

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MONITORAÇÃO E ANÁLISE DE GRANDEZAS DA QUALIDADE DA ENERGIA
ELÉTRICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO INSTRUMENTAÇÃO
VIRTUAL

MICHELE DE NAZARÉ NOVAES SANTOS

DM 18/2011

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MONITORAÇÃO E ANÁLISE DE GRANDEZAS DA QUALIDADE DA ENERGIA
ELÉTRICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO INSTRUMENTAÇÃO
VIRTUAL

MICHELE DE NAZARÉ NOVAES SANTOS

DM 18/2011

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MONITORAÇÃO E ANÁLISE DE GRANDEZAS DA QUALIDADE DA ENERGIA
ELÉTRICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO INSTRUMENTAÇÃO
VIRTUAL

MICHELE DE NAZARÉ NOVAES SANTOS

Dissertação submetida à Banca
Examinadora do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica
da UFPA para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Elétrica

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MONITORAÇÃO E ANÁLISE DE GRANDEZAS DA QUALIDADE DA ENERGIA
ELÉTRICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO INSTRUMENTAÇÃO
VIRTUAL

AUTORA: MICHELE DE NAZARÉ NOVAES SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA A AVALIAÇÃO DA BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

APROVADA EM: 28/02/2011

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Maria Emilia de Lima Tostes
(ORIENTADORA – UFPA)

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(MEMBRO – UFPA)

Dr. Cláudio Luciano da Rocha Conde
(MEMBRO – SEDECT/PA)

VISTO:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(COORDENADOR DO PPGE / ITEC / UFPA)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por me permitir realizar mais um sonho junto a minha família.

Aos meus pais, Pedro Paulo e Rosemeire, e meu irmão, Ribamar, pelo amor e carinho incondicional, e apoio que sempre me deram nas minhas decisões. Em especial a minha mãe, por todas as suas abdições em prol da minha formação.

Ao meu amor Ricardo Fadul, pelo amor, carinho, compreensão, paciência e respeito que sempre teve comigo. Pelo companheirismo em todos os momentos, sejam eles bons ou ruins. Se hoje sou melhor, é porque o tenho na minha vida.

À Professora Doutora Maria Emília de Lima Tostes que me concedeu a oportunidade de tê-la como orientadora da minha dissertação e por ter me ajudado no desenvolvimento desta com seriedade e competência. Desde que a conheci, ainda na graduação, tenho grande admiração pelo modo como conduz seu trabalho, tornando-se para mim uma referência profissional e pessoal.

Aos amigos do Ceamazon: Thiago, Antonio, Allan, Igor, Thiane, Rosana, Suzane, Caio, Ricardo Chamiè, Fábio, Paulo e Vitor. Em especial agradeço ao amigo Rogério pelos ensinamentos que me engrandeceram para o desenvolvimento da dissertação.

Às pessoas que me ajudaram de forma direta ou indireta no desenvolvimento deste trabalho. Em especial ao Guilherme, que apareceu para me ajudar quando eu mais precisava, pois sem ele não conseguiria desenvolver meu trabalho e ao Vitor Hugo que sempre me ajudou quando eu menos esperava.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 IMPORTÂNCIA E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3 ESTADO DA ARTE.....	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	7
2 OS PROCESSOS INDUSTRIAIS	8
2.1 INTRODUÇÃO.....	8
2.2 INDÚSTRIA E SEU IMPACTO NO SETOR ELÉTRICO NACIONAL.....	8
2.3 CUSTOS INDUSTRIAIS ASSOCIADOS À QEE	12
2.4 PRINCIPAIS CARGAS PRESENTES NA INDÚSTRIA	14
2.4.1 Sistemas de Bombeamento.....	14
2.4.2 Sistemas de Ventilação	16
2.4.3 Sistema de Ar Comprimido.....	17
2.4.4 Sistema de Refrigeração	19
2.4.5 Correia transportadora.....	20
2.5 LAMOTRIZ/CEAMAZON.....	21
2.5.1 Descrição da Rede Industrial do Sistema Supervisório.....	22
2.5.2 Descrição dos Sistemas	24
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
3 NORMAS PARA MONITORAÇÃO DE QEE	30
3.1 INTRODUÇÃO.....	30
3.2 NORMAS NACIONAIS SOBRE QEE.....	30
3.2.1 ONS	31
3.2.2 ANEEL.....	32
3.2.2.1 Prodist.....	32
3.3 NORMAS INTERNACIONAIS SOBRE QEE	36
3.3.1 IEC	37
3.3.2 IEEE	45

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
4 INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL	50
4.1 INTRODUÇÃO	50
4.2 VISÃO GERAL DA INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL	50
4.2.1 Descrição de um Instrumento Virtual	50
4.2.2 Composição de um Instrumento Virtual	51
4.2.3 Instrumentos Virtuais versus Instrumentos Tradicionais.....	52
4.2.3.1 Estimativa do custo de implementação do SMVQEE <i>versus</i> custo de analísadores de QEE.	54
4.2.4 <i>LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)</i>	57
4.3 SMVQEE	58
4.4 PROCEDIMENTOS E METODOLOGIAS	62
4.4.1 Ensaios.....	64
4.4.1.1 Variação de tensão em regime permanente	64
4.4.1.2 Distorção Harmônica de Tensão e Corrente.....	65
4.5.1.3 Desequilíbrio de Tensão.....	66
4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
4.6.1 Variação de tensão	67
4.6.2 Distorção Harmônica de Tensão e Corrente	70
4.6.3 Desequilíbrio de Tensão	71
4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
5 CONCLUSÕES	73
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
7 APÊNDICE 1 – DIAGRAMAS DE BLOCOS DO SMVQEE.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Gráfico de Consumo Nacional de Energia Elétrica.....	8
Figura 2.2: Gráfico de consumo de energia elétrica no setor industrial	9
Figura 2.3: Gráfico de Consumo de energia elétrica em sistemas motrizes	10
Figura 2.4 Gráfico de Consumo de energia elétrica no setor industrial nos anos 2008, 2009 e 2010	11
Figura 2.5: Rotores radial, misto e axial.....	14
Figura 2.6: Rotores radiais de simples sucção e dupla sucção	15
Figura 2.7 : Sistemas de Ar Comprimido em indústrias (a) Sistema de Saneamento e (b) Destilaria.....	15
Figura 2.8 : Tipos de Rotor	16
Figura 2.9 : Exemplos de Sistemas de Ventilação	17
Figura 2.10 : Exemplos de Sistema de Ar Comprimido em indústrias	18
Figura 2.11 : Exemplo de Refrigeração de Alimentos	19
Figura 2.12 : Exemplo de Correia Transportadora de Alimentos e Minérios.....	20
Figura 2.12 Bancadas dos protótipos de (a) Bombeamento, (b) Ar Comprimido, (c) Correia Transportadora e (d) Ventilador/Exaustor	21
Figura 2.13 : Rede de protótipos de sistemas motrizes do Lamotriz	23
Figura 2.14: Protótipo de Sistema de Ventilação	24
Figura 2.15: Protótipo de Sistema de Bombeamento.....	26
Figura 2.16: Protótipo de Sistema de Ar Comprimido	27
Figura 2.17: Protótipo de Sistema de Correia Transportadora	28
Figura 3.1. Estrutura geral de um equipamento de medição de harmônicos.....	40
Figura 3.2: Diagrama geral de um sistema de medição	43
Figura 3.3: Aumento de temperatura x Função fator de harmônico ponderada.....	47
Figura 3.4 Gráfico de Tendência de Desequilíbrio em uma alimentação residencial.....	48
Figura 4.1: Interface conceitual do instrumento virtual – (a) painel frontal e (b) diagrama de blocos.....	52
Figura 4.2: Estrutura de um instrumento virtual.....	54
Figura 4.6: Sistema de Monitoração.	56
Figura 4.7: Interface do SMVQEE.....	59
Figura 4.8: Medições de grandezas elétricas: (a) Grandezas elétricas (b) Grandezas de QEE.....	61
Figura 4.9: Diagrama de blocos funcional do instrumento virtual proposto.....	61
Figura 4.10: Protótipo de sistema de exaustão	62
Figura 4.11: Diagrama simplificado da bancada de exaustão	63

Figura 4.12: Painel de automação	64
Figura 4.13: Faixas de Classificação de Tensões em Regime Permanente.....	65
Figura 4.14: Classificação dos níveis de tensão da fase 1 nas velocidades (a) 3370rpm, (b) 3000 rpm e (c) 2500 rpm	67
Figura 4.15: Gráfico da Média das tensões trifásicas medido no analisador e SMVQEE nas velocidades (a) 3370rpm (nominal), (b)3000rpm e (c) 2500rpm.....	69
Figura 4.16: Gráfico de desvio na medição de tensão das três fases	69
Figura 4.17: Gráfico de DHT de tensão	70
Figura 4.18: Gráfico de DHT de corrente	70
Figura 4.19: Gráfico de Desequilíbrio de Tensão	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127).....	34
Tabela 3.2 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	35
Tabela 3.3 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em ...	35
Tabela 3.4. Exigências de exatidão para medição de tensão, corrente e potência	41
Tabela 3.5: Limites de distorção de tensão da norma IEEE std. 519/1992.....	46
Tabela 3.6: Limite de distorção de corrente da norma IEEE std. 519/1992	46
Tabela 4.1: Analisadores de QEE	55

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados elétricos de cargas motrizes no processo industrial de sistema de rede automatizada baseado em instrumentação virtual, permitindo a monitoração e análise de distúrbios relacionados à Qualidade de Energia Elétrica (QEE) em regime permanente, como variação de tensão, distorção harmônica e desequilíbrio de tensão, onde os resultados possam ser visualizados em uma interface amigável e intuitiva ao usuário e armazenados de maneira conveniente em um banco de dados. Este sistema é uma solução viável por ter baixo custo na sua implementação e flexível para a monitoração e análise de parâmetros de QEE nos processos industriais quando comparada com a instrumentação tradicional.

Palavras Chave: Qualidade da Energia Elétrica, Processos Industriais e Instrumentação Virtual.

ABSTRACT

This work aims to develop a data acquisition system of driving electric loads in the industrial process of automated network system based on virtual instrumentation, enabling the monitoring and analysis of disturbances related to steady state Power Quality (PQ), such as voltage variations, harmonic distortion and voltage unbalance, where the results can be viewed on a friendly and intuitive interface to the user and stored conveniently in a database. This system is a viable solution due to have low cost in its implementation and to be flexible for monitoring and analyzing parameters of PQ in industrial processes when compared with traditional instrumentation.

Keywords: Power Quality, Industrial Processes and Virtual Instrumentation.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Cada vez mais na indústria moderna, os equipamentos utilizados estão mais sensíveis às oscilações do fornecimento de energia elétrica. Muitos dos equipamentos utilizados acabam gerando distúrbios na rede. Estes distúrbios causam grandes prejuízos às indústrias, principalmente as de produção contínua onde a parada de uma máquina gera uma diminuição na fabricação e compromete todo o processo de manufatura.

Levando em consideração o potencial destes possíveis prejuízos, torna-se evidente a necessidade da monitoração para análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica, com a finalidade de especificar as causas e as consequências dos problemas no sistema elétrico, apresentando também soluções técnicas, economicamente viáveis, para resolver ou pelo menos amenizar os problemas e seus impactos.

Com a utilização da instrumentação virtual é possível o usuário desenvolver sistemas aplicativos para a execução de determinadas tarefas, visando facilitar, automatizar e acelerar processos que geralmente seriam muito demorados e muito caros do ponto de vista econômico utilizando os instrumentos tradicionais.

Os engenheiros e cientistas cujas necessidades, aplicações e análises de informações dos sistemas variam muito rapidamente, necessitam de flexibilidade para criar suas próprias soluções. Um instrumento virtual pode adaptar as suas necessidades particulares sem ser necessário substituir todo o instrumento já que possui o *software* de aplicação instalado no computador .

A existência de normas nacionais e internacionais, recomendando indicadores de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), procedimentos de obtenção de tais indicadores e limites aceitáveis, torna possível desenvolver sistemas para monitoramento desses indicadores que, além de atenderem à legislação vigente, servem também como fonte de dados importantes para o diagnóstico de distúrbios e para o planejamento e melhoria da operação do sistema elétrico. Através da medição de tensões e correntes do sistema pode-se encontrar as informações necessárias para identificar, investigar e corrigir os problemas de qualidade de energia e, para isso, é fundamental que seja utilizada a instrumentação apropriada.

Novos instrumentos de medição e o uso de técnicas digitais para a análise de sinais em Sistemas de Energia Elétrica (SEE) têm sido de grande interesse para aplicações em QEE. Nos últimos anos, essa área cresceu em importância devido ao aumento da

demanda de equipamentos eletrônicos e aplicações de conversores de potência, causando distorções de tensão e corrente devidas a não-linearidades e desbalanceamento.

1.2 IMPORTÂNCIA E OBJETIVOS DO TRABALHO

Existe um crescente interesse, tanto do órgão de fiscalização (ANEEL), como das concessionárias fornecedoras de energia pela monitoração e manutenção da qualidade da energia elétrica em todos os níveis de tensão. Há também a necessidade de adequar os instrumentos de medição e controle à realidade dos sistemas polifásicos com cargas não-lineares, desbalanceadas, sob tensões e correntes distorcidas.

Vendo a dificuldade em sensibilizar as indústrias para a importância da monitoração da qualidade da energia elétrica no sistema industrial, que são sempre marginais quando se compara ao negócio principal da empresa, este trabalho foi motivado a mostrar que a instrumentação virtual é uma solução viável e flexível para a monitoração e análise de parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) nos processos industriais quando comparada com a instrumentação tradicional (multímetros, amperímetros e osciloscópios, medidores de energia, qualímetros etc).

A instrumentação tradicional muitas vezes não está apta a realizar análise e controle de vários sinais ao mesmo tempo, principalmente pelo fato das situações serem as mais variadas possíveis, ou até mesmo para disponibilizar, em um único instrumento, todas as funções necessárias para a quantificação ou identificação de determinado problema.

O presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um sistema de aquisição e análise de dados elétricos no processo industrial baseado em instrumentação virtual, denominado *Software* de Medição Virtual de Qualidade de Energia Elétrica (SMVQEE), com a finalidade de realizar a monitoração de grandezas elétricas e de qualidade de energia elétrica, permitindo o armazenamento dos dados monitorados.

Utilizou-se na composição do instrumento virtual (SMVQEE + *hardware*): o *LabVIEW* no desenvolvimento do *software*; e, para o *hardware*, componentes existentes na estrutura do sistema de rede industrial automatizado, como o transdutor, que converte as grandezas mecânicas em elétricas, e o controlador lógico programável (dispositivo de aquisição, controle e condicionamento de dados), que recebe os dados do transdutor.

Como objetivos específicos:

- Elaborar um sistema que permita monitoração e análise de distúrbios relacionados à QEE em regime permanente através da aquisição de dados de cargas industriais e da transmissão e comunicação destes dados para um software de monitoração e análise da QEE que será desenvolvido com uma interface amigável e intuitiva ao usuário.
- Desenvolver um *software* no ambiente *LabVIEW*, que utiliza linguagem de programação gráfica, com a função de realizar a medição remota e gerar um banco de dados para fazer análise dos dados monitorados.

1.3 ESTADO DA ARTE

Nesta seção apresenta-se uma revisão dos principais trabalhos consultados para o desenvolvimento desta dissertação, enfatizando a monitoração da qualidade da energia em processos industriais e, especificamente, a utilização de instrumentação virtual para este fim.

A monitoração da qualidade da energia elétrica é o processo de recolhimento, análise e interpretação dos dados de medições brutas em informações úteis. O processo de recolhimento de dados é normalmente realizado através de medições da tensão e da corrente ao longo de um período de tempo. Tradicionalmente, o processo de análise e interpretação dos dados era realizado manualmente, mas avanços no processamento de sinais e na área de inteligência artificial tornaram possível a concepção e implementação de sistemas inteligentes para a análise e interpretação automática dos dados brutos em informação útil, necessitando de uma mínima intervenção humana (DUGAN, 2002).

Pesquisas mostram que os custos resultantes de problema de QEE são muito elevados, e de acordo com a EPRI (*Electric Power Research Institute*) estes prejuízos chegam a mais de 120 bilhões de euros por ano, só nos Estados Unidos (Junior, Prado, 2006 apud AFONSO, 2004). Fica evidente que a questão da QEE entregue aos consumidores é um assunto de primordial importância, e com um maior grau de esclarecimento e cobrança por parte dos consumidores entram em cena as agências reguladoras com a imposição de normas e estudos sobre o tema, pressionando as empresas de energia elétrica a adequarem seus serviços aos moldes vigentes. Contudo, ainda falta legislação clara com respeito às responsabilidades das concessionárias quanto à entrega de energia elétrica com boa qualidade e eventuais prejuízos, sendo este comumente um motivo de disputa entre os consumidores e concessionárias (SILVA, 2010).

De acordo com Pillai Jayaram, atual diretor executivo da *National Instruments* da Índia, nos testes de carros em empresas do setor de automóveis para controle da produção e qualidade das instalações fabris, a maior necessidade de engenheiros e cientistas é ter uma solução flexível e de custo eficaz para teste e medição. Para atender a essas necessidades, uma maneira diferente de resolver o problema de teste e medição desenvolveu-se a instrumentação virtual. A instrumentação virtual alcançou a aceitação popular e é utilizada em milhares de aplicações ao redor do mundo nas indústrias como a automobilística, eletrônica, de petróleo, gás etc.

De acordo com o especialista Renan Bernardes, Engenheiro de Medição e Qualidade de Energia da SEL – *Schweitzer Engineering Laboratories*, empresa especializada na proteção e automação de sistemas elétricos, “é extremamente importante que a empresa monitore a flutuação de tensão – presente em praticamente todas as indústrias siderúrgicas - para verificar os índices de conformidade com as normas brasileiras, e para buscar soluções corretas para o problema”. Outros fenômenos referentes à qualidade de energia, como distorção harmônica e variação de tensão de curta duração, também podem causar perdas elétricas e prejuízos financeiros com parada do processo produtivo.

Ricardo Penido D. Ross, Tatiana M. L. de Assis e Luciano Brasil (2001) apresentaram os resultados de um trabalho de investigação da qualidade da energia em 10 consumidores industriais da Rio Grande Energia (RGE). Foram analisados os fenômenos de afundamentos de tensão, interrupções e harmônicos. Os autores ressaltam a importância da qualidade da energia no novo cenário do setor elétrico brasileiro, onde os diversos agentes do sistema estão sujeitos a penalidades, caso não se encontre dentro dos padrões estabelecidos.

Luiz F. W. de Souza, Ricardo P. D. R., José Roberto de M. e Dalton O. C. B. (2007) apresentaram os resultados obtidos nas campanhas de medição em 8 subestações de diferentes agentes de transmissão da Rede Básica entre os anos de 2004 e 2006. Trata-se da realização da primeira rodada de campanhas piloto de medição de qualidade da energia da Rede Básica. As campanhas de medição avaliaram os indicadores de flutuação, harmônicos e desequilíbrio de tensão. O artigo descreve os aspectos gerais das campanhas de medição coordenadas pelo ONS e apresenta os resultados dos ensaios de resposta em frequência dos transdutores. Os resultados mostraram que Transformadores de Potencial Capacitivos (TPC) não são adequados para medição de harmônicos. Os Transformadores de Potencial Indutivo (TPI) mostraram resposta plana até aproximadamente o 15º harmônico e os Divisores de Potencial Capacitivos (DPC) mediram precisamente harmônicos em toda a faixa de frequência até 3kHz.

N. C. Jesus, J. R. Cogo e K. A. Tavares (2009) apresentaram um estudo de análise da distorção harmônica em um sistema industrial com o objetivo de registrar o comportamento do sistema sob operação normal e durante a realização de manobras. O sistema elétrico em estudo no artigo é composto por dois transformadores de 230/2,3kV e 10MVA que podem operar em paralelo. O barramento de 2,3kV alimenta um banco de capacitores, cargas lineares e cargas não lineares (conversores de frequência). As medições foram realizadas para descrever o perfil de harmônicos de tensão e corrente em diversas configurações do sistema elétrico variando o número de transformadores de 230/2,3kV e retirando o banco de capacitores. Os resultados das medições mostraram aumento da distorção, quando foram inseridos os bancos de capacitores. Os valores de distorção de tensão medidos foram comparados aos valores de referência do PRODIST e apresentaram-se dentro dos limites recomendados. Foram realizadas simulações por meio da modelagem do sistema no ATPDRAW e comparados os resultados com as medições, obtendo resultados semelhantes.

Em diversas atividades os impactos econômicos da má qualidade da energia elétrica são gigantescos. Estes impactos são maiores principalmente nas indústrias de produção contínua onde a parada de uma máquina gera uma diminuição na fabricação e compromete todo o processo de manufatura. Nestes ramos industriais uma interrupção de alguns segundos pode levar a prejuízos financeiros enormes. Levando em consideração o potencial destes possíveis prejuízos torna-se evidente a necessidade da análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica, com a finalidade de especificar as causas e as consequências dos problemas no sistema elétrico, apresentando também soluções técnicas viáveis economicamente para resolver ou pelo menos amenizar os problemas e seus impactos (OLESKOVICS *et al*, 2006).

Conforme FERREIRA *et al* (2008), a virtualização de instrumentos de medida para processos industriais e laboratoriais tem se tornado uma interessante solução com vantagens em termos de custo, eficiência e funções associadas ao instrumento a ser virtualizado. Muitos processos de automação industrial já têm usado a virtualização de instrumentos para medição e visualização de maneira remota. A *National Instruments* desenvolveu um *software* chamado *LabVIEW* utilizado para o controle e aquisição de dados que se adequam perfeitamente às soluções de instrumentação. Com este *software* e uma placa de aquisição é possível desenvolver, por exemplo, osciloscópios e multímetros, visualizando medidas de temperatura e pressão, tendo um custo significativamente menor em comparação com o custo de um instrumento real, além de permitir flexibilidade e qualidade.

Segundo NASCIMENTO *et al* (2007) um instrumento virtual (VI, do inglês *Virtual Instrument*) consiste em um computador do tipo industrial, ou estação de trabalho, equipada

com poderosos programas (*softwares*) e *hardware* econômico (tais como placas de inserção e memórias), que cumprem, em conjunto, as funções dos instrumentos tradicionais. Os VIs representam um segmento fundamental dos sistemas de instrumentação baseados em *hardwares* com sistemas centrados, e em *softwares* que aproveitam ao máximo o potencial de cálculo, produtividade, exibição e capacidade de conexão dos PCs de escritório e estações de trabalho. Com os VIs, os engenheiros e cientistas construíram sistemas de medição e automação que se ajustam exatamente às necessidades definidas pelo usuário, em lugar de estarem limitados aos instrumentos tradicionais de funções fixas (definidos pelo fabricante).

BORGES (2002), em sua dissertação, elaborou um sistema desenvolvido em *LabVIEW* que tem como objetivo acessar a distância um laboratório virtual, que permite acesso, controle e a monitoração de experimentos em tempo real de forma remota através da Internet.

SILVA (2004) apresentou em sua dissertação um exemplo da utilização do sistema de monitoramento remoto da QEE, por meio de um sistema o qual apresenta uma solução integrada de *hardware*, *software* e comunicação. Este sistema tem por finalidade a monitoração das unidades consumidoras, mas pode ser instalado, também, nos secundários dos transformadores de distribuição monitorando dessa forma a rede de distribuição.

Segundo FRANCO (2000), em um tempo não muito distante a maioria dos consumidores industriais entendia que gerenciar a energia elétrica significava controlar a demanda, o fator de potência, e administrar os contratos junto à concessionária. Pouco se falava em supervisão de grandezas como tensões, correntes, potências e muito menos em distorções harmônicas ou transitórios. Com o surgimento dos medidores eletrônicos (transdutores digitais), os sistemas de gerenciamento passaram a oferecer a monitoração de grandezas elétricas e de qualidade da energia, em tempo real, para múltiplos usuários. As soluções de ponta já permitem a utilização de ferramentas de uso diário, como o *Internet Explorer* ou o *Microsoft Excel*, para a monitoração das grandezas, e a customização de relatórios e gráficos. Com isto, três grandes obstáculos são vencidos:

- Instalação (e atualização) de *softwares* específicos em inúmeras máquinas numa empresa.
- Treinamento de inúmeros usuários a novas ferramentas de software.
- Excessivo foco em questões técnicas, sem diferenciação de setores de uma empresa como manutenção, engenharia, projetos ou finanças.

