



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes)
e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos
Trifásicos de Energia Elétrica Ativa”**

LUIZ CARLOS EVANGELISTA DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin

Co-orientador: Prof. Dr. José Carlos Rossi

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação

Ilha Solteira - SP
Novembro/2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

S586e Silva, Luiz Carlos Evangelista da.
Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica / Luiz Carlos Evangelista da Silva. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008.
202 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2008

Orientador: Carlos Alberto Canesin
Co-orientador: José Carlos Rossi
Bibliografia: p. 179-183

1. Medidor de watt-hora. 2. Harmônicos. 3. Sistemas equilibrados e desequilibrados.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa

AUTOR: LUIZ CARLOS EVANGELISTA DA SILVA

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONCALVES

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOÃO ONOFRE PEREIRA PINTO

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Data da realização: 17 de novembro de 2008.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN

*Dedico aos meus queridos pais Osvaldo e Irene dos quais muito me orgulho.
Ao amor, carinho, compreensão e incentivo da minha esposa Eloana e filhas Mariana e Marina.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

À minha família, esposa Eloana e filhas Mariana e Marina por estar sempre presente e me apoiando em todos os momentos dessa caminhada.

Em especial aos meus pais, Irene Costa da Silva e Osvaldo Evangelista da Silva que, mesmo diante das dificuldades zelaram pela minha educação e orientação, pelo amor incondicional a mim dedicado e o apoio nos momentos difíceis da minha formação.

Ao professor Carlos Alberto Canesin pela amizade, paciência e oportunidade oferecida, por ter confiado a mim o desenvolvimento desta pesquisa, pela orientação competente e segura.

Ao co-orientador, professor José Carlos Rossi, que esteve presente desde o início deste trabalho, pela orientação, pela disposição e compreensão nos momentos de dificuldades.

Aos professores Flávio Alessandro Serrão Gonçalves, Luiz Carlos Origa e Júlio Borges de Souza pela participação nas bancas de Estudos Especiais e Exame de Qualificação Geral, pelos comentários e observações pertinentes, fundamentais para o aperfeiçoamento do trabalho.

Ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), que permitiram minha iniciação nas disciplinas em regime de aluno especial e, que me impulsionaram e abriram caminho para conquista deste objetivo.

Aos meus amigos e colegas de trabalho da Elektro, os engenheiros Marcio Sciamana e Ernesto Alberto Mertens Jr. que foram de extrema importância nessa jornada, pelo companheirismo e pela oportunidade de compor o grupo de pesquisa e desenvolvimento que motivou este trabalho, sempre incentivando e me apoiando.

À Elektro - Eletricidade e Serviços S.A., na pessoa do Engenheiro Alex Silveira, pela oportunidade e incentivo.

Enfim, a minha gratidão a todos por possibilitarem esta experiência desafiadora, enriquecedora, gratificante e de extrema importância para o meu crescimento profissional e realização pessoal.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e viver com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve, e a vida é muito bela para ser insignificante”.

Charles Chaplin

RESUMO

Considerando-se as constantes mudanças que vêm ocorrendo no cenário de distribuição de energia elétrica, devido ao grande avanço da eletrônica de potência e cargas não lineares instaladas no sistema elétrico, fazem-se necessários estudos para diagnosticar como e quanto essas alterações interferem nos equipamentos instalados nas redes de distribuição.

A proposta desta dissertação é a análise da influência das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) nos erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletrônicos trifásicos. Estes equipamentos são normalmente projetados para atuarem com condições ideais de frequência constante, formas de onda de tensão e corrente senoidais e em sistemas equilibrados. Condições estas, que não refletem a realidade das redes de distribuição de energia elétrica.

Para a realização da análise dos equipamentos selecionados, submetidos aos efeitos das componentes harmônicas nas tensões e correntes, inclusive desequilíbrios de tensões, montou-se um arranjo padrão de medição, onde foram ensaiados os medidores submetidos a estes distúrbios, sob as mesmas condições laboratoriais, considerando-se três repetições para cada amostra selecionada.

As distorções harmônicas de tensões e correntes, aplicadas nos ensaios, foram obtidas por medições em consumidores em ramais de distribuição com características industrial, comercial, rural e residencial, e, os desequilíbrios de tensões admitidos para ensaios foram de 3% (limite atual) e de 5%, considerando-se determinados cenários de um sistema de distribuição real de uma concessionária de energia elétrica.

Os resultados são apresentados em forma de tabelas e figuras, e, as análises dos erros são apresentadas considerando-se um padrão de medição composto por analisador de energia com classe de exatidão de 0,1% para tensões e correntes, e, de 0,2% para potência ativa, nas faixas das frequências das componentes harmônicas analisadas (60Hz até 1kHz). Adicionalmente, foram desenvolvidos modelos para os erros de medição, baseados no comportamento experimental dos medidores ensaiados, submetidos às distorções harmônicas de tensões e correntes, e, desequilíbrios de tensões.

Finalmente, um aplicativo foi desenvolvido em plataforma amigável para tratamento e análise dos modelos desenvolvidos para os erros de medição dos medidores eletrônicos trifásicos, possibilitando a predição do erro de medição esperado para o equipamento, considerando-se determinados limites de distorções harmônicas e desequilíbrios.

Palavras-chave: Erros de Medição de Energia Elétrica; Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica; Modelo para Medidores de Energia Elétrica; Qualidade da Energia Elétrica; Metrologia; Instrumentação.

ABSTRACT

Considering the constant changes that have been occurring in the electric energy distribution scenery, due to the great improvements of the power electronics devices and non linear loads installed in the system, there are several studies developed in order to analyze and diagnosis the effects of these changes, and how much these loads affect the equipments installed on the distribution systems.

The proposal of this research is to analyze the influence the harmonic contents (voltage and current) and unbalances (voltage) in the systems on the measurement errors of the active electric energy using three-phase electronic meters. These equipments are usually designed to operate on ideal conditions with constant frequency, sinusoidal voltage and current waveforms, and balanced system. However, these conditions are not the reality of the electric energy distribution systems.

The procedures for the measurements, considering the selected samples of the electronics meters under influence of current and voltage harmonic contents, and voltage unbalances, were based on a measurement set-up established for testing, in the same conditions, all the selected samples considering its three repetitions.

The harmonic voltage and current contents, applied in the tests, were obtained by measurements in consumers with different load characteristics (industrial, commercial, rural and residential), and the admitted voltage unbalances were of 3% (actual limit imposed by standards) and 5%, considering real cases of an electric energy distribution system of an utilities.

The results are summarized in tables and figures, and the analyses of the errors are presented considering comparisons with a standard of measurement composed by an energy analyzer, with accuracy of 0.1% for voltages and currents, and, 0.2% for active power, considering the range of 60Hz until 1kHz.

In addition, models were developed for the measurement errors, based on the experimental behavior of the testing meters, submitted to the harmonic distortions of voltages and currents, and, unbalances of voltages.

Finally, a software was developed in friendly platform for treatment and analysis of the models developed for the errors of measurement of the three-phase electronic meters, making possible the prediction of the expected measurement errors for the equipment, being considered certain limits of harmonic distortions and unbalances.

Keywords: Errors of Measurement for Electric Energy; Electronic Meters of Electric Energy; Models for Electronic Meters of Electric Energy; Power Quality; Metrology; Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Fundamental e a resultante das diversas ordens harmônicas	44
Figura 2.2 - Visão geral de um modelo de medidor eletrônico trifásico	54
Figura 2.3 - Diagrama de conexão do medidor para 3 elementos, 4 fios	57
Figura 2.4 - Vista explodida do medidor eletrônico trifásico	58
Figura 2.5 - Diagrama de blocos do medidor eletrônico trifásico	59
Figura 2.6 - Geração de sinais no sistema de medição	61
Figura 2.7 - Diagrama de processamento de sinais	61
Figura 2.8 - Esquema básico do mostrador de cristal líquido (LCD)	63
Figura 2.9 - Quantidade percentual por tipo de medidores	82
Figura 2.10 - Consumo percentual do kWh médio por tipo de medidor	83

CAPÍTULO III

Figura 3.1 - Diagrama de blocos do arranjo laboratorial proposto para ensaios dos medidores eletrônicos trifásicos	88
Figura 3.2 - Exemplo de forma de onda de tensão trifásica reconstruída no plano discreto considerando taxa de amostragem de 50kHz e 833 pontos por período	90
Figura 3.3 - Exemplo de codificação binária das formas de onda de tensão trifásica reconstruída no plano discreto, considerando taxa de amostragem de 50kHz e 833 pontos por período	90
Figura 3.4 - Fotos do amplificador implementado	92
Figura 3.5 - Circuitos de sincronismo implementados, (a) FPGA Xilinx e (b) Sincronismo via detecção de passagem por zero	93
Figura 3.6 - Pontos de conexão do acoplador ótico utilizado na modificação	94

Figura 3.7 - Circuito esquemático da interface de conexão entre a porta digital do sistema de aquisição e o sinal proveniente dos medidores pelo acoplador ótico	95
Figura 3.8 - Formas de onda de tensão e corrente de entrada dos medidores eletrônicos	96
Figura 3.9 - Tela de configuração das informações do sistema de gerenciamento automático desenvolvido para os ensaios dos medidores eletrônicos	98
Figura 3.10 - Tela principal do sistema de gerenciamento automático desenvolvido para os ensaios dos medidores eletrônicos	99
Figura 3.11 - Fotos do “arranjo geral de ensaio” para os medidores de energia eletrônicos	99
Figura 3.12 - Detalhe do “arranjo geral de ensaio” para os medidores de energia eletrônicos	100
Figura 3.13 - Detalhe do “arranjo geral de ensaio” para os medidores de energia eletrônicos, utilização de foto-célula	100
Figura 3.14 - Detalhe de medidor com instalação de transdutor ótico para o “sinal de pulso” de kWh	100
Figura 3.15 - Formas de onda referentes ao Perfil V0-I0	102
Figura 3.16 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-TRI1	102
Figura 3.17 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI1	102
Figura 3.18 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI2	102
Figura 3.19 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-RUI2	102
Figura 3.20 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-RUI3	102
Figura 3.21 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-TRI1	103
Figura 3.22 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-INDI1	103
Figura 3.23 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-INDI2	103
Figura 3.24 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-RUI2	103
Figura 3.25 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-RUI3	103

Figura 3.26 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-TRI1	103
Figura 3.27 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-INDI1.....	104
Figura 3.28 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-INDI2	104
Figura 3.29 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-RUI2	104
Figura 3.30 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-RUI3	104
Figura 3.31 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-TRI1	104
Figura 3.32 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-INDI1	104
Figura 3.33 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-INDI2	105
Figura 3.34 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-RUI2	105
Figura 3.35 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-RUI3	105
Figura 3.36 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-TRI1	105
Figura 3.37 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-INDI1.....	105
Figura 3.38 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-INDI2	105
Figura 3.39 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-RUI2	106
Figura 3.40 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-RUI3	106
Figura 3.41 - Formas de onda referentes ao Perfil V0-I0 apresentando FDV 3%	107
Figura 3.42 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-TRI1 apresentando FDV 3%	107
Figura 3.43 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-TRI1 apresentando FDV 3%	107
Figura 3.44 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-TRI1 apresentando FDV 3%	107
Figura 3.45 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-TRI1 apresentando FDV 3%	108
Figura 3.46 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-TRI1 apresentando FDV 3%	108

Figura 3.47 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI1 apresentando FDV 3%	108
Figura 3.48 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-INDI1 apresentando FDV 3%	108
Figura 3.49 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI2 apresentando FDV 3%	109
Figura 3.50 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-INDI2 apresentando FDV 3%	109
Figura 3.51 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-RUI3 apresentando FDV 3%	109
Figura 3.52 - Formas de onda referentes ao Perfil V0-I0 apresentando FDV 5%	109
Figura 3.53 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-TRI1 apresentando FDV 5%	110
Figura 3.54 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-TRI1 apresentando FDV 5%	110
Figura 3.55 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-TRI1 apresentando FDV 5%	110
Figura 3.56 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-TRI1 apresentando FDV 5%	110
Figura 3.57 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-TRI1 apresentando FDV 5%	111
Figura 3.58 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI1 apresentando FDV 5%	111
Figura 3.59 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-INDI1 apresentando FDV 5%	111
Figura 3.60 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI2 apresentando FDV 5%	111
Figura 3.61 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-INDI2 apresentando FDV 5%	112

Figura 3.62 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-RUI3
apresentando FDV 5%112

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores I, sem desequilíbrio de tensão117

Figura 4.2 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores II, sem desequilíbrio de tensão118

Figura 4.3 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores III, sem desequilíbrio de tensão119

Figura 4.4 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores IV, sem desequilíbrio de tensão120

Figura 4.5 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores V, sem desequilíbrio de tensão.....121

Figura 4.6 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores I, considerando desequilíbrio de tensão de 3%122

Figura 4.7 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores II, considerando desequilíbrio de tensão de 3%.....123

Figura 4.8 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores III, considerando desequilíbrio de tensão de 3%124

Figura 4.9 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores IV, considerando desequilíbrio de tensão de 3%.....125

Figura 4.10 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores V, considerando desequilíbrio de tensão de 3%126

Figura 4.11 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família
de medidores I, considerando desequilíbrio de tensão de 5%127

Figura 4.12 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores II, considerando desequilíbrio de tensão de 5%128

Figura 4.13 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de
medidores III, considerando desequilíbrio de tensão de 5%129

Figura 4.14 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores IV, considerando desequilíbrio de tensão de 5%	130
Figura 4.15 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores V, considerando desequilíbrio de tensão de 5%	131
Figura 4.16 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores I, sem desequilíbrio de tensão	137
Figura 4.17 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores I, considerando desequilíbrio de tensão de 3%	138
Figura 4.18 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores I, considerando desequilíbrio de tensão de 5%	139
Figura 4.19 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores II, sem desequilíbrio de tensão	140
Figura 4.20 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores II, considerando desequilíbrio de tensão de 3%	141
Figura 4.21 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores II, considerando desequilíbrio de tensão de 5%	142
Figura 4.22 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores III, sem desequilíbrio de tensão	143
Figura 4.23 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores III, considerando desequilíbrio de tensão de 3%	144
Figura 4.24 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores III, considerando desequilíbrio de tensão de 5%	145
Figura 4.25 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores IV, sem desequilíbrio de tensão	146
Figura 4.26 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores IV, considerando desequilíbrio de tensão de 3%	147
Figura 4.27 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores IV, considerando desequilíbrio de tensão de 5%	148
Figura 4.28 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores V, sem desequilíbrio de tensão	149

Figura 4.29 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores V, considerando desequilíbrio de tensão de 3%	150
Figura 4.30 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores V, considerando desequilíbrio de tensão de 5%	151
Figura 4.31 - Imagem da tela inicial do aplicativo WhERAN v1.0	153
Figura 4.32 - Aplicativo de consultas de medidores na área de concessão da empresa de referência	155
Figura 4.33 - Exemplo de relatório criado pela ferramenta de consulta de medidores	156
Figura 4.34 - Menu Arquivo do Aplicativo Principal	157
Figura 4.35 - Aplicativo de Cadastro de Perfis Harmônicos (Tensões/Correntes)	157
Figura 4.36 - Assistente de Importação de Dados - adição de perfis extras através de arquivo no formato TOPAS	158
Figura 4.37 - Assistente de Importação de Dados - requerendo a indicação do cruzamento por zero que indicará o ângulo de deslocamento entre tensão e corrente	159
Figura 4.38 - Menu Aplicações do Aplicativo Principal	160
Figura 4.39 - Aplicativo de Análise de Erros de Medição	160
Figura 4.40 - Exemplo de relatório criado pela ferramenta de análise de erros de medição	161
Figura 4.41 - Aplicativo de Avaliação do Erro Porcentual na Família de Medidores	162
Figura 4.42 - Ferramenta auxiliar de construção de cenários para utilização no aplicativo de avaliação de Erro Porcentual na Família de Medidores	163
Figura 4.43 - Exemplo da Avaliação do Erro Percentual na Família de Medidores, considerando cenário composto por duas situações criadas pelo usuário	164

Figura 4.44 - Exemplo de relatório criado pela ferramenta de Avaliação do Erro Percentual na Família de Medidores	164
Figura 4.45 - Aplicativo de Análise de Erros de Medição no Parque de Medidores da empresa de referência, com resultado em kWh	165
Figura 4.46 - Exemplo de relatório criado pela ferramenta de Quantificação do Erro no Parque de Medidores	166
Figura 4.47 - Imagem da tela do documento de ajuda do aplicativo WhERAN v1.0	167
Figura 4.48 - Imagem da tela do assistente de instalação do WhERAN v1.0	168

ANEXO A

Figura A.1 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP0 (F6V-F6I)	201
Figura A.2 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP1 (F0V-F5I)	201
Figura A.3 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP2 (F6V-F8I)	201
Figura A.4 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP3 (F1V-F2I)	201
Figura A.5 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP4 (F2V-F1I)	202

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Principais fenômenos relacionados a Qualidade da Energia Elétrica	42
Tabela 2.2 - Limites da DHTV normatizados/recomendados para média tensão	47
Tabela 2.3 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)	48
Tabela 2.4 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)	48
Tabela 2.5 - Condições de referência para medidores eletrônicos de energia ativa	69
Tabela 2.6 - Tecnologias de medição nos países do Oeste Europeu	79

CAPÍTULO III

Tabela 3.1 - Resumo dos dados quantitativos totalizados da população de medidores e do seu consumo extraídos do BD da empresa de referência	86
Tabela 3.2 - Famílias de medidores eletrônicos trifásicos selecionadas para os ensaios laboratoriais	87
Tabela 3.3 - Arranjo dos conjuntos dos medidores para a realização dos ensaios experimentais	97
Tabela 3.4 - Formas de onda de tensões selecionadas	101
Tabela 3.5 - Formas de onda de correntes selecionadas	101
Tabela 3.6 - Pares tensão-corrente para análises com desequilíbrios (3% e 5%)	106

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores I, sem desequilíbrio de tensão	117
Tabela 4.2 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores II, sem desequilíbrio de tensão	118
Tabela 4.3 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores V, sem desequilíbrio de tensão	121
Tabela 4.4 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores I, com desequilíbrio de tensão de 3%	122
Tabela 4.5 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores V com desequilíbrio de tensão de 3%	126
Tabela 4.6 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores I com desequilíbrio de tensão de 5%	127
Tabela 4.7 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores V, com desequilíbrio de tensão de 5%	131
Tabela 4.8 - Resumo dos resultados obtidos para o intervalo IC das famílias de medidores eletrônicos	152

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Erros da família de medidores I, sistema equilibrado	184
Tabela A.2 - Erros da família de medidores II, sistema equilibrado	185
Tabela A.3 - Erros da família de medidores III, sistema equilibrado (2 amostras)	187
Tabela A.4 - Erros da família de medidores IV, sistema equilibrado	188
Tabela A.5 - Erros da família de medidores V, sistema equilibrado	189
Tabela A.6 - Erros da família de medidores I, sistema desequilibrado	191
Tabela A.7 - Erros da família de medidores II, sistema desequilibrado	193
Tabela A.8 - Erros da família de medidores III, sistema desequilibrado (2 amostras)	195

Tabela A.9 - Erros da família de medidores IV., sistema desequilibrado196

Tabela A.10 - Erros da família de medidores V, sistema desequilibrado198

ANEXO A

Tabela A.11 - Resumo dos valores dos índices das DHT das tensões e correntes consideradas nos pares de perfis utilizados para a realização das análises dos casos atípicos200

Tabela A.12 - Resumo dos resultados obtidos para os erros de medição nos medidores eletrônicos considerando a determinação do erro porcentual absoluto para os casos adicionais202

ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMR	<i>Automatic Meter Reading</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
AV	Auto-verificação
BT	Baixa Tensão
BROABAND	Banda Larga
CC	Corrente Contínua
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CIGRÉ	<i>Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension</i>
C&I	Comércio e Indústria
DA	Digital Analógico
DCSI	<i>Data and Control Signal Interface</i>
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DFS	<i>Direct Field Sensor</i>
DHI _i	Distorção Harmônica de Corrente Individual
DHTI, TDHI	Distorção Harmônica Total de Corrente
DTT	Distorção Harmônica Total
DHTV, TDHV	Distorção Harmônica Total de Tensão
DHV _i	Distorção Harmônica de Tensão Individual
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EDF	<i>Electricité de France</i>
EDP	Energias de Portugal
EN	Norma Européia
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i>
ERT	<i>Electronic Remote Transmitter</i>
FDV	Fator de Desequilíbrio de Tensão
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FP	Horário Fora de Ponta
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array Device</i>

FPS	Horário de Fora de Ponta em Período Seco
FPU	Horário Fora de Ponta em Período Úmido
GCOI	Grupo Coordenador para Operação Interligada
GCPS	Grupo Coordenador do Planejamento do Sistema Elétrico
G&T	Geração e Transmissão
HGA	<i>Harmonic Generator Analyzer</i> (Gerador e Analisador de Harmônicas)
HTML	<i>Hyper Text Markup Language</i> (Linguagem de Marcação de Hipertexto)
IC	Intervalo de Confiança
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MAE	Mercado Atacadista de Energia
MySQL	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados para Linguagem SQL
NBR	Norma Brasileira
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
NTCSE	<i>Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos</i>
ODBC	<i>Open Data Base Connectivity</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
P	Horário de Ponta
PEA	Posto de Ensaio Autorizado
PLC	<i>Power Line Communications</i>
PRODIST	Procedimento de Distribuição
PS	Horário de Ponta em Período Seco
PU	Horário de Ponta em Período Úmido
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RF	Rádio Freqüência
RTM	Regulamento Técnico Metrológico
SMD	<i>Superficial Monting Device</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Linguagem de Consulta Estruturada)

Acrônimos e Abreviaturas

TC	Transformador de Corrente
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
THS	Tarifa Horó-Sazonal
TP	Transformados de Potencial
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WhERAN	<i>Watt-hour Error Analyzer</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO GERAL	26
1.1 - Considerações Iniciais	26
1.2 - Motivação e Objetivos da Dissertação	30
1.3 - Estrutura do Trabalho	32
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 - Introdução	33
2.2 - Estado da Arte	34
2.3 - Qualidade da Energia Elétrica	40
2.3.1 - Harmônicas de Tensões e Correntes	43
2.3.2 - Desequilíbrio de Tensões	49
2.4 - Medidor Eletrônicos de Energia Elétrica	53
2.4.1 - Considerações Iniciais	53
2.4.2 - Descrição Geral	54
2.4.3 - Características Principais	55
2.4.4 - Diagrama de Conexão	57
2.4.5 - Construção do Medidor	57
2.4.6 - Princípio de Medição	58
2.4.6.1 - Diagrama de Blocos	59
2.4.6.2 - Geração do Sinal	60
2.4.6.3 - Processamento do Sinal	61
2.4.7 - Elementos de Controle e Mostrador (Display)	62
2.4.7.1 - Elementos de Controle	62
2.4.7.2 - Mostrador	63
2.4.7.3 - Esquema Básico	63

2.4.7.4 - Diodo de Teste	64
2.4.8 - Parametrização	64
2.5 - Regulamentação Metrológica e Aspectos Normativos	65
2.6 - Sistema de Tarifação de Energia Elétrica	70
2.6.1 - Apresentação	70
2.6.2 - Estrutura Tarifária	71
2.7 - Cenário Mundial da Medição de Energia Elétrica	76
2.7.1 - Cenários por Mercado	77
2.7.2 - Cenário da Empresa de Referência	82
2.8 - Considerações Finais	84

CAPITULO III - PROCEDIMENTOS, PROTOCOLOS PARA OS ENSAIOS E

ARRANJO LABORATORIAL	85
3.1 - Introdução	85
3.2 - Análise da População e Seleção de Medidores	85
3.3 - Arranjo de Medição para os Ensaios de Laboratório	88
3.3.1 - Geração dos Perfis de Corrente	89
3.3.2 - Geração dos Perfis de Tensão	89
3.3.3 - Sistemas de Aquisição de Dados e Determinação de Consumo	93
3.4 - Protocolo de Medição	97
3.5 - Seleção das Formas de Ondas	101
3.5.1 - Perfis de Tensão e Corrente para Sistema Equilibrado	101
3.5.2 - Perfis de Tensão e Corrente para Sistema Desequilibrado	106
3.6 - Considerações Finais	113

CAPÍTULO IV - RESULTADOS DOS ENSAIOS, ANÁLISES E DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO	115
4.1 - Introdução	115
4.2 - Análise de Resultados	115
4.2.1 - Resultados obtidos nos Ensaios Experimentais dos Medidores Eletrônicos Trifásicos, Sistemas Equilibrados	116
4.2.2 - Resultados obtidos nos Ensaios Experimentais dos Medidores Eletrônicos Trifásicos, Sistema Desequilibrado	122
4.3 - Análise Estatística dos Dados e Modelação dos Erros dos Medidores	132
4.3.1 - Modelo Matemático do Erro	134
4.3.2 - Resultados da Modelação dos Erros dos Medidores	136
4.3.3 - Resumos dos Resultados de Intervalos de Confiança (IC)	152
4.4 - Desenvolvimento do Aplicativo	153
4.4.1 - Cadastro/Análise do Parque de Medidores	154
4.4.2 - Cadastro/Análise de Perfis de Tensões e Correntes, e, Pares Tensão/Corrente, considerando-se Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensões	156
4.4.3 - Análise de Erros de Medição em Medidores de Energia Elétrica Ativa, selecionados para Análises Experimentais	159
4.4.4 - Análise de Erros de Medição em Famílias de Medidores de Energia Elétrica Ativa, considerando-se diversos Cenários de Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensões	161
4.4.5 - Análise de Erros de Medição no Parque de Medidores de Energia Elétrica Ativa, considerando-se diversas Famílias de Medidores e Cenários de Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensões	165
4.4.6 - Help - Ferramenta de Apoio ao Usuário	166
4.4.7 - Aplicativo de Instalação - Setup	167

4.5 - Considerações Finais	169
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES GERAIS	171
5.1 - Conclusões Gerais	171
5.2 - Propostas para Trabalhos Futuros	177
REFERÊNCIAS	179
APÊNDICE A	184
ANEXO A	200

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - Considerações Iniciais

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana. E mais do que sobreviver, o homem procurou sempre evoluir, descobrindo fontes e maneiras alternativas de adaptação ao ambiente em que vive e de atendimento às suas necessidades. Dessa forma, a exaustão, a escassez ou a inconveniência de um dado recurso energético tendem a ser compensadas pelo surgimento de outro(s). Em termos de suprimento energético, a eletricidade se tornou uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, passando a ser recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões.

