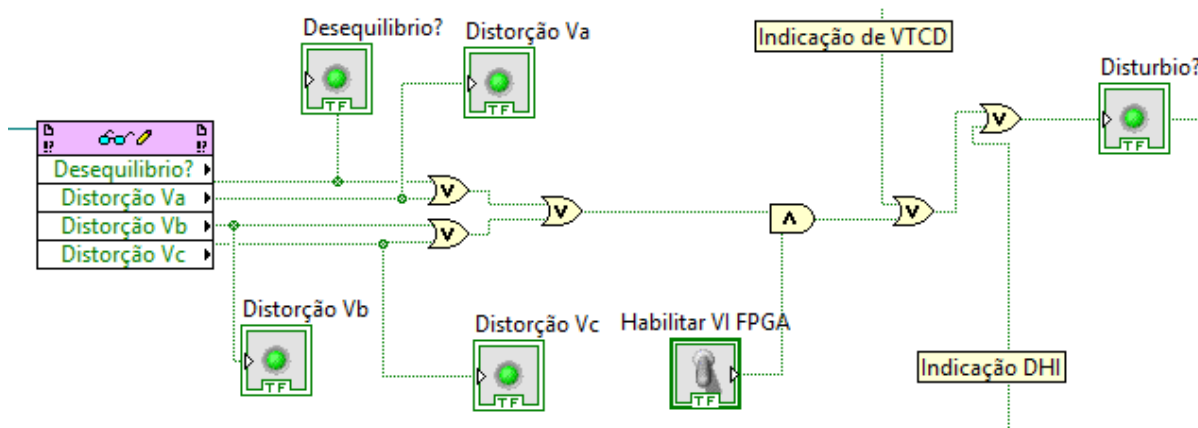


Dados da Pesquisa

B.4 Lista de Distúrbios

Realizados os algoritmos de detecção de desequilíbrio de tensão, distorções harmônicas de corrente e tensão e variações de tensão de curta duração, o próximo passo é criar uma lista com as datas e os horários que aconteceram cada distúrbio. Esta lista tem por objetivo auxiliar o pós-processamento, indicando em que momento aconteceram estes eventos. A Figura 64 exibe a função 'Read/Write/Control' do LabVIEW que traz para o VI Host as informações sobre desequilíbrio e distorções harmônicas de tensão que foram analisadas no VI FPGA. Estes indicadores são combinados, juntamente com os indicadores de VTCD e de distorção harmônica de corrente (DHI), em uma sequência de bloco lógicos "OR" até um indicador de distúrbio. É inserido uma porta AND com um controle booleano para habilitar ou desabilitar a gravação dos distúrbios detectados no VI FPGA.

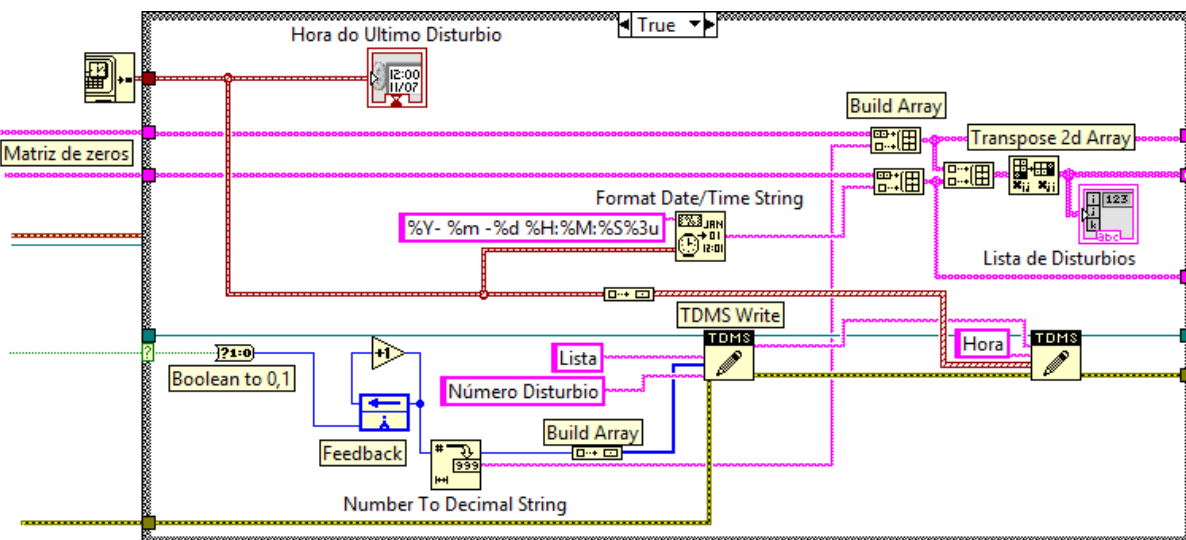
Figura 64 – Indicação dos distúrbios de qualidade da energia