Segundo Moreira (2006), a existência de normas nacionais e internacionais, recomendando indicadores de QEE, procedimentos de obtenção de tais indicadores e limites aceitáveis, torna possível desenvolver sistemas para monitoramento desses indicadores que, além de atenderem à legislação vigente, servem também como fonte de

dados importantes para o diagnóstico de distúrbios e para o planejamento e melhoria da operação do sistema elétrico. Através da medição de tensões e correntes do sistema pode-se encontrar as informações necessárias para identificar, investigar e corrigir os problemas de qualidade de energia e, para isso, é fundamental que seja utilizada a instrumentação apropriada.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho tem seus assuntos organizados em capítulos na seguinte estrutura:

O capítulo 2 mostra o impacto das indústrias no setor elétrico nacional, descreve e apresenta as principais cargas presentes na indústria e o Laboratório de Sistemas Motrizes (Lamotriz) do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (Ceamazon).

No capítulo 3 é apresentado a importância das normas relacionados à QEE, além de definir as normas nacionais e internacionais para monitoração da QEE, especificamente do Prodist/ANEEL, da *International Electrotechnical Commission* (IEC) e do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

O capítulo 4 mostra a utilização da instrumentação virtual em processos industriais, descreve a metodologia proposta à implementação do programa desenvolvido no *LabVIEW* para monitoração das grandezas de QEE, utilizando instrumentação virtual, e apresenta o *software* desenvolvido e os resultados dos ensaios realizados.

As conclusões finais e propostas para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

2 OS PROCESSOS INDUSTRIAIS

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo dar uma visão do uso da energia elétrica na indústria brasileira, para nela situar a participação e importância dos motores elétricos; mostrar as principais aplicações dos sistemas motrizes nos processos industriais; e apresentar os protótipos destes sistemas, que estão instalados no Laboratório de Sistemas Motrizes do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia.

2.2 INDÚSTRIA E SEU IMPACTO NO SETOR ELÉTRICO NACIONAL

Segundo os dados (figura 2.1) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME em 2010, o setor industrial é o segmento com maior consumo de energia elétrica no país, alcançando cerca de 43,9 % do consumo total. O setor residencial vem a seguir, com um consumo de 25,6% e o setor comercial consome cerca de 16,5%. Os restantes 14,1% distribuem-se entre o setor agropecuário, transportes, iluminação pública, órgãos públicos e outros. Além de representar parte considerável do consumo total do país, conforme já mencionado, o setor industrial é responsável por expressiva parcela de desperdício de energia.

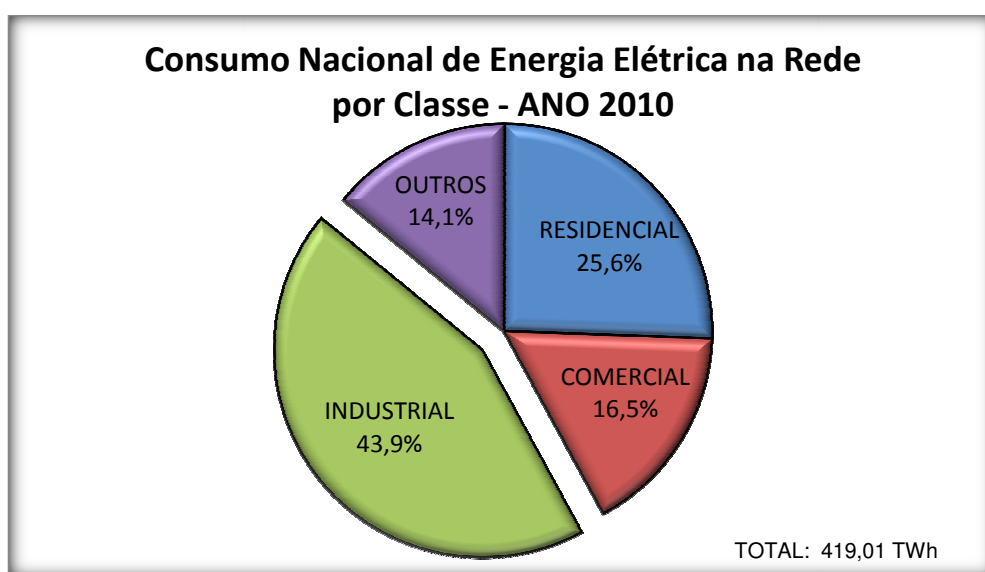


Figura 2.1: Gráfico de Consumo Nacional de Energia Elétrica. Fonte: EPE(2010)

O Plano Nacional de Energia – PNE 2030 tem como objetivo o planejamento de longo prazo no setor energético do país, orientando tendências e balizando as alternativas de expansão desse segmento nas próximas décadas. O PNE é fruto de trabalhos contratados pelo MME e elaborados pela EPE.

Os sistemas motrizes são responsáveis por quase 64% do consumo do setor industrial (figura 2.2), são constituídos por motores elétricos, acionamentos eletroeletrônicos, acoplamentos motorcarga, cargas mecânicas acionadas (bombas, compressores, correias transportadoras, ventiladores e exaustores) e instalações.

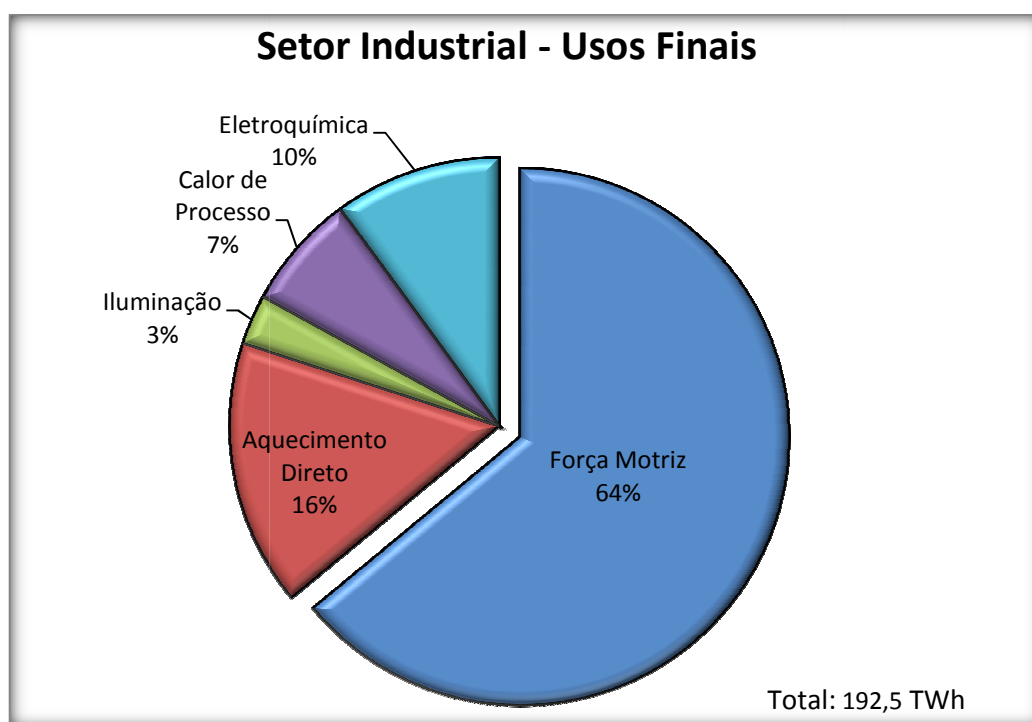


Figura 2.2: Gráfico de consumo de energia elétrica no setor industrial – Usos Finais. Fonte: PNE 2030

Os motores elétricos estão presentes acionando as mais variadas cargas mecânicas no processo industrial, tais como: ventiladores, bombas, compressores, esteiras, entre outras. Na indústria nacional a energia consumida em sistemas de ventilação, compressão, bombeamento e refrigeração é mais que 50% da energia total referente aos sistemas motrizes do setor industrial (figura 2.3).

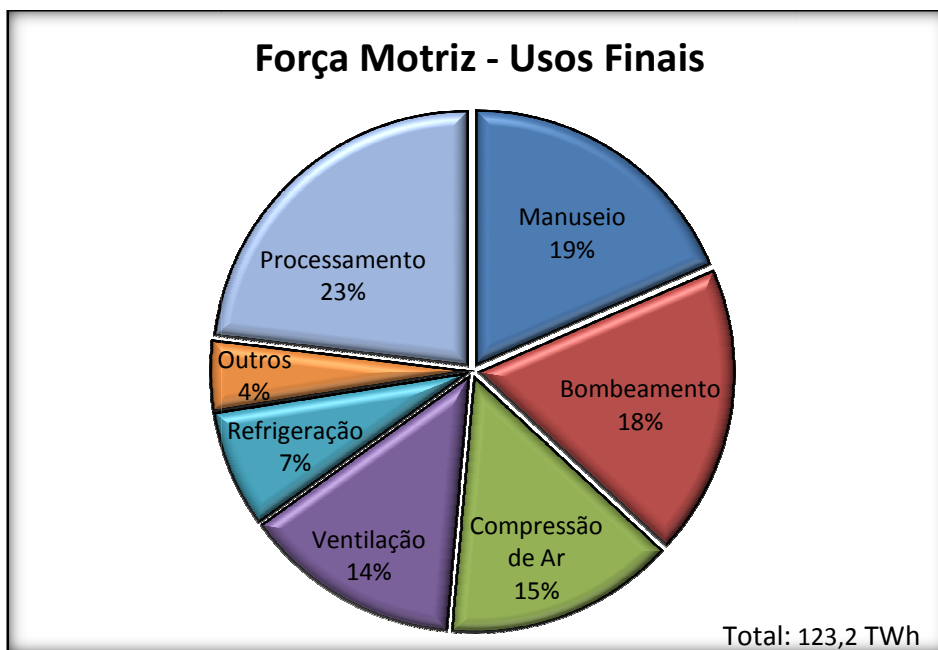


Figura 2.3: Gráfico de Consumo de energia elétrica em sistemas motrizes – Usos Finais.

Fonte: PNE 2030.

Estes dados revelam a importância dos sistemas motrizes como fonte consumidora de energia elétrica e como campo para a implementação de medidas, objetivando o aumento da monitoração da qualidade da energia elétrica no processo industrial, uma vez que uma das formas para competitividade nacional é conhecer o processo e melhorar a qualidade da energia elétrica.

Conforme a EPE, o consumo industrial de energia do ano 2010 apresentou taxas de crescimento robustas tanto por conta do aquecimento econômico, quanto pela base de comparação depreciada, uma vez que, em 2008, o consumo das indústrias caiu 7,7%.

Encerrado o ano de 2010, o consumo nacional de energia elétrica na rede registrou expansão de 7,8% em relação ao ano de 2009, totalizando o montante de 419,01 terawatts-hora (TWh). O mercado de energia elétrica em 2010 foi favorecido pelo desempenho da economia, com destaque para o mercado interno, impulsionado pelo crescimento do emprego e da renda e pelo aumento da oferta de crédito.

O consumo industrial de energia elétrica da rede liderou a expansão do mercado em 2010, contribuindo com 4,5 pontos percentuais na taxa anual de 7,8% do consumo total. Fortemente impactada pela crise financeira internacional de 2008, a produção física da indústria brasileira — e, conseqüentemente, o consumo industrial de energia elétrica — iniciou a retomada do crescimento no segundo semestre de 2009. Em 2010, a indústria consolidou essa recuperação e consumiu 183,7 TWh na rede, com aumento de 10,6% sobre 2009. Esse resultado supera os valores de consumo do ano 2008, antes da crise.

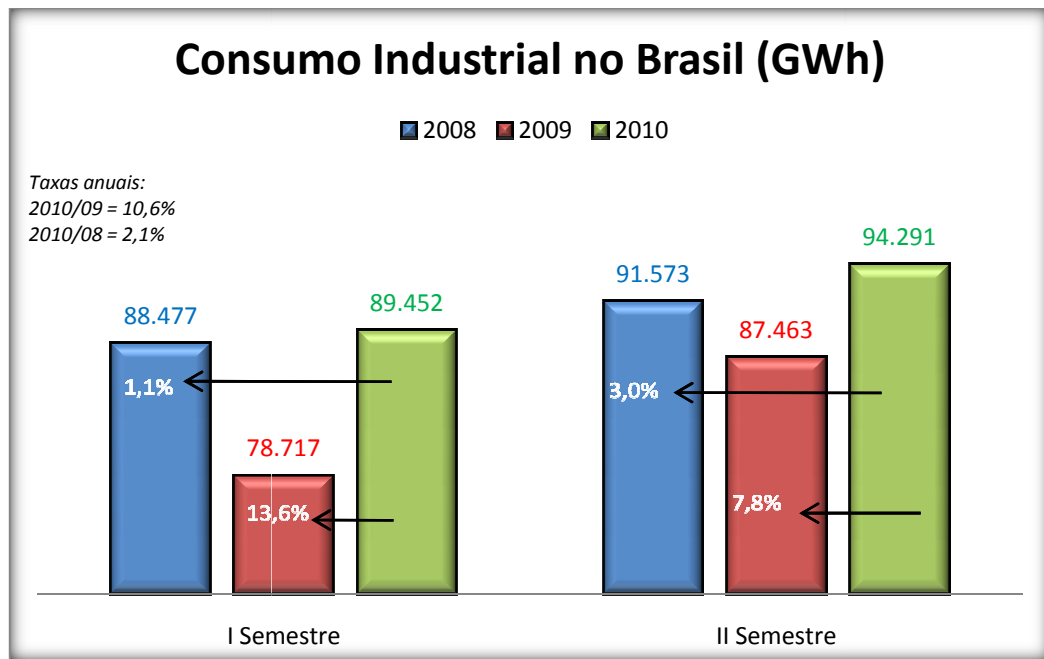


Figura 2.4 Gráfico de Consumo de energia elétrica no setor industrial nos anos 2008, 2009 e 2010.
Fonte: Resenha EPE janeiro/2011.

O Sudeste brasileiro, em contrapartida à retração mais acentuada em 2009 (-9,6%), foi a região que mais expandiu o consumo industrial em 2010: 13,1%. Com forte presença de indústrias dos ramos extrativo-mineral e metalúrgico, em grande parte voltadas para exportação e, portanto, muito afetadas pela crise, Espírito Santo e Minas Gerais apresentaram crescimentos altos, de 32,6% e 18,2% respectivamente. O Rio de Janeiro aparece com acréscimo da ordem de 16%, para o que contribuiu o início de operação de nova planta siderúrgica e o fornecimento temporário a indústria do mesmo ramo que normalmente se utiliza de geração própria.

Ao Sul, coube a segunda maior expansão em 2010, com taxa de 9,7%. O Rio Grande do Sul apontou crescimento de 12%, com a contribuição do restabelecimento das atividades do Polo Petroquímico de Triunfo que, no início de 2009, apresentou acentuada redução do consumo.

No Nordeste, o crescimento anual de 7% se deve, em grande parte, ao aumento do consumo do setor metalúrgico, especificamente do segmento de ferro-ligas. Pernambuco, que tem vivido um período de forte crescimento econômico, muito relacionado com a ampliação das atividades industriais no Porto de Suape, se destaca com expansão de 12%. No Norte, os destaques são Tocantins (33%) e Rondônia (23%), por conta de instalação de indústria de cimento com fornecimento para as obras das usinas hidrelétricas do Rio Madeira, respectivamente.

E o Centro-oeste foi a região que apresentou a menor expansão do consumo industrial em 2010: 3%.

Visto que o setor industrial tem o maior consumo de energia elétrica no Brasil é importante fazer um levantamento dos seus custos associados à qualidade da energia, quantificando a qualidade do fornecimento da energia elétrica às indústrias e a próxima seção apresentará os indicadores desses custos.

2.3 CUSTOS INDUSTRIAIS ASSOCIADOS À QEE (SANTOS, M. N., 2008)

MELO *et al* (2003) utilizaram os Indicadores de Custos Associados (ICA) para fazer a avaliação de prejuízos da interrupção permanente ou transitória de energia através da captação dos custos diretos industriais, levando em consideração os diversos custos fixos e variáveis devido às interrupções e características das indústrias do nordeste do Brasil.

A seguir serão apresentados os principais indicadores elétricos de avaliação da QEE, os indicadores de continuidade e os indicadores de custos associados:

- Variações Sustentadas de Freqüência;
- Variações Momentâneas de Freqüência;
- Variações Sustentadas de Tensão;
- Distorções Harmônicas.

Indicadores de Continuidade:

- Freqüência Equivalente de Interrupção (FREQ);
- Duração Equivalente de Interrupção (DREQ);
- Energia Interrompida (ENES);
- Freqüência de Interrupção do Consumidor (FIC);
- Duração de Interrupção do Consumidor (DIC).

Indicadores de Custos Associados:

1. Custos de Reparos (CR): Custos relativos aos reparos ou a compra de equipamentos danificados pela perda da QEE;
2. Custos de Produtos em Elaboração Estragados (CEE): Custo direto associado à perda de material durante o processo de manufatura;

3. Custos de Produtos Acabados Estragados (CAE): Custo direto associado à perda de material já fabricado ou em estoque;
4. Custo de Matéria Prima ou Produtos Primários Deteriorados (CMP): Custo direto associado à perda de matérias primas ou produtos primários estocados;
5. Custo da Proteção (CPR): Custo referente ao gasto que o consumidor industrial tem para se proteger da perda da QEE;
6. Custo de Geração Própria (CGP): Custo devido à geração de energia alternativa através de geradores de emergência, baterias etc, em casos de interrupção de energia;
7. Custo de Perdas de Informações (CIN): Custo associado às perdas de informações guardadas em meio computadorizado decorrentes de interrupção de energia ocorrida. Esse custo é estimado pelo cálculo da reposição da informação;
8. Custo de Horas Extras (CHE): Custo associado à operação do estabelecimento, quando o seu horário normal de funcionamento é prolongado devido à falha da energia elétrica;
9. Custo de Retomada ou Reinício da Produção (CRP): Este custo refere-se aos gastos utilizados para se retomar o ritmo normal da produção no caso de ocorrência de uma interrupção. Inclui-se neste item os custos de preparo das máquinas, limpeza de resíduos, reposição de ferramentas, reprogramação da produção, reaferição dos equipamentos computadorizados e estabelecimentos dos novos padrões;
10. Custo da Produção Perdida (CPP): Custo relativo à perda de produção (em valor) considerada irrecuperável, referindo-se aos produtos que estão sendo processados.

Com esses indicadores econômicos adicionados aos índices elétricos tradicionais de QEE, é possível realizar um diagnóstico e elaborar um mapa da região, quantificando-se a qualidade do fornecimento da energia elétrica às indústrias.

Com isso, as empresas teriam um banco de dados com os indicadores de custos associados à QEE dos consumidores industriais. Esses dados seriam de grande utilidade para o sistema de gestão da qualidade e para o planejamento estratégico do mercado da empresa. Poderiam ser relacionadas áreas chamadas de “Ilhas de Qualidade” (áreas de menor vulnerabilidade a afundamentos de tensão), onde empresas de alta tecnologia muito sensíveis à energia elétrica seriam instaladas e, em contrapartida, haveria uma tarifa diferenciada.

Esses ICA também subsidiam a empresa nos questionamentos jurídicos relativos ao mercado e fornecimento de energia aos consumidores industriais.

2.4 PRINCIPAIS CARGAS PRESENTES NA INDÚSTRIA

Como foi visto no início deste capítulo, as cargas motrizes que mais consomem energia no setor industrial são os sistemas de ventilação, compressão, bombeamento e refrigeração. Baseando-se nesta informação, esta seção fará uma abordagem geral destas cargas motrizes e do sistema de transporte por correia que são as principais cargas presentes na indústria, principalmente explicar para que servem e onde são aplicados.

2.4.1 Sistemas de Bombeamento

Bomba de fluxo é uma máquina na qual a movimentação do líquido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação de rotor com um certo número de pás especiais, ou seja, é um instrumento capaz de transferir energia de uma fonte para um líquido, assim esse líquido pode realizar trabalho. PROCEL (2006)

A distinção entre os diversos tipos de bombas de fluxo é feita, fundamentalmente, em função da forma como o rotor cede energia ao líquido, bem como pela orientação do líquido ao passar pelo rotor.

De acordo com a forma do rotor:

- Centrífugas ou radiais – aquelas em que o formato do rotor impõe um escoamento predominantemente segundo planos perpendiculares ao eixo e operam em vazões pequenas e grandes alturas;
- Fluxo misto – aquelas em que o formato do rotor impõe um escoamento simultaneamente nas direções axial e perpendicular ao eixo e operam em médias vazões e médias alturas;
- Axiais – aquelas em que o formato do rotor impõe um escoamento predominantemente na direção paralela ao eixo e operam em grandes vazões e pequenas alturas.

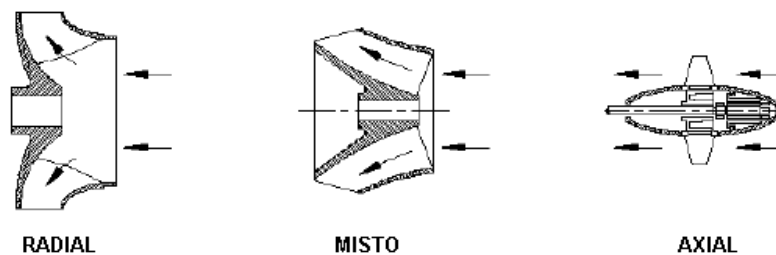


Figura 2.5: Rotores radial, misto e axial. (HADDAD, 2006)

De acordo com o modo de entrada de líquido no rotor:

- Simples Sucção – tem a entrada do líquido em um lado do rotor;
- Dupla Sucção – tem a entrada do líquido nos dois lados do rotor.

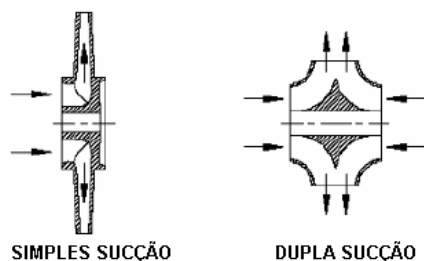


Figura 2.6: Rotores radiais de simples sucção e dupla sucção. (HADDAD, 2006)

As bombas centrífugas são largamente encontradas em diversos ramos de sistemas de bombeamento devido as facilidades de instalação, manutenção barata, flexibilidade de operação e investimento inicial baixo.

Pode-se citar alguns exemplos de aplicação de sistema de bombeamento: irrigação, sistemas de água gelada (ar condicionado), saneamento, indústrias químicas, petroquímicas, indústria açucareira, destilarias, circulação de óleos entre outras diversas aplicações.



(a)



(b)

Figura 2.7 : Sistemas de Bombeamento em indústrias (a) Sistema de Saneamento e (b) Destilaria.

Para se ter uma idéia do alto consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento visto anteriormente na seção 2.2, cita-se que o maior consumidor desse insumo no estado de São Paulo, um dos mais desenvolvidos do país, é exatamente uma empresa de saneamento que abastece grande parte dessa unidade federativa.

Segundo dados da ELETROBRÁS (2007), mais de 2% do consumo total de energia elétrica do Brasil (aproximadamente 8,3 bilhões de kWh por ano) são consumidos por empresas prestadoras de serviços de abastecimento de água. É importante ressaltar também que o aumento dos custos com energia elétrica dessas empresas geralmente é repassado ao consumidor através da inclusão no reajuste de tarifas de água, ou seja, as empresas certamente não absorvem todo o prejuízo vindo do desperdício de energia.

Dentre as possibilidades de redução do consumo de energia em sistemas de bombeamento hidráulico, a eficiência do uso do elemento acionador (no caso o motor elétrico de indução) pode trazer excelentes resultados.

2.4.2 Sistemas de Ventilação

Depois das bombas hidráulicas, os ventiladores são os equipamentos mais utilizados na indústria nas mais variadas aplicações. Os ventiladores são definidos como geradores de fluxo que trabalham com fluido no estado gasoso. Os ventiladores são máquinas com características variadas em relação ao seu tipo de rotor: centrífugo, axial e misto.



Figura 2.8 : Tipos de Rotor.

Os sistemas de ventilação são utilizados em diversos processos industriais, tais como: altos-fornos nas siderúrgicas, instalações de caldeiras, pulverizadores de carvão, queimadores, transportes pneumáticos, além da refrigeração.