No limiar do terceiro milênio, os avanços tecnológicos em geração, transmissão e uso final de energia elétrica permitem que ela chegue aos mais diversos lugares do planeta, transformando regiões desocupadas ou pouco desenvolvidas em pólos industriais e grandes centros urbanos [01].

A medição da energia elétrica é empregada, pela concessionária (entidade fornecedora), para possibilitar o faturamento adequado da quantidade de energia elétrica ativa consumida por cada unidade consumidora, dentro de uma determinada tarifa estabelecida. Portanto, o correto e perfeito desempenho dos medidores de energia elétrica é de interesse tanto da concessionária quanto do consumidor para que ambos não sejam prejudicados, mantendo-se assim, o clima de harmonia entre as partes interessadas [02].

Diante desse cenário, o Setor Elétrico Brasileiro passou nos últimos anos por uma série de transformações estruturais suportadas por leis e decretos.

Dentre os principais objetivos destas reformas, o novo modelo buscou garantir a segurança do suprimento de energia elétrica, promovendo a modicidade tarifária e a inserção social no setor através de programas de universalização de atendimento.

Coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, em 1996 foi implantado o Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico que determinava a necessidade de implementar a desverticalização das empresas de energia elétrica, ou seja,

segmentado-as em geração, transmissão e distribuição. Desta forma, motivando a competição nos segmentos de geração e comercialização, e mantendo sob regulação os setores de distribuição e transmissão de energia elétrica, considerados, até então, monopólios naturais sob regulação do Estado.

Foi também identificada a necessidade de criação de um órgão regulador (a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL), de um operador para o sistema elétrico nacional (Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS) e de um ambiente para a realização das transações de compra e venda de energia elétrica (o Mercado Atacadista de Energia Elétrica - MAE, atualmente, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE) [03].

Uma vez criada a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL ficaram estabelecidas suas atribuições de regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização de energia elétrica, em atendimento às reclamações de agentes e consumidores com equilíbrio entre as partes e em benefício da sociedade. Tendo ainda, dentre suas principais atribuições, a mediação de conflitos entre os agentes do setor elétrico e entre estes e os consumidores.

Apesar de todas essas mudanças, o país ainda carece de regulamentação que ampare de forma mais abrangente, consumidores e distribuidoras de energia elétrica, bem como, a indústria de equipamentos eletro-eletrônicos no que se refere aos índices de qualidade para o processamento da energia elétrica.

Encontra-se em andamento, sob a coordenação da ANEEL, a implantação do PRODIST - Procedimentos de Distribuição, divididos em módulos. É um conjunto de regras com vistas a subsidiar os agentes e consumidores do sistema elétrico nacional na identificação e classificação de suas necessidades para o acesso aos sistemas de distribuição. Disciplinando formas, condições, responsabilidades e penalidades relativas à conexão, planejamento da expansão, operação e medição da energia elétrica, sistematizando a troca de informações entre as partes, além de estabelecer critérios e indicadores de qualidade.

Especificamente, o módulo cinco faz referência aos Sistemas de Medição, entre seus objetivos, estabelece os requisitos mínimos para medição das grandezas elétricas do sistema de distribuição aplicáveis ao faturamento, à qualidade da energia elétrica, ao planejamento da expansão e à operação do sistema de distribuição.

Já o módulo oito estabelece os procedimentos referentes à Qualidade da Energia Elétrica, abordando a qualidade do produto e do serviço prestado.

Apesar de não ser abrangente, a preocupação de regulamentar o setor energético quanto aos aspectos da medição de faturamento e qualidade da energia elétrica se faz necessária, tendo em vista a proliferação de cargas não-lineares no sistema elétrico, devido às técnicas de controle eletrônico de cargas e processos.

Após o racionamento de energia ocorrido no país no período de junho de 2001 a fevereiro 2002, essa tendência foi acentuada através do incentivo ao uso de “cargas econômicas” (lâmpadas fluorescentes compactas, conversores de frequência, etc.). Pressupõe-se que tais cargas possam aumentar significativamente os níveis de correntes harmônicas devido às técnicas de chaveamento utilizadas nestes dispositivos, assim, ocorre uma expectativa de que os distúrbios gerados por essas cargas acentuem os problemas da propagação das distorções de formas de onda de correntes para as tensões da rede.

Ocorre que, estes equipamentos responsáveis por tais distorções harmônicas no sistema elétrico são extremamente sensíveis a estes próprios distúrbios, podendo ocorrer interferências significativas nos seus desempenhos e/ou funcionamento.

Conceitualmente, qualidade da energia é a capacidade de fornecimento de tensão, corrente e frequência, dentro de determinados padrões, que não resultem em defeito, ou falha operacional de dispositivos e sistemas, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária.

Diversas pesquisas foram e continuam sendo desenvolvidas com o propósito de investigar as principais causas dos distúrbios na qualidade da energia, bem como, suas conseqüências e técnicas para minimizar seus impactos na rede elétrica, através da instalação de elementos de mitigação.

Outro fato que deve ser levado em consideração é o das responsabilidades pelas distorções harmônicas no sistema elétrico. Quando o cliente é afetado pelo desligamento ou mau funcionamento de seus equipamentos que impactam diretamente o seu processo produtivo, supostamente por algum tipo de distúrbio, na maioria das ocorrências, a responsabilidade é imputada pelo cliente à concessionária. Investigadas as causas pela concessionária, por equipamentos adequados e certificados por órgãos metrológicos nacionais e/ou internacionais, e verificado que os indicadores de qualidade da energia fornecida se apresentam dentro dos limites aceitáveis, a concessionária por sua vez, passa a responsabilizar

o cliente pela ocorrência. Apesar das regras estabelecidas, isto gera desgastes no relacionamento entre a concessionária e o cliente.

A partir dessas considerações, surge a necessidade de investigar como os diversos equipamentos instalados na rede elétrica se comportam na presença desses distúrbios.

O equipamento objeto de avaliação, neste trabalho, frente aos distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica, será o medidor eletrônico de energia ativa trifásico.

Os medidores de energia elétrica de energia ativa do tipo indução, conhecidos também como medidores eletromecânicos ou convencionais ainda são predominantes no parque de equipamentos instalados no Brasil e no mundo.

Diversos trabalhos experimentais foram realizados com o objetivo de verificar os erros de registro destes medidores tipo indução, propondo-se modelos teóricos tanto no domínio do tempo quanto da frequência, para justificar tais erros de medição uma vez que, no projeto original são concebidos para operarem com formas de ondas de tensões e correntes puramente senoidais.

É conclusão comum, das análises teóricas e experimentais, que pequenas distorções harmônicas não acarretam nestes equipamentos erros significativos. Entretanto, elevadas distorções harmônicas de tensões e correntes podem resultar em erros consideráveis [04].

Por outro lado, considerando-se a tendência atual de substituição dos medidores de energia ativa tipo indução por medidores de energia ativa e/ou reativa eletrônicos (digitais), tem-se que avaliar também seus erros de registro, os quais dependem fortemente de seus algoritmos de cálculo para as energias ativa e reativa, dos sistemas de aquisição, condicionamento e tratamento de sinais (tensões e correntes).

Os erros de medição tanto nos dispositivos eletrônicos quanto nos dispositivos do tipo indução, podem levar à considerável impacto econômico e perdas de faturamento, caso elevadas taxas de distorção harmônica estejam presentes nas tensões e/ou correntes, sendo, portanto, necessária a análise de seu funcionamento em ampla faixa de conteúdos harmônicos de correntes e tensões.

Em alguns dispositivos de medição de energia denominados eletrônicos (misto), o princípio de funcionamento baseia-se em medidas analógicas e integração

digital, ou seja, as tensões e correntes instantâneas são multiplicadas de forma analógica e a energia é obtida através de integração por processos digitais

Nos dispositivos de medição puramente digitais de energia ativa e/ou reativa, têm-se as aquisições dos sinais instantâneos de tensões e correntes, os quais são calculados integralmente de forma digital em um microprocessador.

Portanto, se faz necessária uma consistente avaliação laboratorial nos medidores eletrônicos de energia ativa, especificamente neste trabalho em sistemas trifásicos, analisando-se as possíveis implicações destes dispositivos quando os mesmos operam em sistemas com distorções harmônicas de tensões e correntes, assim como, frente aos desequilíbrios das tensões.

1.2 - Motivação e Objetivos da Dissertação

As concessionárias de energia elétrica têm seu resultado líquido operacional baseado na compra e venda de energia. O caixa registrador desse montante de energia envolvido nesta transação comercial é o equipamento específico de medição. Portanto, este equipamento deve atender a todas as especificações técnicas estabelecidas nos regulamentos metrológicos vigentes, recém oficializados pelo INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.

O Regulamento Técnico Metrológico (RTM) aprovado para medidor eletrônico de energia ativa e/ou reativa parte do pressuposto que seu projeto foi concebido para operar apenas em condições de tensões e correntes senoidais. Portanto, os medidores eletrônicos de energia ativa e/ou reativa são ensaiados e calibrados para registrarem, dentro da faixa preestabelecida da sua classe de exatidão, não levando em consideração possíveis distorções harmônicas de tensão e corrente, nem se quer desequilíbrios de tensões.

Sendo assim, com base em dados reais de distorções de tensões e correntes, coletados nos alimentadores em diversos segmentos (industrial, comercial, residencial e rural) de uma concessionária de distribuição de energia elétrica, o fator motivador desta dissertação é o de reproduzir tais condições em laboratório e identificar o comportamento de amostras de medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa frente à estes cenários com distorções harmônicas e desequilíbrios de tensões, avaliando-se seus erros de registro em relação a um padrão de medição de energia elétrica.

Deve-se lembrar que, um dos diferenciais do trabalho é que as distorções harmônicas de tensões e correntes são distintas e com diferentes características, resultantes dos cenários reais dos clientes com diferentes características de carga.

Outro fator a ser considerado é a representatividade das amostras selecionadas frente ao montante de energia registrada, ou seja, esses medidores representam quantitativamente, aproximadamente 0,5% (meio por cento) do parque instalado. No entanto, são responsáveis pelo registro de cerca de 50% (cinquenta por cento) do consumo de energia elétrica da concessionária de referência.

Observa-se que, foram considerados os modelos trifásicos eletrônicos mais significativos para o cálculo da energia total consumida, para uma média mensal de um período de 14 (quatorze) meses dos dados registrados pela distribuidora de energia elétrica.

Diante do exposto, os objetivos do trabalho são os seguintes:

- Desenvolver a análise e realizar estudos experimentais em medidores eletrônicos de energia ativa para sistemas trifásicos, com relação à operação e possíveis erros de medição, quando submetidos a formas de ondas não senoidais de tensões e correntes, considerando-se ainda desequilíbrios de tensões;
 - Avaliar erros de medição para os equipamentos selecionados para ensaios, através de análise estatística das médias dos erros verificados;
 - Elaborar curvas percentuais de erros médios de medição em relação ao conteúdo e componentes harmônicas, assim como desequilíbrios, proporcionando-se condições para uma avaliação das possíveis perdas médias de faturamento em medidores eletrônicos de energia ativa para sistemas trifásicos;
 - Implementar um “software” em linguagem Delphi que apresente a curvas de erros médios percentuais de registro (medição), para medidores eletrônicos de energia ativa trifásicos, quando submetidos a formas de onda não senoidais e desequilíbrios de tensões, possibilitando a análise das perdas médias financeiras de faturamento, devido a erros médios de medição.
-

1.3 - Estrutura do Trabalho

Com a finalidade de atingir as metas propostas, este trabalho apresenta-se organizado em capítulos, da seguinte maneira:

Capítulo I - Apresenta uma introdução do trabalho, onde se destaca a importância da energia elétrica, aspectos da medição e qualidade da energia elétrica, a reestruturação recente do Setor Elétrico Brasileiro, as referências no tema do trabalho, a motivação e os objetivos da pesquisa e ainda, o diferencial em relação às referências bibliográficas analisadas.

Capítulo II - Revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes e importantes para o desenvolvimento do trabalho, tratando da qualidade da energia elétrica e destacando-se harmônicos e desequilíbrios. Apresenta-se um breve cenário da medição eletrônica mundial, nacional e da concessionária de referência, bem como, a descrição das características construtivas do medidor eletrônico de energia elétrica, aspectos metrológicos e normativos, relacionados à medição de energia elétrica para faturamento, medição de energia elétrica e condições tarifárias especiais.

Capítulo III - Neste capítulo são apresentados os medidores de energia a serem ensaiados, as formas de onda que serão consideradas no sistema, como foram selecionados os perfis de tensões e correntes. Finalmente, o sistema de avaliação experimental proposto é apresentado, contemplando os procedimentos para os ensaios e as principais características dos equipamentos utilizados, incluindo-se o sistema de aquisição de dados.

Capítulo IV - Neste capítulo são apresentados os resultados laboratoriais obtidos e as análises dos mesmos, incluindo as curvas percentuais de erros médios de medição em relação aos conteúdos e componentes harmônicas, assim como desequilíbrios e a modelação de erros de medição das amostras de medidores avaliados e, finalmente, o desenvolvimento do aplicativo em linguagem Delphi que apresenta a curvas de erros médios percentuais de registro (medição), em ambiente amigável ao usuário.

Capítulo V - Nessa etapa final são apresentadas as conclusões referentes a dissertação e as propostas para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

A medição de energia elétrica é o processo de apuração das quantidades de produção e consumo de energia elétrica. É empregada, na prática, para facilitar ao agente fornecedor o faturamento adequado da quantidade de energia consumida pelo usuário, dentro de uma tarifa preestabelecida. Historicamente, o medidor empregado em larga escala ainda é o eletromecânico, tipo indução, por sua simplicidade, robustez, exatidão e desempenho consolidado ao longo dos anos.

Com os avanços tecnológicos, com a evolução dos materiais, necessidades de minimizar custos do produto e impactos ambientais, entre outras, é crescente a aplicação do medidor eletrônico pelas concessionárias nacionais e do mundo inteiro, para o registro da energia elétrica.

A concessionária, entidade responsável pela distribuição da energia elétrica aos seus clientes, tem grande interesse no perfeito e correto desempenho destes medidores, pois neles repousam as bases econômicas da empresa. Os litígios entre clientes e o agente fornecedor podem ser reduzidos se os cuidados necessários forem dispensados à correta medição da energia elétrica [05].

Nesse capítulo pretende-se conceituar e avaliar os fenômenos relevantes à compreensão do desenvolvimento das análises experimentais de medidores eletrônicos de energia elétrica, com o objetivo de avaliar seus erros quando sujeitos à distorções harmônicas de correntes e tensões e desequilíbrios de tensões. Para tanto, se faz necessário que seja realizada uma revisão bibliográfica dos principais fenômenos que influenciam na qualidade da energia elétrica e que refletem nos registros de erros percentuais dos medidores, destacando-se as distorções harmônicas e desequilíbrios de tensões.

Para que se possa avaliar a influência dos harmônicos e desequilíbrios na medição de energia elétrica é indispensável que seja apresentado o princípio de funcionamento, as características técnicas e construtivas do equipamento responsável por essa medição. Desta forma, neste trabalho, analisam-se medidores eletrônicos para uso em sistemas elétricos trifásicos. Serão abordados ainda

aspectos metrológicos e normativos do medidor, medição de faturamento de energia elétrica e estruturas tarifárias especiais.

Adicionalmente, de forma sucinta, apresenta-se o cenário atual e evolutivo da medição eletrônica no mundo, no Brasil e numa empresa de referência, admitida para estudos neste trabalho.

2.2 - Estado da Arte

É de conhecimento geral que a proliferação de cargas não-lineares no sistema elétrico é crescente, devido às técnicas de controle eletrônico de cargas e processos.

Com a modernização dos processos industriais e introdução de diversos processadores eletrônicos de energia elétrica (fontes chaveadas, controladores de velocidade de máquinas elétricas, equipamentos de solda e demais conversores estáticos de potência), apresentando-se como cargas não-lineares, em conjunto com uma grande quantidade de dispositivos presentes nos setores comercial e residencial (computadores pessoais, dispositivos de entretenimento, reatores eletrônicos de reduzido fator de potência para iluminação, incluindo-se as lâmpadas fluorescentes compactas, dentre outros), tem-se observado um aumento significativo no nível de distorção harmônica de correntes e tensões nas redes de distribuição de energia elétrica.

Destaca-se que o setor elétrico é carente dessas informações neste âmbito. Portanto, uma das contribuições deste trabalho é possibilitar à empresa de distribuição de referência o conhecimento da situação dos medidores de energia em sua área de concessão, bem como, a aplicação de eventuais ações corretivas. Trata-se de uma informação inédita que nunca havia sido realizada com esta abrangência em nenhuma concessionária do setor elétrico brasileiro.

As cargas citadas anteriormente apresentam elevado conteúdo harmônico nas correntes drenadas da rede de corrente alternada, resultando em: distorção na tensão de alimentação, redução do fator de potência, elevado nível de terceiro harmônico na corrente de neutro, deslocamento excessivo de correntes e tensões, interferências eletromagnéticas, etc.

Com o baixo fator de potência de entrada ocorre uma inerente redução na potência útil e aumento da circulação de reativos pelo sistema de energia que, além de provocar um aumento das perdas nos condutores e interferências em demais

cargas presentes nas vizinhanças, reduz a eficiência, os índices de qualidade e aumenta os custos dos sistemas de distribuição.

Estas correntes com elevada distorção harmônica, provocando distorções harmônicas também nas tensões, afetam o desempenho de todos os dispositivos presentes nos sistemas de distribuição, tais como: transformadores, compensadores de reativos (por ex: banco de capacitores), dispositivos de proteção e manobra (disjuntores, TC's, TP's, relés e contadores) e inclusive os sistemas de medição de energia elétrica ativa (geralmente empregando medidores watt-hora do tipo indução e eletrônicos), resultando em problemas operacionais, redução da vida útil de equipamentos e perdas de faturamento [06-20].

Portanto, neste cenário de progressivo aumento das cargas não lineares, é imperativo que sejam identificadas as origens das componentes harmônicas, as formas de propagação e seus efeitos sobre os componentes dos sistemas elétricos, principalmente nos medidores de energia, os quais afetam diretamente o desempenho financeiro das empresas de distribuição de energia elétrica.

Os medidores watt-hora do tipo indução ainda são os dispositivos convencionais mais utilizados para a medição de energia ativa, entretanto, são aplicados para operação com formas de onda de tensões e correntes puramente senoidais. Diversos trabalhos têm sido realizados com o intuito de se verificar os erros de registro destes medidores, propondo-se ainda modelos teóricos tanto no domínio do tempo quanto da frequência, para justificar tais erros de medição. Entretanto, todos estes trabalhos de modelagem também apresentam "erros", devido grandes dificuldades de se representar todos os parâmetros que afetam o desempenho destes medidores, frente à presença de correntes e/ou tensões não senoidais [14-20]. Portanto, uma consistente e cuidadosa análise laboratorial é certamente uma proposta correta para se eliminar tais "erros", normalmente presentes nas análises teóricas.

É conclusão comum, das análises teóricas e experimentais, que pequenas distorções harmônicas não acarretam nestes dispositivos erros significativos. Entretanto, elevadas distorções harmônicas (tensões e correntes) podem levar a erros (negativos e positivos) que extrapolam a classe de exatidão destes equipamentos, justificando-se a necessidade de uma análise experimental cuidadosa do desempenho dos dispositivos convencionais, como também, dos

medidores watt-hora digitais (eletrônicos) em função das reais perdas de faturamento.

Adicionalmente, não somente as taxas de distorção harmônica das correntes poderão provocar erros de medição da energia ativa, mas também os desequilíbrios de tensão podem afetar significativamente o desempenho destes medidores, devendo-se avaliar em conjunto as presenças de correntes e tensões com distorções harmônicas e os desequilíbrios existentes nas tensões [21,22].

Em [21], os autores apresentam estudos sobre a precisão de medidores kWh tipo indução quando submetidos às condições de tensões e correntes harmônicas desbalanceadas, próximas às reais encontradas nos sistemas elétricos de potência. Tais condições envolvem diferenças nas amplitudes das correntes e tensões e as diferenças nos níveis de distorção harmônica total destas grandezas em cada fase. Testes foram realizados sobre uma amostra selecionada de nove medidores de kWh trifásicos e três monofásicos. Alguns resultados mostraram que sob um particular conjunto de formas de onda desbalanceadas, com distorções harmônicas de correntes maiores que 80% e de tensões maiores que 2%, os erros percentuais apresentados por estes medidores variaram de -10,09% até +0,52%.

Considerando-se a tendência atual de substituição dos medidores de energia ativa tipo indução, ou seja, a incorporação de medidores de energia ativa e/ou reativa eletrônicos, principalmente para grandes consumidores (cargas fortemente não lineares e intermitentes), tem-se que avaliar também seus erros de registro, os quais dependem fortemente de seus algoritmos de cálculo para as energias ativa e reativa, taxa de amostragem e número de bits de seus sistemas de aquisição de tensões e correntes [21-30].

Os sistemas de medição de energia elétrica baseados em dispositivos semicondutores (eletrônico-digitais), na verdade são equipamentos fundamentados em sistemas de aquisição que dependem das características dos transdutores de tensões e correntes, dos dispositivos de condicionamento de sinais, dos dispositivos de conversão analógico-digital dos sinais a serem processados e dos dispositivos processadores (microprocessador ou *DSP - Digital Signal Processor*). Como citado, além da influência de todos estes dispositivos, tem-se também a influência do algoritmo de cálculo implementado para a medição de interesse. Sendo a medição de interesse para este trabalho a energia elétrica ativa, a precisão do algoritmo

dependerá do sistema de amostragem dos sinais e da precisão da integração dos valores instantâneos de energia analisados [23,24, 27-30].