Dados da Pesquisa

Com a indicação do momento que aconteceu um determinado distúrbio, este indicador é ligado a uma estrutura "Case" do LabVIEW. Esta estrutura possui dois quadros de execução. Um quadro é executado quando uma condição é verdadeira e o outro quadro é executado quando a condição é falsa. No caso do presente estudo, na condição falso, ou seja, não há distúrbio, o quadro não executa nenhuma função. No entanto se for verdadeiro, a estrutura monta uma lista de distúrbios. A Figura 65 exibe o quadro da estrutura 'Case' quando o indicador booleano é verdadeiro. O primeiro passo é converter um sinal verdadeiro ou falso em um número. Isto é feito graças a função 'Boolean to 0,1'. Após esta conversão, a cada novo distúrbio, soma-se 1 ao número anterior. Assim, cada distúrbio medido tem o seu indexador. Este índice é transformado em um tipo de dados "string" e enviado a uma tabela disponível no painel frontal e para o arquivo. tdms inicializado conforme mostrado na seção B.1 deste anexo. Da mesma forma, a data e o horário do distúrbio também é transformado em um formato tipo 'string' e enviado a tabela de 'Lista de Distúrbios'. Estes dados vão preenchendo a matriz de zeros que foi criada na inicialização do VI formando assim, a lista de distúrbios.

Figura 65 – Estrutura Case para a construção da lista de distúrbio



Dados da Pesquisa

ANEXO C – VI FTP

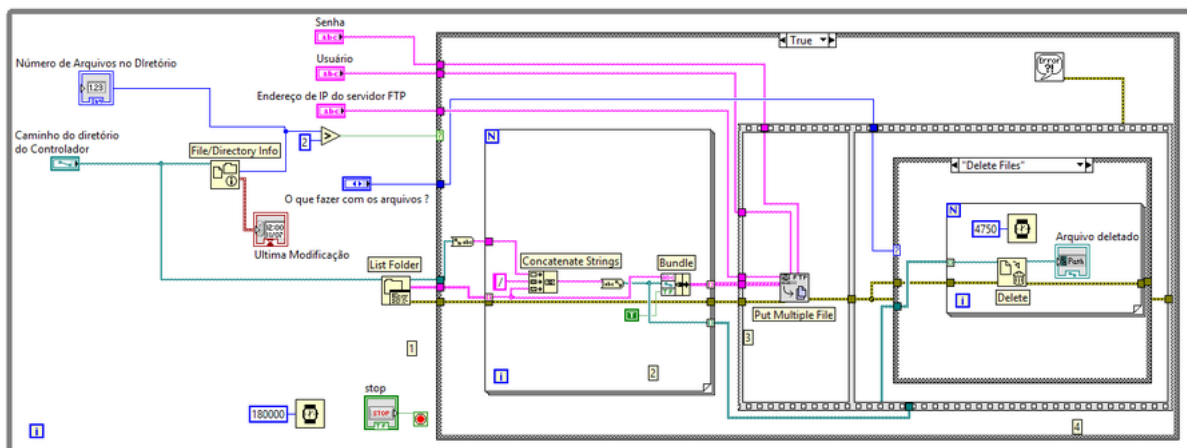
O diagrama de blocos do VI FTP está apresentado na Figura 66. O processamento se inicia com a leitura do endereço do diretório onde estão sendo salvos os arquivos TDMS na controladora. As informações sobre o número de arquivos e o horário da última modificação são extraídos pelo bloco 'File/Directory Info'. Se o número de arquivos for menor que 2, o comparador envia um indicador 'FALSE' para a estrutura CASE que aguarda 5 minutos para executar o VI novamente. Se o comparador enviar um indicador 'TRUE', o VI estabelece uma conexão com o servidor FTP e envia os arquivos para um computador de apoio. Esta tarefa é realizada pelo bloco 'Put Multiple File'. Este bloco necessita das seguintes entradas:

- Usuário do servidor FTP;
- Senha do usuário FTP;
- Endereço de IP do servidor FTP;
- Especificações dos arquivos a serem enviados;

As especificações dos arquivos consistem de um 'cluster' com o caminho do diretório e os nomes dos arquivos. Para que sejam enviados um por vez, é necessária uma estrutura 'For Loop' para ordenar o envio.