Na ventilação industrial, além da manutenção térmica, os ventiladores são utilizados para a renovação de ar por insuflamento ou por exaustão, ou por ambos.

Essa renovação tem como fim primordial a obtenção, no interior de um recinto dito fechado, de ar com grau de pureza e velocidade de escoamento compatível com as exigências de saúde e bem estar humano. Entretanto, a ventilação industrial não visa apenas a atender as condições favoráveis para aqueles que trabalham no interior das

fábricas, mas também facilitar a filtragem de fumaças, poeiras, gases, vapores antes que sejam lançadas ao ar, evitando uma maior degradação do meio ambiente.



Figura 2.9 : Exemplos de Sistemas de Ventilação.

2.4.3 Sistema de Ar Comprimido

Os compressores de ar para serviços industriais são equipamentos encarregados pelo suprimento de ar comprimido em unidades industriais. Devem possuir elevada confiabilidade e podem ser máquinas de grande porte, com elevado custo de aquisição e de operação.

O ar comprimido é empregado em quase todos os setores da indústria e encontra aplicações nas mais diversas tarefas.

Nas indústrias, o ar comprimido é muito empregado nas máquinas operatrizes, em motores pneumáticos, equipamentos de movimentação e transporte de materiais, ferramentas manuais, em sistemas de comando, controle, regulagem, instrumentação e na automação de processos. O ar comprimido também é usado nas instalações dos aeroportos, portos, hospitais, obras civis, nas minerações, postos de combustível, nos equipamentos de climatização e em diversos outros locais.

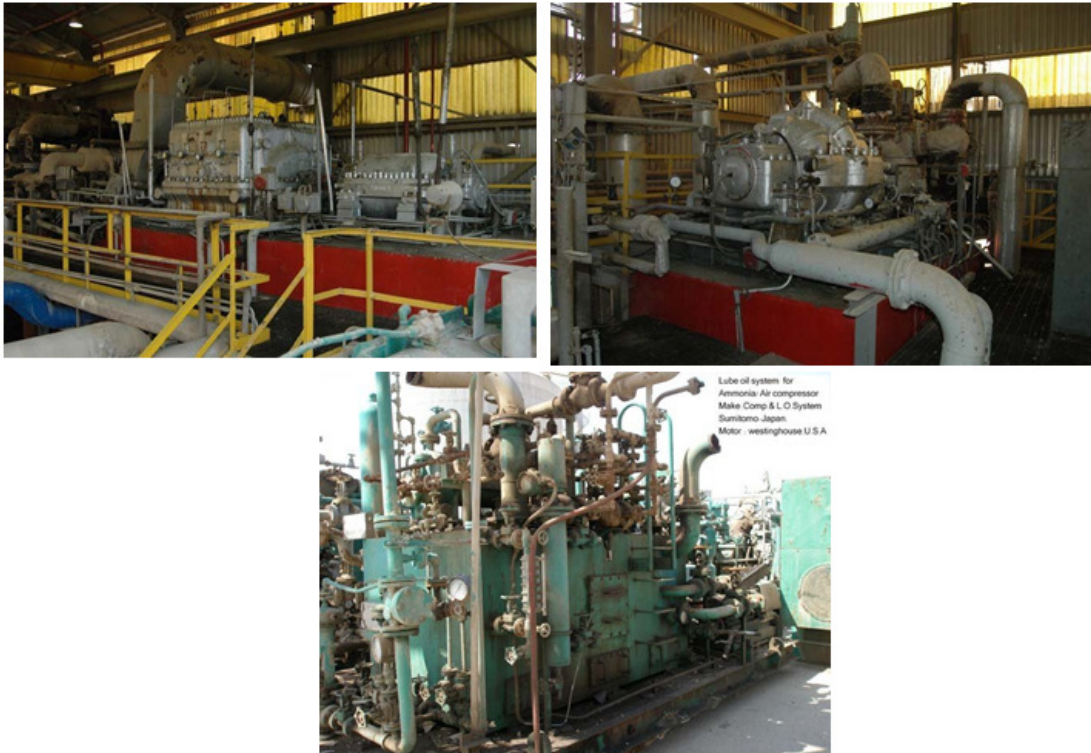


Figura 2.10 : Exemplos de Sistema de Ar Comprimido em indústrias.

Uma das vantagens do emprego do ar comprimido é que o mesmo pode ser armazenado e conduzido ao local de utilização sem necessitar de isolamento térmico, como é o caso do vapor. Não oferece riscos de incêndio ou de explosão e seu emprego se faz de forma flexível, compacta e potente. Essas características explicam seu uso em escala sempre crescente.

Como a principal desvantagem aponta-se o maior consumo de energia que a energia elétrica na produção de um determinado trabalho útil, o que não impede seu uso face às vantagens que oferece.

O ar comprimido é uma utilidade presente em quase todas as indústrias, na seção 2.2 vimos que 14,5% da energia elétrica deste sistema é usada em força motriz na indústria.

No entanto, por ser algo acessório à produção em geral, não se atribui a esta utilidade o devido cuidado no projeto e manutenção dos sistemas de ar comprimido. Ampliações são feitas muitas vezes quando se atinge o limite da instalação, procurando solucionar uma necessidade imediata, resultando em sistemas com múltiplas oportunidades de otimização. Não é raro perdas somente em vazamentos demandarem metade da capacidade instalada.

2.4.4 Sistema de Refrigeração

A refrigeração tem como objetivo o controle da temperatura de alguma substância ou meio. Os componentes básicos do sistema de refrigeração são: compressores, trocadores de calor, ventiladores, bombas, tubos, dutos e controles.

A refrigeração industrial poderia ser caracterizada pela faixa de temperatura de operação. No limite inferior, a temperatura pode atingir a ordem de -60°C a -70°C , enquanto no limite superior podem ser observadas temperaturas de 15°C . aplicações em que se verifiquem temperaturas menos que o limite inferior pertencem à indústria da criogenia, a qual se especializa na produção e utilização de gás natural liquefeito, oxigênio e nitrogênio líquidos.

Outra forma de caracterizar a refrigeração industrial seria através das aplicações. Assim, a refrigeração industrial poderia ser descrita como sendo o processo utilizado nas indústrias químicas, de alimentos e de processos, as quais envolvem dois terços das aplicações. Outra aplicação importante está relacionada à indústria manufatureira e laboratórios, onde deve haver um controle ambiental a baixa temperatura. Algumas aplicações de bombas de calor poderiam ser associadas à refrigeração industrial, muito embora a rejeição de calor se faça a temperaturas relativamente elevadas em relação à temperatura ambiente.



Figura 2.11 : Exemplo de Refrigeração de Alimentos.

2.4.5 Correia transportadora

Os transportadores de correias são em geral utilizados para transportar grande quantidade de materiais (muito comum para transporte de minérios). Podem atingir alguns quilômetros de comprimento mas sua versatilidade permite também a sua utilização em trechos menores para o transporte econômico de volumes. São utilizados também no transporte de sacos e possui como principais vantagens o fato de reduzirem a necessidade de mão-de-obra e a possibilidade de variação do ritmo de trabalho.

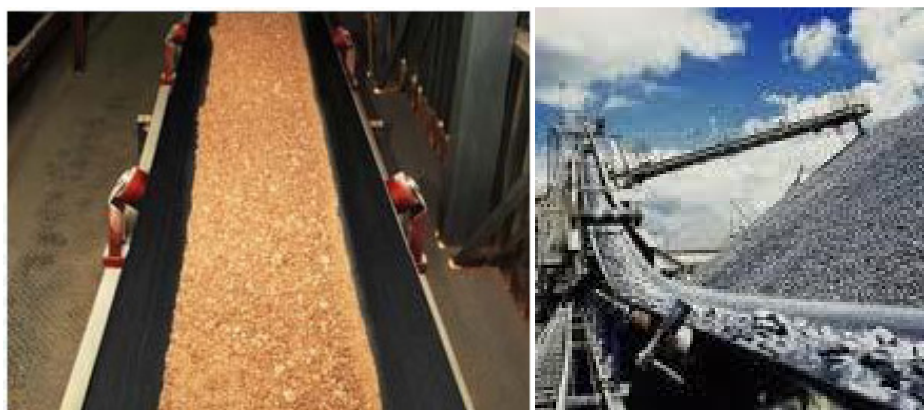


Figura 2.12 : Exemplo de Correia Transportadora de Alimentos e Minérios.

Os atuais equipamentos e máquinas de transporte de alta produtividade, que trabalham em elevadas velocidades e que possuem grande capacidade de carga apareceram como resultado do aperfeiçoamento gradual das máquinas no curso de um longo período de tempo.

As correias transportadoras têm uma posição dominante no transporte de materiais a granel devido às inerentes vantagens que possuem, tais como: baixo custo operacional, segurança, vida útil longa, versatilidade e praticamente uma faixa ilimitada de capacidade de carga. Além disso, podem ser projetadas para integrar inúmeros processos, garantindo o fluxo contínuo de materiais entre duas operações sucessivas. Segundo NOGUEIRA, 2004, as exigências ambientais tornaram a seleção das correias transportadoras ainda mais vantajosa em relação aos outros meios de transporte.

2.5 LAMOTRIZ/CEAMAZON

O Laboratório de Sistemas Motrizes do CEAMAZON é um laboratório de desenvolvimento de pesquisas, ensino e extensão em sistemas motrizes industriais. O laboratório permite o acesso a automação e controle industrial que vem sendo utilizado nas indústrias modernas.

O Lamotriz é composto por quatro bancadas de ensaios (figura 2.12) que funcionam independentemente umas das outras, para simular sistemas de acionamento através de motores de indução trifásicos padrão e de alto rendimento. As cargas acionadas são:

- Correia Transportadora,
- Bomba Centrífuga,
- Ventilador/Exaustor e
- Compressor de Ar.



Figura 2.12 Bancadas dos protótipos de (a) Bombeamento, (b) Ar Comprimido, (c) Correia Transportadora e (d) Ventilador/Exaustor.

As bancadas possuem: Motores (de alto rendimento e *standard*), Inversor de Frequência, Chave *Soft-Starter*, Módulo de Carga, Controlador Lógico Programável (CLP) e os equipamentos de acionamento e proteção tais como contatores, disjuntores, chaves, botoeiras e sinaleiros. Todos os parâmetros elétricos da entrada dos motores são medidos através desta bancada que ainda armazena o sistema de aquisição dos dados mecânicos.

Cada bancada de ensaio tem um sistema de medição para grandezas elétricas como tensões, correntes, potências ativa e reativa, fator de potência e frequência, além de grandezas mecânicas e ambientais distribuídas entre temperaturas ambiente e de carcaça do motor, velocidade angular, indicador de posição e grandezas associadas à bancada (pressão, vazão, velocidade angular, torque etc.). O controle da vazão dos fluidos pode ser realizado através de inversores de frequência ou de válvulas proporcionais.

Os Controladores lógico programáveis (CLPs) permitem que os ensaios sejam realizados automaticamente e que os dados sejam registrados e armazenados, para gerar relatórios detalhados ao final de cada atividade através do sistema supervisório. Todas as bancadas estão conectadas ao sistema supervisório, com a função de ajustar os parâmetros dos ensaios e monitorar os sinais eletromecânicos no computador, disponíveis também em indicadores digitais.

Através do sistema supervisório é possível variar a carga do motor elétrico sendo que este último pode ser o *standard* ou de alto rendimento, dependendo do acoplamento à carga.

Ainda no sistema supervisório, pode ser escolhido o tipo de acionamento desejado:

- Sistema de partida direta através de contatores;
- Sistema de partida suave (*soft-start*);
- Sistema de partida eletrônica via inversor de frequência.

Depois de selecionado um método de partida, o CLP enviará um sinal aos respectivos contatores ficando os outros dois sistemas desconectados e intertravados.

2.5.1 Descrição da Rede Industrial do Sistema Supervisório

Para a comunicação de dados entre os diversos dispositivos do sistema supervisório, foram utilizados: a rede de comunicação industrial *Profibus*, com perfil de comunicação DP (*Decentralized Periphery*); meio de transmissão padrão RS-485; e como nível de acesso ao meio, a chamada camada *Fieldbus data link* (FDL).

A topologia de rede *Profibus* e *Ethernet* é de barramento, sendo o CLP mestre o elemento de integração entre as redes. A comunicação do supervisor com as memórias de dados do CLP mestre se faz com o uso do protocolo OPC (*Object Linking and Embedding for Process Control*).

O painel de operação local se comunica com a remota através do protocolo PPI. A comunicação da remota com o inversor de frequência é realizada pela rede *Profibus* DP, e se o protótipo for utilizado em operação local a comunicação entre eles será via protocolo USS e será necessário o desacoplamento do módulo de comunicação *Profibus* do inversor de frequência ou a mudança de parâmetros. Na figura 2.13 tem-se a ilustração da rede de protótipos de sistemas motrizes do Lamotriz.

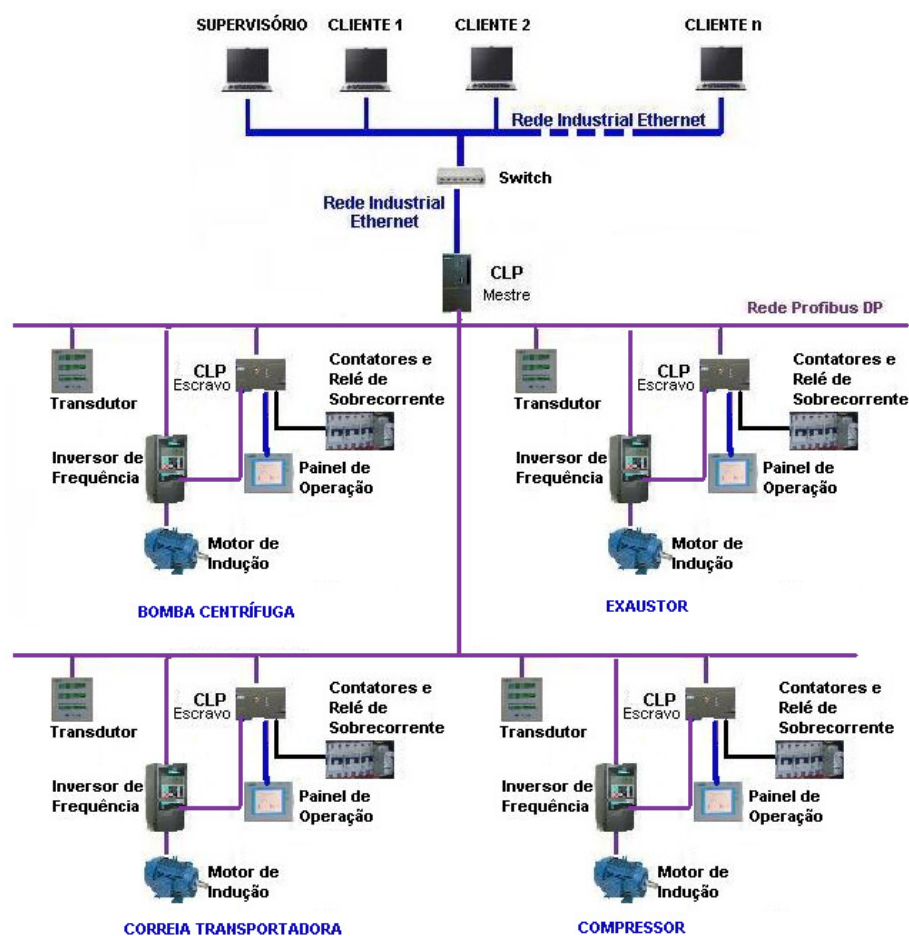


Figura 2.13 : Rede de protótipos de sistemas motrizes do Lamotriz.

2.5.2 Descrição dos Sistemas (Duarte, 2006)

a. Sistema de Ventilação: Exaustor

O sistema de exaustão possui um *damper* motorizado que é comandado por um controlador lógico programável alterando a perda de carga na rede de tubulação. Os sensores de vazão e pressão informam ao CLP os valores, e este aciona o inversor de frequência para alterar a rotação do motor ligado ao eixo do exaustor. O ventilador é acionado através de partida direta, soft-starter ou inversor de frequência, que pode ser operada remotamente via sistema supervisão, ou através do painel de operação local. A bancada do sistema de ventilação (exaustor) é composta por:

- Coletor de ar;
- Tubulações;
- Estrutura de metalon, rodízios e calço;
- Motor de indução de 1,5 cv (1,1 kW);
- Medidor de fluxo com damper motorizado;
- Transmissor de pressão;
- Ventilador industrial;
- Painel de automação.



Figura 2.14: Protótipo de Sistema de Ventilação.

b. Sistema de Bombeamento: Bomba Centrífuga

A bancada da bomba centrífuga poderá ser acionada através de partida direta, via *soft-starter* ou inversor de frequência. As válvulas de controle, tanto a manual quanto a automática, serão utilizadas para a adequação da perda de carga dos circuitos hidráulicos. Os sensores de nível dos reservatórios têm a função de garantir a segurança do funcionamento do experimento, evitando o transbordo dos reservatórios e impedindo que a bomba centrífuga trabalhe com nível abaixo do recomendado, aspirando ar.

No reservatório superior existem os sensores de nível ultrasônico (SNUS) e superior (SNS1), o primeiro terá a função principal de medir a altura do nível da água no reservatório, e o segundo de segurança contra transbordamento em caso de falha de SNUS, que através de um contato “*ON-OFF*” desligará a bomba. O reservatório RI possuirá sensores de nível superior (SNS2) e inferior (SNI) que servirão para evitar o transbordo e que a bomba trabalhe com nível abaixo do limite inferior.

A bancada do sistema de bombeamento (bomba centrífuga) é composta por:

- Reservatório superior (RS) – 250 litros;
- Reservatório inferior (RI) – 400 litros;
- Tubulações;
- Estrutura de metalon, rodízios e calço;
- Motor de indução de 1,5 cv (1,1 kW);
- Medidor de vazão;
- Dois transmissores de pressão, P1 e P2;
- Válvula de Controle Automática (VCA);
- Válvula de Controle Manual (VCM)
- Válvula de retenção (VR);
- Duas válvulas de registro tipo globo (VG);
- Três válvulas solenóides (VS1, VS2 e VS3);
- Válvula de gaveta;
- Dois sensores de nível de água superior tipo bóia (SNS1 e SNS2);
- Sensor de nível de água inferior (SNI);
- Sensor de nível ultrasônico (SNUS);
- Bomba centrífuga KSB Meganorm - 3500 rpm, altura manométrica: $H = 30\text{m}$ e vazão: $Q = 2,5\text{m}^3/\text{h}$; e
- Painel de automação.



Figura 2.15: Protótipo de Sistema de Bombeamento.

c. Sistema de Ar Comprimido: Compressor

A bancada do compressor, igualmente aos outros experimentos, permite o acionamento de forma direta, via *soft-starter* ou inversor de frequência.

Nesta bancada será possível, além das variações de motor e acionamento, um experimento para análise de redução de consumo de energia com a utilização de inversor de frequência. As válvulas solenóides, para atuações automáticas, como as manuais, serão utilizadas para a adequação do consumo de ar comprimido do sistema. Dessa forma, é possível ser simulado um sistema que necessite de mais ou menos pressão que o disponível, com isso o inversor de frequência tentará alterar a rotação do motor de indução para compensar a diferença. A bancada do sistema de ar comprimido (compressor) é composta por:

- Reservatório de ar comprimido;
- Tubulação;
- Estrutura de metalon, rodízios e calço;
- Motor de indução de 1,5 cv (1,1 kW);

- Medidor de vazão;
- Transmissor de pressão;
- 4 válvulas solenóides;
- 4 válvulas manuais
- Compressor mono pistão – 1,5 m³/h e 8 bar;
- Painel de automação.



Figura 2.16: Protótipo de Sistema de Ar Comprimido.

d. Sistema de Transporte de Cargas: Correia Transportadora

O motor ligado ao redutor da correia transportadora é acionado por partida direta, via *soft-starter* ou o inversor de frequência principal.

O mecanismo de deslocamento linear será movimentado, por um conjunto inversor de frequência, motor e encoder, e serão responsáveis pelo posicionamento de um mecanismo que exercerá pressão sobre a esteira, simulando a carga.

Nesta bancada é possível realizar várias possibilidades de esteiras transportadoras industriais, como por exemplo: as que transportam minerais, ou matéria prima para algum processo.

A bancada do sistema de transporte de cargas (correia transportadora) é composta por:

- Esteira rolante;
- Rolos em aço com mancais de rolamento;
- Base com roletes para suporte da carga;
- Redutor (caixa de redução de 10 vezes);
- Estrutura de metalon, rodízios e calço;
- Motor de indução de 1,5 cv (1,1 kW);
- Motor de indução de 0,25 cv (kW) (para acionamento do mecanismo de deslocamento linear);
- Mecanismo de deslocamento linear, com parafuso de alta retenção;
- Inversor de frequência auxiliar;
- Célula de carga;
- Encoder; e
- Painel de automação.



Figura 2.17: Protótipo de Sistema de Correia Transportadora.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi observado que o setor industrial é o responsável pelo maior consumo de energia elétrica do país, conforme informações do EPE (2010), alcançando cerca de 43,9% do consumo total de energia e sendo responsável por expressiva parcela de desperdício de energia. Somando-se a isso, o atual momento de economia globalizada, onde a competição tem se mostrado extremamente acirrada, pode-se dizer que a monitoração das grandezas de energia elétrica dos seus processos representa uma oportunidade para as indústrias melhorarem a sua competitividade. Sendo assim, é amplamente considerada como uma ferramenta que pode ser utilizada por empresas procurando melhorar seu estado atual.

O Capítulo 3, a seguir, irá tratar das normas nacionais e internacionais de monitoração de qualidade da energia elétrica, uma vez que a monitoração é de grande importância para a análise do sistema elétrico de um processo industrial, por exemplo, pois através desta é possível realizar a prevenção de maiores problemas que possam vir a ocorrer ou realizar medidas corretivas quando for necessário.

3 NORMAS PARA MONITORAÇÃO DE QEE

3.1 INTRODUÇÃO

As normas de operação para um sistema elétrico variam de um país para outro, ficando difícil estabelecer critérios gerais para mensurar a qualidade da energia elétrica. No Brasil foi constituído pelo ONS um Grupo de Qualidade de Energia Elétrica (GQEE) para tratar especificamente dessa questão.

Segundo Deckmann, existe uma tendência mundial em discutir as normas de âmbito nacional para se chegar a um consenso internacional. As iniciativas nesse sentido partiram justamente dos órgãos que historicamente têm suportado a maior parte da documentação normativa, como o *IEEE* nos Estados Unidos e o *CIGRÉ* na Europa. A convergência deverá ocorrer a longo prazo e, por enquanto, o que se dispõe são normas nacionais ou recomendações internacionais.

Muitas vezes a falta de unificação de procedimentos e critérios normativos prejudica os consumidores, por adquirirem equipamentos previstos para utilização sob determinadas condições no país de origem, diferentes das condições locais, podendo sofrer prejuízo com o mau funcionamento dos equipamentos mais sensíveis.

No entanto, grupos de técnicos e especialistas, coordenados pela ANEEL e ONS, têm trabalhado para se chegar a um conjunto de procedimentos e recomendações aplicáveis tanto no nível da rede básica como das redes de distribuição, para viabilizar os contratos de conexão entre os diversos agentes na nova estrutura do setor elétrico. Esses procedimentos, a nível de distribuição de energia, resultou no PRODIST onde sua versão atual pode ser encontrada nos portais da ANEEL e do ONS.

Neste capítulo será feita uma abordagem das normas de monitoração de QEE, principalmente no que diz respeito a desequilíbrio de tensão, distorções harmônicas e variação de tensão em regime permanente, pois são grandezas relevantes ao estudo em questão.

3.2 NORMAS NACIONAIS SOBRE QEE

Nacionalmente uma entidade que merece um destaque pelo trabalho que vem desenvolvendo na área da QEE, é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT),

responsável por elaborar a norma NBR IEC 61000-4-30 Compatibilidade Eletromagnética (CEM) Parte 4-30 “Técnicas de Medição – Métodos de Medição da Qualidade da Energia Elétrica”, baseada na IEC 61000-4-30 – *Testing and Measurement Techniques – Power quality measurement methods* (Belchior et al, 2009 apud NBR/IEC; Newman,2009). A norma orienta quanto aos procedimentos para se fazer a avaliação e integração no tempo dos valores medidos. O objetivo é tornar idênticos os resultados obtidos por diferentes equipamentos quando o mesmo fenômeno eletromagnético é medido. Para tanto, entra-se num nível de detalhamento que abrange: os métodos, desempenho requerido, incertezas e faixas de valores dos diversos parâmetros (Belchior et al, 2009).