Como já citado no capítulo anterior, os erros de registro tanto nos dispositivos digitais quanto nos dispositivos tipo indução, podem levar à substancial impacto econômico e perdas de faturamento, caso elevadas taxas de distorção harmônica estejam presentes nas tensões e/ou correntes, portanto sendo necessária a análise em ampla faixa de conteúdos harmônicos de correntes e tensões.

Observa-se ainda que, alguns dispositivos de medição de energia denominados eletrônicos, na verdade são constituídos através de medidas analógicas e integração digital, ou seja, as tensões e correntes instantâneas são multiplicadas de forma analógica e a energia é obtida através de integração por processos digitais [24]. Desta forma, tem-se que avaliar, dentro do universo de equipamentos da empresa, todas as características dos processos de medição destes dispositivos.

Em [24], os autores procuram demonstrar e discutir as amplitudes absolutas e relativas dos erros de leitura dos medidores de energia elétrica ativa, quando os mesmos operam em sistemas com presença de distorções harmônicas nas correntes e tensões de suprimento. Um sistema, para determinar a amplitude do erro causado pelas ordens harmônicas individuais na medição é utilizado para gerar curvas nas quais o erro é introduzido pelas diferentes frequências harmônicas. O enfoque principal deste estudo está nos efeitos causados pelas distorções harmônicas da corrente e da tensão de suprimento, isto é, nos registros dos erros de leitura de energia ativa de registradores com grande capacidade de medição, ou seja, de consumidores de elevada demanda.

Neste trabalho, os autores relatam erros de leitura registrados superiores a 10% (negativos), para medidores de energia ativa monofásicos e trifásicos, quando submetidos a condições de distorções harmônicas e desbalanceamentos. Já para medidores de energia reativa, os erros relativos verificados ficaram entre - 41% até + 68%, quando formas de ondas de tensões e correntes reais (encontradas usualmente nos sistemas elétricos de potência) foram aplicadas. Os autores realizaram avaliações para três tipos de medidores de energia ativa utilizados comumente na Europa, sendo: medidor eletromecânico analógico, tipo indução; medidor digital (eletrônico) e medidor misto (analógico-digital).

Nesta análise, verificou-se que os medidores eletromecânicos de energia ativa estão sujeitos a dois tipos de erros. Primeiro, em condições de baixa intensidade de fluxo, resultam grandes erros negativos de registro, e, segundo, registros errôneos de uma energia fictícia, não existente, quando a tensão e a corrente estão em fase. Foram ainda verificados que os medidores digitais estão menos sujeitos a erros de registro. Entretanto, observa-se que, os sinais aplicados foram bastante limitados para o experimento, restringindo os resultados deste trabalho, uma vez que as situações nas quais os medidores foram submetidos não são as reais de campo. Outro aspecto não analisado foi a influência, na estrutura física dos medidores analógicos e digitais, quando os mesmos são submetidos a condições não idealizadas de funcionamento. Os medidores digitais principalmente, com componentes a estado sólido (semicondutores), podem apresentar mudança de comportamento quando operam em situações adversas (por exemplo, temperaturas elevadas, etc.).

Além disso, as novas facilidades apresentadas pelos medidores eletrônicos de energia (medição de outras grandezas e funções, melhor exatidão, estabilidade metrológica, conectividade, etc.), baseados na tecnologia a estado sólido, incentivam o uso cada vez mais freqüente destes dispositivos na medição de energia elétrica. Os dispositivos eletromecânicos apresentam características bastante conhecidas e permitem a medição apenas da energia consumida. Entretanto, as novas regras para remuneração das fontes energéticas fomentam um novo campo competitivo no mercado de medição da energia elétrica. Desta forma, informações detalhadas sobre o consumo de energia de cada cliente são cada vez mais necessárias para a composição tarifária. Além disso, medidores eletrônicos apresentam grande flexibilidade para implementação de novos mecanismos tarifários, bem com a adequação de sua capacidade nominal.

Adicionalmente, sendo sua saída digital, facilita a conexão com os dispositivos de comunicação e processamento de sinais. A comunicação estabelecida entre o medidor eletrônico e a base de dados permite uma leitura remota, conseqüentemente, reduzindo custos. Novas configurações de cargas, tarifas antecipadas e capitalização multi-tarifária são também passíveis de serem implementadas. As concessionárias poderão ainda ser beneficiadas com um maior controle sobre sua capacidade de fornecer energia de forma mais eficiente para a rede. O fator de potência pode ser calculado nestes equipamentos e disponibilizado

automaticamente, permitindo às companhias a manutenção de um nível de energia adequado para as redes elétricas. Simultaneamente, as interrupções de energia podem ser detectadas mais rapidamente, possibilitando uma atualização em tempo real dos índices DEC e FEC. Portanto, sob tais pontos de vista, os medidores eletrônicos são vistos como a melhor opção diante destes novos desafios.

Portanto, considerando-se as referências bibliográficas pesquisadas, ficou evidente que a melhor metodologia para análise de erros dos medidores eletrônicos de energia ativa é a que envolve a experimentação destes equipamentos em condições próximas das instalações nos sistemas de distribuição.

Neste contexto, este trabalho analisará os erros percentuais de registro de medidores eletrônicos de energia ativa para sistemas trifásicos, selecionados de acordo com análise do parque de medidores da empresa de referência e dados de registros das unidades consumidoras, através de avaliações experimentais comparativas com um medidor padrão adotado. Em seguida, os estudos serão direcionados para a avaliação dos erros nestes medidores na presença de harmônicas e desequilíbrios. No arranjo experimental para ensaios serão utilizados fonte/gerador de harmônicos onde os medidores eletrônicos serão submetidos a formas de ondas arbitrárias, analisador digital de energia estabelecido como padrão e sistema de aquisição que permita o cálculo da energia ativa, através das tensões e correntes instantâneas. As distorções harmônicas de tensões e correntes serão aplicadas nos medidores sob ensaio e no padrão de energia, de formas distintas e controladas independentemente, com quaisquer ângulos de defasagem.

Assim, será permitida a análise destes medidores com quaisquer desequilíbrios de tensões de interesse, considerando-se uma ampla variedade de cenários de distorções harmônicas (tensões e correntes), obtidos através da aquisição de sinais (tensões e correntes) em consumidores com perfis tipicamente residenciais, comerciais, rurais e industriais, em um ambiente real de sistema de distribuição de energia elétrica, admitido como exemplo para a pesquisa.

2.3 - Qualidade da Energia Elétrica

A qualidade da energia elétrica se tornou, atualmente, fator preponderante para a competitividade de alguns setores industriais e de prestação de serviços. O setor da energia elétrica, nos últimos anos, passa por profundas mudanças devido a alteração do perfil das cargas consumidoras, dos hábitos de consumo dos usuários frente ao uso da energia elétrica, a desregulamentação do setor elétrico em nível mundial, a proliferação de autoprodutores, o surgimento de novas tecnologias de geração, a questão da sustentabilidade ambiental associada ao advento das tecnologias.

Para manter os indicadores da qualidade da energia elétrica dentro dos limites operacionais aceitáveis, tanto nos níveis de tensão de transmissão como de distribuição, são necessárias medidas de controle e de acompanhamento dos órgãos reguladores e das concessionárias fornecedoras de energia.

Esta preocupação se deve por conta do sistema elétrico estar sujeito a ocasionais variações de tensão e, mesmo dentro dos limites preestabelecidos, podem gerar operações incorretas de sensíveis equipamentos nos diversos setores.

A tensão e a frequência são as duas grandezas elétricas básicas para avaliar a eficiência de operação do sistema elétrico. O Sistema Interligado Nacional (SIN) opera com a frequência de $60 \pm 0,5\text{Hz}$.

Em relação à tensão, as características principais a serem observadas são: a forma de onda (senoidal); a simetria da forma de onda (isenção de valores médios) e as amplitudes das tensões dentro de limites aceitáveis da regulamentação ($\pm 5\%$).

Portanto, o termo “Qualidade da Energia Elétrica (QEE)” está relacionado com qualquer desvio que possa ocorrer na amplitude, na forma de onda ou na frequência da tensão e/ou corrente elétrica. Esta designação também se aplica às interrupções de natureza permanente ou transitória que afetam o desempenho da transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica.

Uma definição mais abrangente: a QEE deve ser a perfeita combinação entre características quase ideais do produto eletricidade (qualidade do produto/conformidade), com um sistema físico de fornecimento adequado (qualidade do serviço/continuidade) e agilidade operacional para satisfazer as expectativas do cliente (qualidade do atendimento).

Cabe destacar outros fenômenos importantes que ocorrem no sistema elétrico que afetam a qualidade da energia elétrica e que interferem diretamente nas grandezas tensão e frequência.

Na Tabela 2.1 destaca-se um resumo dos principais fenômenos relacionados a qualidade da energia, com suas causas, efeitos e soluções de mitigação.

Deve-se ressaltar ainda que, o impacto econômico para as concessionárias, clientes e fabricantes de equipamentos, resultante das interrupções operacionais, é uma das principais razões para os estudos relacionados à qualidade da energia.

Com a evolução tecnológica dos equipamentos eletrônicos e com a estabilidade econômica do país, as concessionárias, clientes e fabricantes têm-se preocupado com a qualidade da energia, investigando seus fenômenos por intermédio de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento e buscando parcerias com as universidades, pelos seguintes motivos:

- Maior sensibilidade dos equipamentos à qualidade da tensão de suprimento;
 - A crescente aplicação de equipamentos que utilizam a eletrônica de potência;
 - O impacto de algumas medidas para a racionalização e conservação energética;
 - Uma maior conscientização dos clientes em relação aos fenômenos correlatos à qualidade da energia;
 - Implicações de ordem econômica;
 - Programas de Eficiências Energéticas.
-

Tabela 2.1 - Principais fenômenos relacionados a Qualidade da Energia Elétrica

Tipo do Distúrbio	Causas Típicas	Efeitos	Soluções
Transitórios Impulsivos	- Descargas atmosféricas; - Chaveamentos de banco de capacitores e/ou cargas.	- Excitação de circuitos ressonantes; - Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	- Filtros; - Supressores de surto; - Transformadores de isoladores.
Transitórios Oscilatórios	- Descargas atmosféricas; - Chaveamentos de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.	- Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; - Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	- Filtros; - Supressores de surto; - Transformadores isoladores.
Sub e Sobretensões	- Partidas de motores; - Variações de cargas; - Chaveamento de capacitores.	- Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; - Falhas em equipamentos eletrônicos; - Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TP's e TC's; - Operação indevida de relés de proteção.	- Reguladores de tensão; - Fontes de energia de reserva; - Chaves estáticas; - Geradores de energia.
Interrupções	- Curto-circuito; - Operação de disjuntores; - Manutenção.	- Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; - Desligamento de equipamentos; - Interrupção do processo produtivo (altos custos);	- Fontes de energia sobressalentes; - Sistemas "nobreak"; - Geradores de energia.
Desequilíbrios	- Fornos a arco; - Cargas monofásicas e bifásicas; - Assimetrias entre as impedâncias.	- Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; - Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos.	- Operação simétrica; - Dispositivos de compensação.
Nível CC	- Operação ideal de retificadores de meia onda, etc.	- Saturação de transformadores; - Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores.	- Filtros.
Harmônicos	- Cargas não lineares.	- Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; - Danificação de capacitores, etc.	- Filtros; - Transformadores isoladores.
Interharmônicos	- Conversores estáticos de potência; - Cicloconversores; - Motores de indução; - Equipamentos a arco, etc.	- Interferência na transmissão de sinais "carrier"; - Indução de "flicker" visual no "display" de equipamentos.	- Filtros.
Ruídos	- Chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência; - Radiações eletromagnéticas.	- Distúrbios em equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis).	- Aterramento das instalações; - Filtros.
Oscilações de Tensão	- Cargas intermitentes; - Fornos a arco; - Partidas de motores.	- "Flicker"; - Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; - Queda de rendimento de equipamentos elétricos; - Interferência nos sistemas de proteção.	- Sistemas estáticos de compensação de reativos; - Capacitores série.
Variações de Freqüência	- Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc.	- Pode causar danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc.	

2.3.1 - Harmônicas de Tensões e Correntes

Conceitualmente, harmônicas são tensões e correntes com frequências correspondentes a múltiplos inteiros da frequência fundamental.

As correntes harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares conectadas na rede de distribuição de energia elétrica. A circulação das correntes harmônicas gera tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação da tensão de alimentação.

No passado predominavam cargas lineares com valores de impedâncias fixas (iluminação incandescente, cargas de aquecimento, motores sem controle de velocidade). Atualmente, tem-se uma enorme quantidade de cargas não-lineares geradoras de poluição elétrica (harmônicas).

Os dispositivos geradores de harmônicas são apresentados em todos os setores industriais, comerciais e residenciais, sendo denominadas de cargas não-lineares [32].

O grau de distorção harmônica presente na tensão e/ou corrente pode ser quantificado matematicamente com base no estudo das ondas não senoidais periódicas, viabilizada por meio da série de Fourier.

O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta de uma expressão senoidal em frequência fundamental, de expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas) e de uma eventual componente contínua.

Portanto, um sinal de tensão periódico não senoidal pode ser expresso por:

$$v(t) = V_0 + V_{m\acute{a}x.1} \text{sen}(1\omega t + \varphi_1) + V_{m\acute{a}x.2} \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_{m\acute{a}x.h} \text{sen}(h\omega t + \varphi_n) \quad (2.1)$$

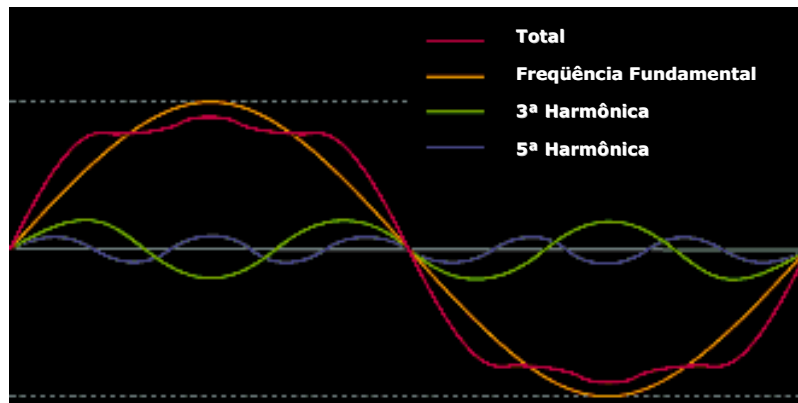
e, similarmente, para corrente:

$$i(t) = I_0 + I_{m\acute{a}x.1} \text{sen}(1\omega t + \varphi'_1) + I_{m\acute{a}x.2} \text{sen}(2\omega t + \varphi'_2) + \dots + I_{m\acute{a}x.h} \text{sen}(h\omega t + \varphi'_n) \quad (2.2)$$

onde, h (1, 2, 3, ..., n) é a ordem do harmônico.

Como exemplo, a Figura 2.1 apresenta a decomposição de uma forma de onda, com sua correspondente fundamental e a suas componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordens.

Figura 2.1 - Fundamental e a resultante das diversas ordens harmônicas



Conforme descrito em [31], nota-se que a natureza e a intensidade dos harmônicos gerados por cargas não lineares dependem de cada carga especificamente, mas três aspectos devem ser considerados gerais:

- É um fenômeno contínuo, ou seja, de longa duração;
- Devido ao comportamento similar no semiciclo positivo e no semiciclo negativo da quase totalidade das cargas, os harmônicos de ordem ímpar são mais freqüentes e com maior intensidade e, por isso, geralmente são os causadores de problemas;
- Quanto maior a ordem ou freqüência do harmônico menor sua intensidade.

Conhecidos os valores de tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema, utilizam-se de procedimentos quantitativos para expressar a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda. Um dos mais utilizados é a “Distorção Harmônica Total”, a qual pode ser empregada tanto para sinais de tensões como para correntes, conforme equações (2.3) e (2.4), respectivamente.

- Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV)

$$\text{DHTV} = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}{V_1^2}} \times 100(\%) \quad (2.3)$$

- Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI)

$$DHTI = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h_{m\acute{a}x}} I_h^2}{I_1^2}} \times 100(\%) \quad (2.4)$$

Onde:

- V_h - Valor eficaz da tensão de ordem “h”
- I_h - Valor eficaz da corrente de ordem “h”
- V_1 - Valor eficaz da tensão fundamental
- I_1 - Valor eficaz da corrente fundamental
- h - Ordem da componente harmônica

Pode-se também fazer a análise da Distorção Harmônica Individual para se analisar a influência de apenas uma ordem harmônica, em relação à fundamental, conforme equações (2.5) e (2.6).

- Distorção Harmônica de Tensão Individual (DHTI)

$$DHTI = \frac{V_h}{V_1} \times 100(\%) \quad (2.5)$$

- Distorção Harmônica de Corrente Individual (DHI)

$$DHI = \frac{I_h}{I_1} \times 100(\%) \quad (2.6)$$

De acordo com [32], as harmônicas circulam nas redes deteriorando a qualidade da energia, e são assim a origem de numerosos prejuízos:

- Sobrecarga dos condutores de neutro em razão da soma das harmônicas de ordem terceira geradas pelas cargas monofásicas;
- Sobrecarga, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores, motores, ruídos dos transformadores;
- Sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa;
- Deformação da tensão de alimentação pode perturbar receptores sensíveis;

- Perturbação das redes de comunicação ou das linhas telefônicas.

A presença de harmônicos em um sistema pode não necessariamente causar danos imediatos, mas no decorrer do tempo, equipamentos expostos a correntes harmônicas podem vir a apresentar sérios problemas. As harmônicas têm um impacto econômico considerável, resultando em:

- Envelhecimento precoce do material, levando a substituí-lo mais cedo, a menos que seja sobredimensionado;
- Sobrecargas da rede obrigam a aumentar a potência necessária, e implicam, a menos que haja um sobredimensionamento das instalações, perdas suplementares;
- Deformações da corrente provocam disparos intempestivos e a parada das instalações da produção.

Estes custos relacionados com o material, as perdas energéticas e perda de produtividade ocasionam uma baixa competitividade das empresas.

O fenômeno das harmônicas era pouco considerado, pois seus efeitos sobre as redes eram geralmente pouco importantes. Entretanto, com o advento da eletrônica de potência nas mais diversas cargas, tem amplificado fortemente o fenômeno em todos os setores.

Normalmente, a análise do fluxo harmônico é de difícil análise pelas empresas de distribuição, e, portanto, a mitigação dos seus efeitos é normalmente realizada de forma parcial e muitas vezes de maneira empírica.

Na prática, as harmônicas mais incômodas freqüentemente encontradas nos casos de redes trifásicas, são as de ordens ímpares. Além da ordem 50, as correntes harmônicas são desprezíveis e sua medição não é mais significativa.

Geralmente, as distribuidoras de energia elétrica supervisionam as harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens, considerando a fundamental na freqüência de 60Hz.

Assim, a compensação das harmônicas até a ordem décima terceira é imperativa. Uma boa compensação leva igualmente em conta as harmônicas até a ordem vigésima quinta.

Cabe destacar ainda os indicadores essenciais que permitem quantificar e avaliar a distorção harmônica das ondas de tensões e correntes.

Estes indicadores são indispensáveis para determinação das ações corretivas eventuais, são eles: o fator de potência; o fator de crista; a potência de distorção; espectro em frequência e a taxa de distorção harmônica.

Devido aos vários problemas que as harmônicas causam no sistema elétrico e a falta de regulamentação nesta área tornou-se necessário estudos que estabelecessem os limites do Nível de Distorção Harmônica, visando propiciar a compatibilidade da rede elétrica com os níveis de qualidade da energia fornecida.

A Tabela 2.2 mostra resultados de pesquisas de diversas normas e recomendações internacionais, a fim de se verificar os limites recomendados para o indicador de avaliação do desempenho global quanto a harmônicos correspondente à distorção de tensão harmônica (DHTV) em outros países. Constatou-se que os limites para a tensão de distribuição de 13,8kV, variam de 5% a 8%.

Tabela 2.2 - Limites da DHTV normalizados/recomendados para média tensão

Distorção Harmônica de Tensão Total	Normas / Recomendações - Média Tensão						
	PRODIST	IEEE 519	EN 50160	NRS 048	NTCSE	IEC	ONS
DHTV (%)	8	5	8	8	8	8	6

Diante deste contexto, encontra-se em fase de aprovação pela ANEEL, o PRODIST (Procedimentos de Distribuição) que é um conjunto de documentos regulatórios na forma de regulamentações, normatizações e padronizações que têm como objetivo possibilitar a conexão elétrica aos sistemas de distribuição por usuários, garantindo que os indicadores de desempenho ou de qualidade de serviço sejam atingidos de forma clara e transparente, preservando, dentre outros aspectos, a segurança, a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos.

O Módulo 8, denominado Qualidade da Energia Elétrica, versão de 19 de fevereiro de 2008, estabelece os valores de referência para as distorções harmônicas totais conforme tensão nominal de alimentação, como mostra a Tabela 2.3. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

Tabela 2.3 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 138kV$	3

Devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais indicados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13.8 \text{ kV}$	$13.8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$	
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	5	4	2
	9	2	1.5	1.5	1
	15	1	0.5	0.5	0.5
	21	1	0.5	0.5	0.5
	>21	1	0.5	0.5	0.5
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
	>12	1	0.5	0.5	0.5

Em função das cargas existentes no sistema, manter esse controle no nível de distorção harmônica se torna inviável. Alternativas podem ser utilizadas para reduzir essa distorção, tais como, a inserção de filtros ativos ou passivos próximos às fontes geradoras de harmônicos, atenuação da circulação de harmônicas de seqüência zero (em circuitos trifásicos, com a conexão de um dos lados dos transformadores em triângulo), o aumento da potência de curto-circuito do sistema.

Entretanto, para que seja tomada qualquer atitude com o intuito de minimizar as correntes harmônicas no sistema, faz-se necessário o estudo prévio da

instalação, para que se possa estabelecer a alternativa mais eficaz e economicamente viável.

2.3.2 - Desequilíbrio de Tensões

De acordo com [33], o desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as fases apresentam tensão com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente.

Sabe-se que a presença de cargas trifásicas desequilibradas conectadas a um sistema trifásico causa um desequilíbrio de tensão, uma vez que as correntes absorvidas nas três fases não são simétricas, isto é, não são iguais em módulo nem tão pouco defasadas de 120° .

Geralmente, em sistemas de alta tensão não existem grandes desequilíbrios, exceto quando alimentam instalações com cargas monofásicas de grande porte, tais como trens com tração elétrica ou fornos elétricos monofásicos.

Outro fator que causa o aparecimento do desequilíbrio de tensão é a existência de linhas de transmissão mal transpostas, pois as características elétricas destas linhas não serão uniformes no seu percurso.

Os efeitos provocados por um sistema elétrico com a presença de desequilíbrios de tensão estão associados a sobreaquecimentos, mau funcionamento e/ou falhas dos dispositivos de proteção, maior solicitação do isolamento e redução da vida útil.

O cálculo do nível do desequilíbrio de tensão - fator K e, em algumas literaturas, também definido como FDV (Fator de Desequilíbrio de Tensão), pode ser feito através de diferentes métodos, dos quais, quatro deles serão apresentados neste trabalho. O primeiro método utiliza os módulos e os ângulos das tensões trifásicas para a obtenção do FDV, enquanto que, os demais utilizam somente os módulos.

Método 1 - Componentes Simétricas:

Neste método, o desequilíbrio de tensão é definido pela relação entre os módulos da tensão de seqüência negativa e da tensão de seqüência positiva, conforme (2.7).

$$FDV (\%) = \frac{V_{(-)}}{V_{(+)}} \cdot 100 \quad (2.7)$$

Onde:

$V_{(-)}$ - Módulo da tensão de seqüência negativa;

$V_{(+)}$ - Módulo da tensão de seqüência positiva.

Para metodologia de cálculo do nível de desequilíbrio, utilizando componentes simétricas, são considerados apenas os valores para a componente de seqüência negativa, pois esta é a mais apropriada no caso de possíveis interferências em equipamentos conectados ao sistema. Por outro lado, as componentes de seqüência zero se somam e circulam no neutro, exigindo adicionalmente do sistema um dimensionamento adequado.