Finalmente, após a transferência dos arquivos via FTP, o bloco 'Delete' apaga os arquivos da memória da cRIO liberando espaço em disco para novas aquisições de dados. O VI é executado de três em três minutos para não comprometer a memória da cRIO e a execução do VI Host.

Figura 66 – Diagrama de Blocos do VI FTP



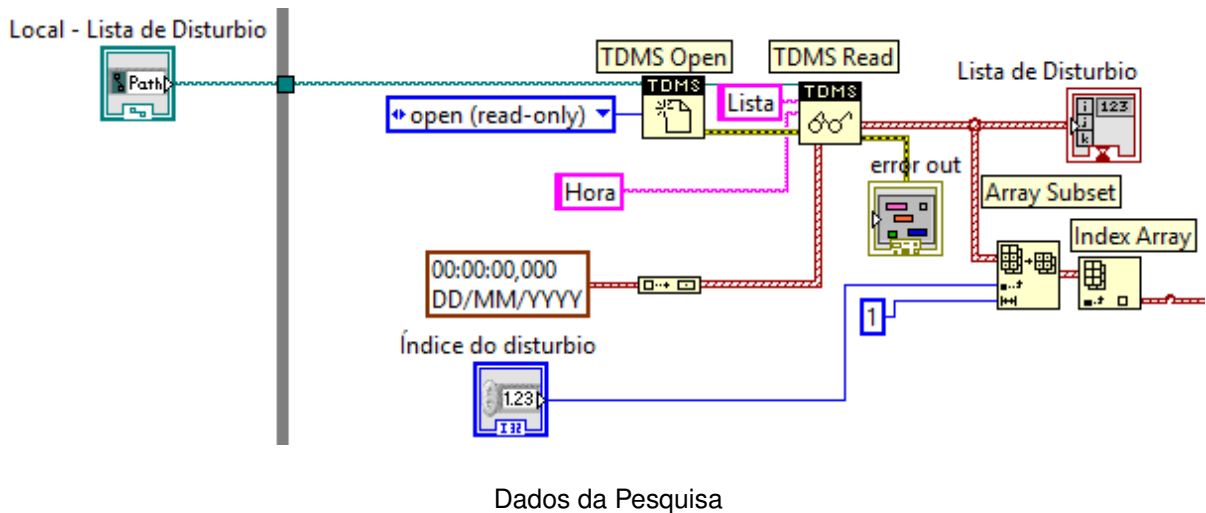
Dados da Pesquisa

ANEXO D – VI de Pós-Processamento

O diagrama de blocos do VI de pós-processamento se inicia com a abertura da lista de distúrbios que o usuário selecionar no painel frontal. Este arquivo é aberto pelo bloco 'TDMS Open' e lido pelo bloco 'TDMS Read'. O bloco 'TDMS Read' requer como entradas o nome do grupo, que neste caso é 'Lista', o nome do canal, que neste caso é 'Hora' e o tipo de dados, que neste caso é o formato de dados de 'data e hora'. Esta lista é apresentada no painel frontal graças a um indicador do bloco 'TDMS Read'.

Para o analista selecionar a perturbação que almeja analisar, seleciona-se o índice do distúrbio de interesse. Este índice é enviado a um bloco 'Array subset' que retira da lista de distúrbios o índice e o horário do distúrbio de interesse. Logo após, este índice e o horário seguem para o bloco 'Index Array' que extrai somente o horário do distúrbio. Esta parte inicial do VI de pós-processamento é apresentada na Figura 67.