Pode-se afirmar que o papel atual desempenhado pelo setor energético brasileiro é de responsabilidade principal da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Operador Nacional do Sistema (ONS). Além de terem o encargo com praticamente tudo o que se refere à energia elétrica no país, esses dois órgãos não deixariam de abordar questões específicas como a qualidade e os aspectos de medição da energia, assuntos que serão tratados a seguir. Para o estudo desenvolvido nesta dissertação se dará uma maior relevância à ANEEL, direcionando-se para normas e resoluções normativas sobre monitoração de QEE a nível de distribuição de energia.

3.2.1 ONS

Foi criado em 26 de agosto de 1998, é 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.

Atinentes ao ONS destacam-se os documentos normativos de Procedimentos de Rede, elaborados com a participação dos agentes, e aprovados pela ANEEL. Definem os procedimentos e os requisitos necessários à realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real no âmbito do SIN.

Os principais objetivos dos Procedimentos de Rede são:

- Legitimar, garantir e demonstrar a transparência, integridade, equanimidade, reprodutibilidade e excelência da operação do SIN;
- Estabelecer, com base legal e contratual, as responsabilidades do ONS e dos agentes de operação, no que se refere as atividades, insumos, produtos e prazos dos processos de operação do sistema elétrico;

- Especificar os requisitos técnicos contratuais exigidos nos Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão – CPST, dos Contratos de Conexão ao Sistema de Transmissão – CCT e dos Contratos de Uso do Sistema de Transmissão – CUST.

Ao todo, os Procedimentos de rede são divididos em 26 módulos, sendo suas versões aprovadas em caráter definitivo pela ANEEL através da resolução REN nº 372/2009. Dentre os módulos, destaca-se o submódulo 25.6 que fala sobre os indicadores de qualidade de energia elétrica (frequência e tensão).

3.2.2 ANEEL

Foi criada no final de 1996, porém regulamentada em outubro de 1997. Sua missão é proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade.

Até o final de 2009, a QEE no país estava subordinada a duas normas principais:

1. Resolução 024/2000 da ANEEL: De 27 de fevereiro de 2000, a qual define os padrões de continuidade do fornecimento de energia elétrica para consumidores abaixo de 230kV.
2. Resolução 505/2001 da ANEEL: De 26 de novembro de 2001, que estabelece os padrões relativos à conformidade dos níveis de tensão em regime permanente para sistemas de energia elétrica.

Porém, a resolução normativa nº 395, de 15 de novembro de 2009, revoga entre outras, as resoluções 024/2000 e a 505/2001. A partir de então passa a valer a norma de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que será tratado a seguir.

3.2.2.1 Prodist

A elaboração do Prodist teve início em 1999, com a contratação do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, e recebeu ao longo do tempo diversas contribuições sobre o

tema. Estes procedimentos disciplinam o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e demais agentes (unidades consumidoras e centrais geradores) conectados aos sistemas de distribuição, que incluem redes e linhas em tensão inferior a 230 kV. Tratam, também, do relacionamento entre as distribuidoras e a Agência, no que diz respeito ao intercâmbio de informações. Oito módulos fazem parte dos procedimentos a versão vigente (após a primeira revisão) está listada abaixo:

- Módulo 1 – Introdução
- Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
- Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição
- Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
- Módulo 5 – Sistemas de Medição
- Módulo 6 – Informações Requeridas e Obrigações
- Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição
- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica

Com respeito à QEE, destaca-se o módulo 8, o qual:

- Define as suas terminologias e caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE (seção de qualidade do produto).
- Estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento (seção de qualidade dos serviços prestados);
- Trata do planejamento do processo de implantação dos indicadores de qualidade do produto da energia elétrica (seção de disposições transitórias).

Para tanto, são definidos os índices, critérios de amostragem e padrões de qualidade do produto para os seguintes aspectos considerados (em regime permanente ou transitório):

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Harmônicos;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão;
- f) Variações de tensão de curta duração;

g) Variação de frequência.

Este trabalho trata de medição virtual de Harmônicos, desequilíbrio de tensão e tensão em regime permanente, então estes aspectos serão detalhados a seguir:

a. Variação de Tensão em Regime Permanente

No Prodist são estabelecidos os limites adequados, precário e críticos para os níveis de tensão em regime permanente de acordo com a faixa de variação da tensão de leitura. A Tabela 3.1 foi retirada do Anexo I do módulo 8 do Prodist referente aos Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127).

Tabela 3.1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 231) /$ $(116 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(109 \leq TL < 116 \text{ ou } 133 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) /$ $(TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

b. Harmônicos

O tópico de Harmônicos do módulo 8 do Prodist determina que, 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.

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais do Prodist são mostradas na Tabela 3.2. Estes valores servem como referência para o planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

Tabela 3.2 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT _V) [%]
V _N	10
1kV < V _N ≤ 13,8kV	8
13,8 kV < V _N ≤ 69 kV	6
69kV < V _N ≤ 138kV	3

Devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais de tensão indicados na tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	V _n ≤ 1kV		1kV < V _n ≤ 13,8kV	13,8kV < V _n ≤ 69kV	69kV < V _n ≤ 230kV
Ímpares não múltiplas de 3	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
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	1	1	0,5
	9	2	5	4	2
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	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

c. Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição.

A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão em porcentagem (FD%)

é:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (3.1)$$

Alternativamente, pode-se utilizar a expressão (3.2), que conduz a resultados em consonância com a formulação anterior:

$$FD(\%) = 100 \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}}, \text{ sendo:} \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{V_{L1}^4 + V_{L2}^4 + V_{L3}^4}{(V_{L1}^2 + V_{L2}^2 + V_{L3}^2)^2} \quad (3.3)$$

Onde V_{L1} , V_{L2} e V_{L3} são as magnitudes das tensões trifásicas de linha em RMS. De forma a eliminar possíveis efeitos das componentes de seqüência zero, as medições devem ser realizadas para as tensões fase-fase.

3.3 NORMAS INTERNACIONAIS SOBRE QEE

Diversos organismos vem trabalhando para o desenvolvimento de parâmetros, características, conceituação, metas, índices e objetivos para a qualidade da energia nos mais variados setores desta atividade. As exigências e o cumprimento destes padrões descritos nas normas são, mais do que nunca, requeridos comercialmente nos contratos de fabricação de produtos ou prestações de serviço (Matana, 2008).

Alguns exemplos de organizações de normatização, que atuam em seus campos específicos e uma breve descrição sobre as mesmas, são elucidadas abaixo:

- *European Committee for Electrotechnical Standardization* (CENELEC): prepara as normas relativas à área de engenharia elétrica para os países que pertencem a União Européia.
- *Information Technology Industry Council* (ITIC): é um 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 (ligados a tecnologia da informação) frente a distúrbio na rede. Por sua vez, vale ressaltar que esta curva foi atualizada pela própria organização (ITIC).
- *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA): associação Americana que define padrões para diversos campos da engenharia

elétrica, normalmente com aplicações mais voltadas ao uso industrial (NEMA).

- *American National Standards Institute (ANSI)*: é uma organização americana privada e sem fins lucrativos que supervisiona o desenvolvimento de normas para produtos, serviços e processos (ANSI).
- *International Organization for Standardization (ISO)*: é uma entidade de padronização e normalização que atualmente conta com um grupo de 160 países, um membro por país (ISO).

No que se refere à qualidade da energia, no âmbito mundial, a *Electrotechnical Commission (IEC)* e o *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* são duas organizações de importante destaque que vem contribuindo em muitos aspectos para a área. As seções a seguir explicam mais detalhadamente o papel desempenhado por essas duas instituições.

3.3.1 IEC

A IEC foi criada em Londres no ano de 1906. É uma organização internacional de padronização de tecnologias elétrica, eletrônica e afins. Serve como base para normalizações em diversos países, sendo referência na elaboração de propostas e contratos pelo mundo todo. Também, lida com avaliações de conformidade, certificando-se equipamentos e outros componentes do sistema estão em conformidade com os padrões (IEC: Missão).

A comissão tem por objetivo:

- Atender eficientemente as exigências do mercado global;
- Assegurar a utilização a nível mundial das normas e sistemas de avaliação de conformidade;
- Avaliar e melhorar a qualidade dos produtos e serviços abrangidos pelas suas normas;
- Estabelecer as condições para a interoperabilidade de sistemas complexos.
- Aumentar a eficiência dos processos industriais;
- Contribuir para a melhoria da saúde e segurança humana;
- Contribuir para a proteção do ambiente.

Vale frisar que o conjunto de norma da família IEC 61000, referentes à compatibilidade eletromagnética (*Electromagnetic compatibility*, EMC) se caracterizam de fundamental importância. Estas normas são aceitas internacionalmente e também abrangem assuntos concernentes à QEE.

Em termos simples, 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 este um equipamento deve ser. Na prática, isso significa que as perturbações eletromagnéticas de cada dispositivo devem ser limitadas e ter um nível adequado de imunidade às perturbações em seu ambiente (IEC: EMC).

A estrutura da série de normas IEC 61000 (excluindo-se os itens 7 e 8, pois ainda estão em aberto) é dividida da seguinte maneira (IEC: Estrutura):

- Parte 1: Geral

Possui somente uma seção, no qual fornece os princípios fundamentais a respeito dos problemas de compatibilidade eletromagnética, assim como a definição e terminologia utilizada neste padrão.

- Parte 2: Ambiente

São fornecidas diretrizes para os níveis de compatibilidade de vários distúrbios. Além disso, apresenta descrições, classificações e métodos de quantificação do ambiente onde o equipamento será utilizado.

- Parte 3: Limites

É a base dos padrões de compatibilidade eletromagnética onde vários limites de emissão e compatibilidade para equipamentos são fornecidos. Os padrões IEC 61000-3-2 e o IEC 61000-3-4 dão os limites de emissão de corrente harmônica; e as IEC 61000-3-3 e IEC 61000-3-5 dão os limites para flutuação de tensão.

- Parte 4: Técnicas de teste e medições

Fornecer diretrizes para o projeto de equipamentos para medição e monitoramento de distúrbios da qualidade da energia. Ela também delinea os procedimentos de teste dos equipamentos de modo a confirmar a conformação do mesmo com as outras partes desse padrão.

- Parte 5: Orientações de instalação e mitigação

Ela fornece as diretrizes para a instalação de modo a minimizar e aumentar a imunidade contra distúrbios que prejudicam a compatibilidade eletromagnética. Além disso, descreve vários dispositivos para resolver o problema da qualidade da energia elétrica.

- Parte 6: Normas genéricas

Inclui padrões específicos para uma categoria de equipamentos ou para certos ambientes. Eles também incluem níveis de imunidade e emissão padrões.

Alguns documentos da norma IEC 61000-4 se destacam para este trabalho no que concerne à monitoração de parâmetros de qualidade de energia, como as subdivisões 7 e 30, que especificam, entre outros, os procedimentos de ensaios e as características necessárias de um medidor, como a aquisição das leituras, o tratamento dos dados e a classificação dos resultados para análise dos distúrbios englobados pela QEE.

Muitas normas internacionais utilizam estes conceitos de medidores da IEC como requisitos para obtenção dos valores das medidas dos fenômenos eletromagnéticos envolvidos e suas análises. Baseado nisto pode-se afirmar que as normas da IEC são mais utilizadas para equipamentos de medição sobre QEE que as outras normas vigentes (Matana, 2008). Nos próximos itens, as subdivisões 7 e 30 da norma IEC 61000-4 serão descritas.

a. IEC 61000-4-7: Compatibilidade Eletromagnética – Teste e Técnicas de Medições: Guia Geral de Medição e Instrumentação de Harmônicos e Interharmônicos para Sistemas Supridores de Energia e equipamentos conectados.

A IEC 61000-4-7 é a principal norma sobre distorção harmônica, onde estão definidas as terminologias, indicadores para a avaliação do nível de distorção harmônica na rede elétrica, metodologias de medição dos harmônicos de tensão e corrente, e os requisitos básicos para a construção de equipamentos de medição como: analisadores da qualidade da energia, registradores etc. Ela é destinada à instrumentação responsável por medir a componente espectral com uma frequência de até 9 kHz.

De acordo com a IEC 61000-4-7, a estrutura genérica de um instrumento de medição de harmônicos 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 . A figura 3.1 mostra a estrutura geral de um equipamento de medição de harmônicos.

A janela de tempo é sincronizada com cada grupo de 10 ou de 12 ciclos de acordo com a frequência do sistema elétrico de 50 Hz ou 60 Hz.

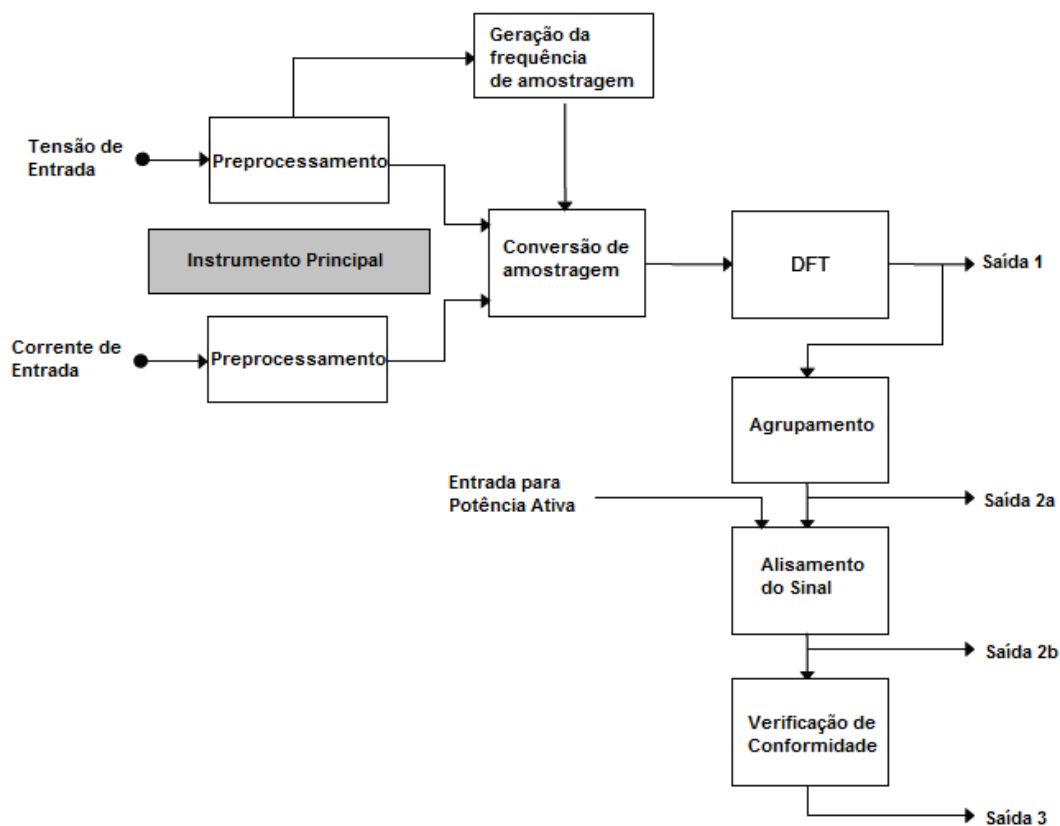


Figura 3.1. Estrutura geral de um equipamento de medição de harmônicos.

Fonte: IEC 61000-4-7

A transformada discreta de *Fourier* é 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.

Além disso, a presente norma define duas classes de exatidão para a instrumentação destinada à medição de componentes harmônicas. Essas classes podem ser visualizadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Exigências de exatidão para medição de tensão, corrente e potência

Class	Measurement	Conditions	Maximum error
I	Voltage	$U_m \geq 1\% U_{nom}$	$\pm 5\% U_m$
		$U_m < 1\% U_{nom}$	$\pm 0,05\% U_{nom}$
	Current	$I_m \geq 3\% I_{nom}$ $I_m < 3\% I_{nom}$	$\pm 5\% I_m$ $\pm 0,05\% I_{nom}$
	Power	$P_m \geq 150 \text{ W}$ $P_m < 150 \text{ W}$	$\pm 1\% P_{nom}$ $\pm 1,5 \text{ W}$
II	Voltage	$U_m \geq 3\% U_{nom}$	$\pm 5\% U_m$
		$U_m < 3\% U_{nom}$	$\pm 0,15\% U_{nom}$
	Current	$I_m \geq 10\% I_{nom}$ $I_m < 10\% I_{nom}$	$\pm 5\% I_m$ $\pm 0,5\% I_{nom}$
I_{nom} : Nominal current range of the measurement instrument U_{nom} : Nominal voltage range of the measurement instrument U_m and I_m : Measured values			
NOTE 1 Class I instruments are recommended where precise measurement are necessary, such as for verifying compliance with standards, resolving disputes, etc. Any two instruments that comply with the requirements of Class I, when connected to the same signals, produce matching results within the specified accuracy (or indicate an overload condition).			
NOTE 2 Class I instruments are recommended for emission measurements, Class II is recommended for general surveys, but can also be used for emission measurements if the values are such that, even allowing for the increased uncertainty, it is clear that the limits are not exceeded. In practice, this means that the measured values should be lower than 90% of the allowed limits.			
NOTE 3 Additionally, for Class I instruments, the phase shift between individual channels should be smaller than $n \times 1^\circ$.			

b. IEC 61000-4-30: Eletromagnética – Teste e Técnicas de Medições: Métodos de Medição da Qualidade da Energia Elétrica

Um universo muito amplo de fenômenos eletromagnéticos pode ocorrer nos sistemas elétricos, dos transitórios ultra-rápidos, até os de baixa frequência, típicos de oscilações eletromecânicas entre grandes sistemas interligados.

Flutuações de tensão, desequilíbrios, distorções harmônicas constituem outros aspectos da qualidade da energia elétrica que demandam um tratamento específico para o adequado registro.

A 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.

São estabelecidas três classes de métodos de medição (A, S e B), para cada parâmetro medido. Para cada uma dessas classes, estão incluídos métodos de medição e exigências de desempenho dos medidores, conforme a seguir:

- **Classe A**

Esta classe é usada onde medições precisas são necessárias, por exemplo, para aplicações contratuais que podem exigir soluções em disputas entre consumidores e concessionárias, verificação de conformidade com padrões, etc. Qualquer medição de um parâmetro executada com dois instrumentos diferentes que obedecem as exigências da classe A, ao medir os mesmos sinais, deve produzir resultados iguais dentro da incerteza especificada para o parâmetro.

- **Classe S**

Esta classe, de menor custo, é usada para aplicações estatísticas tais como pesquisas ou avaliações de qualidade de energia onde a alta exatidão não é necessária e possivelmente com um subconjunto limitado de parâmetros. Embora utilize intervalos equivalentes de medição como classe A, os requisitos de processamento da classe S são menores.

- **Classe B**

Esta classe é definida com a finalidade de se evitar a continuidade da fabricação de projetos obsoletos de muitos instrumentos existentes.

Também é citada a necessidade da avaliação de toda a seqüência de medição, passando pelos transdutores de medição, a unidade de medição e a unidade de avaliação da medição. Apesar da norma não normatizar o transdutor de medição externo ao instrumento e sua incerteza associada, ela fornece orientações no seu anexo A.3.

Na norma IEC 61000-4-30 são abordados 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, Desequilíbrio de Tensão, Tensões Harmônicas, Tensões Inter-harmônicas, Mudanças rápidas de tensão, Medição de desvios superiores e inferiores de parâmetros.

As grandezas elétricas a serem medidas podem ser diretamente acessíveis (no caso dos sistemas de baixa tensão) ou mediante a utilização de transdutores de medição. Na figura 3.2, podem ser visualizados os blocos que compõe um sistema de medição da qualidade da energia elétrica.

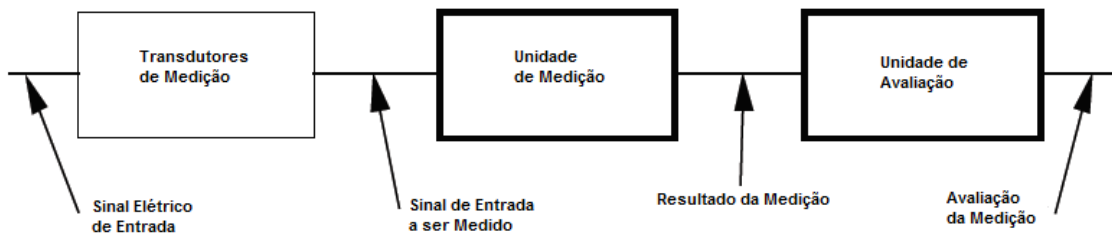


Figura 3.2: Diagrama geral de um sistema de medição

Como já descrito anteriormente, cada uma das classes de equipamentos é usada para determinada aplicabilidade. Em cada uma das classes e nos respectivos parâmetros a norma estabelece critérios para a determinação da incerteza de medição. Esta tratativa segue de perto a filosofia das normas que garantem sistemas da qualidade, sejam eles de processos produtivos ou serviços.

- **Intervalo de integração**

O intervalo de integração para medição da magnitude dos parâmetros da tensão eficaz, harmônicos, interharmônicos e desequilíbrio de tensão deve seguir critérios específicos de intervalo de tempo, de modo a possibilitar a correção de eventuais sobreposições de sinais. Outro ponto importante é a referência de tempo (RTC). Tal procedimento é necessário para garantir que dois instrumentos utilizando métodos de medição Classe A tenham o mesmo resultado de integração quando conectado ao mesmo sinal.

- **Frequência**

É estabelecido que a frequência deva ser obtida a cada 10s. Com isto quando esta não for exatamente 60 Hz, o número de ciclos não é um número inteiro. Neste caso a frequência fundamental a ser considerada é igual ao número de ciclos inteiros do intervalo de 10 s dividido pela duração total dos ciclos inteiros. Antes de cada avaliação, os harmônicos e interharmônicos devem ser filtrados a fim de minimizar os efeitos de múltiplas passagens pelo zero. A medição da frequência deve ser feita num canal de referência. O fabricante deve especificar o comportamento da frequência de medição sempre que o canal de referência perde tensão.

- **Tensão eficaz (rms)**

A Norma estabelece que o valor eficaz da tensão deva ser medido sobre 1 ciclo, começando no cruzamento em zero da componente fundamental e atualizado a cada meio-

ciclo. A taxa de amostragem é ajustada com base na frequência do sinal – amostragem sincronizada.

- **Flutuação de Tensão (Flicker)**

É estabelecido que o método, a avaliação e a agregação da medição da flutuação de tensão devem atender à IEC 61.000-4-15.

- **Variações de Tensão de Curta Duração**

A norma cita o conceito de marcação de dados. Assim, durante um afundamento, elevação, ou interrupção de tensão, o algoritmo de medição para outros parâmetros (por exemplo, a medição de frequência) pode produzir um valor não confiável. O conceito de marcação, portanto, evita que um único evento seja considerado mais de uma vez em diferentes parâmetros (por exemplo, considerando um único afundamento tanto como um afundamento e uma variação de frequência). Assim, os dados são marcados para que não possam interferir nos resultados dos demais parâmetros.

- **Filtro Anti-Aliasing**

É estabelecida a necessidade de um filtro passa-baixa *anti-aliasing*, conforme especificado na IEC 61000-4-7:2002. Isto visa evitar o aparecimento de um falso sinal que parece existir. Sem esse tipo de correção as medições podem não ser confiáveis. Todos os instrumentos digitais de amostragem podem ter esse tipo de "problema".

De acordo com a IEC 61000-4-30 os desequilíbrios de tensão são avaliados utilizando o método de componentes simétricas. Quando há desequilíbrio de tensão, há pelo menos uma das seguintes componentes: sequência negativa e/ou zero. A componente de sequência negativa pode ser encontrada pela razão dela com a componente de sequência positiva. O mesmo vale para a componente de sequência zero, onde desta vez a razão ocorre entre a sequência zero pela positiva.

E os harmônicos e os interharmônicos são medidos conforme estabelecido na IEC 61000-4-7, através da utilização da transformada discreta de *Fourier*.

Segundo a norma a medição de uma característica específica pode ser gravemente afetada pela influência de uma perturbação aplicada (grandezas de influência) no sinal elétrico de entrada, por exemplo, a medição de desequilíbrio da tensão pode ser afetada de maneira desfavorável se a forma de onda da tensão for ao mesmo tempo submetida a uma perturbação harmônica.