Método 2 - NEMA:

A norma NEMA-MG-14.34, a fim de quantificar o desequilíbrio, define o FDV como a relação entre o máximo desvio da tensão média e a tensão média, tendo como referência as tensões de linha, de acordo com 2.8.

$$FDV (\%) = \frac{\Delta V}{V_m} \cdot 100 \quad (2.8)$$

Onde:

ΔV - Máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio;

V_m - Média aritmética dos módulos das tensões trifásicas.

Método 3 - IEEE:

O IEEE recomenda que o desequilíbrio de tensão pode ser obtido por uma relação que expressa a maior diferença entre as tensões de linhas medidas e o somatório das mesmas, conforme 2.9.

$$FDV (\%) = \frac{3(V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} \cdot 100 \quad (2.9)$$

Onde:

- $V_{m\acute{a}x}$ - Maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas;
 $V_{m\acute{i}n}$ - Menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas;
 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} - Módulo das tensões trifásicas.

Método 4 - CIGRÉ:

Outro procedimento recomendado para a definição do desequilíbrio de tensão pode ser extraído do CIGRÉ (*Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*), que emprega uma expressão para o fator de desequilíbrio a partir de uma grandeza adimensional que correlaciona as tensões de linha, dada pelas expressões (2.10) e (2.11).

$$FDV (\%) = 100 \cdot \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \gamma}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \gamma}}} \quad (2.10)$$

Onde:

$$\gamma = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.11)$$

Com o objetivo de se regulamentar o setor elétrico brasileiro e buscar a normalização dos indicadores de Qualidade da Energia Elétrica, a ANEEL encomendou estudos à grupos de trabalhos, com vasta experiência na área e que,

fundamentados em documentos internacionais e nacionais, sugeriram propostas para o estabelecimento dos índices de conformidade relativos a desequilíbrios, bem como, padronização da nomenclatura e metodologia para o cálculo do fator.

Investigações foram realizadas pelo grupo para a fundamentação de propostas alternativas para a determinação do fator de desequilíbrio, além daquela que emprega a relação entre as componentes simétricas de maneira a antever eventuais discrepâncias entre os valores encontrados para os níveis de desequilíbrios.

Foram executadas simulações onde, em um sistema trifásico típico, foram impostos desequilíbrios os quais, utilizando o método das componentes simétricas, resultariam em níveis de 0 a 10%. A partir das expressões mostradas anteriormente e considerando-se outras existentes, foram calculados os índices FDV, para cada desequilíbrio imposto.

Dentre todas as expressões encontradas, cujo resultado mais se aproxima daquela considerada ideal para o cálculo do fator de desequilíbrio, definida pelas componentes simétricas, corresponde à proposta oriunda da CIGRÉ e utilizada pelas recomendações/normas GCOI/GCPS e NRS - 048 [34].

Diante do exposto, como alternativa à formulação ideal ($V_{(-)}/V_{(+)}$), sugere-se as equações (2.10) e (2.11), para o cálculo do fator de desequilíbrio (FDV) e, também adotada como referência para o desenvolvimento deste trabalho.

2.4 - Medidor Eletrônico de Energia Elétrica

2.4.1 - Considerações Iniciais

De acordo com [31], historicamente no Brasil, a revolução, em termos tecnológicos, ocorreu a partir do início dos anos 80 com o desenvolvimento do registrador eletrônico programável, atendendo às necessidades das concessionárias para implantação da tarifa diferenciada horo-sazonal para os clientes de médio e grande porte (Grupo A). Tal equipamento, apesar da similaridade física a um medidor de energia, não possuía a propriedade de medir, mas sim, e apenas, de contar pulsos recebidos de outro(s) instrumento(s). Ele foi desenvolvido para trabalhar em conjunto com medidores eletromecânicos do tipo indução, adaptados com um circuito eletrônico emissor de pulsos em quantidade proporcional às revoluções do disco. Dessa forma, o registrador eletrônico tem a propriedade de receber e acumular os pulsos, tanto de energia ativa quanto de energia reativa, obedecendo a uma programação previamente estabelecida pela concessionária e gravada em sua memória.

Na década de 90, surge o medidor de energia elétrica do tipo eletrônico, como evolução natural do registrador eletrônico. Esse é um equipamento estático no qual a corrente e a tensão agem sobre componentes eletrônicos para produzir uma informação de saída proporcional à quantidade de energia elétrica medida. A atratividade é a capacidade de medir, dispensando assim, a necessidade do uso compartilhado dos medidores convencionais. Isso proporcionou ganhos para o sistema de medição como um todo, desde a diminuição de itens de estoques, facilidades de instalação e operação.

Os mais complexos e utilizados para medições de faturamento de unidades consumidoras de médio e grande porte, são providos de “memória de massa”, onde são armazenados pulsos relativos às grandezas medidas para posterior visualização e/ou recuperação destas grandezas. No aspecto de interface com o usuário, eles são providos, além do mostrador, de um dispositivo de saída de dados serial via cabo e uma porta ótica.

Diferentemente dos medidores eletromecânicos, os medidores eletrônicos proporcionam uma enorme gama de funcionalidades.

De forma geral, os medidores eletrônicos de energia atualmente em uso no Brasil, e em especial os utilizados neste trabalho, possuem a classe de exatidão de D (0,2 %) e B (1,0 %), existindo ainda, as classes C (0,5 %) e A (2,0 %).

A seguir, serão destacadas as características técnicas e construtivas e, o princípio de funcionamento de um modelo de medidor eletrônico trifásico, para uso nas medições de baixa tensão, em consumidores do grupo B (ligados em tensão inferior a 2,3kV), porém, com alternativas de “*upgrade*” para aplicação também nas medições de média e alta tensão, em consumidores do grupo A (ligados em tensão igual ou superior a 2,3kV) [35].

2.4.2 - Descrição Geral

Para os diferentes modelos de medidores eletrônicos de energia elétrica existirão observações específicas quanto à sua funcionalidade e/ou compatibilidade em relação à versão do medidor admitido para esta descrição genérica.

A base do medidor é constituída de material plástico com a seção inferior e o bloco de terminais reforçados com fibra de vidro. A parte superior é provida com uma janela plástica transparente para acesso ao mostrador do medidor como mostra a Figura 2.2.



Figura 2.2 - Visão geral de um modelo de medidor eletrônico trifásico

Todos os dados pertinentes ao medidor são mostrados em uma placa de identificação frontal.

Os medidores armazenam o consumo de energia ativa e reativa para conexão à rede em sistemas de distribuição três fases, quatro fios.

Podem ser ligados em tensões de 120V ou 240V (faixa de tensão 0,8 a 1,15 x Vn), 60Hz e correntes de até 120A. Para esse propósito eles são instalados diretamente na linha de alimentação pela concessionária de energia elétrica e são lidos regularmente para efeitos de cobrança.

A versão básica de um medidor eletrônico trifásico oferece: registros de energia de um a quatro postos horários; interface óptica padrão ABNT e diodo (LED) de teste.

Este medidor é destinado a consumidores, em particular, consumidores residenciais.

Para finalidades mais específicas e com foco em outros segmentos tarifários, funções extras podem ser incorporadas a esse medidor, tais como: entradas para controle de tarifa externo; entradas para contagem de pulsos externos; relógio interno para controle de tarifa; saída pulso (energias ativa e reativa); saída para controle de carga; interface de comunicação padrão RS485; demanda e sistema de detecção de fraude.

Dependendo da extensão, podem ser adicionadas sem a necessidade de o medidor ser desconectado e/ou recalibrado. É necessário que o usuário informe-se das parametrizações em campo e das parametrizações em fábrica.

2.4.3 - Características Principais

O medidor em questão possui as seguintes características:

- Registro de energia ativa e reativa em até quatro postos horários;
 - Registro de demanda de energia ativa;
 - Registro de até duas entradas de pulso externas ou uma entrada em quadratura;
 - Controle de posto horário externo através de terminais;
 - Controle de posto horário através de relógio e calendário interno;
 - Controle de contator externo através de saída eletrônica;
 - Mostrador LCD, legível de -25 °C a 70 °C;
-

- Medição com tecnologia DFS (*Direct Field Sensor*), baseado no efeito Hall, que propicia características de medição, incluindo resposta linear dentro da faixa de medição, estabilidade e proteção contra interferências;
 - Conformidade com as normas ABNT/NBR-14519:2000 (Especificação) e NBR-14520:2000 (Método de ensaio);
 - Classes de precisão disponíveis: 1,0%, 0,5% e 0,2%;
 - Indicadores que facilitam a identificação de ligações incorretas;
 - Detecção de fraude: contador de faltas de energia por fase e total;
 - Sistema antifraude com sensor de abertura da tampa;
 - Tanto o equipamento quanto sua parametrização são projetados para uma vida longa, mantendo a confiabilidade dos produtos, e considerados estáveis para um período de até 15 anos, desde que não sejam violados os lacres de fábrica. Para isto são tomadas algumas medidas de projeto/fabricação: precauções com ESD (*Electrostatic Discharge*) desde a fábrica até o campo; capacitores tipo “vida longa” e resistores superdimensionados;
 - Somente componentes aprovados e qualificados;
 - Tecnologia SMD (*Superficial Mounting Device*);
 - Não é necessário abrir o medidor para efetuar a verificação do mesmo (terminais de prova internos, porém acessíveis externamente);
 - Dados para rastreabilidade gravados na memória não volátil do medidor.
-

2.4.4 - Diagrama de Conexão

A Figura 2.3 apresenta o diagrama esquemático de conexões do medidor eletrônico 3 elementos para aplicação nos sistemas de distribuição a 4 fios.

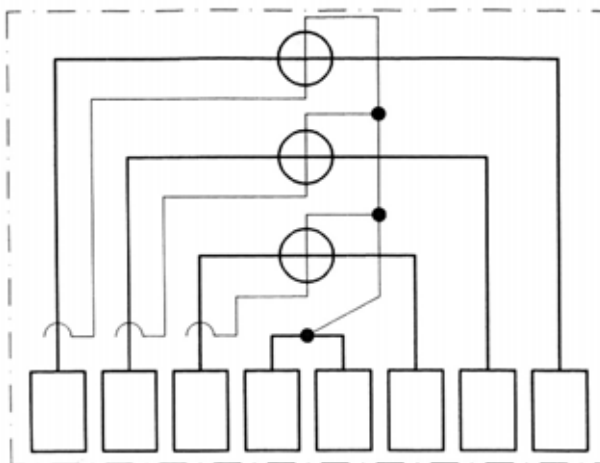


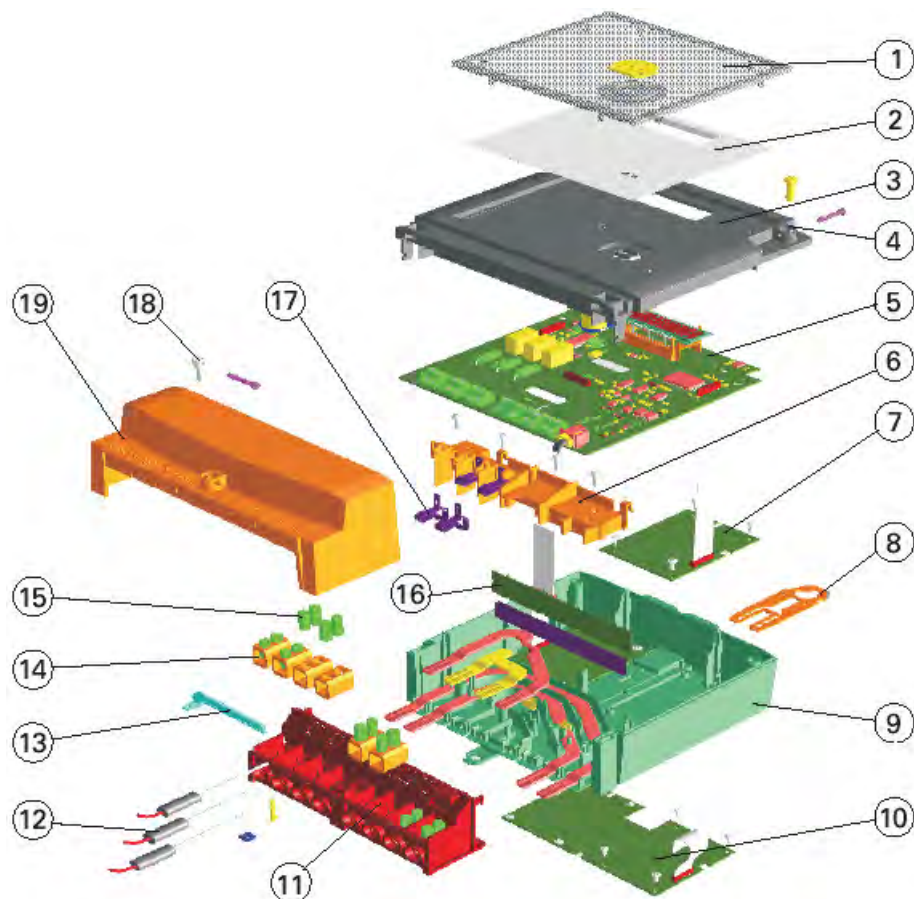
Figura 2.3 - Diagrama de conexão do medidor para 3 elementos, 4 fios

2.4.5 - Construção do Medidor

As principais partes que compõem o medidor eletrônico de energia elétrica trifásico podem ser visualizadas através da vista explodida apresentada na Figura 2.4.

Um selo na tampa do bloco terminais, a ser adicionado pela concessionária de energia, previne contra acesso não autorizado às conexões das fases.

A placa de identificação é configurada para conter os dados específicos do cliente. Ela contém as informações relevantes para o uso do medidor, de acordo com a norma ABNT/NBR-14519:2000 (Especificação). A tampa frontal fornece uma visão do mostrador (LCD - display), diodos de teste e porta óptica para leitura automática dos dados do medidor.



Legenda:

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1. Janela | 10. Placa de expansão |
| 2. Placa de identificação | 11. Bloco de terminais |
| 3. Tampa do medidor | 12. Pinos de teste |
| 4. Lacre de fábrica | 13. Lacre dos terminais de prova |
| 5. Placa principal | 14. Terminais |
| 6. Fixação da placa de medição | 15. Parafuso dos terminais |
| 7. Placa de expansão | 16. Placa medição + isolador |
| 8. Dispositivo de fixação | 17. Molas de conexão |
| 9. Base | 18. Parafuso fixação da tampa do bloco |
| | 19. Tampa do bloco de terminais |

Figura 2.4 - Vista explodida do medidor eletrônico trifásico

2.4.6 - Princípio de Medição

A explicação a seguir refere-se somente aos medidores com tecnologia de medição DFS (*Direct Field Sensor*, baseado no efeito “Hall”).

2.4.6.1 - Diagrama em Blocos

O princípio de medição é brevemente descrito por meio de um diagrama em blocos como mostra a Figura 2.5. Os blocos são descritos a seguir com mais detalhes, quando necessário, para uma melhor compreensão do princípio de funcionamento.

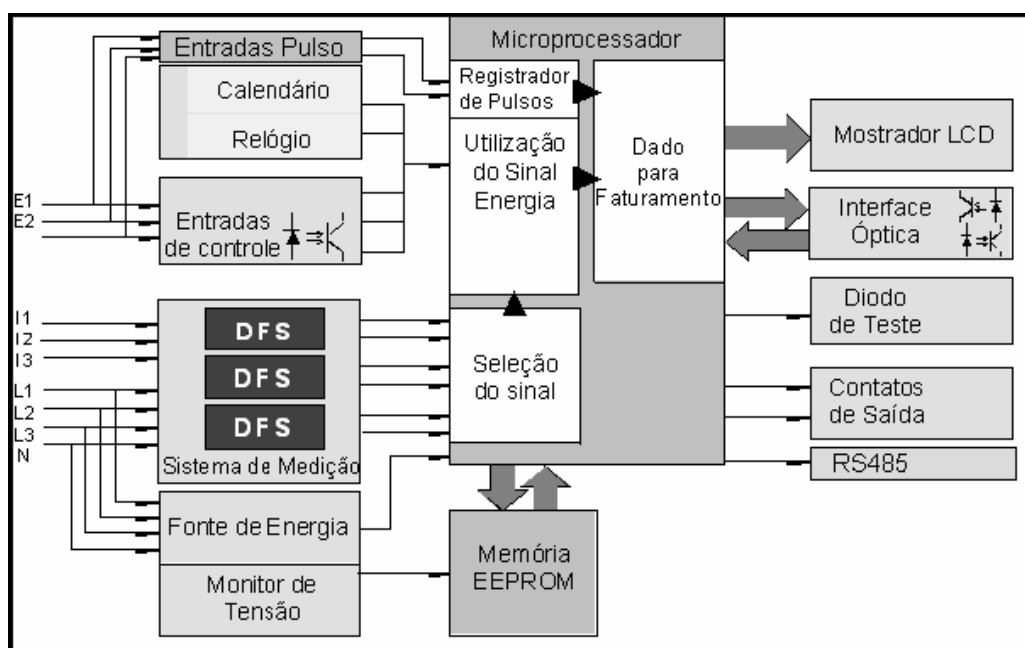


Figura 2.5 - Diagrama de blocos do medidor eletrônico trifásico

As entradas principais para o medidor são mostradas à esquerda, na Figura 2.5, identificadas as conexões de fase (L1, L2, L3) e neutro (N) para medição de energia e para a alimentação da fonte de energia do medidor, bem como, as entradas de controle (E1, E2) para chaveamento da tarifa de energia.

As saídas principais do medidor são mostradas à direita (como também a entrada para a interface óptica), na Figura 2.5, identificando o mostrador (LCD - display) para leitura dos valores medidos de energia (8 dígitos com informação adicional para direção de energia, presença de fase, seqüência de fase, energia aplicada e tarifa corrente), os diodos de teste, a interface óptica para leitura automática no campo por meio de leitoras (*hand held terminal*) e PC's com porta óptica e os contatos de saída para transmissão de constante de pulsos (opcional).

A fonte de energia para os medidores eletrônicos é obtida dos circuitos de tensões trifásicos. Um circuito de monitoramento de tensão garante uma eficiente

operação e armazenamento dos dados em eventos de falha de energia, bem como a correta reinicialização quando a energia retorna.

O sistema de medição é a três elementos na consolidada tecnologia DFS (*Direct Field Sensor*, baseado no efeito “Hall”) e geram um sinal proporcional à potência em cada fase, com base na tensão aplicada e corrente circulante. Esse sinal é convertido para um sinal digital para o futuro processamento pelo microprocessador. O sensoriamento das correntes é através de sensores de efeito “Hall” e o das tensões através de divisores resistivos, normalmente.

O processamento do sinal é realizado através do microcontrolador que soma os sinais digitais das fases individuais e a forma pulsos de energia fixa. Ele separa esses pulsos de acordo com a direção do fluxo de energia, em positivo e negativo. Ele então os processa de acordo com a constante do medidor e alimenta o respectivo registrador de acordo com a tarifa, determinada pelo controlador de tarifas. O microcontrolador também controla a comunicação de dados com o mostrador (display), a interface óptica e ainda garante uma operação segura mesmo em evento de falta de energia.

Uma memória não volátil (EEPROM) contém os parâmetros configurados no medidor e assegura os dados de faturamento - dados de energia - contra perda quando de uma falta de energia.

2.4.6.2 - Geração do Sinal

Após o sensoriamento das tensões e correntes, ocorre a multiplicação analógica destes sinais. A seguir, um conversor analógico digital converte o resultado deste produto, proporcional à energia, para um sinal digital. Estes sinais digitais são processados no microprocessador, o qual o adiciona as informações de energia de todas as fases, transferindo o total para o correspondente registro de energia. A direção do fluxo de energia está contida no sinal digital de acordo com a Figura 2.6.

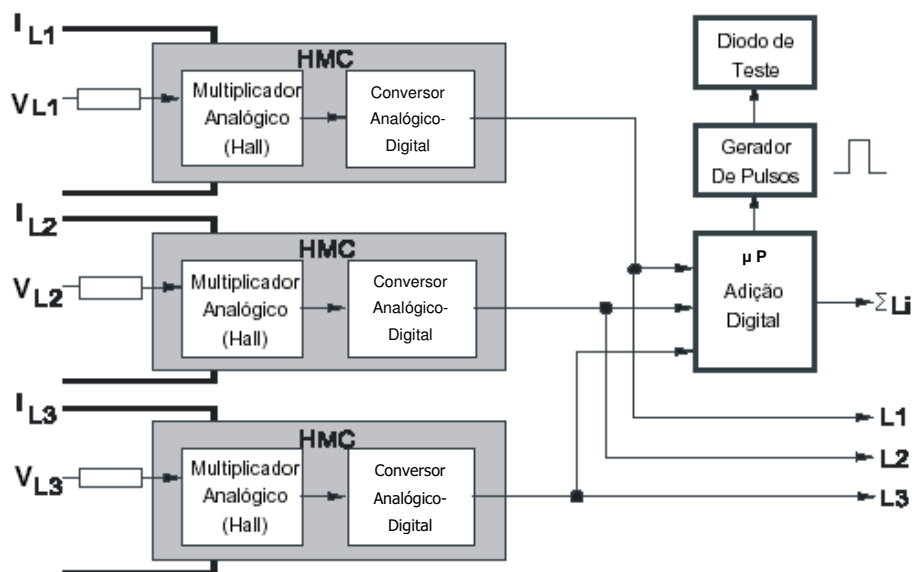


Figura 2.6 - Geração de sinais no sistema de medição

O microprocessador gera um pulso para o diodo de teste a partir da soma digital das energias em cada fase, correspondente à constante do medidor.

2.4.6.3 - Processamento de Sinal

Conforme mostra o diagrama de blocos da Figura 2.7, os medidores medem a energia ativa e reativa nas três fases e as processam separadamente de acordo com o sentido da energia.

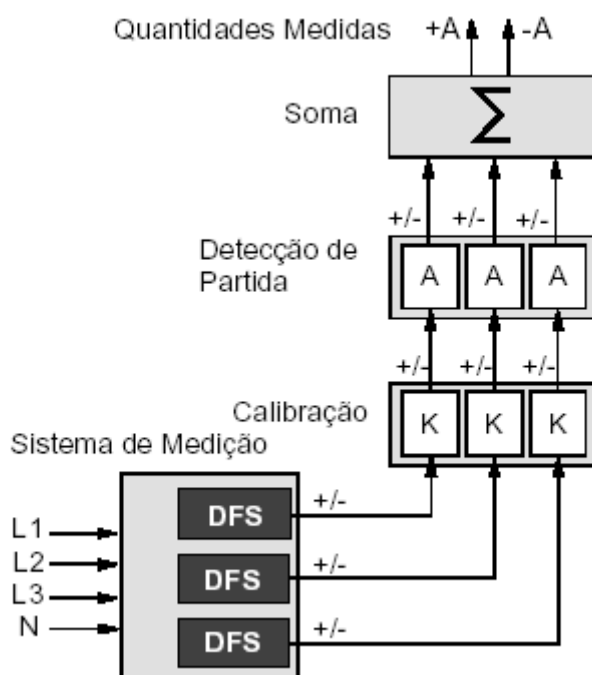


Figura 2.7 - Diagrama de processamento de sinais

Para esse fim, o microprocessador soma os sinais digitais dos sensores e armazena o consumo de energia nos respectivos registros de energia.

Obviamente, o processamento/computação das quantidades de energia ativa e reativa, é realizado pelo microprocessador baseado num algoritmo de cálculo que dependerá da precisão dos sensores (tensão e corrente) e do sistema de condicionamento destes sinais.

O algoritmo de cálculo tanto da energia ativa quanto da energia reativa varia de fabricante para fabricante, e, portanto, o comportamento para sinais não padronizados (com distorções harmônicas e desequilíbrios) variarão de modelo para modelo.

Neste sentido, este trabalho de pesquisa avaliará a resposta destes medidores frente a sinais não padronizados de referência de tensões e correntes, inclusive, admitindo-se desequilíbrios de tensões.

Com uma função de calibração o microprocessador primeiramente acessa o sinal dos sensores individuais nas bases de seus desvios. Esses são determinados e armazenados durante o teste final do medidor.

Para a detecção de partida o microprocessador então compara a energia presente com a energia mínima de partida especificada. Os sinais são só repassados para soma quando a energia mínima de partida é excedida.

Para determinação das quantidades medidas o sinal agregado A é produzido a partir das fases individuais através das somas. Junto com o sinal das fases, elas formam as quantidades de medição separadas de acordo com a direção de energia.