Figura 67 – Seleção da lista de distúrbio e do distúrbio de análise

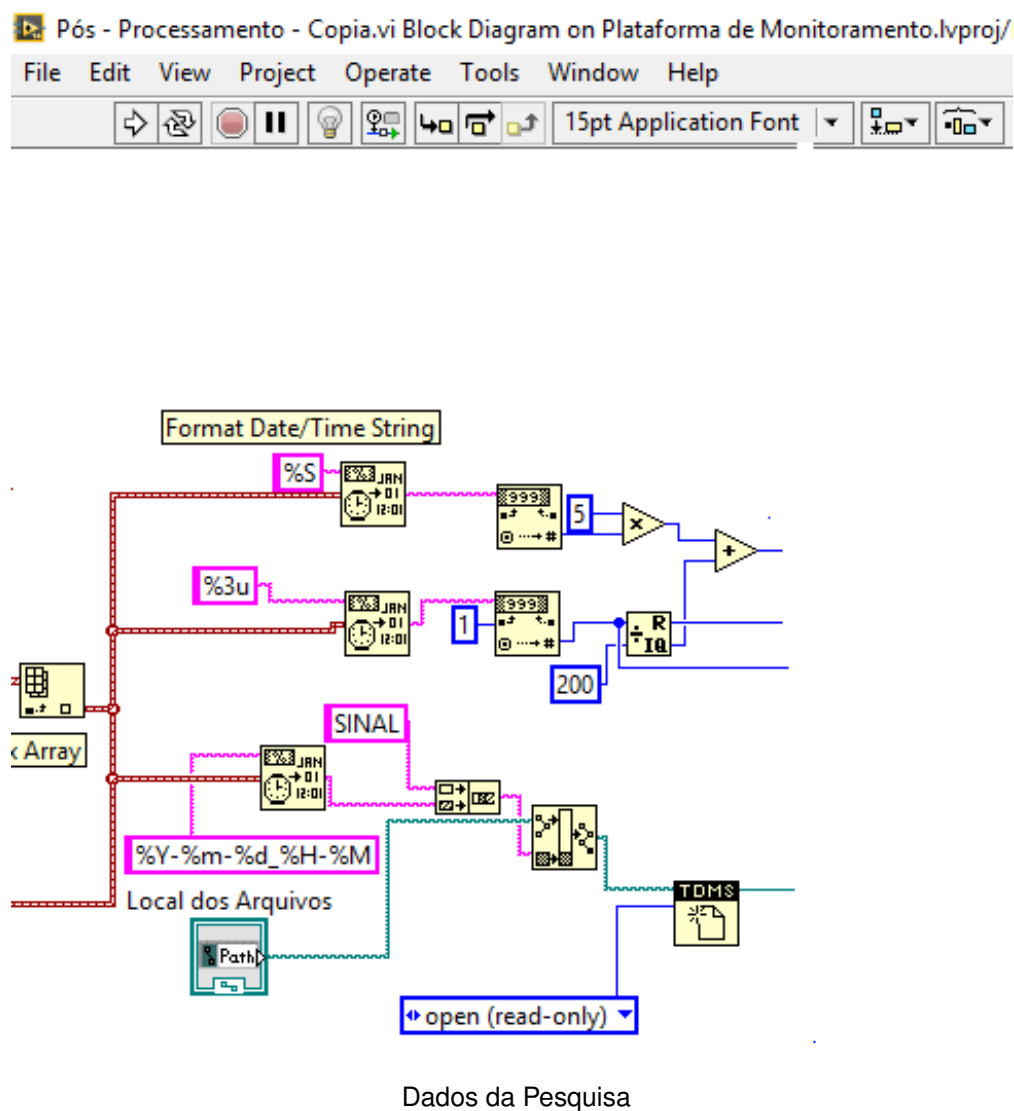


Com a data e o horário do distúrbio definido, o fluxo de dados segue para três blocos 'Format Date/Time String'. Um dos blocos extrai as informações de ano, mês, dia, hora e minuto (%Y-%m-%d_%H-%M). Esta informação é concatenada com palavra 'SINAL' e com o caminho do diretório onde estão salvos os arquivos de gravação para enviar ao bloco 'TDMS Open' que abre o arquivo do minuto em que ocorreu a perturbação. Os outros dois blocos 'Format Date/Time String' extraem informações sobre os segundos e os milissegundos em que o distúrbio ocorreu e é utilizada para localizar em qual grupo está os dados da perturbação. Vale lembrar, que na seção 4.5.4 é definido que cada arquivo de gravação possui 300 grupos que representam as janelas de medição de 200 ms definidas pela norma IEC 61.000-3-2. Assim, para

localizar a janela correta, basta multiplicar o valor em segundos por 5 e somar com o valor inteiro da razão entre o valor de milissegundo por 200 conforme equação D.1. A Figura 68 apresenta o diagrama de blocos desta parte do cálculo.