3.3.2 IEEE

O IEEE tem sua sede localizada nos Estados Unidos. Deixa sua marca pelo desenvolvimento de importantes normas e estudos em praticamente todos os campos da engenharia elétrica. Com relação à qualidade da energia, não poderia ser diferente, o tema é abordado com um nível de aprofundamento bem elevado.

As recomendações do IEEE são focadas no comportamento do sistema elétrico ou na instalação industrial como um todo. Suas normas limitam os níveis de distúrbios sobre a QEE no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) a todos os equipamentos. Com isto, não são os equipamentos específicos que são avaliados, mas as instalações em geral (Matana, 2008 apud Serni, 2006).

Das várias normas e padronizações referentes à qualidade da energia, pode-se destacar para este trabalho a IEEE 519: Controle de Harmônica em Sistemas Elétricos de Potência e a IEEE 1159: Monitoração da Qualidade de Energia Elétrica.

a. *IEEE Std 519/1992*

A norma *IEEE 519/1992* é uma recomendação *IEEE* para práticas e requisitos de controle de harmônicos nos sistemas elétricos de potência.

Essa recomendação produzida pelo *IEEE* descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica e indica métodos de medição e limites de distorção. Seu enfoque é diferente do da norma IEC 61000-3-2, pois os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no ponto de acoplamento comum (PAC), e não em cada equipamento individual, uma vez que não é de interesse do sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC. Obviamente, quanto maior for a corrente de curto-circuito (I_{cc}) em relação à corrente de carga, maiores serão as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão no PAC. À medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis. A grandeza TDD – *Total Demand Distortion* – é definida como a distorção harmônica da corrente, em porcentagem, da máxima demanda da corrente de carga (demanda de 15 ou 30 minutos). Isso significa que a medição da TDD deve ser feita no pico de consumo.

Para os limites de tensão, os valores mais severos são para as tensões menores (nível de distribuição). Estabelece-se um limite individual por componente e um limite para a distorção harmônica total, expressos na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Limites de distorção de tensão da norma IEEE std. 519/1992

Faixa de Tensão	Distorção Individual por Ordem harmônica (%)	Distorção total de tensão – $DHT_V(\%)$
$V \leq 69\text{kV}$	3	5
$69 < V < 161\text{kV}$	1,5	2,5
$V \geq 161\text{kV}$	1,0	1,5

Os limites de distorção de corrente em um ponto de acoplamento comum (PAC) no sistema elétrico diferem conforme sua corrente de curto-circuito e nível de tensão. A tabela 3.6 traz os limites de distorção de corrente para nível de tensão dos sistemas de distribuição de tensão ($V \leq 69\text{kV}$).

Tabela 3.6: Limite de distorção de corrente da norma IEEE std. 519/1992

Harmônicos Ímpares						
I_{cc}/I_{carga}	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \geq h$	$THD_i (\%)$
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 – 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 – 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 – 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20
Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares						
I_{cc} = corrente máxima de curto-circuito						
I_{carga} = demanda máxima de corrente de carga (somente fundamental)						

Observa-se que quanto maior a corrente de curto-circuito (I_{cc}) em relação à corrente de carga (I_{carga}), maiores serão as distorções de corrente admissíveis.

FUCHS *et al* (2004) publicou um artigo que questiona a recomendação de DHT das normas IEEE e IEC, onde estudos experimentais e analíticos dos efeitos de harmônicos de tensão e corrente realizados em máquinas de indução, transformadores, dispositivos e relés mostram que as versões atuais destas normas são muito restritivas para harmônicos de tensão e corrente.

O aumento excessivo de temperatura em um dispositivo eletromagnético, como máquinas elétricas e transformadores, pode provocar sérios danos nestes equipamentos. Cada um destes dispositivos apresenta um limite máximo de temperatura suportável, dependendo da geometria de suas estruturas e dos materiais utilizados em sua composição.

Em FUCHS *et al* (2004) são sugeridas algumas modificações nas normas de harmônicos, de forma que estas se tornem mais flexíveis. Por exemplo, se para o valor padronizado de DHT_V a temperatura de um motor de indução encontra-se muito baixo do limite térmico, por que não permitir valores maiores de DHT_V ? No artigo fica evidente, como mostrado na figura 3.3, que máquinas de indução monofásicas e trifásicas são mais sensíveis a harmônicos de tensão que transformadores e máquinas universais.

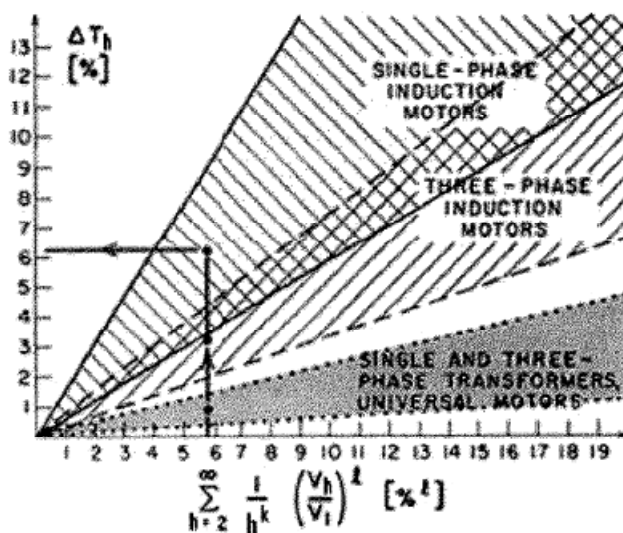


Figura 3.3: Aumento de temperatura x Função fator de harmônico ponderada

Conclui-se no artigo que maiores valores de DHT_V e DHT_i para harmônicos de baixa frequência ($h = 3$ a 19) devem ser permitidos em sistemas de distribuição, como o aumento do limite de quaisquer harmônicos individuais de tensão da norma IEEE 519-1992 em alimentadores residenciais de 3% para 5% e a DHT de tensão de 5% para 8%.

b. IEEE Std 1159-1995 - Recomendação Prática para Monitoração da Qualidade de Energia Elétrica.

Segundo a norma IEEE std 1159 o desequilíbrio de tensão (ou desbalanceamento) é definido como a relação da componente de sequência negativa ou zero pela componente de sequência positiva. Segundo a norma a tensão de sequência negativa ou zero em sistema de potência geralmente resulta de cargas desbalanceadas causando fluxo de corrente de sequência negativa ou zero. A figura 3.4 mostra um exemplo de uma medição de desequilíbrio de uma semana no alimentador residencial.

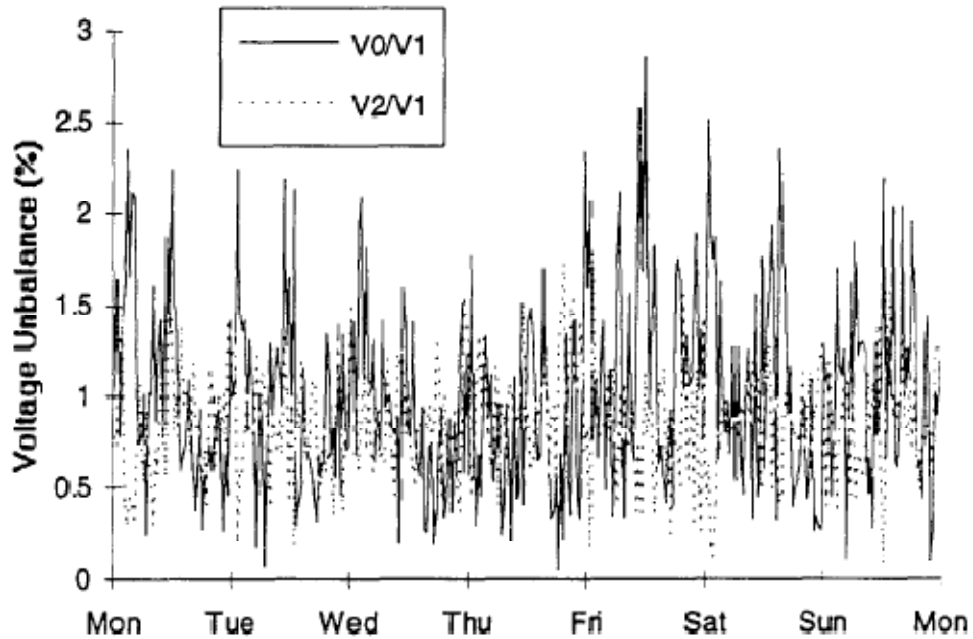


Figura 3.4 Gráfico de Tendência de Desequilíbrio em uma alimentação residencial.
 Fonte: IEEE std 1159/1995.

O desequilíbrio pode ser estimado como o desvio máximo da média das três fases, de tensão ou corrente, dividido pela média das três fases, de tensão ou corrente, expresso em porcentagem. A expressão é:

$$k(\%) = 100 \left(\frac{\text{Desvio máximo entre a tensão média e as três tensões de linha}}{\text{Média das tensões de linha}} \right) \quad (3.4)$$

Por exemplo, com medições de tensão de linha de 230, 232 e 225 volts, a média é 229. O desvio máximo da média entre as três leituras é 4. O desequilíbrio em porcentagem é $100 \times \frac{4}{229} = 1,7\%$.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As normas técnicas são importantes para a evolução sustentável da tecnologia das máquinas e equipamentos ofertados à sociedade, pois garantem principalmente a segurança do operador, um funcionamento correto conforme sua especificação e a difusão da tecnologia. No mundo existem várias entidades normativas que estudam os efeitos, as causas e propõem parâmetros para os distúrbios eletromagnéticos, porém as principais

entidades normativas internacionais relacionadas à QEE são o IEEE e a IEC. As normas da IEC estabelecem muitos dos parâmetros de aceitação e são as mais utilizadas para análise de aparelhos e sistemas, pois garantem a confiabilidade e a repetibilidade consideradas aceitáveis pelas diversas áreas do setor de energia elétrica através da avaliação do desempenho esperado e da forma construtiva dos equipamentos de medição

Com a implantação do Prodist pela ANEEL estima-se que haverá uma forte demanda por medições de qualidade da energia e neste novo cenário, será indispensável caracterizar a norma que será seguida para cálculo de cada um dos parâmetros, pois existe uma enorme variedade de tipos de instrumentos disponíveis no mercado, com recursos e preços diversos.

Atenção especial deve ser dada às futuras campanhas de medição preconizadas pelo PRODIST, o que irá requerer verificação de conformidade dos equipamentos de medição às normas aplicáveis, por diversos organismos oficiais de certificação no país, legalmente qualificados e autorizados.

No próximo capítulo será apresentada uma visão geral da instrumentação virtual, descrevendo e identificando os componentes importantes para o desenvolvimento desta; será mostrado o *software* desenvolvido neste trabalho baseado na instrumentação virtual para monitoração de parâmetros de QEE em regime permanente; e serão aplicadas algumas das normas estudadas neste capítulo, como método de cálculo e análise dos resultados.

4 INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

4.1 INTRODUÇÃO

A utilização dos computadores nos últimos anos levou à evolução dos instrumentos de automação e medição. Uma das maiores vantagens resultantes do emprego dos computadores foi o desenvolvimento do conceito de instrumentação virtual, que vem beneficiando os engenheiros e cientistas que necessitam aumentar a produtividade, precisão e desempenho.

Atualmente, diversos instrumentos analógicos podem ser concentrados de maneira virtual em um único instrumento digital, possibilitando redução de espaço e de custo. Por exemplo, em um único computador é possível ter um gerador de funções, um multímetro, um osciloscópio, um analisador de espectro e muitos outros instrumentos.

Laboratórios e indústrias utilizam computadores equipados com placas de aquisição de dados, portas seriais e paralelas para fazer medições e controlar diversos sistemas. Algumas placas podem gerar e transmitir sinais elétricos, permitindo a implementação do controle de equipamentos.

Neste capítulo trata-se de forma mais ampla a instrumentação virtual aplicada nos processos industriais, explicando seu funcionamento, relacionando custo- benefício em relação aos instrumentos reais, apresenta-se o *software* de medição virtual de qualidade de energia elétrica (SMVQEE) desenvolvido juntamente com a metodologia e procedimentos utilizados, além dos ensaios e análise dos resultados.

4.2 VISÃO GERAL DA INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL

4.2.1 Descrição de um Instrumento Virtual

Um instrumento virtual consiste de um computador equipado com um *software* aplicativo e um *hardware*, como placas *plug-in* e *drivers*, que juntos desempenham as funções dos instrumentos tradicionais.

Um programa executado no computador torna o instrumento ou o controlador acessível ao operador através de uma interface gráfica. Essa interface é dotada de botões, chaves, mostradores, indicadores, painéis de exibição de gráficos etc, apresentados como

objetivos interativos, animados sob ação do operador através do apontador do mouse. O instrumento conectado ao computador pode ser desde um equipamento completo, como um osciloscópio, frequencímetro etc, ou mesmo um simples sensor como um termopar, um extensômetro etc.

Os botões e indicadores que aparecem na tela do instrumento virtual podem não corresponder a controles reais do instrumento que está conectado ao computador. Isto é, usando o computador, podemos ampliar a funcionalidade de um instrumento acrescentando novas funções executadas pelo computador com as medidas fornecidas pelo instrumento. Por exemplo, se acoplarmos ao computador um osciloscópio digital que não tenha a função de análise espectral, podemos obter os dados do sinal adquiridos pelo osciloscópio, processá-los no computador usando-se um algoritmo FFT (*Fast Fourier Transformer*) e assim realizar uma análise espectral do sinal. O conjunto osciloscópio digital mais computador executando a FFT, forma um Analisador de Espectro Virtual (Borges, 2002).

A interface conceitual entre um computador e seu usuário é provida pelos seus dispositivos de entrada/saída: a tela do monitor, o teclado, o apontador (*mouse, trackball, tablets, data gloves*) e tantos outros dispositivos que vão surgindo à medida que se desenvolve novas interfaces homem-máquina (IHM). Além do interfaceamento com o usuário, deve-se considerar aquele realizado com outros computadores e equipamentos periféricos. Através da interface de rede, o computador pode comunicar-se com outros computadores e, dessa forma, com usuários dos mesmos, situados remotamente. Outros equipamentos periféricos são ligados ao computador através de adaptadores adequados (porta serial, porta paralela e placas conectadas ao barramento do computador). Esses equipamentos são, por exemplo, câmeras de vídeos, microfone, alto-falantes, instrumentos de medida e acionamento etc.

Com o advento dos ambientes gráficos de programação e visando simplificar a tarefa de quem desenvolve aplicações que manipulam dados de instrumentos, surgiram as chamadas “linguagem de programação visual”. Uma dessas linguagens é usada pelo *LabVIEW*, a qual será abordada mais adiante.

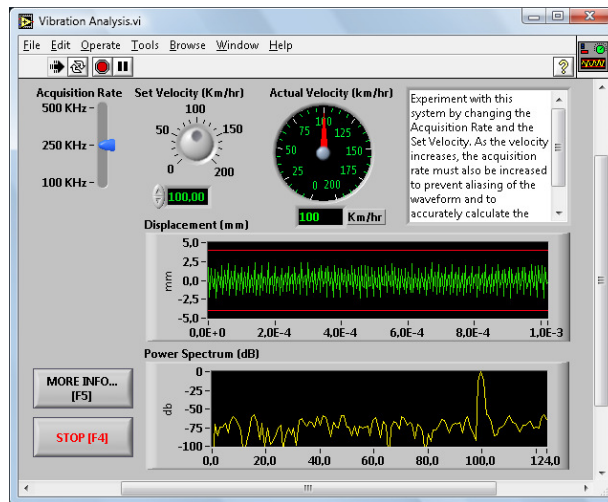
4.2.2 Composição de um Instrumento Virtual

O instrumento virtual é composto de duas partes:

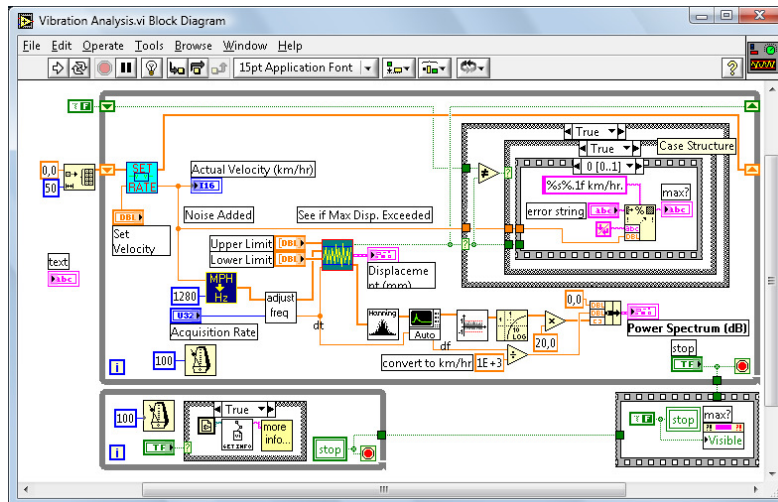
- Painel frontal e
- Diagrama de blocos

O painel frontal é uma janela apresentada na tela do monitor na qual são desenhados ícones com formatos que lembram os componentes de um painel de instrumento (botões, chaves, indicadores, oscilogramas etc), conforme mostrado na figura 4.1. Esses componentes estão associados às variáveis e parâmetros, cujos valores são medidos ou ajustados.

O diagrama de blocos (figura 4.1-b) representa graficamente os processos aos quais se submetem as variáveis e os parâmetros apresentados no painel frontal.



(a)



(b)

Figura 4.1: Interface conceitual do instrumento virtual – (a) painel frontal e (b) diagrama de blocos.

Fonte: LabVIEW 7.1 -National Instruments

4.2.3 Instrumentos Virtuais versus Instrumentos Tradicionais

Um instrumento tradicional genérico pode ser visto como um aparelho dotado dos seguintes componentes:

- Um elemento sensor ou atuador;
- Um transdutor;
- Um painel de controle e medição;
- Um painel de conexões.

Outros componentes eventualmente fazem parte do instrumento, porém os elementos acima apresentados são suficientes para construir um modelo genérico de instrumento, os quais podemos citar:

- Sensor: é o componente que aparece em um instrumento de medida, o que o habilita a “sentir” uma dada grandeza física (tensão, temperatura, pressão etc).
- Atuador: aparece no caso de um instrumento de controle ou comando. Permite alterar uma variável física.
- Transdutor: é o elemento que converte uma grandeza física de uma dada natureza em uma de outro tipo.
- Painel de controle e medição: contém botões, chaves e indicadores que permitem operar o instrumento.
- Painel de conexões: contém os terminais aos quais se conecta os elementos sensores ou atuadores, por exemplo, através de cabos ou fios.

A figura 4.2 mostra a estrutura de um instrumento virtual, tal como implementado no *LabVIEW*. Sua interface conceitual é composta dos elementos que anteriormente foi mencionado: o painel frontal e o diagrama de blocos. O processo de monitoração ou controle se dá fisicamente no instrumento tradicional. Só que agora, o instrumento tradicional é conectado ao computador via um enlace de comunicação digital (nesse caso GPIB) e a operação do instrumento tradicional se faz através da interface gráfica do computador com o usuário.

O instrumento virtual pode fornecer ao usuário um conjunto de valores melhor caracterizado do que o que seria fornecido pelo instrumento tradicional que de fato os mediu. Por exemplo, é possível que o VI forneça esses dados filtrados de ruído, organizados em uma escala mais adequada, agrupados em classes etc. Além disso, pode-se usufruir de recursos de computação gráfica para reproduzir uma visualização dos dados mais compreensível.

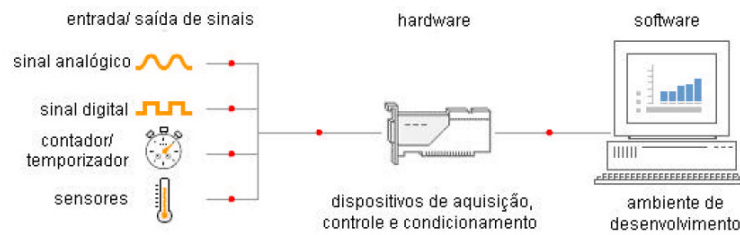


Figura 4.2: Estrutura de um instrumento virtual. *Fonte: Catálogo da National Instruments, 2006*

Os instrumentos tradicionais independentes, como osciloscópios e geradores de forma de onda são muito poderosos, caros e projetados para desempenhar uma ou mais tarefas definidas pelo fornecedor. No entanto, o usuário geralmente não pode expandí-los ou personalizá-los. Os *knobs* e botões do instrumento, o circuito interno e as funções disponíveis para o usuário são inerentes ao instrumento. Além disso, tecnologias especiais e componentes de custo elevado devem ser desenvolvidos para construir esses instrumentos, fazendo-os muito caros e de adaptação lenta.

Os instrumentos virtuais, em virtude de serem baseados em computadores, inerentemente tiram proveito das últimas tecnologias incorporadas aos PCs comerciais. Esses avanços na tecnologia e no desempenho estão rapidamente cobrindo a lacuna entre instrumentos tradicionais e os PCs, incluindo poderosos processadores e sistemas operacionais e tecnologias. Além disso, para incorporar esses recursos poderosos, essas plataformas também oferecem fácil acesso a ferramentas fundamentais como a internet. Os instrumentos tradicionais frequentemente apresentam falta de portabilidade, enquanto instrumentos virtuais implementados em *notebooks* incorporam automaticamente sua portabilidade natural.

Engenheiros e pesquisadores cujas necessidades, aplicações e requisitos mudam muito rapidamente, precisam de flexibilidade para criar suas próprias soluções. Podendo adaptar um instrumento virtual para suas necessidades particulares sem ter que substituir completamente o dispositivo devido ao *software* aplicativo instalado no PC e ampla variedade de *hardware* de aquisição de dados.

4.2.3.1 Estimativa do custo de implementação do SMVQEE *versus* custo de analisadores de QEE.

No mercado há uma grande variedade de analisadores para monitorar parâmetros de QEE. Normalmente esses equipamentos apresentam-se com diversos modelos e módulos opcionais. Existem modelos portáteis e/ou fixos, sendo necessários em

alguns casos utilizar um computador para fazer *download* das medições realizadas. Entretanto, estes equipamentos são normalmente caros, e ao selecionar um equipamento com alta performance e múltiplas funções, o seu preço cresce consideravelmente. A seguir serão mostrados na tabela 4.1 funções e preço médio no mercado de alguns analisadores utilizados para monitoração de QEE.

Tabela 4.1: Analisadores de QEE.

PRODUTO	DESCRIÇÃO	PREÇO
<p>Fluke 435</p> 	<p>Mede: tensão, corrente, frequência, potência, consumo de energia, desequilíbrio e oscilações, harmônicos e inter-harmônicos, efeitos transitórios, interrupções, sag e swell e alterações rápidas de tensão.</p> <p>Satisfaz a exigente norma de segurança 600 V CAT IV, 1000 V CAT III.</p> <p>Precisão de voltagem de 0,1% e opção de sincronização de tempo GPS, tendo conformidade total com o padrão IEC 61000-4-30 Classe A.</p>	US\$6.399,00
<p>QEE MARH 21 – RMS</p> 	<p>Digital, portátil e robusto, trifásico, programável, destinado ao registro das tensões, correntes, potências, energia, harmônicos e oscilografia de perturbações em sistemas elétricos de geração, consumo e distribuição assim como circuitos de alimentação de máquinas elétricas em geral.</p> <p>Dotado de memória interna estática tipo “RAM” de 4 MB e porta serial para leitura dos dados registrados e programação através de um computador local.</p>	US\$10.890,00
<p>HIOKI 3196</p> 	<p>Monitora e registra a qualidade de energia, permitindo análise da causa do problema aonde o mesmo ocorre. Medição de fator de potência, sags, swells, flicker e transientes. Harmônicas até a 50ª ordem. Transientes de alta frequência. Display de detecção de formas de onda. 4 canais de tensão e 4 canais de corrente. Memória interna: 13MB</p>	US\$11.275,00
<p>Fluke RPM 1750</p> 	<p>Registrador de Qualidade de Energia. Conformidade com as normas IEC 61999-1-4 Class 1, IEC 61000-4-30 Class A or B dependendo da função da medição, IEEE519, IEEE1159, IEEE1459 and EN50160. Capacidade da memória interna de 2 GB. Conexão wireless (2.4 GHz radio) Velocidade até 700 kbit/second Protocolo de Comunicação Bluetooth SPP.</p>	US\$11.475,00
<p>QEE 1760 Topas – Fluke</p> 	<p>Está em conformidade com a norma IEC 61000-4-30 Classe A, para análises avançadas de qualidade de energia e testes de conformidade consistentes. Este monitor de QEE proporciona a flexibilidade para personalizar limites, algoritmos e seleções de medição.</p> <p>Efetua análises rápidas de efeitos transitórios e descobre causas de distúrbios em equipamentos para posterior resolução do problema e manutenção preditiva. A opção de efeitos transitórios rápidos, com a gama de medições de 6000 V, permite captar impulsos muito curtos, como quedas de raios.</p>	US\$14.390,00

A implementação do sistema de monitoração pelo SMVQEE usando a estrutura de um sistema de rede industrial automatizado, como descrito no capítulo 2, é constituído basicamente de transdutor (multimedidor), CLP escravo, rede *Profibus*, CLP mestre, rede *Ethernet* e computadores. Pode-se implementar o sistema de monitoração de QEE proposto neste trabalho (figura 4.6), tendo baixíssimo custo comparativamente à aquisição dos analisadores de QEE mencionados anteriormente, uma vez que um multimedidor de QEE está custando, no mercado atual, em média US\$2400,00, uma economia, por exemplo, de mais da metade do valor do analisador mais barato citado na tabela 4.1 de analisadores de QEE .