2.4.7 - Elementos de Controle e Mostrador (Display)

2.4.7.1 - Elementos de Controle

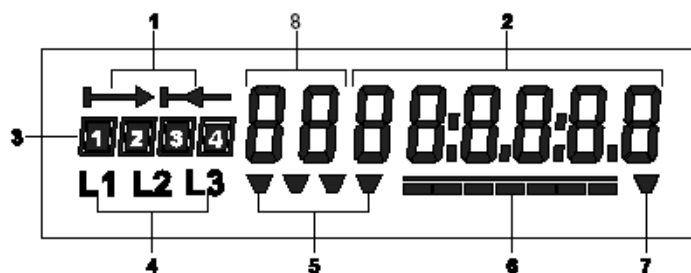
Os medidores não possuem elementos de controle (botões ou chaves externas). A única função operacional, a aquisição de dados, é feita tanto pela simples leitura do mostrador como pela leitura automática através da interface óptica. Para esse propósito a cabeça da leitora é colocada na respectiva identificação na parte frontal do medidor.

2.4.7.2 - Mostrador

Os medidores são providos de um mostrador de cristal líquido (LCD).

2.4.7.3 - Esquema Básico

O esquema básico destacado na Figura 2.8 mostra as possibilidades de indicação do mostrador de cristal líquido.



Legenda:

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 1 - Direção da Energia Ativa | 5 - Tarifa Ativa |
| 2 - Conteúdo dos Registros | 6 - Indicação de Potência |
| 3 - Tarifa | 7 - Modo de Teste |
| 4 - Presença de Tensões nas Fases | 8 - Código do Registro |

Figura 2.8 - Esquema básico do mostrador de cristal líquido (LCD)

A direção da energia ativa sempre mostra a soma das 3 fases:

- Direção positiva (consumida da concessionária);
- Direção negativa (fornecida para a concessionária).

Se nenhuma seta aparece é por não haver carga aplicada no medidor.

O mostrador apresenta o conteúdo do registro de energia com até oito dígitos (2 para código, 5 ou 6 para valor - programável). Quanto ao número de dígitos a exibição dos registros pode ser programável para 6 inteiros, 5 inteiros, 5 inteiros e 1 decimal ou 4 inteiros e 2 decimais (6, 5, 5+1 ou 4+2).

Mostra a energia por tarifa ou total, como exemplo uma dupla tarifa:

- 1 - Registro de Energia 1 (tarifa 1 - Ponta)
- 2 - Registro de Energia 2 (tarifa 2 - Fora Ponta)
- 1 2 3 4 - Energia Total

Indicação de presença de tensão nas fases do: L1 L2 L3

Com seqüência de fase reversa os caracteres piscam, se assim parametrizados.

Mostra a tarifa atualmente ativa. A informação quanto à tarifa está situada na placa de identificação.

Energia aplicada é evidenciada através de indicador gráfico de potência aplicada. Representa a potência ativa ou reativa (demanda instantânea - programável) com as varias faixas.

Mostra que o modo de teste está selecionado (como alta resolução dos registros de energia para o teste do medidor). A seta está no canto direito inferior do mostrador.

O mostrador é elaborado para trabalhar de forma rotacional, ou seja, valores alternados são mostrados em um ciclo fixo.

Para verificação do mostrador todos os segmentos e símbolos aparecem simultaneamente.

A seqüência de apresentação das grandezas, bem como seus respectivos códigos, é parametrizável e padronizados de acordo com a norma ABNT/NBR-14522:2000.

2.4.7.4 - Diodo de Teste

O diodo de teste é usado para testar o medidor. Ele transmite pulsos correspondentes aos valores de energia medidos. O número dos pulsos por unidade de tempo depende da constante do medidor (de acordo com a inscrição na placa de identificação) e da tensão aplicada.

Processamento digital do sinal gera um atraso de 2 a 3 segundos entre a energia instantânea no medidor e a formação do pulso no diodo de teste. Nenhum pulso é perdido.

O diodo de teste é parametrizável para pulsar energia ativa (kWh), energia reativa indutiva (kVArhInd) ou energia reativa capacitiva (kVArhCap).

2.4.8 - Parametrização

Os medidores podem ser configurados, de forma que parametrizações específicas possam ser carregadas através de software, e de forma que os medidores possam ser fornecidos de acordo com as solicitações específicas da concessionária. Futuras modificações na parametrização também são possíveis.

A parametrização inicial é realizada durante produção de acordo com os dados solicitados pela concessionária de energia. A re-parametrização por terceiros só deve ser realizada por profissionais devidamente qualificados.

Os parâmetros armazenados no medidor podem ser protegidos contra sobrescrita não autorizada através do uso de senha.

2.5 - Regulamentação Metrológica e Aspectos Normativos

De acordo com [36], a expansão da produção industrial, ao mesmo tempo em que ampliou o mercado interno, hoje diversificado e crescentemente exigente, abriu para o Brasil novas perspectivas de exportação de bens manufaturados.

Torna-se necessário desenvolver de forma racional, integrada e extensiva a todo o território nacional, a normalização, a inspeção, a certificação e a fiscalização das características metrológicas, materiais e funcionais dos bens manufaturados, tanto os produzidos no País quanto os importados.

Diante deste contexto, o Projeto Lei de outubro de 1973, reformou e ampliou as atribuições do INPM - Instituto Nacional de Pesos e Medidas, transformando-o em Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO, com caráter de autarquia federal. Esta medida visou criar as condições para que o Instituto, que é um dos instrumentos básicos de atuação na área tecnológica, pudesse contribuir eficazmente para a progressiva elevação dos padrões de qualidade da indústria nacional.

Compete ao INMETRO expedir ou propor a expedição de atos normativos metrológicos, necessários à implementação de suas atividades, abrangendo os campos comercial, industrial, técnico e científico.

Dentre as categorias de metrologia a Metrologia Legal está preocupada com a exatidão das medições onde estas têm influência na transparência das transações econômicas, nas medições relacionadas à saúde, à segurança e ao meio ambiente.

A Metrologia Legal é parte da metrologia relacionada às atividades resultantes de exigências obrigatórias, referentes às medições, unidades de medida, instrumentos de medição e métodos de medição, e que são desenvolvidas por organismos competentes.

O controle metrológico legal se compõe pelo conjunto de atividades de Metrologia Legal, visando a garantia metrológica.

O *controle legal* dos instrumentos de medição é composto de apreciação técnica de modelo e verificação (*inicial e subsequente - periódica e após reparos*).

A *supervisão metrológica* refere-se à fabricação, importação, instalação, utilização, manutenção e reparos de instrumentos de medição e ao controle da indicação quantitativa e do conteúdo dos produtos prémedidos.

A *perícia metrológica* é o conjunto de operações que tem por finalidade examinar e demonstrar as condições de um instrumento de medição e determinar suas características metrológicas de acordo com as exigências regulamentares aplicáveis.

A *auto-verificação (AV)* é um modelo de atuação do controle metrológico que visa permitir que fabricantes de medidores de energia elétrica, possam, através de seus procedimentos, meios técnicos e operações, garantirem por si mesmos, e sob supervisão do Inmetro, que os medidores fabricados atendam às condições prescritas para a sua aprovação em verificação inicial.

O fabricante deve atender aos requisitos e critérios da regulamentação do Inmetro para obter a autorização para realizar a *auto-verificação*.

O *PEA - Posto de Ensaio Autorizado* é outro modelo de atuação do controle metrológico que visa permitir que as concessionárias de energia elétrica possam, através de seus procedimentos, meios técnicos e operações ou de seus laboratórios contratados, garantir por si mesmos, e sob supervisão do Inmetro, que os reparos realizados nos medidores de energia elétrica, atendam às condições prescritas para a sua aprovação da verificação após reparo.

Neste caso, a concessionária é sempre a responsável pelos reparos realizados, seja na sua planta ou na contratada. A concessionária ou o laboratório contratado deve atender aos requisitos e critérios da regulamentação do Inmetro para obter a autorização para posto de ensaio autorizado, que são baseados nos requisitos da Norma NBR/ISO-17025:2005.

O controle metrológico dos medidores eletrônicos de energia elétrica se faz através do Regulamento Técnico Metrológico (RTM) a que se refere a Portaria INMETRO nº 431/2007.

Portanto, o RTM estabelece as condições mínimas a serem observadas na apreciação técnica de modelos, no exame da conformidade ao modelo aprovado, na verificação inicial, na verificação após reparos e na verificação por solicitação do usuário/proprietário, a que se sujeitam os medidores eletrônicos de energia elétrica

ativa e/ou reativa, monofásicos e polifásicos, índices de classes D (0,2 %), C (0,5 %), B (1,0 %), A (2,0 %).

Quanto aos aspectos normativos, a norma brasileira ABNT/NBR14519:2000 fixa as condições mínimas exigíveis aplicáveis a medidores eletrônicos, monofásicos e polifásicos, de índice de classe D, C, B e A, para a medição de energia elétrica em corrente alternada encerrados num mesmo invólucro.

O índice de classe é o número que define os limites admissíveis de erro percentual para todos os valores de corrente entre 10% (dez) da corrente nominal e a corrente máxima, para o fator de potência ativo ou reativo, unitário com as cargas equilibradas, quando o medidor é ensaiado sob condições de referência.

As condições de referência são um conjunto apropriado de grandezas de influência e de características de desempenho, com valores de referência, suas tolerâncias e faixas de referência, em relação ao qual o erro intrínseco é especificado [37].

As condições normais de serviço é o conjunto de faixas de medição especificadas para características do desempenho e faixas operacionais especificadas para grandezas de influência, dentro das quais os erros do medidor e suas variações são especificados e determinados.

Para a determinação dos erros das amostras ensaiadas para o desenvolvimento deste trabalho as condições de referência das normas brasileiras foram rigorosamente levadas em consideração, dentro das faixas de variação permitidas para as grandezas de influência tais como: temperatura; umidade relativa do ar; frequência; tensão; interferência eletromagnética; estabilidade térmica e posição de serviço do medidor. Entretanto, as distorções harmônicas e desequilíbrios de tensões foram extrapolados, justamente para avaliar o comportamento dos medidores frente às formas de ondas não padronizadas de referência.

A norma ABNT/NBR-14520:2000 [38] prescreve o método de ensaio para medidores eletrônicos de medição de energia elétrica especificados na norma ABNT/NBR-14519:2000, ou seja, as condições gerais de ensaios, os ensaios e a interpretação dos seus resultados. Cabe citar ainda, a norma ABNT/NBR14521:2000 [39] que fixa as condições exigíveis para a aceitação de lotes de medidores eletrônicos, sendo aplicada exclusivamente a medidores novos.

A gama de ensaios previstos pelas normas brasileiras é bastante ampla e são prescritos para serem realizados em laboratório específicos, sendo que os ensaios para aprovação de modelo devem ser realizados pelo INMETRO.

Para este trabalho, conforme mostra equação (2.12), o erro relativo percentual é definido como a relação entre o erro absoluto e a quantidade de energia elétrica medida pelo medidor-padrão multiplicado por 100 (cem). De acordo com o resultado, conclui-se que se for negativo, o medidor sob ensaio está “atrasado” e, se positivo, o medidor está “adiantado” em relação ao padrão de referência.

$$\varepsilon (\%) = \frac{N_m - N_p}{N_p} \cdot 100$$

(2.12)

Onde:

$\varepsilon (\%)$ - Erro relativo percentual

N_m - Número de pulsos do medidor sob ensaio;

N_p - Número de pulsos do padrão de referência.

O erro percentual admissível é o maior erro percentual do medidor admitido pela norma de acordo com o respectivo índice de classe do medidor sob ensaio.

Neste trabalho, as amostras dos medidores ensaiados possuem índices de classe 0,2% e 1,0%.

Antes de serem iniciados os ensaios, os medidores foram calibrados e/ou ajustados conforme estabelecido na norma ABNT/NBR-14519:2000, de maneira a ajustar os erros percentuais.

A calibração dos medidores em todas as condições de todos os ensaios em que é exigida a determinação de seus erros foi pelo Método do Medidor Padrão.

Recomenda-se que o sistema de calibração deve ter um índice de classe de no mínimo três vezes melhor do que a do medidor sob ensaio.

A Tabela 2.5 contém um resumo das condições de referência, relativas as amostras dos medidores eletrônicos utilizados neste trabalho, que serão consideradas para os ensaios de laboratório, detalhados no Capítulo IV.

Tabela 2.5 - Condições de referência para medidores eletrônicos de energia ativa

Grandeza de influência	Condição de referência	Tolerâncias admissíveis para o índice de classe	
		0,2	1,0
Temperatura ambiente	Temperatura de referência ou na falta desta, 23 °C	± 2 °C	± 2 °C
Tensão	Tensão nominal	± 2,0%	± 2,0%
Frequência	Frequência nominal	± 0,5%	± 0,5%
Forma de onda	Corrente/tensões senoidais	FDV < ± 1,0%	FDV < ± 1,0%
Indução magnética de origem externa na frequência nominal	Indução magnética igual a zero	Valor de indução que causa variação de desvio não maior que:	
		± 0,1%	± 0,2%
		mas deve ser em qualquer caso < que 0,05 mT	

As condições de teste para as condições não padronizadas (de referência) para tensões e correntes, assim como, desequilíbrios de tensões, são apresentadas no Capítulo III.

2.6 - Sistema de Tarifação de Energia Elétrica

2.6.1 - Apresentação

Até meados da década de 90, o regime tarifário que vigorava no setor elétrico brasileiro era o do custo do serviço. Este regime tarifário previa que as tarifas de energia elétrica cobrada dos consumidores deveriam ser capazes de cobrir os custos associados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, e ainda garantir uma taxa de retorno, previamente fixada, para as empresas concessionárias do setor elétrico.

Um dos primeiros passos para a reorganização do setor elétrico foi dado com o objetivo de prepará-lo para a privatização.

Em 1993, a Lei 8.631 encerrou o regime de remuneração garantida e pôs fim ao mecanismo de equalização tarifária entre as concessionárias do setor. A partir de então as concessionárias distribuidoras passaram a ter seus reajustes e tarifas fixadas de forma diferenciada, em função dos custos do serviço de cada concessionária.

A desestatização do setor elétrico exigiu um novo formato de regulação por parte do Estado brasileiro, merecendo destaque a adoção de um novo modelo setorial e a criação de uma agência reguladora do setor elétrico.

No caso do setor elétrico, um dos marcos neste novo modelo setorial foi a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A ANEEL, criada em dezembro de 1996, passou a ter a função de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal.

Para estabelecer a sua relação com o setor, a ANEEL passou a celebrar contratos de concessão com as empresas concessionárias. Nesses contratos passaram a ser conhecidas as regras a respeito das tarifas, da regularidade, da continuidade, da segurança, da atualidade e qualidade dos serviços e do atendimento a serem prestados aos consumidores.

Em relação às tarifas, os contratos tinham como princípio preservar o equilíbrio econômico e financeiro das concessionárias, estabelecendo valores que permitissem cobrir todas as etapas do processo industrial de geração, transmissão e distribuição acrescidas dos impostos e encargos setoriais. De acordo com a Agência, dois princípios eram fundamentais na definição das tarifas: a modicidade

tarifária - ou seja, uma tarifa acessível para todos os cidadãos - e o equilíbrio financeiro das empresas, tornando-as viáveis para o recebimento e manutenção dos investimentos.

Em meio a todas estas modificações, a ANEEL adotou uma nova sistemática de correção das tarifas, substituindo o modelo de regulação tarifária do custo do serviço pelo modelo tarifário conhecido como do preço-teto. Por este modelo, é fixado o valor máximo da tarifa, depois de estabelecida uma premissa de receita requerida por parte de uma determinada concessionária [40].

2.6.2 - Estrutura Tarifária

Os consumidores de energia elétrica pagam, por meio da conta recebida de sua empresa distribuidora de energia elétrica, um valor correspondente à quantidade de energia elétrica consumida, no mês anterior, estabelecida em quilowatt-hora (kWh) e multiplicada por um valor unitário, denominado tarifa, medido em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh), que corresponde ao valor de 1 quilowatt (kW) consumido em uma hora.

Para efeito de aplicação das tarifas de energia elétrica, os consumidores são identificados por classes e subclasses de consumo. São elas: residencial; industrial; comercial, serviços e outras atividades; rural; poder público; iluminação pública; serviço público e consumo próprio.

As tarifas de energia elétrica são definidas com base em dois componentes: demanda de potência e consumo de energia. A demanda de potência é medida em quilowatt e corresponde à média da potência elétrica solicitada pelo consumidor à empresa distribuidora, durante um intervalo de tempo especificado normalmente 15 minutos e é faturada pelo maior valor medido durante o período de fornecimento, normalmente de 30 dias. O consumo de energia é medido em quilowatt-hora ou em megawatt-hora (MWh) e corresponde ao valor acumulado pelo uso da potência elétrica disponibilizada ao consumidor ao longo de um período de consumo, normalmente de 30 dias.

Nem todos os consumidores pagam tarifas de demanda de potência. Isso depende da estrutura tarifária e da modalidade de fornecimento na qual o consumidor está enquadrado.

Define-se estrutura tarifária como sendo o conjunto de tarifas aplicáveis aos componentes de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, de acordo com a modalidade de fornecimento.

No Brasil, as tarifas de energia elétrica estão estruturadas em dois grandes grupos de consumidores: “grupo A” e “grupo B”.

As **tarifas do “grupo A”** são para consumidores atendidos pela rede de alta tensão, de 2,3 a 230 quilovolts (kV), e recebem denominações, como segue:

- **A1** para o nível de tensão de 230 kV ou mais;
- **A2** para o nível de tensão de 88 a 138 kV;
- **A3** para o nível de tensão de 69 kV;
- **A3a** para o nível de tensão de 30 a 44 kV;
- **A4** para o nível de tensão de 2,3 a 25 kV;
- **AS** para sistema subterrâneo.

As tarifas do “grupo A” são construídas em três modalidades de fornecimento: *convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde*.

A estrutura *tarifária convencional* é caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano. A tarifa convencional apresenta um valor para a demanda de potência em reais por quilowatt e outro para o consumo de energia em reais por megawatt-hora.

O consumidor atendido em alta tensão pode optar pela estrutura tarifária convencional, se atendido em tensão de fornecimento abaixo de 69 kV, sempre que tiver contratado uma demanda inferior a 300 kW.

A estrutura *tarifária horo-sazonal* é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano. O objetivo dessa *estrutura tarifária* é racionalizar o consumo de energia elétrica ao longo do dia e do ano, motivando o consumidor, pelo valor diferenciado das tarifas, a consumir mais energia elétrica nos horários do dia e nos períodos do ano em que ela for mais barata.

Para as horas do dia são estabelecidos dois períodos, denominados *postos tarifários*. O *posto tarifário “ponta”* corresponde ao período de maior consumo de energia elétrica, durante um intervalo de três horas consecutivas, definido pela concessionária local. No caso deste trabalho, a empresa de referência adota o

intervalo das 17:30 às 20:30 horas. O *posto tarifário “fora da ponta”* compreende as demais horas dos dias úteis e às 24 horas dos sábados, domingos e feriados. As tarifas no horário de “ponta” são mais elevadas do que no horário “fora de ponta”.

Já para o ano, são estabelecidos dois períodos: “*período seco*”, quando a incidência de chuvas é menor (maio a novembro do mesmo ano), e “*período úmido*” quando é maior o volume de chuvas (dezembro de um ano a abril do ano seguinte).

As tarifas no período seco são mais altas, refletindo o maior custo de produção de energia elétrica devido à menor quantidade de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas, provocando a eventual necessidade de complementação da carga por geração térmica, que é mais cara.

A *tarifa horo-sazonal azul* é a modalidade de fornecimento estruturada para a aplicação de *tarifas diferenciadas de consumo* de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, bem como de *tarifas diferenciadas de demanda de potência* de acordo com as horas de utilização do dia. Ela é aplicável obrigatoriamente às unidades consumidoras atendidas pelo sistema elétrico interligado, e com tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV.

A tarifa horo-sazonal azul tem a seguinte estrutura:

- *Demanda de potência* (R\$/kW) - valores diferenciados para o horário de ponta (P) e para o horário fora de ponta (FP);
- *Consumo de energia* (R\$/MWh) - valores diferenciados para o horário de ponta em período úmido (PU), para o horário fora de ponta em período úmido (FPU), para o horário de ponta em período seco (PS) e para o horário fora de ponta em período seco (FPS).

A *tarifa horo-sazonal verde* é a modalidade de fornecimento estruturada para a aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, bem como de uma única *tarifa de demanda de potência*.

A tarifa horo-sazonal se aplica obrigatoriamente às unidades consumidoras atendidas pelo sistema elétrico interligado com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada igual ou superior a 300 kW, com opção do consumidor pela modalidade azul ou verde. As unidades consumidoras atendidas pelo sistema elétrico interligado com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW podem optar pela tarifa horo-sazonal, seja na modalidade azul ou verde.

A *tarifa horo-sazonal verde* tem a seguinte estrutura:

- *Demanda de potência* (R\$/kW): valor único
- *Consumo de energia* (R\$/MWh) - valores diferenciados para os horários de ponta em período úmido (PU), o de fora de ponta em período úmido (FPU), o de ponta em período seco (PS) e para o fora de ponta em período seco (FPS).

As **tarifas do “grupo B”** se destinam às unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kV e são estabelecidas para as seguintes classes (e subclasses) de consumo:

- **B1** classe residencial e subclasse residencial baixa renda;
- **B2** classe rural, abrangendo diversas subclasses, como agropecuária, cooperativa de eletrificação rural, indústria rural, serviço público de irrigação rural;
- **B3** outras classes: industrial, comercial, serviços e outras atividades, poder público, serviço público e consumo próprio;
- **B4** classe iluminação pública.

As *tarifas do “grupo B”* são estabelecidas somente para o componente de consumo de energia, em reais por megawatt-hora, considerando que o custo da demanda de potência está incorporado ao custo do fornecimento de energia em megawatt-hora.

Com base na legislação em vigor, todos os consumidores residenciais com consumo mensal inferior a 80 kWh, ou aqueles cujo consumo esteja situado entre 80 e 220 kWh/mês e que comprovem inscrição no Cadastro Único de Programas Sociais do Governo Federal, fazem jus ao benefício da subvenção econômica da Subclasse Residencial Baixa Renda.

A **tarifa social de baixa renda** sofre descontos escalonados do acordo com o consumo em relação à tarifa da classe residencial (B1). Aos primeiros 30 kWh é aplicada tarifa com 65% de desconto em relação à tarifa aplicada a uma unidade consumidora residencial. Dos 31 kWh consumidos, até o limite de 100 kWh, é aplicada tarifa com 40% de desconto. Finalmente, de 101 kWh até o Limite Regional, é aplicado desconto de 10%.

Define-se Limite Regional como sendo o consumo máximo para o qual poderá ser aplicado o desconto na tarifa, sendo que tal limite é estabelecido por

concessionária, e os valores que excederem serão faturados pela tarifa plena (B1) aplicada às unidades residenciais.

No contexto do trabalho, os medidores eletrônicos trifásicos avaliados são aplicados na área de concessão da empresa de referência nos seguimentos das tarifas do “grupo A” nas três modalidades de fornecimento: *convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde*.

Parte das amostras é constituída de medidores de três elementos motores, destinado à medição de energia ativa (kWh), demanda máxima em registrador acumulativo (kW) e energia reativa (kVArh indutivo), em circuitos polifásicos, para aplicação em fornecimentos binômios com aplicação de tarifa convencional - medição indireta.

Outra parcela das amostras é de medidores, de três elementos motores, destinados à medição de energia ativa (kWh), demanda máxima em registrador acumulativo (kW) e energia reativa (kVArh indutivo e capacitivo), em circuitos polifásicos, dotado de memória de massa para registro dos eventos com estampa de tempo em postos diários, para aplicação em fornecimentos binômios com aplicação de tarifa horo-sazonal - medição indireta.