$$Janela = 5Xs + INT\left(\frac{ms}{200}\right) \quad (D.1)$$

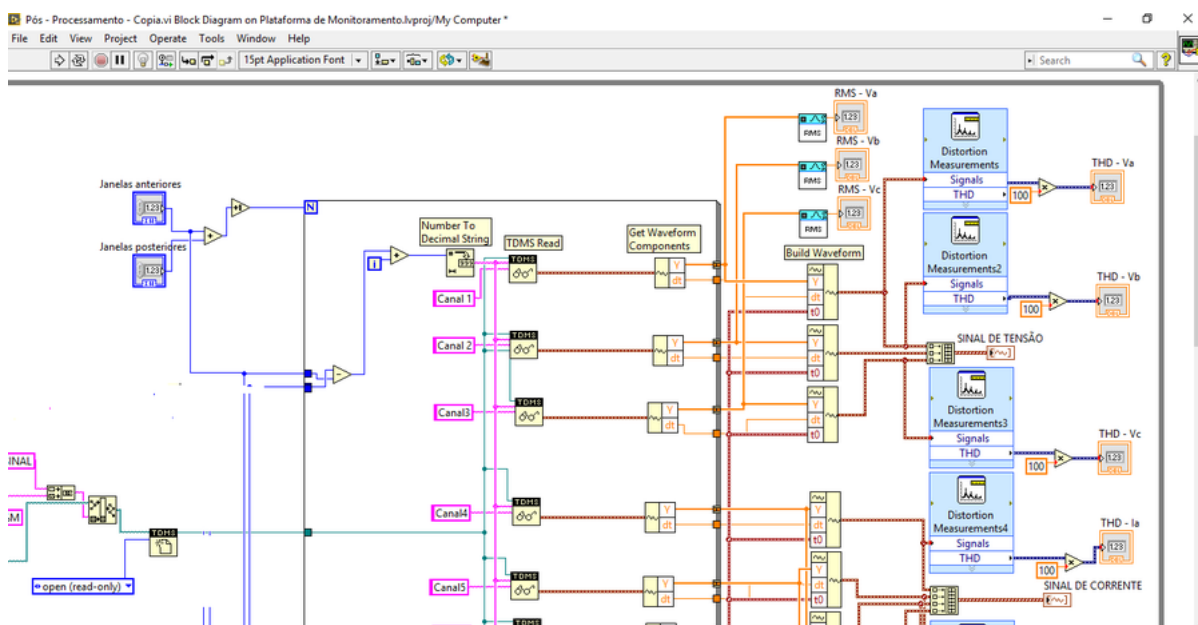
Figura 68 – Determinação do arquivo a ser aberto e da janela a ser apresentada ao analista



O passo seguinte é a leitura dos arquivos, a plotagem da forma de onda e o cálculos dos indicadores de qualidade da energia. Esta etapa se inicializa com o bloco 'TDMS Read' que extrai os dados dos 7 canais do grupo determinado na Figura 68. No entanto, um dos objetivos da plataforma é possibilitar ao analista visualizar janelas de medição anteriores e/ou posteriores. Portanto, foi inserido uma estrutura 'For Loop' que realiza a leitura de N janelas definidas pelo analista. O número de janelas a serem lidas será igual ao número de janelas anteriores ao distúrbio que o usuário definir, mais o

número de janelas posteriores que o usuário definir, mais a janela onde está localizado a perturbação. Esta parte do diagrama de blocos pode ser visualizada na Figura 69.

Figura 69 – Detalhe da parte final do diagrama de blocos do VI de Pós Processamento, detalhando as análises dos canais V_a , V_b , V_c e I_a



Dados da Pesquisa

Após a leitura dos canais das janelas de interesse, os dados dos canais são enviados a uma estrutura 'Get Waveform Components' que extrai as amostras e o intervalo dt entre elas. Estas informações são enviadas a uma estrutura 'Build Waveform' que juntamente com a informação da data e o horário da em que ocorreu a perturbação plota os gráficos no painel frontal para análise da forma de onda. Este 'cluster' de dados também é enviado a um bloco RMS e um bloco 'Distortion Measurement' para os cálculos do valor eficaz e da DHT de cada um dos 7 canais analisados.