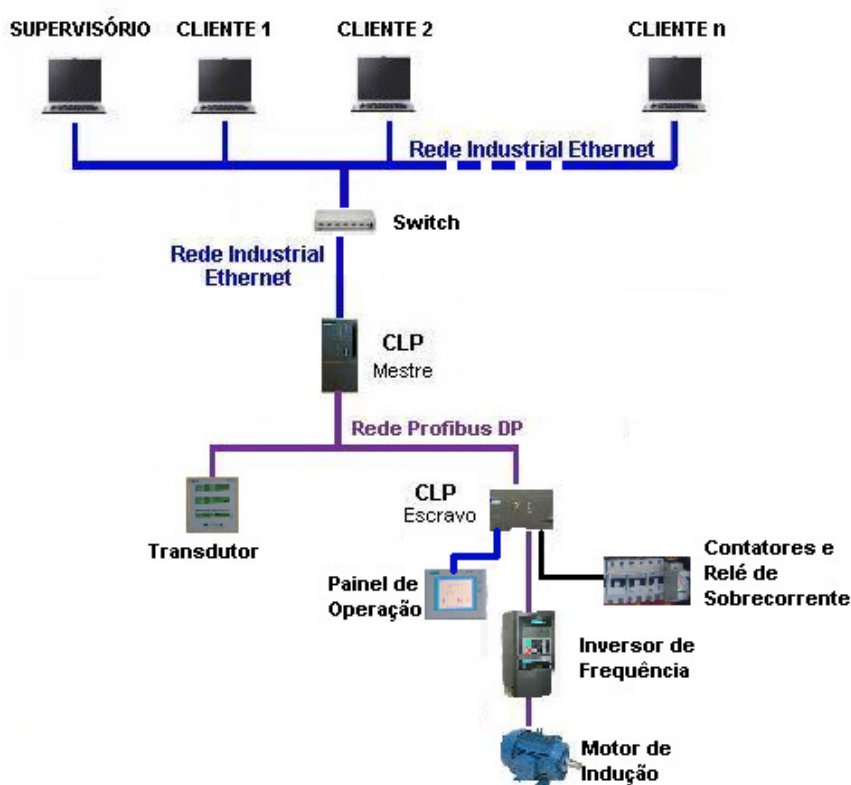


Figura 4.6: Sistema de Monitoração.

Como a transmissão de dados é via rede *Ethernet*, a monitoração pode ser feita por qualquer usuário que esteja conectado a rede e possua o *software*, caracterizando uma monitoração por múltiplos usuários.

Os usuários interagirão diretamente com o sistema de monitoração através do computador. As informações adquiridas pelo CLP são visualizadas na interface do *software* e armazenadas no banco de dados do computador. Por meio do acesso a este banco de dados, o usuário poderá fazer análises sobre os dados coletados das grandezas.

Sendo assim, pode-se observar que o custo da implementação deste tipo sistema de monitoração é apenas o da compra do SMVQEE, uma vez que será utilizada a própria estrutura automatizada da rede industrial já existente, não sendo necessário fazer alterações nesta. A partir disso, nota-se que a implementação do SMVQEE torna-se mais economicamente viável que a utilização de analisadores tradicionais. Mesmo que houvesse a necessidade de adquirir um transdutor para a implementação deste sistema de monitoração, o custo desta aquisição ainda seria menor que a de um analisador de QEE com funções básicas.

4.2.4 LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*)

No *LabVIEW* os programas feitos são chamados de VIs (*Virtual Instruments*) porque tem a aparência de instrumentos tradicionais, tais como multímetros e osciloscópios. A construção de VI é executada através da conexão de blocos, criando assim os módulos de execução.

Em contraste com as linguagens baseadas em texto, onde as instruções determinam a execução do programa, o *LabVIEW* usa programação baseada em fluxo de dados, onde o fluxo dos dados determina a execução do programa. Essa linguagem é denominada “G” e tem a mesma potencialidade de uma linguagem textual, como C ou Pascal, por exemplo. Entretanto, seus comandos são apresentados de forma gráfica, como ícones interconectados através de ligações, formando o programa. O programa escrito em “G” constitui a base do instrumento virtual do *LabVIEW*.

Os aplicativos são desenvolvidos pelo usuário com o uso de um conjunto de ferramentas e objetos que possuem funções para aquisição, análise e apresentação dos dados, GPIB e controle de instrumentos seriais. Os códigos são adicionados no diagrama de blocos usando representações gráficas de funções para controlar os objetos adicionados no painel frontal. Depois de criado o diagrama de blocos e compilado para linguagem de máquina.

Este programa gráfico contribui para a rapidez e precisão no desenvolvimento ou alteração do programa, pois além de permitir uma identificação rápida da função de cada módulo ou bloco, muitos dos blocos possuem uma biblioteca interna já desenvolvida especificamente para determinadas funções, não sendo necessário realizar seu desenvolvimento novamente.

Outras vantagens do *LabVIEW* são:

- sua abertura para vários ambientes e ferramentas de trabalho (*ActiveX*, DLL, OPC, SQL etc),
- seu funcionamento nos diversos sistemas operacionais (*Windows*, *Mac OS*, *Linux* etc),
- possui uma completa integração para se comunicar com *hardware* tais como GPIB, VXI, PXI, RS-232, RS-485 e outros dispositivos de aquisição de dados.
- Facilita o desenvolvimento de programas para conexão com a Internet com o uso de protocolos TCP/IP, *DataSocket* e *ActiveX* e
- possui alta velocidade na análise e processamento dos sinais.

Sendo assim, os instrumentos virtuais baseados no *LabVIEW* podem ser implementados em qualquer computador existente no mercado, trabalhando em um sistema operacional conhecido atualmente e oferecendo a capacidade de criar e definir seu próprio sistema de trabalho baseado em uma interface visual gráfica com o usuário. Esse conceito garante uma alta flexibilidade nas alterações de *hardware* e *software*, permite ampliações do equipamento conforme necessário, tem uma manutenção simples e modular e admite que os módulos obsoletos em uma determinada aplicação de trabalho sejam reutilizados em outra.

4.3 SMVQEE

Esta seção dedica-se a apresentação do *Software* de Medição Virtual de Qualidade de Energia Elétrica (SMVQEE), desenvolvido neste trabalho, para a monitoração e análise de grandezas elétricas e de QEE em regime permanente, baseado na instrumentação virtual.

O SMVQEE foi desenvolvido no sistema operacional *Windows XP Professional* e, com base nas vantagens descritas no item 4.2.4, foi utilizado o programa *LabVIEW* da *National Instruments* versão 7.1.

O *software* tem a finalidade de realizar a medição de grandezas elétricas e de QEE, permitindo o armazenamento dos dados medidos. Ele foi elaborado utilizando-se equações e cálculos matemáticos baseados em normas de QEE referentes às grandezas a serem monitoradas, sendo que os cálculos matemáticos serão descritos mais adiante, na seção de ensaios.

A figura 4.7 mostra a interface do SMVQEE, que fornece a visualização fácil e prática das grandezas elétricas e de QEE, medidas e registradas.

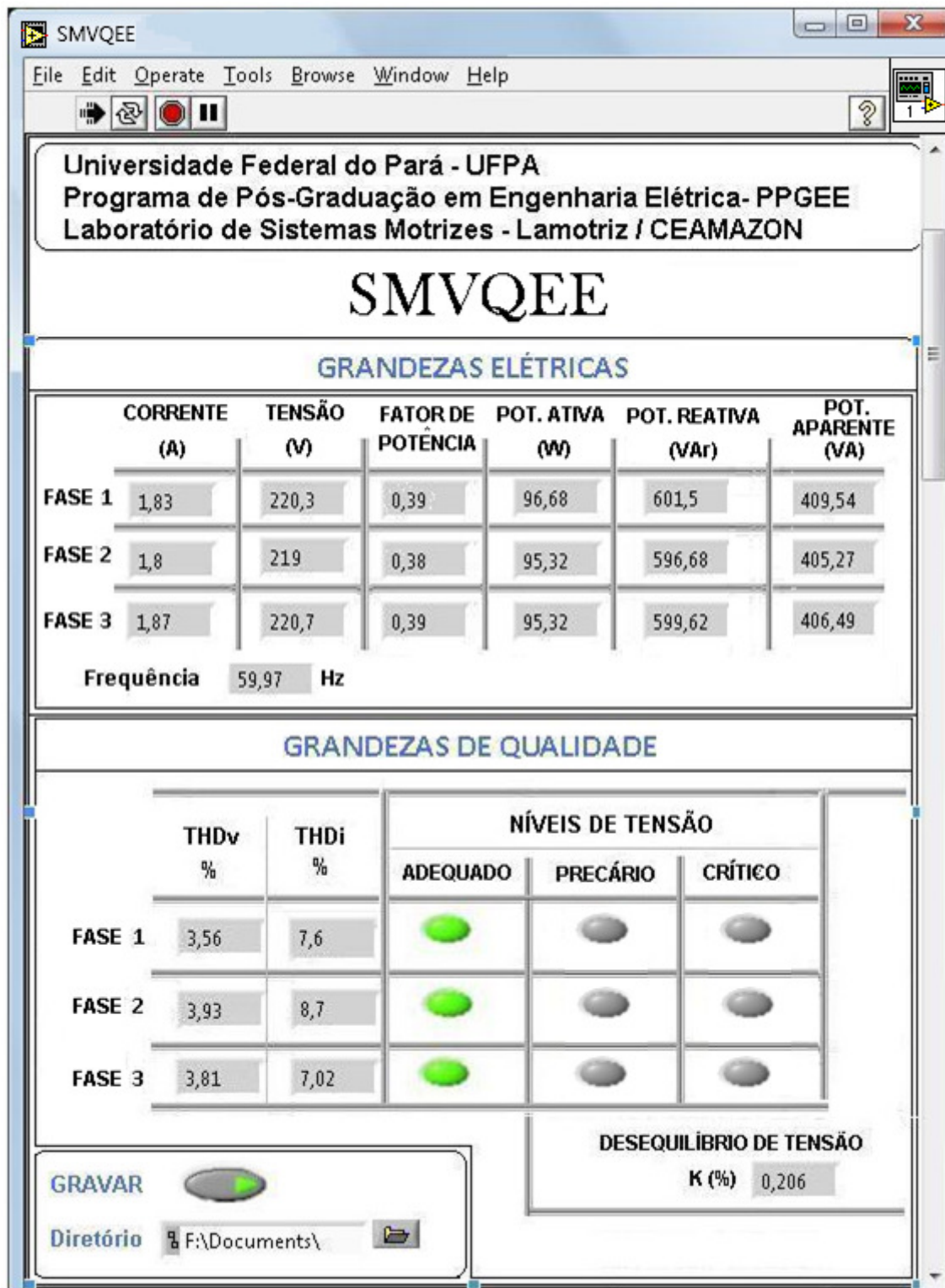


Figura 4.7: Interface do SMVQEE.

O SMVQEE foi aplicado e testado na bancada de sistema de exaustão, conforme será explicado no item 4.4. As medições foram realizadas nas três fases desse sistema trifásico, dividindo-se em dois módulos: grandezas elétricas e grandezas de QEE.

O módulo de grandezas elétricas monitora corrente, tensão, fator de potência, potências ativa, reativa e aparente e frequência.

O módulo de grandezas de qualidade monitora os parâmetros em regime permanente: distorção harmônica total (THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*) de tensão e corrente; desequilíbrio de tensão; e nível de tensão nas fases, classificado em adequado, precário ou crítico, correspondendo, respectivamente, aos indicadores luminosos verde, amarelo ou vermelho.

Todas as grandezas (elétricas e de qualidade) podem ser armazenadas em um banco de dados, através da escolha do diretório onde o arquivo será salvo e do acionamento, a qualquer momento durante a monitoração, do botão GRAVAR. Os arquivos são gerados na extensão .xls, possibilitando a visualização em formato de planilha a partir de programas de edição de planilhas como o *OpenOffice.org* (pacote de programas livre e gratuito) e o *Excel* da *Microsoft*.

Para finalizar o armazenamento de dados durante a medição, basta pressionar novamente o botão GRAVAR, desabilitando-o. Vale ressaltar que a monitoração das grandezas funciona independente da função de salvar estar habilitada. A figura 4.8-(a) mostra a planilha gerada a partir de uma medição realizada pelo SMVQEE nas três fases do protótipo de sistema de exaustão do Lamotriz no Ceamazon contendo as seguintes grandezas elétricas: tensão, corrente, fator de potência, potência ativa, potência reativa e potência aparente. A figura 4.8-(b) mostra a planilha contendo as grandezas de QEE (desequilíbrio de tensão e DHT de tensão e corrente nas três fases).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	ID	V L1	V L2	V L3	I L1	I L2	I L3	FP L1	FP L2	FP L3	P L1	P L2	P L3	Q L1	Q L2	Q L3	S L1	S L2	S L3
2	0	220,22	220,10	220,10	2,07	2,11	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	608,39	593,75	400,39	408,93	401,02
3	1	220,22	220,10	220,10	2,07	2,11	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	608,39	593,75	400,39	408,93	401,02
4	2	220,22	220,10	220,10	2,07	2,11	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	608,39	593,75	400,39	408,93	401,02
5	3	220,22	220,10	220,10	2,07	2,11	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	608,39	593,75	400,39	408,93	401,02
6	4	220,22	220,10	220,10	2,07	2,11	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	608,39	593,75	400,39	408,93	401,02
7	5	220,15	220,10	220,10	2,07	2,11	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	608,39	593,75	400,39	408,93	401,02
8	6	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	605,46	593,75	400,39	408,93	401,02
9	7	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	605,46	592,77	400,39	407,10	401,02
10	8	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	605,46	592,77	400,39	407,10	401,02
11	9	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	605,46	592,77	400,39	407,10	401,02
12	10	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	605,46	592,77	400,39	407,10	401,02
13	11	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	605,46	592,77	400,39	407,10	401,02
14	12	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	605,46	592,77	400,39	407,10	401,02
15	13	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	91,55	597,65	602,53	592,77	400,39	407,10	401,02
16	14	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	592,77	400,39	407,10	401,02
17	15	220,15	219,98	220,05	2,07	2,10	2,08	0,36	0,36	0,38	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	592,77	400,39	407,10	401,02
18	16	220,05	219,82	219,96	2,07	2,10	2,07	0,36	0,36	0,37	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	592,77	400,39	407,10	401,02
19	17	220,05	219,82	219,96	2,07	2,10	2,07	0,36	0,36	0,37	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	592,77	400,39	407,10	401,02
20	18	220,05	219,82	219,96	2,07	2,10	2,07	0,36	0,36	0,37	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	591,79	400,39	405,27	399,16
21	19	220,05	219,82	219,96	2,07	2,10	2,07	0,36	0,36	0,37	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	591,79	400,39	405,27	399,16
22	20	220,05	219,82	219,96	2,07	2,10	2,07	0,36	0,36	0,37	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	591,79	400,39	405,27	399,16
23	21	220,05	219,82	219,96	2,07	2,10	2,07	0,36	0,36	0,37	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	591,79	400,39	405,27	399,16
24	22	220,05	219,82	219,96	2,07	2,10	2,07	0,36	0,36	0,37	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	591,79	405,27	405,27	399,16
25	23	220,05	219,82	219,96	2,07	2,10	2,07	0,36	0,36	0,37	86,42	89,72	89,72	597,65	602,53	591,79	405,27	405,27	399,16
26	24	220,05	219,89	220,05	2,08	2,10	2,08	0,35	0,36	0,37	86,42	88,25	89,72	599,60	604,49	591,79	405,27	405,27	399,16
27	25	220,05	219,89	220,05	2,08	2,10	2,08	0,35	0,36	0,37	86,42	88,25	89,72	599,60	604,49	594,72	405,27	405,27	399,16
28	26	220,05	219,89	220,05	2,08	2,10	2,08	0,35	0,36	0,37	86,42	88,25	89,72	599,60	604,49	594,72	405,27	405,27	401,01
29	27	220,05	219,89	220,05	2,08	2,10	2,08	0,35	0,36	0,37	86,42	88,25	89,72	599,60	604,49	594,72	405,27	405,27	401,01
30	28	220,05	219,89	220,05	2,08	2,10	2,08	0,35	0,36	0,37	86,42	88,25	89,72	599,60	604,49	594,72	405,27	405,27	401,01

(a)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	ID	K	THDV L1	THDV L2	THDV L3	THDI L1	THDI L2	THDI L3
2	0	0,206	3,32	3,38	3,30	6,58	7,24	7,61
3	1	0,206	3,32	3,38	3,30	6,58	7,24	7,61
4	2	0,206	3,32	3,38	3,30	6,58	7,24	6,58
5	3	0,203	3,32	3,39	3,30	6,58	7,24	6,58
6	4	0,203	3,32	3,39	3,32	7,60	7,24	6,58
7	5	0,205	3,32	3,39	3,32	7,60	7,53	7,12
8	6	0,206	3,32	3,40	3,32	7,60	7,53	7,12
9	7	0,206	3,33	3,40	3,31	7,60	7,53	6,58
10	8	0,206	3,33	3,40	3,31	7,53	7,61	6,58
11	9	0,206	3,33	3,38	3,31	7,53	7,61	6,58
12	10	0,206	3,33	3,38	3,31	7,53	7,61	6,35
13	11	0,205	3,33	3,38	3,31	7,53	7,61	6,47
14	12	0,205	3,33	3,39	3,33	7,12	6,58	6,47
15	13	0,205	3,31	3,39	3,31	7,12	6,58	6,47
16	14	0,206	3,31	3,39	3,31	7,12	6,58	6,47
17	15	0,206	3,31	3,40	3,31	6,58	6,35	6,58
18	16	0,207	3,31	3,40	3,31	6,58	6,47	6,35
19	17	0,210	3,31	3,39	3,30	6,58	6,47	6,35
20	18	0,210	3,31	3,39	3,30	6,35	6,47	6,35
21	19	0,210	3,31	3,40	3,30	6,35	6,47	6,35
22	20	0,208	3,32	3,40	3,30	6,35	6,52	7,53
23	21	0,208	3,32	3,40	3,32	6,35	6,52	7,53
24	22	0,205	3,32	3,39	3,32	6,35	7,12	7,53
25	23	0,205	3,32	3,39	3,32	6,47	7,12	7,53
26	24	0,205	3,32	3,40	3,32	6,47	7,12	7,61
27	25	0,205	3,32	3,40	3,32	6,47	6,96	7,61
28	26	0,207	3,32	3,40	3,32	6,47	6,96	7,61
29	27	0,207	3,32	3,38	3,31	6,47	6,96	6,47
30	28	0,207	3,32	3,38	3,31	6,47	6,96	6,58

(b)

Figura 4.8: Medições de grandezas elétricas: (a) Grandezas elétricas (b) Grandezas de QEE.

Os dados obtidos pelo SMQEE são fornecidos pelo CLP conectado ao multimetror (transdutor), ambos constituintes da rede de protótipos do Lamotriz. Após a aquisição dos dados vindos do CLP, estes são convertidos em unidades de engenharia adequadas no ambiente de diagrama de blocos que contém o código do programa (ver Apêndice 1).

Já na tela gráfica de interface homem-máquina (IHM) do SMQEE, encontra-se os dois módulos citados anteriormente, grandezas elétricas e de qualidade.

Portanto, de uma forma resumida, as grandezas mecânicas advindas do motor são convertidas em grandezas elétricas pelo transdutor (multimetror de grandezas elétricas) e armazenadas no CLP conectado ao transdutor. A transmissão dos dados do CLP para o *software* é feita via rede ethernet usando um *switch* para possibilitar o uso de múltiplos usuários. Este percurso das informações pode ser melhor visualizado no diagrama de blocos da figura 4.9.



Figura 4.9: Diagrama de blocos funcional do instrumento virtual proposto.

4.4 PROCEDIMENTOS E METODOLOGIAS

Nos ensaios de monitoração foram analisadas três grandezas de QEE em regime permanente: Distorção Harmônica de Tensão e de Corrente, Desequilíbrio de Tensão e Variação de Tensão de longa duração. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Sistemas Motrizes (Lamotriz) do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) utilizando a bancada do sistema de exaustão apresentada na figura 4.10.



Figura 4.10: Protótipo de sistema de exaustão.

A monitoração das grandezas de QEE foi feita após os sistemas de acionamento da bancada, ou seja, na alimentação do motor de indução que movimenta o exaustor, como ilustra o diagrama simplificado da figura 4.11. Para tanto foram utilizados o programa desenvolvido de monitoração de grandezas de QEE e um analisador de QEE trifásico convencional que possui as seguintes características:

- Mede tensão, corrente, frequência, potência, consumo de energia, desequilíbrio e oscilações, harmônicos e inter-harmônicos;
- Possui quatro canais de tensão e corrente (3 fases + neutro);
- Dispõe de uma precisão de tensão de 0,1%;
- Está em conformidade com a norma de medição IEC 61000-4-30.

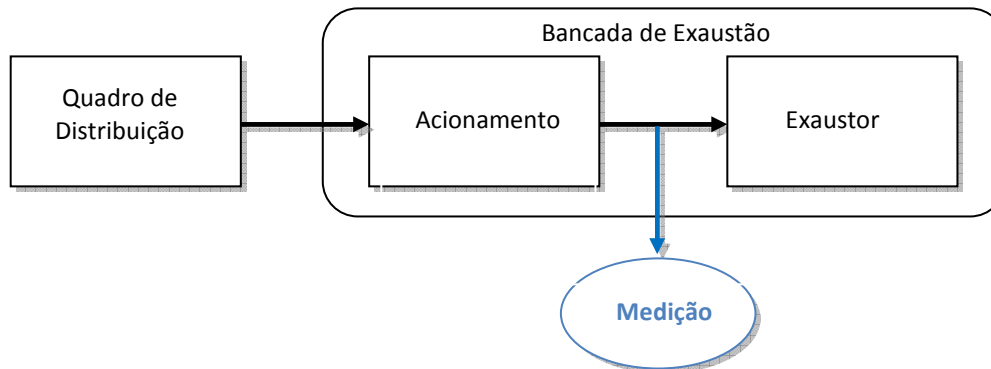


Figura 4.11: Diagrama simplificado da bancada de exaustão.

Os valores das grandezas elétricas e de QEE medidos pelo analisador trifásico de QEE foram utilizados como referência para análise dos resultados, consistindo na comparação entre estes e os obtidos com o SMVQEE.

O analisador e o SMVQEE registraram os dados de tensão e de corrente em cada fase da alimentação do motor de indução trifásico (conectado em delta) que tem como dados de placa 1,5 CV, 2P, 220V, 3370 rpm, classe de isolamento B e o motor foi submetido a acionamento por partida com inversor de frequência.

O inversor de frequência da bancada que é capaz de alimentar cargas de 0,16 CV a 350 CV é controlado por microprocessador, utiliza tecnologia IGBT (Transistor Bipolar de Gate Isolado), a modulação por largura de pulsos (PWM) com frequência de pulsação ajustável de 2 kHz à 16 kHz.