Em [41] é apresentada uma proposta de tarifação para energia elétrica quando submetida aos efeitos do conteúdo de harmônicos das cargas que poluem o sistema de alimentação. É baseada no conceito de ocupação da capacidade do sistema alimentador quando uma carga é suprida. O uso adicional além da capacidade mínima necessária para entregar certa potência ativa é denominada de ocupação supérflua. O uso adicional além da parcela admitida como tolerância é cobrado. Para efeito de tarifação, o deslocamento e a distorção são separados, o que permite cobrar de forma independente e com pesos diferenciados, os excedentes de reativos e harmônicos. Existem variadas formas de tarifações com base nas grandezas elétricas e cada uma tem suas vantagens e desvantagens. Esta proposta tem o objetivo de possibilitar uma distribuição mais justa da responsabilidade pelos custos adicionais no sistema elétrico provocados pelas distorções harmônicas. É baseada no fator de potência harmônico, de forma análoga à da tarifação de excedentes de carga reativa usada atualmente no Brasil.

De uma forma geral e tendo em vista o que a legislação prevê e permite às concessionárias faturar, estas adotam sistemas de medição apropriados e compatíveis com as necessidades de medição, de acordo com o grupo ao qual a

unidade consumidora pertence e a modalidade tarifária em que se enquadra. Concomitantemente, os fabricantes desenvolvem medidores e sistemas de medição que atendam às necessidades e às futuras expectativas das concessionárias no campo da medição de energia elétrica.

Entretanto, este trabalho tem justamente o objetivo de verificar a adequação destes medidores e as metodologias de computação da energia elétrica, para um lote de medidores selecionados na área de concessão da empresa de distribuição de referência.

2.7 - Cenário Mundial da Medição de Energia Elétrica

Destaca-se a seguir, o cenário mundial e de mercado das tendências em relação à medição de energia elétrica, onde se verifica uma forte convergência na aplicação de sistemas automatizados empregando medidores eletrônicos nos vários seguimentos de consumo.

O cenário mundial das distribuidoras de energia elétrica está passando por uma forte transformação nos últimos anos provocados por diversos fatores, entre os quais se destacam:

- Forte desregulamentação em diversos países (Inglaterra, Países Baixos, Espanha, Estados Unidos, etc.);
- Migração do investimento do capital público para o privado (Inglaterra, Espanha, Alemanha, Leste Europeu, América do Sul, Índia, diversos países Africanos e Asiáticos);
- Fortalecimento do investimento privado em países que já atuavam desta maneira (Estados Unidos, Escandinávia, Canadá, etc.);
- Fatores políticos e econômicos: queda do muro de Berlim, globalização da economia, Mercado Comum Europeu que gerou investimentos para que empresas européias (inclusive estatais como EDP - Energias de Portugal e EDF - Électricité de France) partissem para a participação em processos de privatização no Leste Europeu, América Central, América do Sul, Ásia e África;
- Fatores tecnológicos: exponencial evolução das ferramentas de Tecnologia da Informação e da microeletrônica.

Os fatores acima fizeram com que diversos paradigmas fossem quebrados, que a busca constante por maior eficiência operacional seja um impulso estratégico

para o alcance das metas impostas. Que a introdução de processos automáticos em substituição a processos manuais, o que em muitos casos significa a continuidade da existência empresarial de uma entidade, levam cada vez mais os gestores a necessitarem de uma única ferramenta para a correta tomada de decisão: *informação confiável*.

Os mesmos fatores colaboraram ainda para uma forte redução nos preços dos medidores e a uma necessidade de atendimento regionalizado, com agilidade e custos operacionais reduzidos, fazendo com que as tradicionais e grandes logomarcas de medição deixassem este mercado na virada do século.

2.7.1 - Cenários por Mercado

Neste item são apresentados comentários sobre alguns mercados, visando apenas ilustrar a diversidade de situações, embora fique nítida a migração tecnológica e crescimento da automação da medição e, conseqüentemente, a aplicação dos medidores eletrônicos (digitais) de energia elétrica.

A **América do Norte (Estados Unidos e Canadá)** certamente é o mercado onde os processos de automação da medição estão mais avançados, tanto na aplicação G&T (Geração e Transmissão), C&I (Comércio e Indústria) e Residencial.

O foco inicial deste mercado foi a implementação de projetos de AMR (*Automatic Meter Reading*) para as aplicações G&T e C&I.

Nas aplicações G&T e C&I, a implantação da automação foi feita através de medidores eletrônicos com modem incorporado ou com interface RS232. Atualmente os novos processos se baseiam em coleta de dados através de TCP/IP com base no conceito de VPN (*Virtual Private Network*).

Ainda nos anos 90, o processo de automação migrou fortemente para o segmento residencial, com larga tendência para soluções de RF (Rádio Freqüência).

Nesta época as interfaces de RF eram inseridas dentro dos medidores eletromecânicos, com a transformação dos mesmos em emissores de pulso.

Os projetos de RF se dividem em:

- “*Walk-by*” - solução na qual o leitorista coleta os dados automaticamente através de um “*handheld*” com transmissor/receptor RF que “chama” os medidores com transmissor RF que estão “adormecidos” em cada unidade consumidora. Cada medidor possui um ERT (*Electronic Remote Transmitter*) que recebe o sinal de “acordar” do “*handheld*” e envia o dado de leitura;

– “*Drive-by*” - solução na qual o leitorista com “*handheld*” é substituído por um veículo que percorre as ruas a uma determinada velocidade máxima “acordando” os ERT’s e coletando as leituras;

– Concentrador - solução na qual é instalado um concentrador de dados que recebe dados dos ERT’s e transmite diretamente para a concessionária através de diversas mídias de comunicação (linha telefônica, satélite etc.);

– Rede Fixa - solução na qual são lançadas redes fixas de RF para total independência de comunicação. Toda a comunicação entre a concessionária e o ponto de medição é totalmente “*wireless*” e com total controle da concessionária.

As aplicações acima são “*one-way*” existindo mais de 50 milhões de pontos instalados, considerando aplicações de eletricidade, água e gás.

Os principais sistemas de RF em operação nos Estados Unidos são fornecidos pela ITRON e pela Schlumberger Cellnet. Ambos possuem mais de 65% dos pontos de AMR em aplicações residenciais.

A tecnologia PLC (*Power Line Communications*) tem um percentual bem abaixo da de RF. O maior provedor de solução PLC neste mercado é a Hunt Technologies, que desenvolveu uma solução de Gestão de Consumidores Rurais, denominada Sistema Turtle. A Hunt está chegando a 4 (quatro) milhões de pontos vendidos. Sozinha ela possui mais de 60% dos pontos que as outras duas alternativas existentes (CONVERGE e DCSI).

Ao final dos anos 90 a medição de energia elétrica, bem como a coleta de dados tomou um novo rumo com a migração da medição eletrônica para o segmento residencial. Os benefícios propiciados por esta nova tecnologia fizeram com que o mercado norte-americano de medidores residenciais sofresse a maior quebra de paradigma de sua história, fazendo com que este mercado esteja com um crescimento anual médio de 20% além do crescimento vegetativo.

No **Oeste Europeu**, nos países pertencentes ao Mercado Comum Europeu apresentam situações distintas entre eles, não havendo uma tendência única de solução, conforme podemos observar na Tabela 2.6 [42].

Tabela 2.6 - Tecnologias de medição nos países do Oeste Europeu

Situação x Países	França	Itália	Inglaterra	Espanha	Alemanha
Tecnologia Automação	Ripple Control	PLC	Pré-Pagamento	PLC	Ripple Control PLC
Migração para Medição Eletrônica	Total desde o início dos anos 90	Total desde o final dos anos 90	Parcial desde o início dos anos 90	Parcial desde o início do novo século	Parcial desde o início dos anos 90
Números	Mais de 15 milhões de pontos instalados	Implantação de projeto de 30 milhões de ponto, tendo sido concluído 20% do projeto até o momento	35% dos consumidores da Inglaterra operam em Pré-Pagamento	Automação não avançou em virtude de falhas nos projetos tentados com base em tecnologia local	80% da automação se baseia em tecnologia Ripple Control, que migra agora para PLC
Motivadores da Automação	Controle de Demanda	Automação de processos comerciais e controle inadimplência	Redução da inadimplência	Tarifas diferenciadas	Controle de Demanda

Os países da **Escandinávia** certamente são aqueles nos quais a desregulamentação do setor de energia mais avançou, onde consumidores residenciais podem selecionar seu provedor de energia. Isso fez com que a implementação da automação da medição fosse uma ação estratégica.

Inicialmente os projetos começaram com o tradicional PLC. Em seguida tentou-se avançar para o conceito BROADBAND através do protocolo ECHELON. Esta tentativa de avanço encontrou duas barreiras: taxa de sucesso de comunicação e preço por ponto.

Em virtude disso, a Escandinávia padronizou e está homologando e implantando sistemas de PLC fora do escopo do protocolo ECHELON [42].

No **Leste Europeu** se encontram uma grande diversidade de situações, porém com forte tendência de migração da medição eletromecânica para eletrônica e a migração dos sistemas de automação para PLC. Citamos a seguir alguns casos:

- Hungria, República Checa, Eslováquia e Romênia: *Ripple Control* para controle de carga com forte tendência de medição eletromecânica;
- Croácia e Eslovênia: migração para medição eletrônica com foco em tarifas diferenciadas na baixa tensão (dois postos diários);
- Ucrânia: migração total para medição eletrônica e implementação de solução de PLC em mais de 250.000 pontos de medição. O mercado de medição eletromecânica não existe mais;
- Rússia e Bulgária: inicia a migração lenta de medição eletromecânica para eletrônica com a implementação de automação através de PLC;
- Cazaquistão: aquisição apenas de medidores eletrônicos.

Em **Israel e Emirados Árabes** há a implementação de automação de medição através de medidores eletrônicos e tecnologia PLC. Inexistência de medidores eletromecânicos em Israel.

Na **África**, a maioria dos mercados ainda é de medição eletromecânica, com migração ou definição por medição eletrônica realizada em alguns países:

- África do Sul: o padrão é o pré-pagamento através de medidores eletrônicos. Atualmente estão estudando como adaptar a tecnologia de pré-pagamento implementada com sistema de automação de coleta de dados através de RF, visto que o índice de perdas comerciais está crescendo para níveis insustentáveis.

- Egito: inicia forte migração para medição eletrônica agregada à automação através de tecnologia PLC, visando combate a perda comercial.

- Camarões: migração total para medição eletrônica.

A **Oceania** é o continente que está em fase de migração plena para medição eletrônica, sendo que a Nova Zelândia tende a incorporação de automação por PLC e a Austrália para RF.

No **Japão** não existe mais medição eletromecânica. Apenas medidores eletrônicos são adquiridos por este mercado. Inicia implementação de sistemas de automação com base em tecnologia RF.

Na **China**, 50% do mercado de medidores para aplicação residencial já são eletrônicos e 50% tipo Ferraris (indução).

Nos **demais Países Asiáticos**, aqueles com índice de desenvolvimento mais avançado como Coréia do Sul e Taiwan, atualmente compram apenas medidores eletrônicos para baixa tensão. Outros países como Tailândia segue o momento da China (50% Eletrônico e 50% Ferraris).

Outros mercados como Bangladesh, Laos e Indonésia ainda compram de forma majoritária medidores eletromecânicos.

Na **América Central** existe forte migração para medição eletrônica, sendo que em vários países não há mais a comercialização de medidores tipo Ferraris. Entre os países que não mais compram medidores de indução Ferraris citamos Porto Rico, Bahamas, Bermudas, Panamá e Honduras. Projetos de plena automação estão sendo implementados nestes países, com base em tecnologia RF. A tecnologia PLC apenas é utilizada em Porto Rico.

Na **América do Sul** a migração da medição eletromecânica para a medição eletrônica está forte em países como Chile, Colômbia, Argentina e Peru, e em fase de início de crescimento no Brasil e Uruguai.

O mercado sul-americano (exceto Brasil) já contava em 2005 com 1.200.000 (um milhão e duzentos mil) medidores instalados e em 2006, 1.800.000 (um milhão e oitocentos mil) medidores instalados, ou seja, 3.000.000 de medidores eletrônicos instalados em dois anos.

No **Brasil**, os fatores que estão acelerando as concessionárias a optarem pela aquisição de medidores eletrônicos são: a busca de redução de perdas comerciais; as vantagens tecnológicas; o preço compatível com o medidor eletromecânico; a oferta no mercado interno de medidor de alta qualidade e a necessidade de implementação de sistemas na baixa tensão.

Segundo dados da ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, foram produzidos no mercado interno, 3 (três) milhões de medidores/ano (ano de referência 2007), sendo que do total, 40% (quarenta por cento) foram de eletrônicos.

Para 2008, estima-se que será de 60% (sessenta por cento) a parcela de medidores eletrônicos.

Como destacado anteriormente, vários países do mundo migraram para medição eletrônica em baixa tensão, em função das vantagens agregadas a esta tecnologia.

2.7.2 - Cenário da Empresa de Referência

O parque de medidores de energia elétrica da concessionária, objeto de estudo neste trabalho, é composto, em sua maioria, por medidores eletromecânicos, conforme mostra a Figura 2.9 (referência novembro/2005).

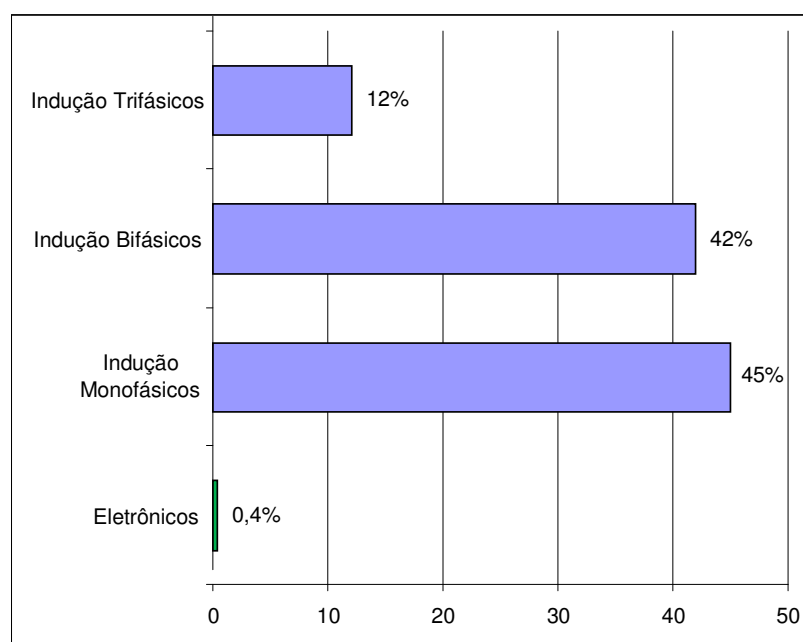


Figura 2.9 - Quantidade percentual por tipo de medidores

No entanto, o pequeno volume de medidores eletrônicos, instalados nas medições de fronteira e nos grandes clientes, em clientes pela THS (Tarifa Hora-Sazonal) e, em fase de migração gradativa no segmento residencial, é responsável por, cerca de, 55% (cinquenta e cinco por cento) do registro da energia comercializada pela empresa (referência de novembro/2005), de acordo com o gráfico da Figura 2.10.

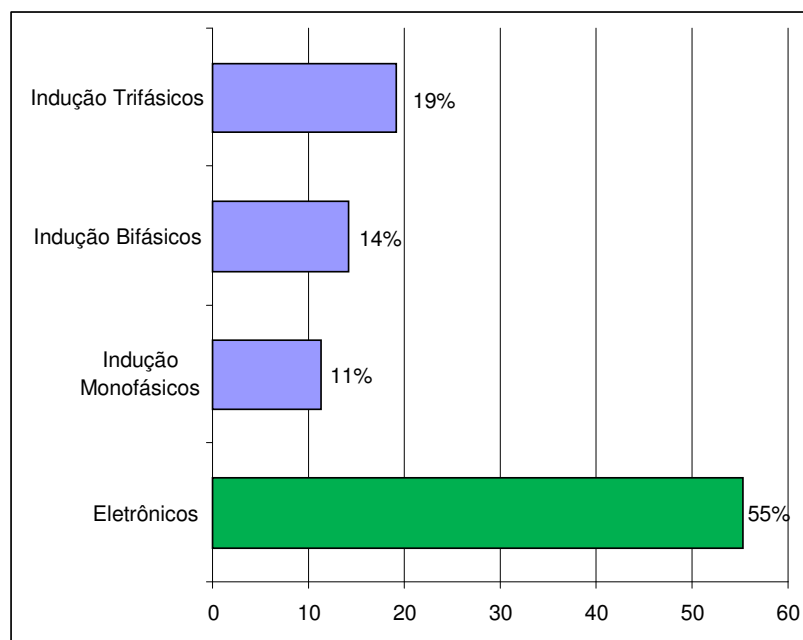


Figura 2.10 - Consumo percentual do kWh médio por tipo de medidor

Com base em análises de estudos técnico-econômicos oriundos de projeto piloto de avaliação da tecnologia de medição eletrônica, a partir de 2008 a concessionária em análise, passou a adquirir 100% (cem por cento) medidores eletrônicos monofásicos e, parcialmente, medidores eletrônicos polifásicos em função ainda de diferenças de preço em relação aos eletromecânicos. A partir do momento que os fabricantes ganharem em escala de produção e os preços dos medidores eletrônicos polifásicos tornarem-se mais atrativos, com certeza, a migração total será inevitável.

De forma geral, os motivos que estão levando as concessionárias a ampliarem a aplicação dos medidores eletrônicos, são os seguintes: medição de outras grandezas e funções; ganho na precisão; estabilidade metrológica; menor corrente de partida; independe do grau de inclinação; unidirecional; facilidade de detecção de fraude e facilidade de integração (conectividade).

Apesar dos medidores de watt-hora do tipo indução serem, ainda, os dispositivos mais utilizados para a medição de energia ativa, há uma tendência mundial de migração para os eletrônicos.

2.8 - Considerações Finais

Do exposto, o objetivo deste capítulo foi apresentar uma revisão bibliográfica dos temas relevantes ao desenvolvimento da pesquisa.

Primeiramente, ao analisar publicações, nas quais foram estudados os comportamentos de medidores de energia elétrica, sujeitos às formas de onda de correntes e tensões com distorções harmônicas, observou-se que os medidores de energia elétrica, podem apresentar erros de medição consideráveis, quando estão operando nessas condições, havendo a necessidade de uma análise experimental mais aprofundada do tema, justificando-se a proposta desta dissertação, uma vez que os desequilíbrios de tensões são também pouco investigados, principalmente para o caso dos equipamentos eletrônicos.

Posteriormente, uma introdução dos itens relacionados à qualidade de energia elétrica, conceituando os fenômenos mais encontrados com suas origens e características e assim definindo as conseqüências que podem vir a causar no sistema elétrico. Em seguida, fez-se uma análise resumida dos fenômenos que são analisados na dissertação: distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão, fenômenos estes amplamente estudados nas referências bibliográficas.

Após um resumo dos fenômenos que serão analisados quando aplicados aos medidores eletrônicos, foram apresentados o princípio de funcionamento e, as características técnicas e construtivas deste tipo de medidor de energia elétrica ativa, equipamento responsável pelo registro do maior montante de kWh faturado nas unidades consumidoras integrantes da área de concessão da empresa de referência. Destacou-se ainda, a regulamentação metrológica e os aspectos normativos vigentes para os medidores eletrônicos, bem como, o sistema de tarifação da energia elétrica, situando-se neste contexto, os equipamentos que serão objeto de análise neste trabalho.

Foi apresentado também, o cenário mundial e de mercado das tendências em relação à medição de energia elétrica, onde se verifica uma crescente tendência na aplicação de sistemas automatizados empregando medidores eletrônicos nos vários seguimentos de consumo, culminando com os interesses e propósitos da presente dissertação que é a investigação experimental do comportamento desse tipo de equipamento frente aos fenômenos de distorções harmônicas e desequilíbrios que se apresentam nos sistemas elétricos.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DE ENSAIOS E ESTRUTURA LABORATORIAL

3.1 - Introdução

Antes do início dos procedimentos laboratoriais foi necessária uma análise do parque de equipamentos instalados na concessionária de referência para a seleção dos medidores de energia a serem ensaiados, assim como, para a seleção das formas de onda distorcidas que serão aplicadas no sistema.

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de seleção dos medidores, as suas características, parâmetros e as informações relevantes à pesquisa, quais sejam: a quantidade, a representatividade no montante de energia elétrica registrada e o consumo médio mensal de cada família selecionada.

A escolha das formas de onda utilizadas nos ensaios se deu a partir de tensões e correntes coletadas em um sistema real de distribuição, em consumidores com características de cargas típicas industriais, comerciais, rurais e residenciais.

Apresentam-se ainda a estrutura laboratorial admitida para medições e comparações, assim como, os procedimentos e protocolos utilizados nos ensaios.

3.2 - Análise da População e Seleção de Medidores

Esta etapa consistiu fundamentalmente da análise quantitativa dos dispositivos medidores de energia com relação a sua contribuição no montante total do consumo aferido pela empresa. A análise foi baseada nos arquivos de banco de dados (BD) fornecidos pela concessionária de distribuição de energia elétrica, envolvendo o cadastro de medidores, o cadastro de consumidores, e o consumo registrado por unidade consumidora, considerando-se um período de 14 (quatorze) meses de registros. O primeiro passo foi a determinação e catalogação da população de famílias de medidores instalados, a sua distribuição em zonas urbana e rural, e o montante do consumo registrado relacionado com os mesmos em valores percentuais do montante total.

Uma vez efetuado o processo de coleta da população de medidores em função de seu tipo (indução e eletrônico) e do sistema de distribuição (monofásico, bifásico e trifásico), analisou-se o impacto efetivo de cada família de medidores em sua categoria e no arranjo global da empresa, com relação à quantidade de unidades instaladas no parque e o montante do consumo médio aferido pelos mesmos.

A Tabela 3.1 apresenta o resumo dos dados quantitativos totalizados do parque de medidores em operação na área de concessão da empresa de referência e os respectivos consumos médios para os tipos indução, aplicados nos sistemas de distribuição monofásicos, bifásicos e trifásicos e, para os medidores eletrônicos trifásicos.

Tabela 3.1 - Resumo dos dados quantitativos totalizados da população de medidores e do seu consumo extraídos do BD da empresa de referência

Tipos de Medidores	Quantidade	% Medidores do Total	Somatória Total kWh Médio (Consumo)	% kWh Total (Consumo)
Eletrônicos	8.132	0,43	518.597.797,28	55,39
Indução Monofásicos	849.046	45,07	105.538.512,92	11,27
Indução Bifásicos	790.211	41,95	132.961.106,82	14,20
Indução Trifásicos	227.488	12,08	179.244.033,65	19,14
Total	1.874.877	99,52	936.341.450,67	100,00

Os valores médios e o desvio padrão para o consumo total da categoria e para o fator kWh unitário (percentual do kWh total, da média dos 14 meses, dividido pelo número de equipamentos em análise), foram calculados para cada caso com o objetivo de determinação das famílias de interesse para análise experimental/laboratorial. O princípio de escolha consistiu em selecionar inicialmente todas as famílias que possuíssem consumo maior que a média calculada para a sua categoria. Posteriormente, a análise concentrou-se em selecionar todas as famílias que possuíssem o fator kWh unitário maior que a média mais um desvio padrão, calculado para a sua categoria. Exceções a esta regra foram ainda estabelecidas, consistindo do descarte de certas famílias em função de se tratarem de equipamentos obsoletos e/ou em fase de substituição do parque de medidores da empresa, e, ainda, da inserção de outras famílias em função de plano de expansão/atualização das mesmas no parque.

Após extensa análise quantitativa, e, com a consolidação dos Bancos de Dados fornecidos pela empresa, obtiveram-se de forma validada as informações referentes ao montante dos medidores relacionados com sua categoria (tipo indução

e eletrônico), com seu sistema de distribuição (monofásicos, bifásicos, trifásicos) e com seu consumo, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Assim, apesar dos medidores eletrônicos representam apenas 0,43% dos equipamentos instalados no parque da empresa, são responsáveis pelo registro de 55,39% do consumo kWh global (média mensal, considerando período de quatorze meses analisados). Por outro lado, os medidores do tipo indução monofásicos representam 45,07% do montante total do parque de medidores instalados, contudo são responsáveis por registrar apenas 11,27% do consumo total médio mensal. Os medidores do tipo indução bifásicos representam 41,95% do parque de medidores da empresa e são responsáveis pelo registro de 14,20% do consumo total médio mensal. Já os medidores do tipo indução trifásicos representam 12,08% do parque de medidores da empresa e são responsáveis pelo registro de 19,14% do consumo total médio mensal.