O multimetido de grandezas elétricas montado no painel de automação (figura 4.12) através do seu *display* frontal permite leitura local de grandezas elétricas, e inclusive de alguns parâmetros importantes para monitoração da qualidade de energia dos sistemas de potência ou rede elétrica. O multimetido funciona como um transdutor de energia mecânica em energia elétrica e conectado a rede *Profibus* DP permite o processamento no supervisor dos parâmetros medidos.



Figura 4.12: Painel de automação.

4.4.1 Ensaios

A seguir serão descritos os ensaios realizados no Lamotriz para cada uma das grandezas de QEE em regime permanente monitoradas pelo SMVQEE: variação de tensão, distorção harmônica de tensão e corrente e desequilíbrio de tensão.

4.4.1.1 Variação de tensão em regime permanente

Para identificar a variação de tensão em regime permanente desenvolveu-se no SMVQEE, tomando por referência os valores definidos no Anexo I Módulo 8 do Prodist/ANEEL visto no capítulo 3 deste trabalho, indicadores luminosos verde (adequado), amarelo (precário) e vermelho (crítico) para classificação dos determinados níveis de tensão nas três fases do sistema, foram implementados conforme figura 4.13.



Figura 4.13: Faixas de Classificação de Tensões em Regime Permanente.

Na realização do ensaio variou-se a velocidade do motor para se conseguir na prática diferentes níveis de tensão, com a intenção de se verificar a eficácia do SMVQEE na classificação dos níveis de tensão em regime permanente. Inicialmente deixou-se na velocidade nominal de 3370rpm, depois foi diminuída para 3000rpm e 2500rpm.

4.4.1.2 Distorção Harmônica de Tensão e Corrente

Para as medições no SMVQEE de distorção harmônica total (DHT) utilizou-se a Transformada de *Fourier* como técnica numérica, onde para uma função periódica (forma de onda) dada por $x(t)$, na qual o período é dado por T_0 , $x(t)$ pode ser representado por um somatório de ondas senoidais (componentes harmônicas), onde:

$$x(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos\left(\frac{2\pi ht}{T_0}\right) + \sum_{h=1}^{\infty} b_h \sin\left(\frac{2\pi ht}{T_0}\right) \quad (4.1)$$

Em que h é a ordem harmônica e os coeficientes a_0 , a_h e b_h são calculados da seguinte forma:

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) dt \quad (\text{componente DC}) \quad (4.2)$$

$$a_h = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi ht}{T_0}\right) dt \quad (4.3)$$

$$b_h = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \sin\left(\frac{2\pi ht}{T_0}\right) dt \quad (4.4)$$

Conforme o Prodist adotou-se as seguintes expressões para o cálculo de DHT:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (4.5)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (4.6)$$

Onde: DHT_V é a distorção harmônica total de tensão; DHT_I é a distorção harmônica total de corrente; V_h é o valor eficaz de tensão de ordem h ; I_h é o valor eficaz da

corrente de ordem h ; V_1 é o valor eficaz da tensão fundamental; I_1 é o valor eficaz da corrente fundamental; e h é a ordem harmônica.

Realizou-se a aquisição das distorções harmônicas de tensão e corrente pelo analisador e pelo programa para fins comparativos e foram medidas as harmônicas de tensão e corrente até a décima primeira ordem por serem as mais significativas nos sistemas de distribuição de energia. E realizou-se análise dos valores medidos com os de referência para distorção harmônica de tensão recomendada pelo PRODIST nos sistemas de distribuição de energia elétrica

4.5.1.3 Desequilíbrio de Tensão

Para fazer a monitoração do desequilíbrio de tensão no SMVQEE baseou-se em uma norma nacional e outra internacional: Prodist/ANEEL e *IEEE* 1159-1995, respectivamente. Ambas normas usam como metodologia de cálculo a relação da componente de sequência negativa pela componente de sequência positiva, porém expressam equações alternativas para o cálculo usando os valores RMS (*root means square*), estas expressões foram adotadas nos ensaios para que seus resultados pudessem ser analisados e então escolhido o método de cálculo que mais se aproximasse dos valores de desequilíbrio de tensão medidos no analisador.

1. **Prodinst/ANEEL**, a expressão alternativa para o cálculo do desequilíbrio de tensão é:

$$k(\%) = 100 \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \quad , \text{ sendo:} \quad (4.7)$$

$$\beta = \frac{V_{L1}^4 + V_{L2}^4 + V_{L3}^4}{(V_{L1}^2 + V_{L2}^2 + V_{L3}^2)^2} \quad (4.8)$$

Onde V_{L1} , V_{L2} e V_{L3} são as magnitudes RMS das tensões trifásicas de linha.

2. **Norma IEEE std 1159-1995**, o desequilíbrio de tensão pode ser estimado como o desvio máximo entre a tensão média trifásica e as tensões de linha dividido pela média das três tensões, expresso em porcentagem. Na forma de equação temos:




$$k(\%) = 100 \left(\frac{\text{Desvio máximo entre a tensão média e as três tensões de linha}}{\text{Média das tensões de linha}} \right) \quad (4.9)$$

Após análises, constatou-se que a equação utilizada no Prodíst é a que mais se aproxima dos valores medidos pelos analisadores de QEE. Desta forma, adotou-se no SMVQEE o uso da metodologia do Prodíst.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.6.1 Variação de tensão




Na primeira análise obteve-se o resultado das três fases, porém adotou-se os valores de tensão da Fase 1 nos resultados do ensaio de variação de tensão do sistema trifásico quanto a classificação dos níveis de tensão para não se tornar repetitivo nas análises, portanto na figura 4.14 são mostrados os resultados da variação da velocidade do motor quanto a classificação dos níveis de tensão.

NÍVEIS DE TENSÃO		
ADEQUADO	PRECÁRIO	CRÍTICO
		

(a) 220,39V a 3370 rpm

NÍVEIS DE TENSÃO		
ADEQUADO	PRECÁRIO	CRÍTICO
		

(b) 194,98V a 3000 rpm

NÍVEIS DE TENSÃO		
ADEQUADO	PRECÁRIO	CRÍTICO
		

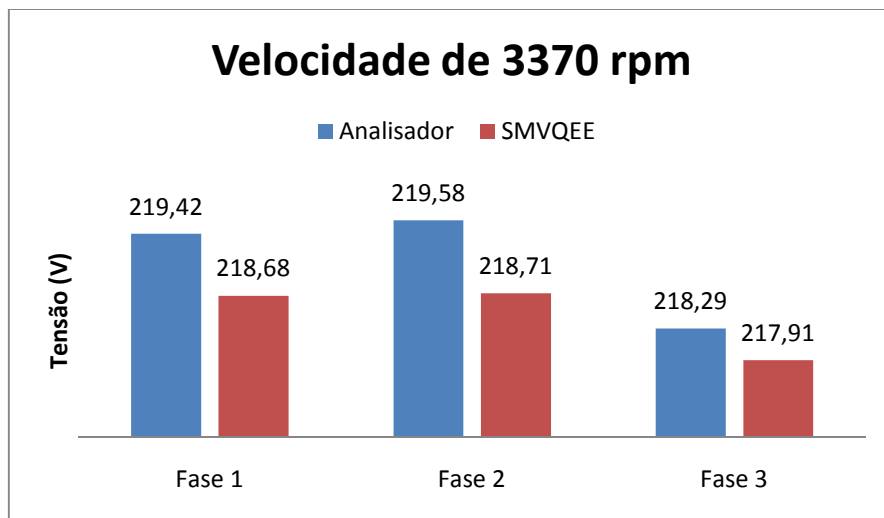
(c) 165,11V a 2500 rpm

Figura 4.14: Classificação dos níveis de tensão da fase 1 nas velocidades (a) 3370rpm, (b) 3000 rpm e (c) 2500 rpm.

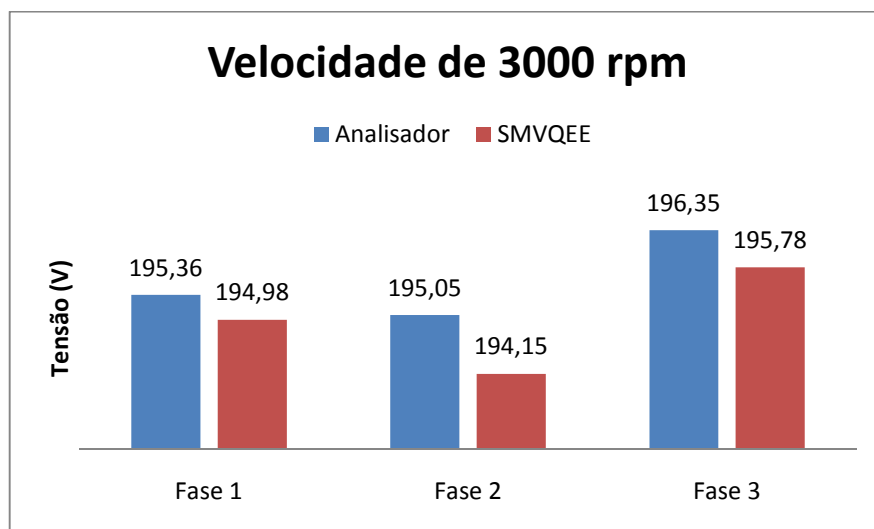
A partir dos resultados apresentados na figura 4.14, comprovou-se a eficácia da análise realizada pelo SMVQEE, pois os níveis de tensão das três fases para as variações de velocidades do motor foram classificados corretamente, estando portanto em conformidade ao Prodist/ANEEL.

A segunda análise deste ensaio foram as médias das tensões trifásicas medidas no SMVQEE e no analisador, a figura 4.15 mostra esses valores para cada uma das três velocidades, com isto, para efeito de comparação calculou-se o erro relativo entre estas medições a partir da equação 4.6, que foi retirada do VIM (Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia).

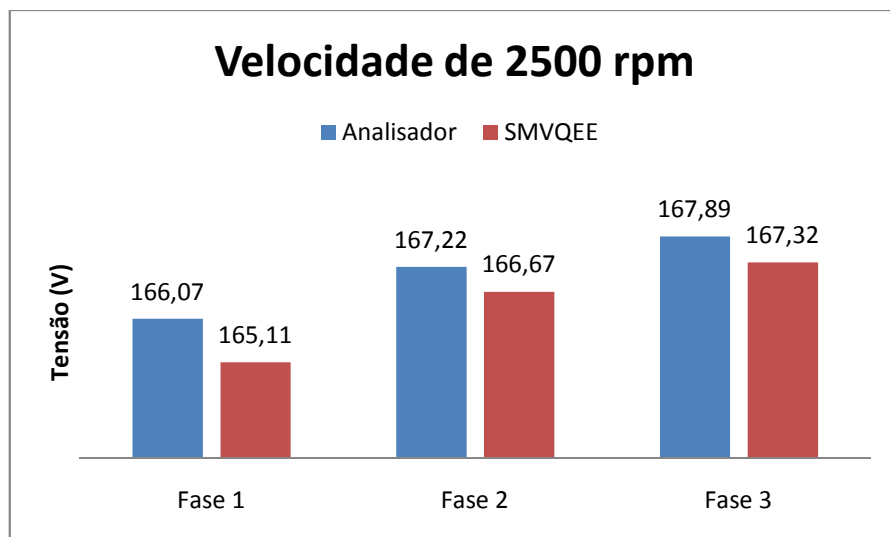
$$Erro_{(\%)} = \frac{(Medido - Referência)}{Referência} \times 100 \quad (4.10)$$



(a)



(b)



(c)

Figura 4.15: Gráfico da Média das tensões trifásicas medido no analisador e SMVQEE nas velocidades (a) 3370rpm (nominal), (b)3000rpm e (c) 2500rpm

Observa-se na figura 4.16 que o maior erro foi de 0,58% na medição de tensão do SMVQEE em relação ao analisador. Este resultado, apesar de próximo, mostra a necessidade de se realizar a calibração no transdutor e no analisador do Lamotriz utilizados na medição, uma vez que ambos não haviam sido calibrados até o dia da realização dos ensaios para este trabalho. A diferença dos resultados pode ser, também, devido as aproximações realizadas no desenvolvimento do SMVQEE e o analisador tem a precisão de um algarismo significativo diferente do SMVQEE que foi configurado para dois algarismos significativos.

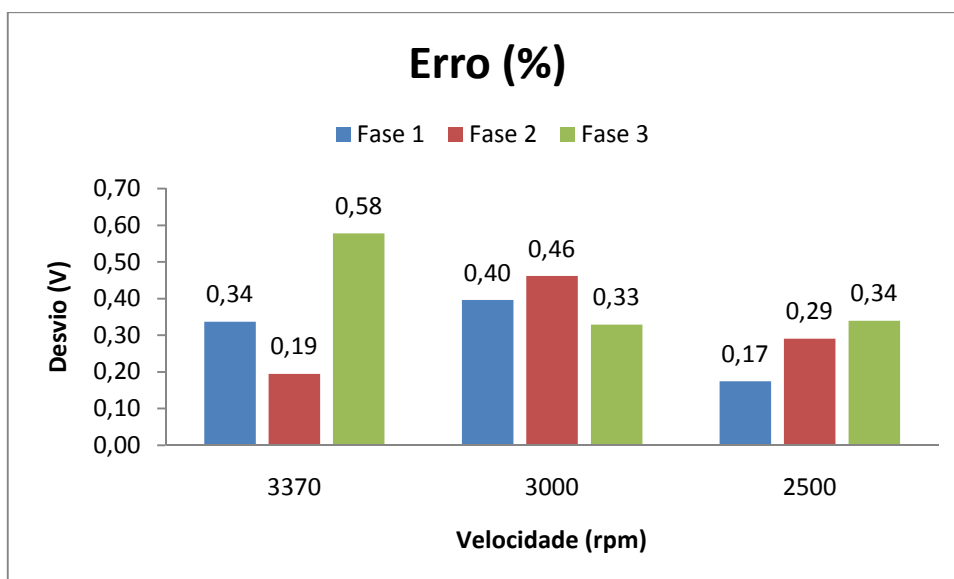


Figura 4.16: Gráfico de desvio na medição de tensão das três fases.

4.6.2 Distorção Harmônica de Tensão e Corrente

Neste ensaio obteve-se a medição de DHT de tensão e corrente, figura 17 e 18, respectivamente, nas três fases, porém adotou-se os valores de medição na Fase 1 para que as análises feitas não se tornassem repetitivas neste trabalho.

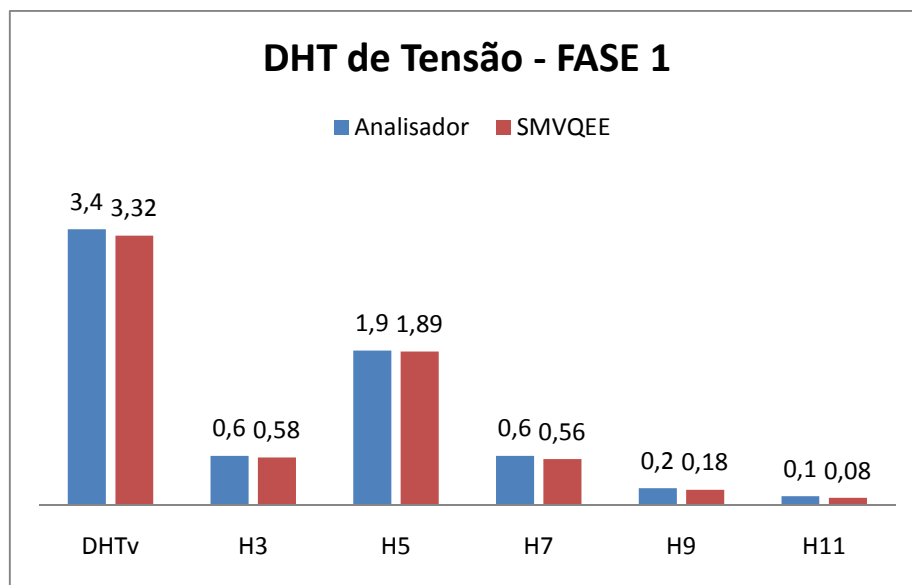


Figura 4.17: Gráfico de DHT de tensão.

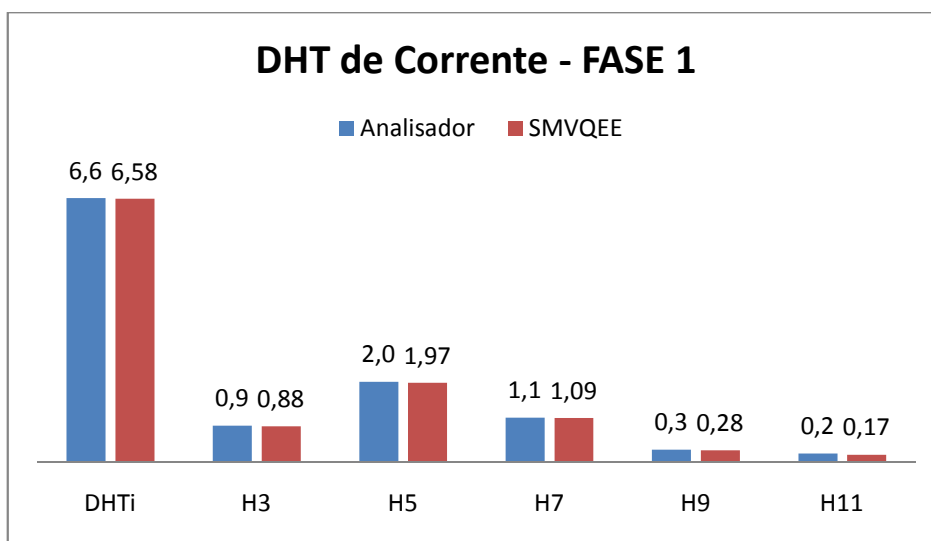


Figura 4.18: Gráfico de DHT de corrente.

Observou-se que os valores medidos de DHT_v e DHT_i pelo SMVQEE foram próximos aos registrados pelo Analisador, uma vez que esta pequena diferença pode ser justificada pela precisão do analisador que é de um algarismo significativo diferente do SMVQEE que foi configurado para dois algarismos significativos. Se fosse feito o

arredondamento dos valores medidos para um algarismo significativo no SMVQEE estes ficariam iguais aos do Analisador.

O valor 3,32% de DHT_V do sistema medido no SMVQEE está em conformidade ao valor de referência de 10% de DHT_V do Prodist em tensão nominal do barramento menor que 1kV.

4.6.3 Desequilíbrio de Tensão

Na monitoração do desequilíbrio de tensão observou-se que está em conformidade com o Prodist-ANEEL que o limita em 2%. A média dos valores registrados tanto no analisador quanto no SMVQEE podem ser visualizados na figura 4.19.

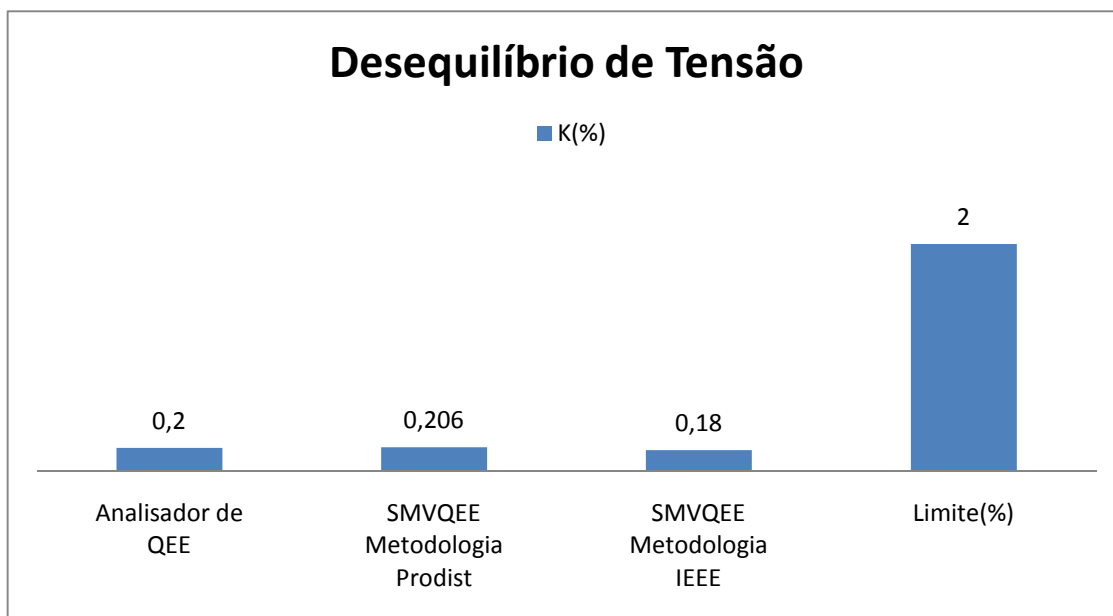


Figura 4.19: Gráfico de Desequilíbrio de Tensão.

Como o valor medido usando o método de cálculo do Prodist foi o que mais se aproximou do valor registrado, no analisador usado neste trabalho como referência nos ensaios, com um desvio de 0,006V contra 0,02V pela metodologia do IEEE, este foi o escolhido para ser aplicado no SMVQEE.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de variação de tensão em regime permanente mostraram-se satisfatórios estando em conformidade com o Prodist e o desvio máximo foi de 0,96% calculado em relação ao analisador.

Os valores de DHT de tensão e corrente foram satisfatórios, mesmo assim houve uma pequena diferença do valores medidos no analisador e no SMVQEE. E o DHT_v (3,32%) medido no SMVQEE esteve dentro do nível de referência adotado pelo Prodist (10%).

Na monitoração do desequilíbrio de tensão os valores foram satisfatórios estando dentro do limite máximo de 2% conforme a regulamentação do Prodist. Assim como nos outros ensaios teve-se uma pequena diferença entre as medições realizadas no SMVQEE e no analisador. Além disso, observou-se que o método de cálculo das expressões usando valores RMS o que mais se aproximou da medição no analisador foi a expressão do Prodist.

Mesmo que, nas medições realizadas pelo analisador de referência e pelo SMVQEE, os desvios tenham sido pequenos, conclui-se que há a necessidade de calibrar o transdutor do protótipo e o analisador, implicando em uma medição mais confiável, redução do erro e aproximação das medições do SMVQEE ao analisador utilizado como referência nos ensaios.

Comprovou-se a grande contribuição e eficácia que o SMVQEE proporciona a sistemas supervisórios em meios industriais ao empregar soluções de instrumentação virtual para aquelas indústrias que não utilizam medição contínua de parâmetros de QEE por questões de custo, além de aumentar a qualidade dos produtos e reduzir consideravelmente os custos pelo instrumento tradicional de monitoração e análise de QEE; desenvolvimento do sistema; e manutenção do sistema.

Com a monitoração baseada na instrumentação virtual mesmo sem uma grande precisão, tem-se condições de avaliar os diversos processos com relação a QEE.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Acredita-se que este trabalho tenha contribuído de forma a mostrar que a instrumentação virtual é uma proposta muito interessante para a monitoração e análise de problemas de QEE em processos industriais. A Instrumentação virtual é movida pela crescente tecnologia computacional que permite poder criar e definir seu próprio sistema baseado numa estrutura de trabalho aberta. Este conceito não só assegura que é possível que este trabalho seja utilizável no futuro, assim como também disponibiliza flexibilidade para adaptá-lo e lhe permite efetuar ampliações, na medida em que as necessidades mudam.

A partir de análise dos dados de consumo de energia elétrica no país do Plano Nacional de Energia, conclui-se que o setor industrial é o de maior consumo global, com 43,9% do total produzido, e grande parcela dessa energia é desperdiçada, devido a equipamentos e processos obsoletos utilizados, ainda hoje, nas indústrias. A eficiência energética na indústria pode contribuir significativamente para a conservação de energia e preservação do próprio meio ambiente em que vivemos, utilizando processos automatizados. Somando-se a isso, o atual momento de economia globalizada, onde a competição tem se mostrado extremamente acirrada, pode-se dizer que a monitoração das grandezas de energia elétrica dos seus processos representa uma oportunidade para as indústrias melhorarem a sua competitividade.

Mostrou-se que as normas técnicas são importantes para a evolução sustentável da tecnologia das máquinas e equipamentos ofertados à sociedade, pois garantem principalmente a segurança do operador, um funcionamento correto conforme sua especificação e a difusão da tecnologia. No mundo, existem várias entidades normativas para medição de energia elétrica que estudam os efeitos, as causas e propõem parâmetros para os distúrbios eletromagnéticos, porém as principais entidades normativas internacionais relacionadas à QEE são o IEEE e a IEC e a nacional é o Prodist.