Finalmente, em função dos resultados obtidos, realizou-se a seleção dos medidores que são significativos e representativos, em termos percentuais, em relação ao montante de consumo registrado pela empresa, para serem analisados em laboratório, envolvendo os medidores tipo indução bifásicos e trifásicos, e, medidores eletrônicos (trifásicos).

Entretanto, neste trabalho, apresentar-se-á os resultados e análises para os **medidores eletrônicos trifásicos**, aplicados nas unidades consumidoras de elevado consumo, os quais são os de maior importância para a empresa concessionária de referência.

A Tabela 3.2 apresenta as cinco famílias de medidores eletrônicos trifásicos selecionadas para serem avaliadas nos ensaios laboratoriais.

Tabela 3.2 - Famílias de medidores eletrônicos trifásicos selecionadas para os ensaios laboratoriais

Família	Quantidade	kWh médio	% kWh dos Eletrônicos	% kWh Total dos Eletrônicos
I	1.118	79.972.881	15,42	8,54
II	761	12.476.554	2,41	1,33
III	1.111	115.615.661	22,29	12,35
IV	372	39.023.650	7,52	4,17
V	31	182.933.429	35,28	19,54
Selecionados	3.393	430.022.175	82,92	45,93
Total	8.132	518.597.797	100,00	55,39

Para cada amostra selecionada, foram adquiridos três medidores (três repetições), possibilitando a obtenção de uma média de erro para cada uma destas amostras, considerando-se os perfis de tensões e correntes a serem ensaiados.

3.3 - Arranjo de Medição para os Ensaios de Laboratório

A Figura 3.1 apresenta um diagrama geral de blocos referente ao arranjo proposto para a realização dos ensaios experimentais dos medidores eletrônicos selecionados para ensaios com distorções harmônicas de tensões e correntes, e, desequilíbrios de tensões (3% e 5%), conforme metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho.

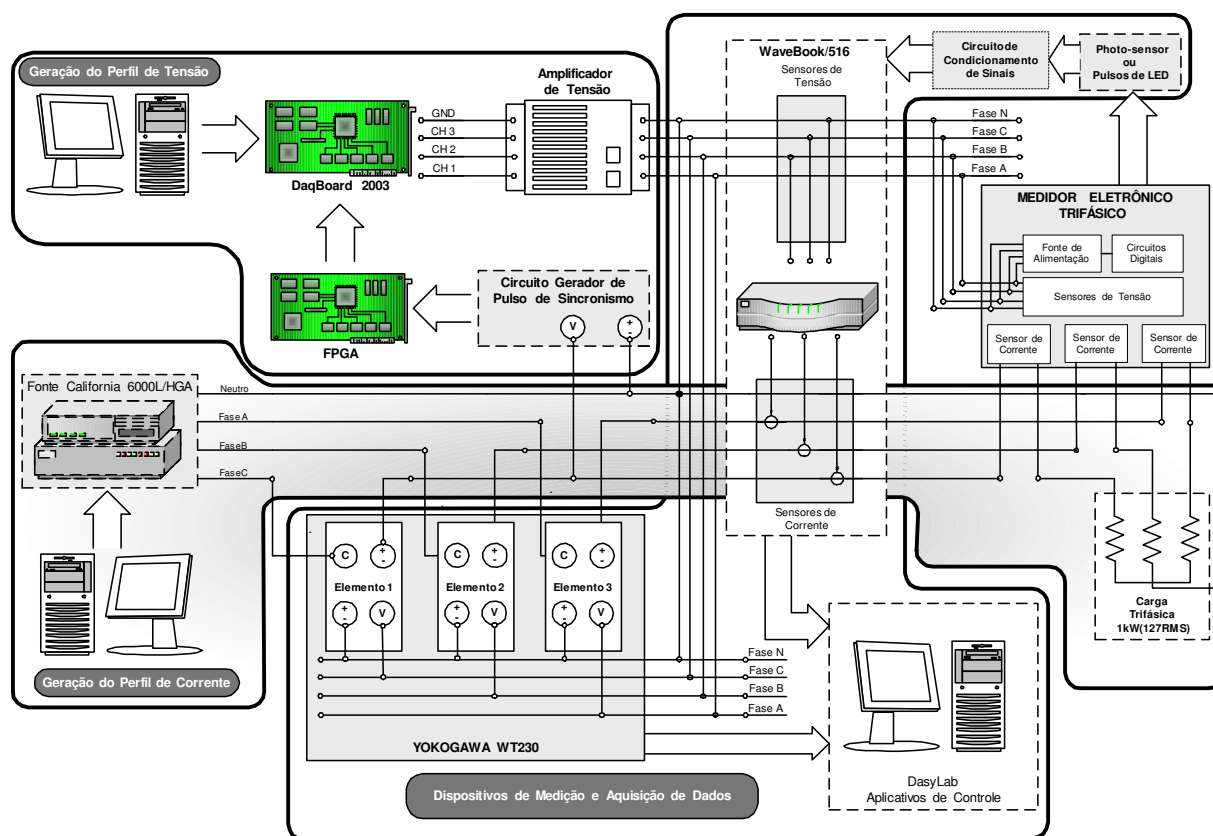


Figura 3.1 - Diagrama de blocos do arranjo laboratorial proposto para ensaios dos medidores eletrônicos trifásicos

A configuração de dispositivos empregada nos ensaios experimentais para os medidores eletrônicos pode ser dividida em quatro categorias principais:

- Dos dispositivos envolvidos na geração dos perfis de corrente;
- Dos dispositivos envolvidos na geração dos perfis de tensão;

- Dos dispositivos envolvidos na aquisição dos dados necessários para a determinação do consumo em watt-hora pelo dispositivo padrão e pelos demais métodos de cálculo utilizados;
- Dos dispositivos medidores a serem ensaiados.

3.3.1 - Geração dos Perfis de Corrente

A metodologia empregada consistiu em aplicar uma forma de onda de tensão pré-determinada à uma carga resistiva e injetar a corrente resultante nos sensores de corrente dos medidores sob ensaio. Desta maneira, consegue-se impor um perfil de forma de onda de corrente para o medidor sob teste através da imposição de uma forma de onda de tensão controlada.

Para a geração dos perfis de corrente, a serem submetidos nos sensores de corrente dos medidores nos ensaios experimentais, utilizou-se uma fonte de alimentação trifásica modelo 6000L acoplada a um dispositivo gerador de formas de onda HGA (ambos da Califórnia Instruments) e uma carga resistiva trifásica com ponto comum.

O dispositivo HGA é capaz de gerar formas de onda de referência para a fonte de alimentação à partir das informações das componentes harmônicas (amplitudes e fases) da forma de onda desejada. Considerando a componente fundamental com frequência de 60Hz, o dispositivo é capaz de representar formas de onda com componentes harmônicas contemplando até a quinquagésima ordem.

A configuração do perfil de tensão é realizada por meio de software, em sincronismo com a fonte Califórnia Instruments, em função da leitura de um banco de dados contendo todos os valores de amplitudes e fases das componentes harmônicas da forma de onda de interesse para o ensaio.

3.3.2 - Geração dos Perfis de Tensão

A metodologia empregada consistiu inicialmente na reconstrução da forma de onda desejada, no plano discreto considerando uma taxa de amostragem de 50kHz e 833 pontos por período, a partir dos dados de amplitudes e fases provenientes da decomposição harmônica da forma de onda de tensão de interesse (coletada em ramais de distribuição da concessionária de referência). Aplicou-se a transformada

de deslocamento discreto no conjunto de pontos obtidos para um período da forma de onda.

Considerando deslocamentos de fase de 240° e 120° graus obtiveram-se as demais fases para a composição de um sistema trifásico, como mostra a Figura 3.2.

Posteriormente, os pontos discretos com amplitudes em tensão são codificados utilizando a representação binária com palavras de 12 bits, conforme a Figura 3.3.

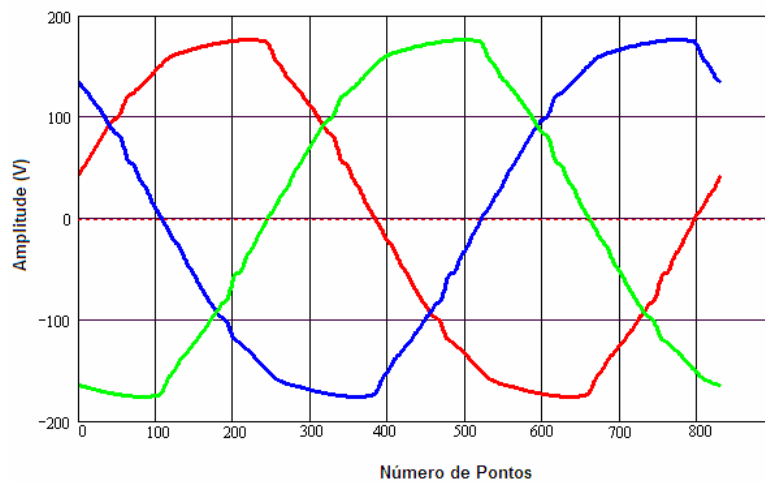


Figura 3.2 - Exemplo de forma de onda de tensão trifásica reconstruída no plano discreto considerando taxa de amostragem de 50kHz e 833 pontos por período

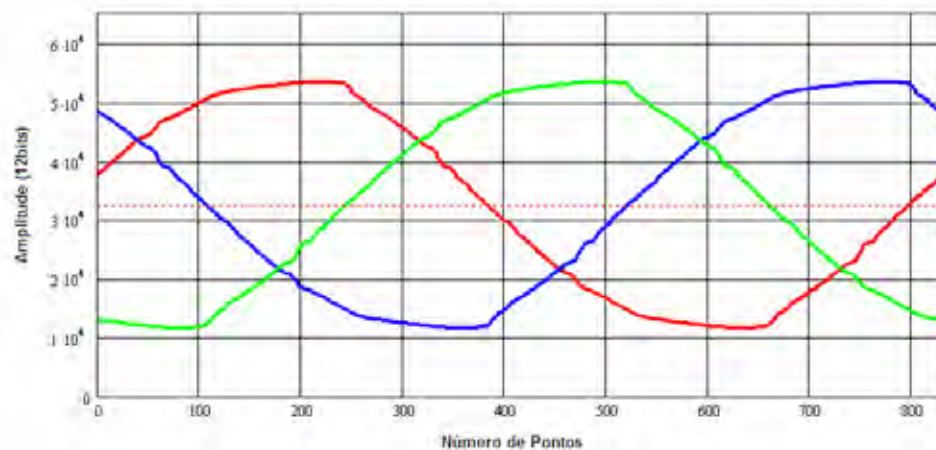


Figura 3.3 - Exemplo de codificação binária das formas de onda de tensão trifásica reconstruída no plano discreto, considerando taxa de amostragem de 50kHz e 833 pontos por período

Assim, as formas de onda discretas codificadas no padrão binário, referentes a cada fase, podem ser implementadas através de conversores do tipo digital/analógico presentes na placa DaqBoard 2003 (Iotech), em formas de onda analógicas com amplitudes de tensão de no máximo 20V de pico a pico.

De acordo com a proposta formulada para o presente trabalho de pesquisa, ou seja, análise dos erros de medição de equipamentos de kWh sujeitos à distorções harmônicas de tensões e correntes distintas (com amplitudes e conteúdos harmônicos distintos), e, considerando-se que para tal análise ter-se-ia que alimentar de forma independente as unidades sensores de tensões e correntes dos medidores de energia elétrica, houve a necessidade de desenvolvimento e implementação de um amplificador de sinais de tensões.

Com o propósito de atender a demanda da proposta, ficou estabelecido que uma fonte programável (Califórnia Instruments) fosse responsável pela imposição de quaisquer formas de onda de corrente (com diferentes perfis, distintas distorções harmônicas) nos sensores de corrente dos medidores a serem ensaiados, conforme citado no item anterior.

Neste contexto, admitindo-se a fonte Califórnia alimentando uma carga puramente resistiva, todos os conteúdos harmônicos pré-programados estarão presentes nas correntes drenadas e em circulação pelos sensores de corrente dos medidores sob ensaio.

Por outro lado, considerando-se a limitação da amplitude dos sinais gerados para as tensões, tornou-se necessário o acoplamento de um amplificador linear de tensão, desenvolvido para suportar as ampliações dos sinais harmônicos selecionados.

Considerando que todos os medidores pré-selecionados são para o padrão de alimentação em 127V (eficaz), foi imposto para o projeto do amplificador que, para qualquer nível de distorção harmônica determinada para as tensões, o amplificador deve manter em sua saída um valor eficaz de 127V, para alimentação dos sensores de tensão dos medidores sob ensaios. Adicionalmente, considerando-se as impedâncias típicas dos sensores de tensão dos medidores sob análise, ficou estabelecida uma potência máxima de saída para o amplificador em torno de 20W. A Figura 3.4 apresenta fotos do amplificador desenvolvido.

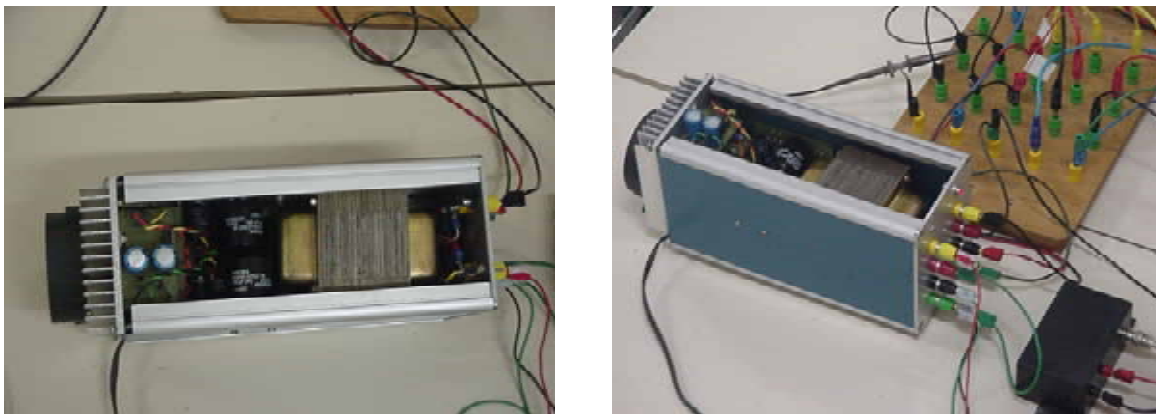


Figura 3.4 - Fotos do amplificador implementado

A base utilizada na conversão está relacionada com o ganho imposto pelo amplificador nas formas de onda geradas pelo dispositivo DaqBoard 2003, de maneira que as formas de onda de tensão na saída do amplificador sempre apresentem um valor eficaz igual à 127V, independentemente das ordens harmônicas que compõe o sinal de tensão.

Desta forma, teve-se a necessidade da implementação de um amplificador de tensão que pudesse ser também pré-programado, em função da programação de seus sinais de entrada obtidos de uma placa de geração de sinais.

A maneira com que os pontos discretos são convertidos em sinais analógicos pela placa DaqBoard 2003 é determinada por uma lógica de controle adicional de sincronismo com a fonte Califórnia Instruments, implementada em um dispositivo lógico programável do tipo FPGA (Field Programmable Gate Array Device) da família SPARTAN-II (Xilinx).

Deste modo, as formas de onda analógicas geradas em cada canal da placa DaqBoard 2003 devem ser amplificadas para alcançar os níveis de tensão e corrente requeridos para emular a existência de um perfil de tensão específico para os medidores a serem ensaiados.

Como as formas de onda de tensão e corrente injetadas nos elementos de medição dos dispositivos medidores, para compor o perfil de carga desejado, são geradas de maneira independente, a existência do mecanismo de sincronismo entre estas formas de onda de corrente e tensão, através do dispositivo FPGA, se fez necessária.

A metodologia de sincronismo empregada consiste em monitorar a forma de onda de corrente imposta (pela fonte Califórnia) e determinar o exato instante da passagem do semiciclo negativo para o semiciclo positivo, ou seja, o cruzamento por zero, e, a partir deste instante, sincronizar o deslocamento de fase entre a forma de onda de corrente e tensão requerido pelo perfil de carga empregado (defasagem das formas de onda instantâneas de tensão e corrente, de interesse para os ensaios laboratoriais). O dispositivo FPGA monitora este instante de transição para acionar a placa de conversores D/A (DaqBoard 2003) com um trem de pulsos de “clock”, controlando a geração das formas de onda de maneira síncrona, mostrados na Figura 3.5.

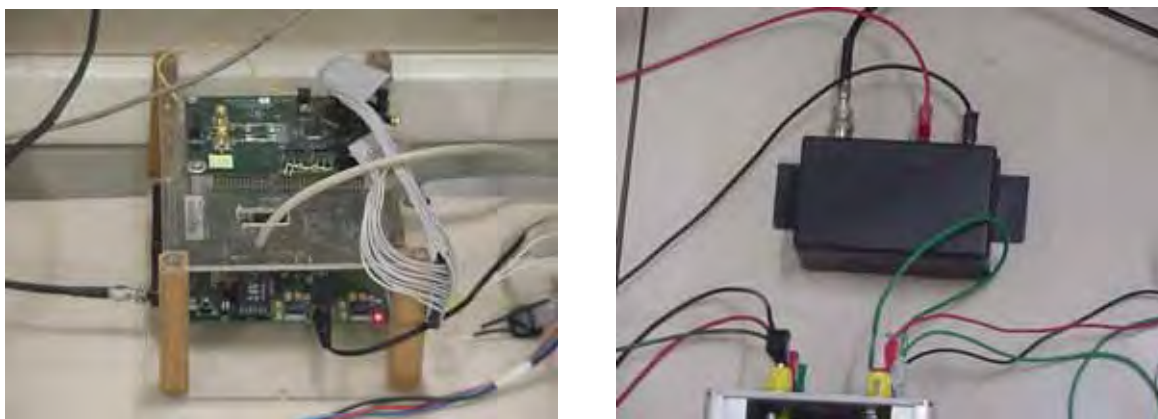


Figura 3.5 - Circuitos de sincronismo implementados, (a) FPGA Xilinx e (b) Sincronismo via detecção de passagem por zero

Portanto, a configuração do perfil de tensão é efetuada por meio de software através da leitura de um banco de dados contendo os valores discretos dos pontos que compõe as formas de onda e gravação dos mesmos na memória da DaqBoard 2003, para cada caso admitido para ensaio.

3.3.3 - Sistemas de Aquisição de Dados e Determinação de Consumo

Para os medidores eletrônicos, em virtude de sua concepção, a informação referente ao consumo watt-hora está disponível de várias maneiras de acordo normas de fabricação e a capacidade do equipamento. De acordo com a norma ABNT/NBR14519:2000, esta informação deve estar presente visualmente de forma proporcional a uma constante (K_e), através de sinalizações de “led’s” ou caracteres em um visor do tipo LCD, e/ou, por meio de uma saída serial de dados obedecendo

a um protocolo de comunicação específico, através da porta de comunicação óptica ou de um porto de saída determinado.

Considerando a diversidade de famílias selecionadas para serem submetidas aos ensaios de distorções harmônicas e desequilíbrios, conforme a Tabela 3.2, e as características funcionais de cada equipamento, determinou-se que a metodologia de coleta de informação referente ao consumo watt-hora registrado pelo medidor seria baseada nas sinalizações do “led” na maioria dos casos, e, através da porta de comunicação óptica nos casos restantes.

Desta maneira, com o objetivo de efetivar a implementação da metodologia adotada, quatro das cinco famílias dos medidores eleitos tiveram seus sinais de “led”, responsáveis pela informação do kWh (energia elétrica ativa), enviados para um acoplador ótico 4N25. É importante salientar que a modificação efetuada não afeta de forma alguma o funcionamento do circuito lógico do equipamento, e ainda propicia um estágio de isolamento, permitindo uma conexão segura e isolada entre os medidores e o sistema de aquisição de dados.

A Figura 3.6 apresenta os pontos de conexão das entradas e as saídas do acoplador ótico utilizado. O canal de entrada ocupa os nós do circuito ocupado pelo “led”, e o canal de saída apresenta a imagem da informação da entrada isolada da massa do medidor.

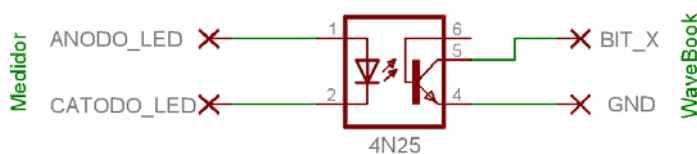


Figura 3.6 - Pontos de conexão do acoplador ótico utilizado na modificação

Considerando a limitação no número de canais analógicos disponíveis no sistema de aquisição de dados e a idéia de realizar múltiplos ensaios simultâneos, optou-se por utilizar o porto de comunicação digital no padrão TTL do sistema de aquisição para coletar as informações provenientes dos medidores através dos acopladores óticos.

Assim, o desenvolvimento e a implementação de uma interface de conexão entre a porta digital do sistema de aquisição e o sinal proveniente dos medidores fez-se necessária. A Figura 3.7 apresenta o circuito esquemático e a conexão com os equipamentos envolvidos. A interface foi prevista para possuir 12 canais de

entradas digitais, com resistores internos de polarização do tipo “pull-up”, e, o padrão do sinal adotado foi o TTL, porém, operando com lógica do tipo “ativo-baixo”.

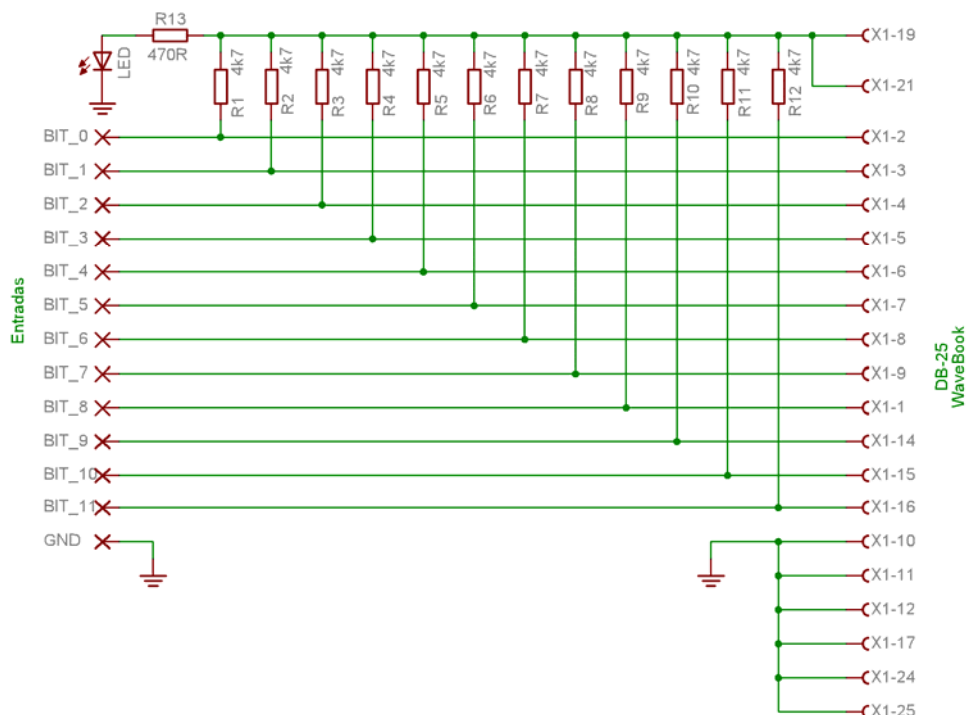


Figura 3.7 - Circuito esquemático da interface de conexão entre a porta digital do sistema de aquisição e o sinal proveniente dos medidores pelo acoplador ótico

Portanto, o sistema de aquisição atualizado poderia gerenciar um ensaio experimental de até 12 medidores ao mesmo tempo.

Entretanto, analisando a forma de onda da corrente que flui através do ramo de alimentação de tensão dos medidores eletrônicos, constatou-se que na maioria dos equipamentos a mesma é composta pela somatória das formas de onda de correntes drenadas pelos sensores de tensão e pela fonte de alimentação interna. A forma de onda da corrente drenada pela fonte de alimentação interna possui amplitude muito maior que a exigida pelos sensores de tensão, os quais são basicamente do tipo divisores resistivos, e, portanto, preponderante em relação à corrente exigida pelos sensores.