Desenvolveu-se o SMVQEE para monitoração e análise de grandezas em regime permanente de QEE nos processos industriais que tenham sistema de rede automatizado. A variação de tensão em regime permanente, a distorção harmônica e o desequilíbrio de tensão são as grandezas monitoradas no SMVQEE e todas têm sua metodologia de cálculo baseada no Prodist. Analisando o sistema monitorado a partir do

SMVQEE, pode-se dizer que está dentro dos níveis aceitáveis de distorção harmônica total (3,32%) e desequilíbrio de tensão (0,2%). Para dar credibilidade ao SMVQEE, tomou-se como referência um analisador de QEE e os resultados obtidos foram muito próximos, sendo o maior desvio de 0,96V entre as leituras na medição da variação de tensão.

Desta forma, comprova-se a grande contribuição e eficácia que o SMVQEE proporciona a sistemas supervisórios em meios industriais ao empregar soluções de instrumentação virtual para indústrias que não utilizam medição contínua de parâmetros de QEE por questões de custo. Além de aumentar a qualidade dos produtos e reduzir consideravelmente, em mais de 50%, os custos pelo instrumento tradicional de monitoração e análise de QEE, garante uma alta flexibilidade nas alterações de *hardware* e *software*, permitindo ampliações do equipamento conforme necessário, tendo uma manutenção simples e modular e admitindo que os módulos obsoletos em uma determinada aplicação de trabalho sejam reutilizados em outra.

Tudo indica que o próximo passo da evolução desta instrumentação estará na flexibilização do *hardware*, ou seja, o usuário poderá, além de alterar o *software* conforme suas necessidades, também alterar o *hardware*.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tem-se como sugestões nos trabalhos futuros para o *software* desenvolvido:

- Implementar um sistema de análise de ocorrência de distúrbios para auxílio e tomada de decisão através de técnicas estatísticas e/ou inteligência computacional.
- Implementar grandezas de QEE que não sejam em regime permanente (transitórios), como *sags* e *swell*.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

____ (2005). Balanço de Energia Útil: Ano Base 2005. Brasília: Ministério de Minas e Energia /Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Brasília, DF, 2005.

____ (2010). Balanço Energético Nacional 2010: Ano base 2009. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

____ ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – site: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 01 fevereiro de 2011.

____ ANSI – *American National Standards Institute* – Site: <<http://www.ansi.org/>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

____ CENELEC – *European Committee for Electrotechnical Standardization* – site: <<http://www.cenelec.eu/Cenelec/Homepag.htm>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

____ EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional**. Ano base 2005. Rio de Janeiro: EPE, 2005.

____ EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal**. Ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. Site: <http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/20110124_1.pdf>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

____ IEC: EMC – *International Electrotechnical Commission* – site: <<http://www.iec.ch/zone/emc/>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

____ IEC: Estrutura – *International Electrotechnical Commission* – site: <<http://www.iec.ch/zone/emc/baspubs.htm#str61000>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

____ IEC: Missão – *International Electrotechnical Commission* – site: <<http://www.iec.ch/zone/emc/about/mission-e.htm>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

____ IEC 61000-4-7, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques* - Guia Geral de Medição e Instrumentação de Harmônicos e Interharmônicos para Sistemas Supridores de Energia e equipamentos conectados, 2003.

____ IEC 61000-4-30, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques— Power quality measurement methods*, 2003.

____ IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. – Site: <<http://www.powerstandards.com/IEEE.htm>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

____ ISO – *International Organization for Standardization* – site: <<http://www.iso.org/iso/home.html>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

____ ITIC – *The Information Technology Industry Council* – site: <<http://www.itic.org>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

____ Resenha mensal do mercado de energia elétrica, Ano II, Número 16, Outubro de 2010, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, 2010.

____ RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 395, DE 15 DE DEZEMBRO DE 2009 - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL

____ XENERGY. **United States Industrial Motor Systems Market Opportunities Assessment**. Relatório preparado para o US-DOE – Departamento de Energia dos EUA. Burlington, Massachusetts: dez.1998.

____ MME – MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balço de Energia Útil – BEU 2005**. Brasília – DF: MME, 2005.

____ NEMA – *National Electrical Manufacturers Association* – Site: <<http://www.nema.org/>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2011.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**, Módulo 8 – Qualidade da Energia, Revisão 1, 01/01/2010.

BELCHIOR, F. N.; BONATTO, B. D.; MERTENS Jr, E. A.; SUEMATSU, A. K.; Ahn, S. U.; BRONZEADO, H. S.; SOLETO, K. T.; J. de CAMARGO. (2009), **Medição da qualidade da energia elétrica – Protocolo, padronização e certificação** – VIII CBQEE – Conferência Brasileira sobre qualidade de energia elétrica, Blumenau-SC.

BORGES, A. P.(2002), **Instrumentação Virtual Aplicada a um Laboratório com Acesso Pela Internet**.Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2002.

DE SOUZA L. F. W., ROSS R. P. D., MEDEIROS J. R. (2007) **Campanhas de Medição dos Indicadores de flutuação, harmônicos e desequilíbrio de tensão na Rede Básica – constatações e resultados**, VII SBQEE Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia, Santos, Brasil, 2007.

DECKMANN, S.M. e POMILIO J. A., **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. 2010. Universidade Estadual de Campinas.

DUARTE, A. O. S. M., MOURA, R. P. S (2006). **Utilização da automação Industrial para eficiência Energética**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará, Belém, 2006

DUGAN R.C.; MCGRANAGHAN M.F.; SANTOSO S.; BEATY, H.W. (2002), **Electrical Power Systems Quality** – 2ª Edição, McGraw-Hill, USA.

FERREIRA, R. F., LINS, Z. D., CAVALCANTI, M. C. (2008), **Virtualização de Instrumentos Industriais Utilizando o Labview**, VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais – Induscon, 2008.

FUCHS E. F., ROESLER D. J., MASOUM, M. A. S. (2004) **Are Harmonic Recommendations According to IEEE and IEC Too Restrictive?** IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 19, No. 4, October 2004

HADDAD, J. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos.** Itajubá: FUPAI, 2006.

JESUS N. C., COGO J. R., TAVARES K. A. (2009), **Monitoramento e simulação da Qualidade da Energia: Procedimentos de avaliação do Impacto de Harmônicos**, VIII SBQEE Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia, Blumenau, Brasil, 2009

JUNIOR, R. A. M.; PRADO. T. F., (2006), **Ferramenta Computacional para Análise de Cintilações Luminosas** – Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade de Brasília, UnB.

LOPES, V. J. S **Instrumentação virtual aplicada ao ensino experimental de engenharia elétrica.** 2007. 108f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

M.McGranaghan, B. Roettger.(2002), **Economic Evaluation of Power Quality.** IEEE Spectrum Vol.22, No.2, Fev. 2002.

MATANA, G. M. (2008), **Proposta de Equipamento para Medição dos Fenômenos Relativos à Qualidade da Energia Elétrica utilizando Conceitos de Instrumentos Virtuais**, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP.

MELO, M., CAVALCANTI G. A. (2003), **Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica no mercado e na produção industrial análise e metodologia.** Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - V SBQEE 17 a 20 de agosto 2003.

MOREIRA, A. C. (2006) **Uso de Instrumentação Virtual Para a Análise da Qualidade da Energia Elétrica** – Dissertação, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas – SP.

NASCIMENTO, M. M., NETO, J. G. S., **Instrumentação Virtual**, (2007), Monografia apresentada à Universidade Federal da Bahia.

NEWMAN, R., (2009), **Os níveis de desempenho das medições segundo a norma IEC 61000-4-30** – Revista Eletricidade Moderna, nº 419, pag. 90-101, fevereiro de 2009.

OLESKOVICZ M., COURY D. V., ARRUDA, E. F., SOUZA, S., DELMONT, O., CARNEIRO, A., (2006) **Estudo Comparativo de Ferramentas Modernas de Análise Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica**, Revista Controle & Automação/vol.17 no.3/julho, agosto e setembro 2006.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Padrões de Desempenho da Rede Básica – Submódulo 2.2**, versão aprovada pelo Conselho Administrativo em outubro de 2000.

Power Quality Indices and Objectives Final Draft WG Report for Approval Cigrè C4.07/Cired.
- Jan. 2004.

Power Quality in European Electricity Supply Networks - 1st Edition, Union of the Electricity Industry – Eurelectric, Feb. 2004.

ROSS R. P. D., de ASSIS T. M. L., BRASIL L.(2001), **Investigação da Qualidade da Energia em Clientes Industriais da RGE**, IV SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia, Porto Alegre, Brasil, 2001

SANTOS, M. N.(2008). **Implementação de Software para Monitoração e Análise de Grandezas da Qualidade da Energia Elétrica em Processos Industriais**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

SERNI, P. J. A., (2006), **Qualidade da Energia** – São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, SEL 5749, 146 p.

SILVA R. R. (2004) **Sistema Remoto de Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica em Redes de Distribuição** Dissertação (Mestrado) submetida à UFPA

7 APÊNDICE 1 – DIAGRAMAS DE BLOCOS DO SMVQEE

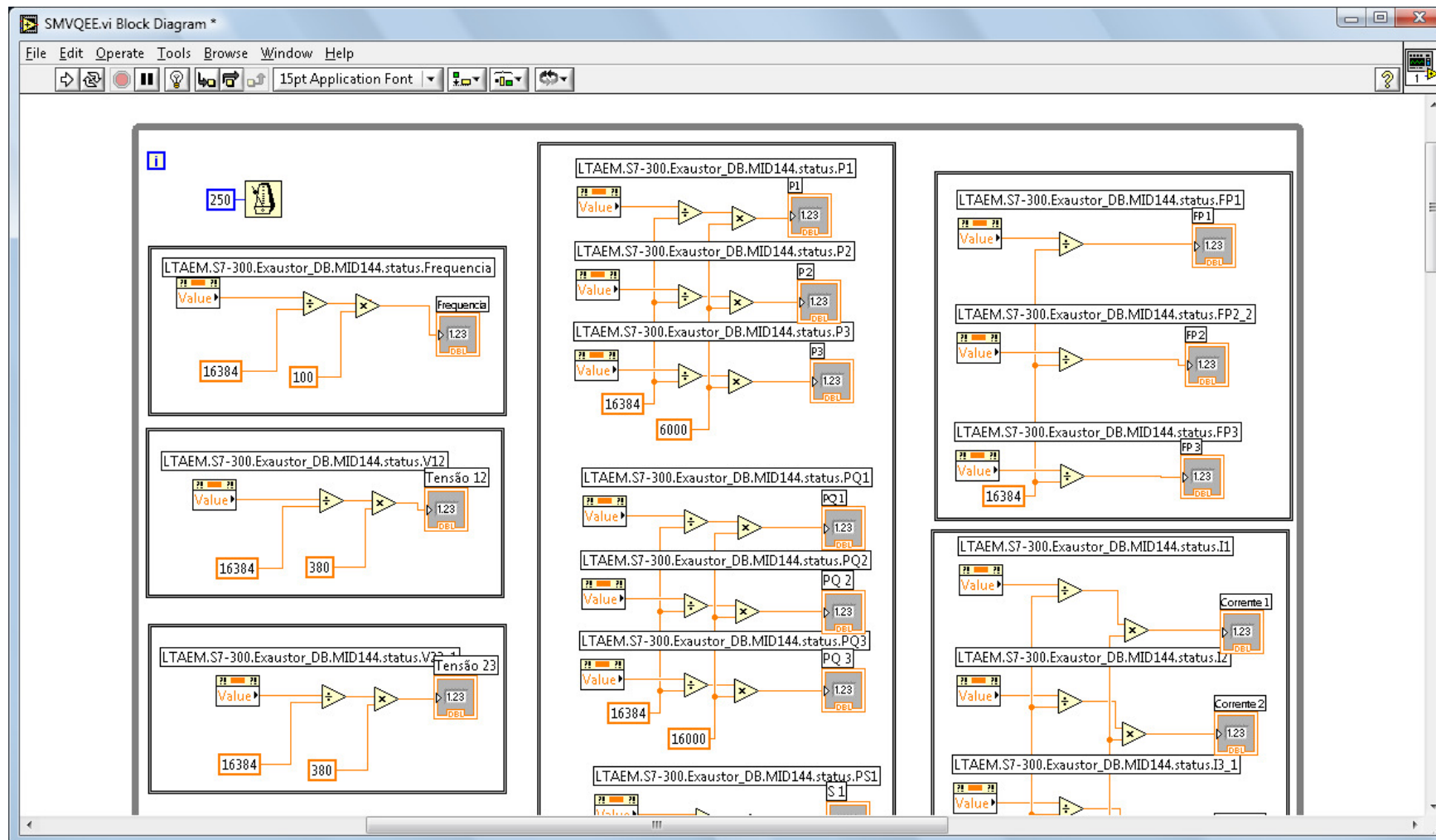


Diagrama de blocos da conversão dos dados vindos do CLP em unidades de engenharia.

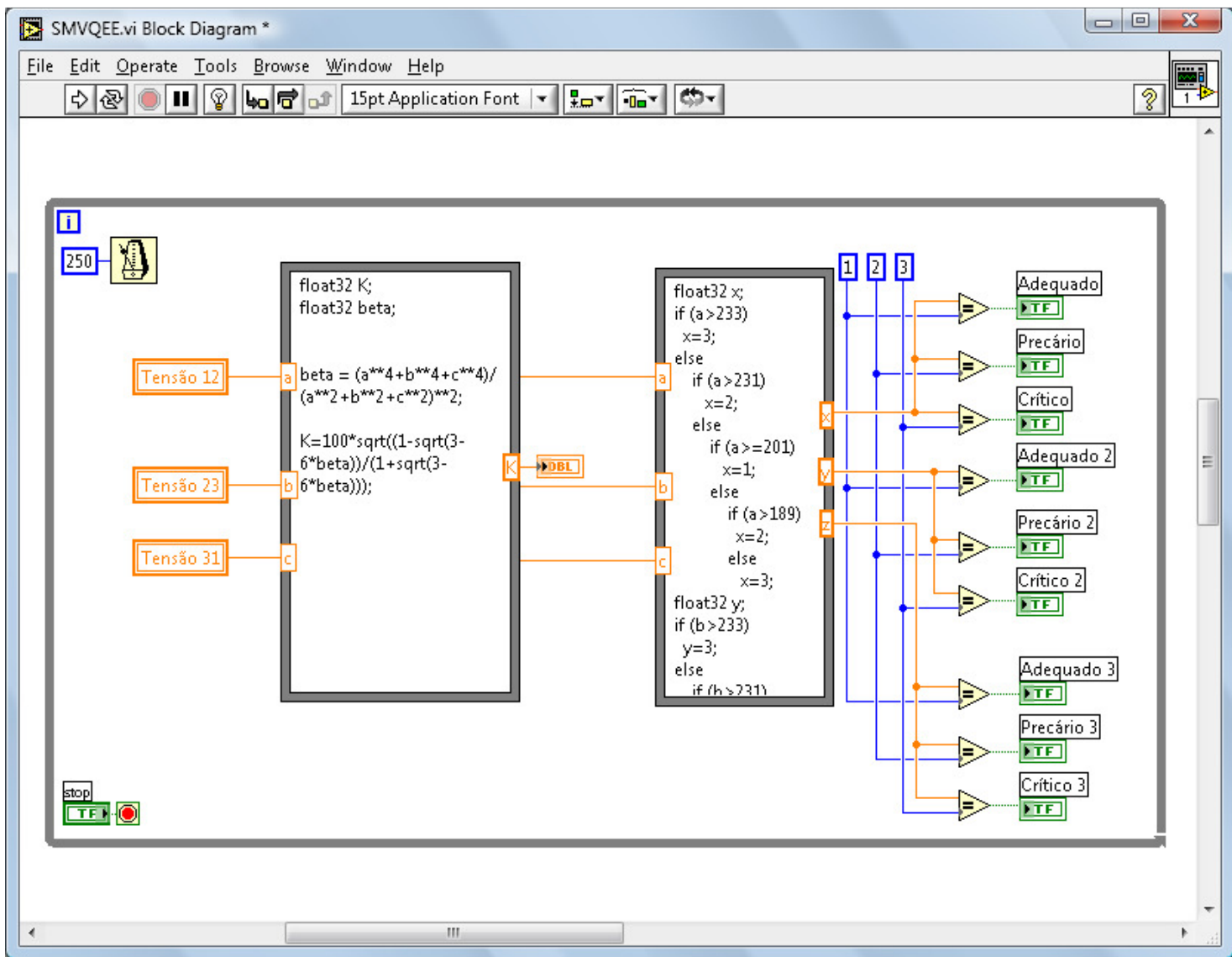


Diagrama de blocos para a classificação de níveis de tensão e desequilíbrio de tensão.

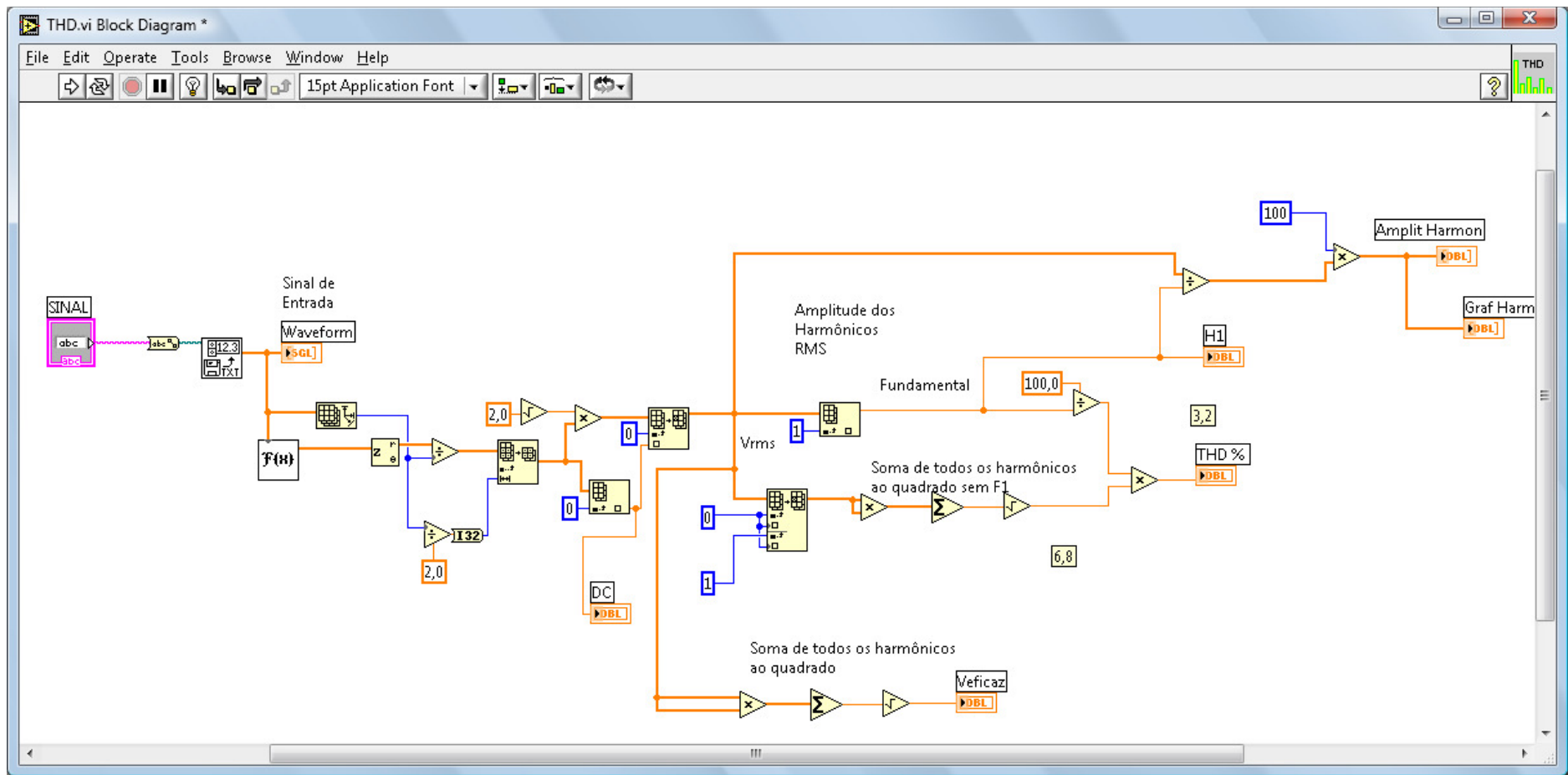


Diagrama de blocos para o cálculo de DHT.

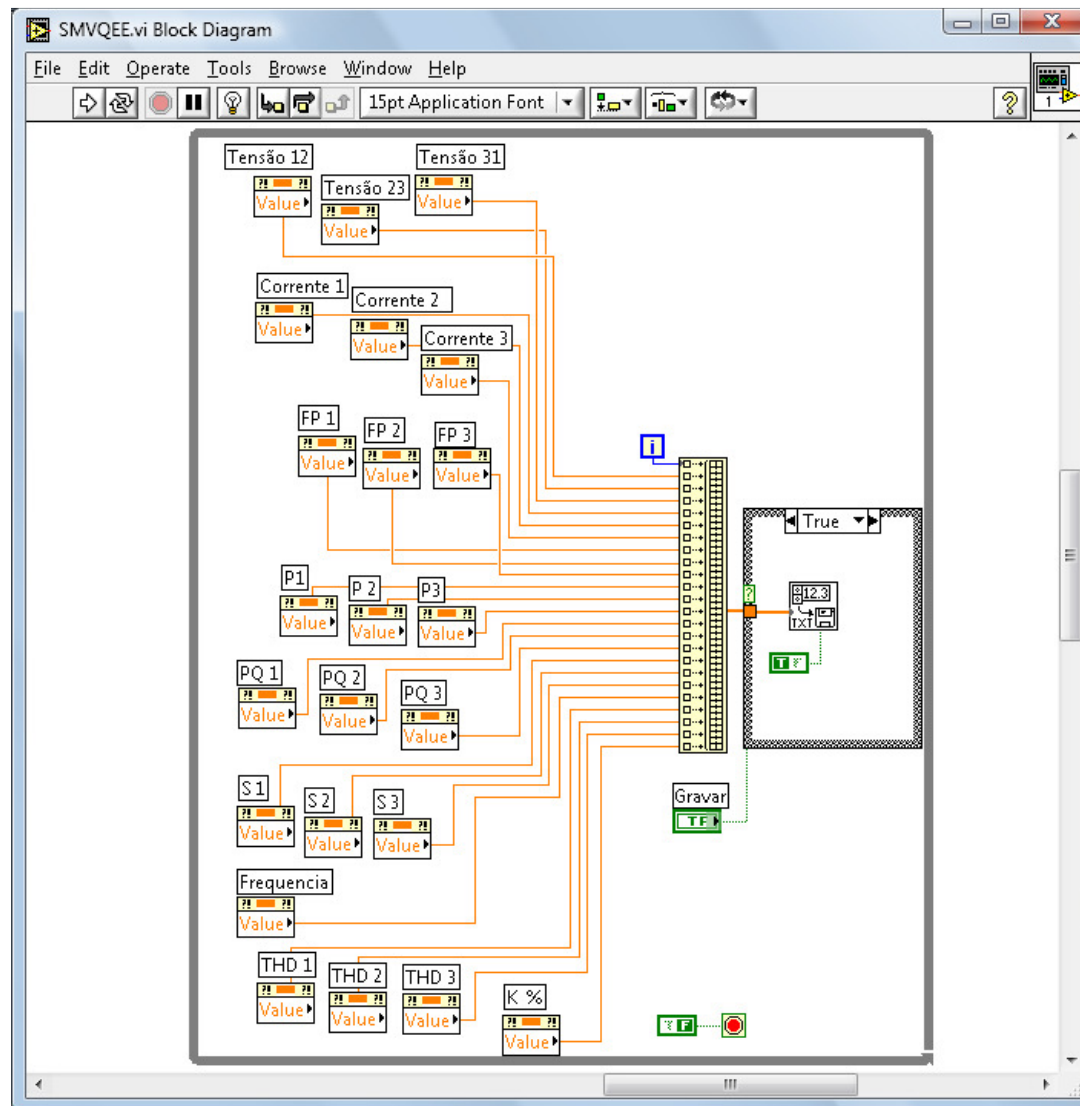


Diagrama de blocos do banco de dados.