Assim, um fator limitante que deve ser analisado na implementação de um ensaio experimental envolvendo vários medidores ao mesmo tempo é a máxima corrente que pode ser suprida pelo estágio do amplificador de tensão desenvolvido, em cada canal, sem afetar o seu correto funcionamento. Especificamente, este limite está relacionado com a proteção de sobre-corrente configurada para um valor de pico variando de 70mA até 150mA, de acordo com o tempo de existência deste esforço.

Para ilustrar o problema, a Figura 3.8 apresenta as formas de onda de corrente e tensão de alimentação em uma das fases de alguns dos medidores. Adicionalmente, os dados referentes aos medidores da família “V” não foram apresentados na Figura 3.8 devido ao fato de que sua fonte de alimentação possibilita conexão à rede externa, de forma independente dos sensores de tensão.

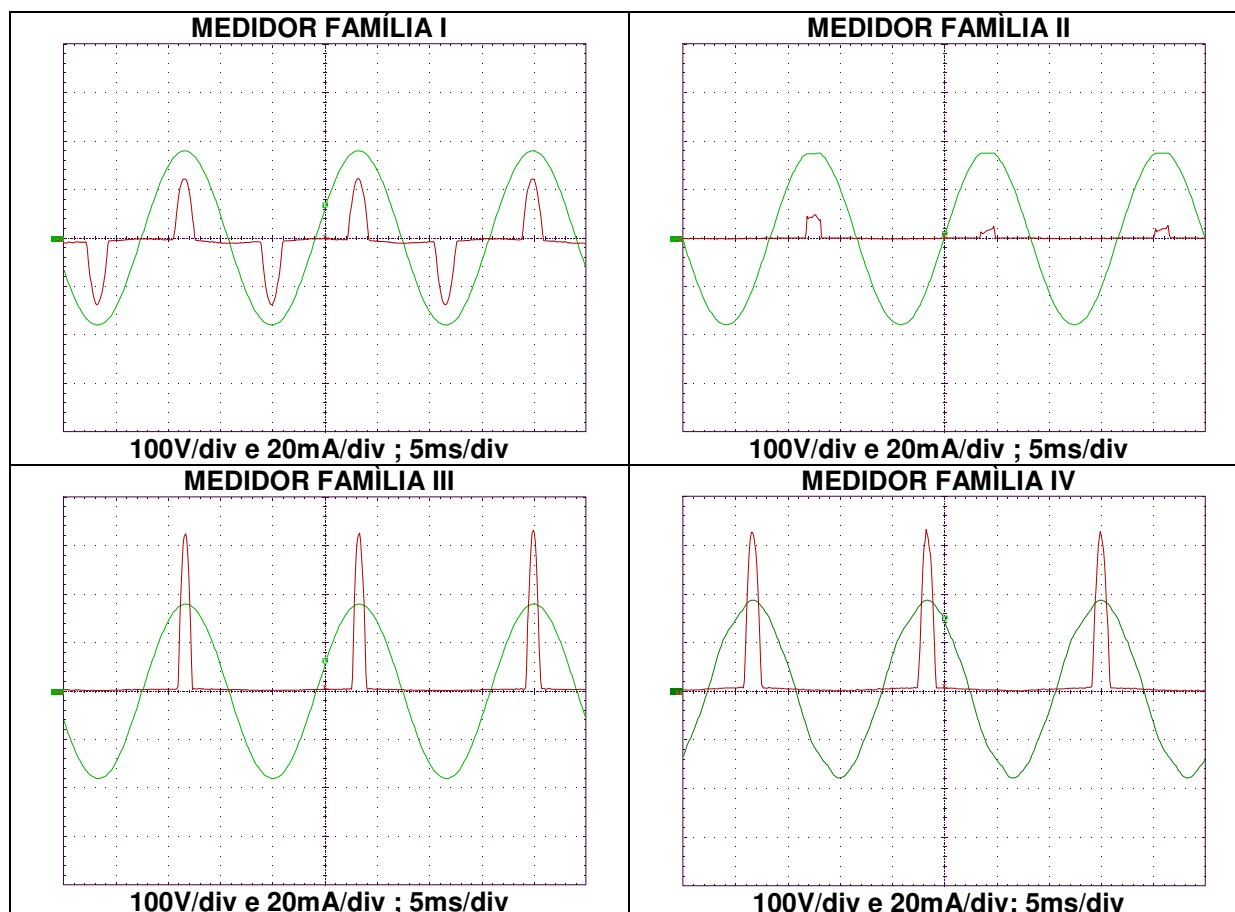


Figura 3.8 - Formas de onda de tensão e corrente de entrada dos medidores eletrônicos

Estes dados de esforços de corrente foram analisados para a criação dos conjuntos de amostras que poderiam ser ensaiadas ao mesmo tempo, de acordo com as amplitudes requeridas por cada família de medidores. A análise resultou na determinação de cinco conjuntos, os quais estão descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Arranjo dos conjuntos dos medidores para a realização dos ensaios experimentais

Conjunto	Nº de Amostras	Família do Medidor	Total de medidores ensaiados em conjunto
A	3	II	5
	2	III	
B	2	IV	2
C	3	V	4
	1	IV	
D	2	I	2
E	1	I	2
	1	III	

3.4 - Protocolo de Medição

Com relação aos procedimentos de “inicialização” dos ensaios, o tempo de espera entre um ensaio e outro no caso dos medidores eletrônicos está relacionado apenas com os procedimentos de troca de perfil, calibração dos sensores do sistema de aquisição e com a entrada em operação dos medidores em regime. Desta maneira, estipulou-se um protocolo de tempo de espera de 3 minutos, como referência para início dos ensaios.

Especificamente, dois aplicativos foram desenvolvidos para o ambiente DasyLab, um referente à calibração automática dos ganhos utilizados nos sensores de tensão e corrente do dispositivo WaveBook/516, e outro referente à determinação e registro do consumo em watt-hora através das metodologias propostas (integração, contagem de pulsos - led saída serial) e do valor padrão aferido pelo dispositivo Yokogawa WT230.

O aplicativo de calibração desenvolvido é utilizado sempre que as amostras sob ensaio são substituídas no set de medição, ou, quando da troca de perfis de distorções harmônicas sob análise, ou, quando do reinício das medições depois de determinado período de interrupção.

O aplicativo principal determina e registra o valor do consumo aferido no ensaio experimental em watt-hora através das metodologias propostas (indireta e direta) e o valor calculado pelo dispositivo Yokogawa WT230 (considerando como padrão de medição).

Dentre as informações disponíveis na tela principal estão: a codificação dos medidores em ensaios agrupados em conjuntos de até três equipamentos, o tempo decorrido de ensaio, a potência ativa em cada fase utilizada, os valores do consumo em watt-hora determinados pelo método de integração e o determinado pelo equipamento adotado como padrão (WT230). O número de pulsos (“led” kWh, ou, saída serial) detectados após o início do ensaio, o valor do consumo watt-hora resultante ao número de pulsos calculados de acordo com a constante K_e , para cada medidor ensaiado, também estão presentes na tela principal.

Uma vez o processo iniciado, o aplicativo funciona de maneira autônoma, determinando e registrando os dados de consumo em arquivos do tipo texto a cada 1 segundo, para posterior processamento pelas ferramentas de análise estatística. O tempo de registro dos dados foi de 1 (um) segundo, para uma boa resolução, uma vez que o sinal proporcional referente ao consumo watt-hora registrado pelos medidores eletrônicos possui uma constante de transformação (K_e) com valor bem menor que a constante de transformação dos medidores do tipo indução (K_d). O tempo de ensaio é de 1 (uma) hora, após os procedimentos de inicialização apresentados.

As Figuras 3.9 e 3.10 mostram as telas de configuração inicial e principal do aplicativo de gerenciamento automático de ensaios, onde o usuário pode visualizar as principais informações envolvidas na execução do ensaio experimental. Nota-se que o sistema foi previsto para poder gerenciar até quatro famílias, com três amostras ao mesmo tempo por família de medidor, totalizando 12 (doze) equipamentos ensaiados de forma conjunta.

Temperatura:	27.70
Familia 1:	
Familia 2:	
Familia 3:	
Familia 4:	
Medidor Código:	ELE-S2a-TV1-INDI2-D5P-X
Ke Meds. 1-2-3:	0,60
Ke Meds. 4-5-6:	0,30
Ke Meds. 7-8-9:	0,00
Ke Meds. 10-11-12:	0,20

Figura 3.9 - Tela de configuração das informações do sistema de gerenciamento automático desenvolvido para os ensaios dos medidores eletrônicos

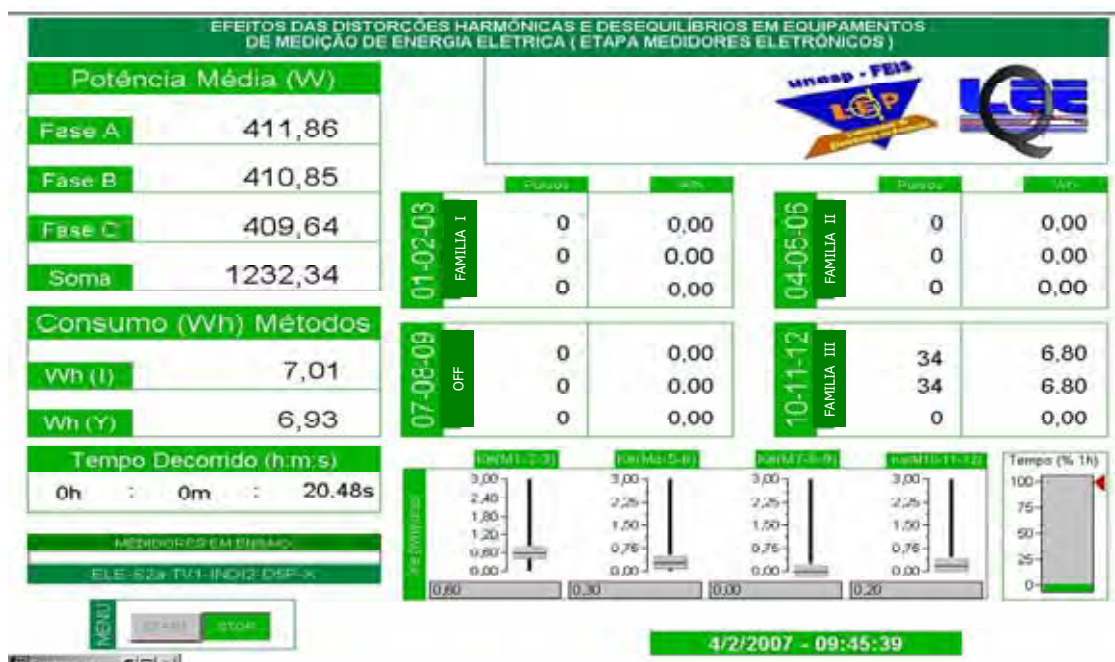


Figura 3.10 - Tela principal do sistema de gerenciamento automático desenvolvido para os ensaios dos medidores eletrônicos

A Figura 3.11 apresenta uma foto geral do arranjo de medição implementado, incluindo os equipamentos de medição e monitoração (Padrão Yokogawa e Sistema WaveBook), assim como, os medidores eletrônicos submetidos aos ensaios.



Figura 3.11 - Fotos do “arranjo geral de ensaio” para os medidores de energia eletrônicos

As Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 ilustram detalhes do arranjo de medição.



Figura 3.12 - Detalhe do “arranjo geral de ensaio” para os medidores de energia eletrônicos



Figura 3.13 - Detalhe do “arranjo geral de ensaio” para os medidores de energia eletrônicos, utilização de foto-célula.



Figura 3.14 - Detalhe de medidor com instalação de transdutor óptico para o “sinal de pulso” de kWh

3.5 - Seleção das Formas de Ondas

3.5.1 - Perfis de Tensão e Corrente para Sistema Equilibrado

Na Tabela 3.4 são apresentadas as nomenclaturas das formas de onda de tensões aplicadas nos ensaios trifásicos, com seus respectivos percentuais de distorções. As nomenclaturas das formas de onda de corrente para os ensaios trifásicos, com os percentuais das distorções harmônicas total de cada forma de onda analisada, são mostradas na Tabela 3.5..

Tabela 3.4 - Formas de onda de tensões selecionadas

Nomenclatura	Tipo de Consumidor	DHTV
TV1	Comercial	3,02
INDV1	Industrial	4,76
INDV2	Industrial	1,89
RUV2	Rural	2,86
RUV3	Rural	2,49

Tabela 3.5 - Formas de onda de correntes selecionadas

Nomenclatura	Tipo de Consumidor	DHTI
TRI1	Comercial	46,80
INDI1	Industrial	18,40
INDI2	Industrial	4,46
RUI2	Rural	7,18
RUI3	Rural	7,54

As formas de onda para correntes e tensões aplicadas aos ensaios dos medidores eletrônicos trifásicos, considerando-se uma ampla diversidade de espectros harmônicos, são apresentadas nas Figuras de 3.15 até 3.40. As combinações foram compostas por cruzamento dos perfis, utilizando-se de todos os perfis de tensão e corrente disponíveis, considerando a existência do par tensão-corrente V_0 e I_0 padrão puramente senoidal.

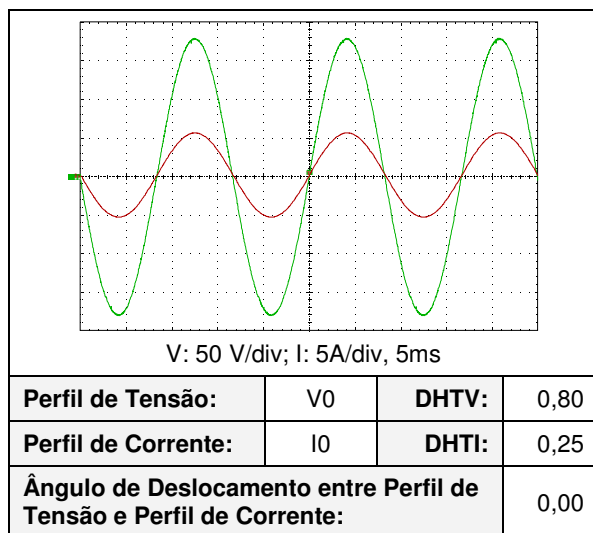


Figura 3.15 - Formas de onda referentes ao perfil V0-I0

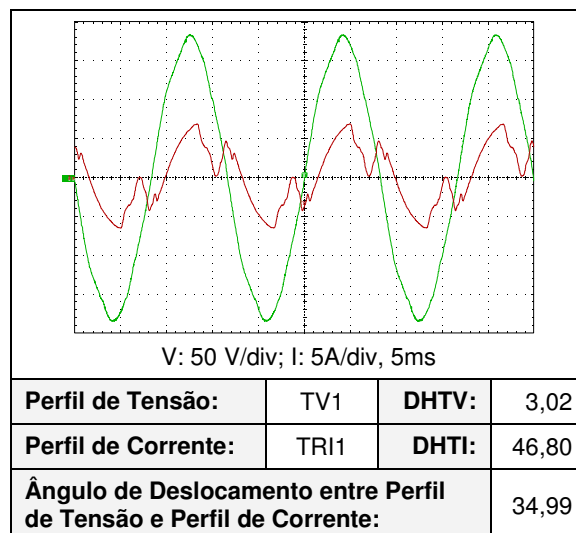


Figura 3.16 - Formas de onda referentes ao perfil TV1-TRI1

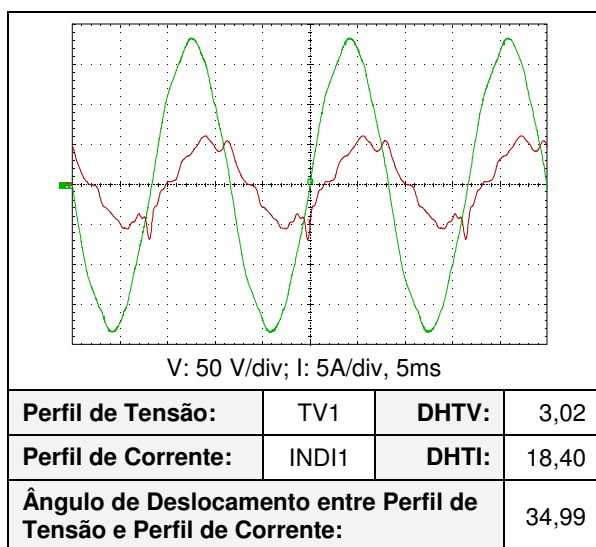


Figura 3.17 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI1

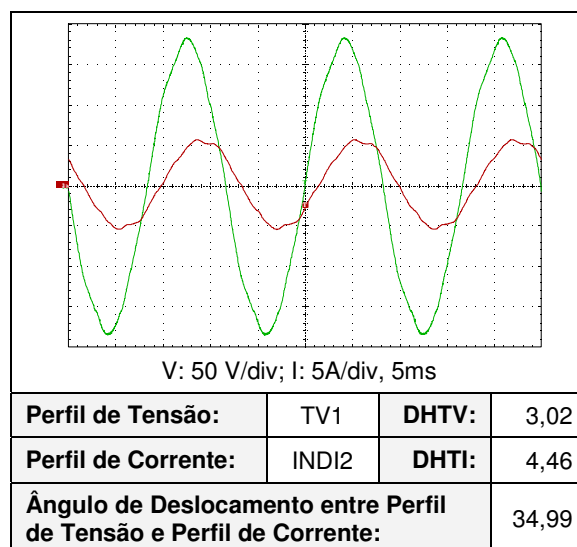


Figura 3.18 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI2

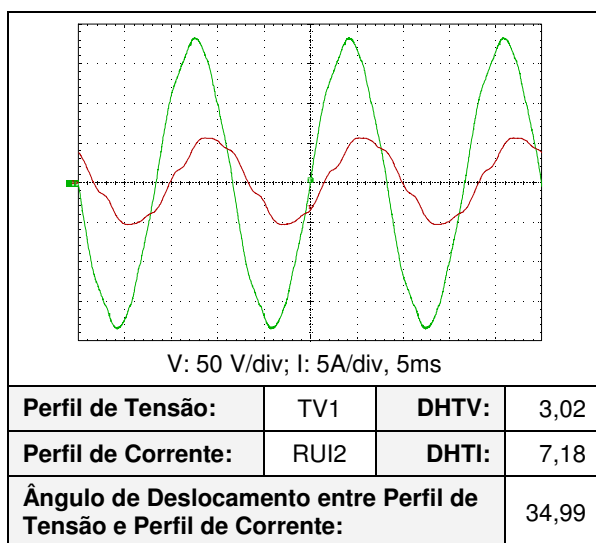


Figura 3.19 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-RUI2

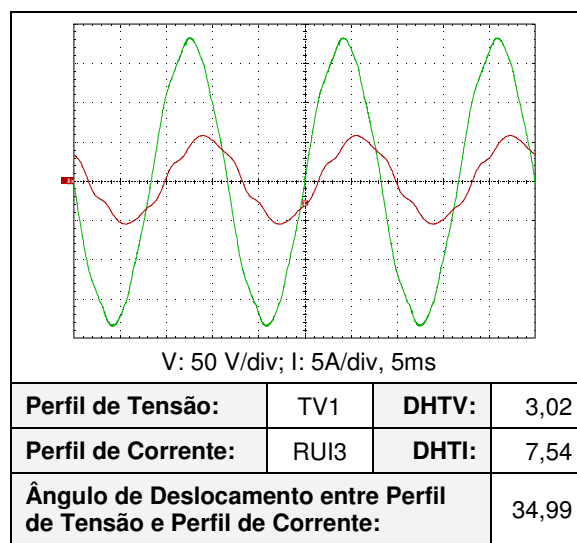


Figura 3.20 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-RUI3

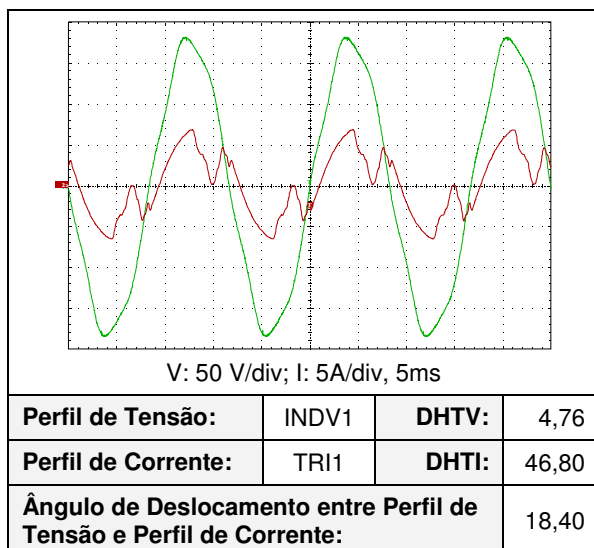


Figura 3.21 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-TRI1

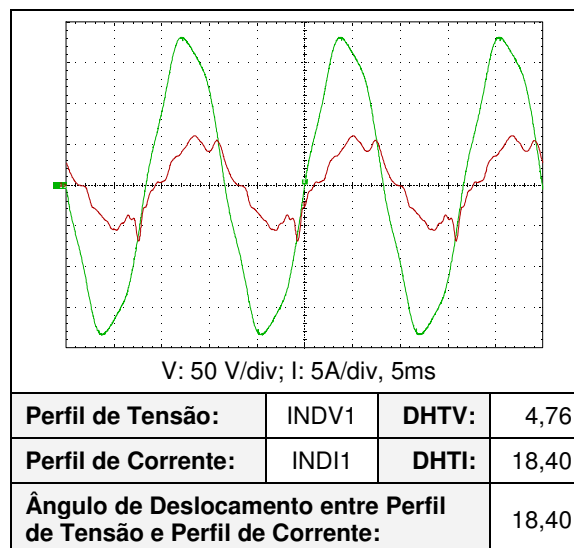


Figura 3.22 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-INDI1

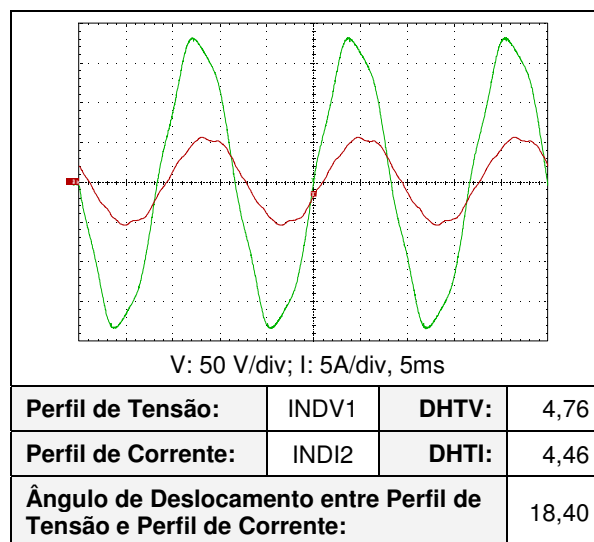


Figura 3.23 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-INDI2

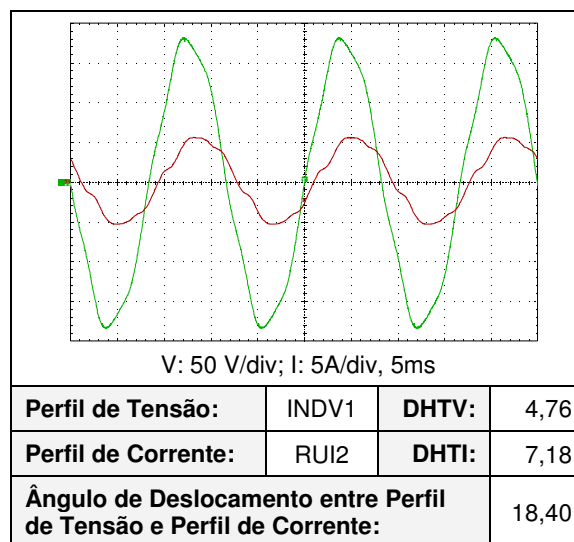


Figura 3.24 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-RUI2

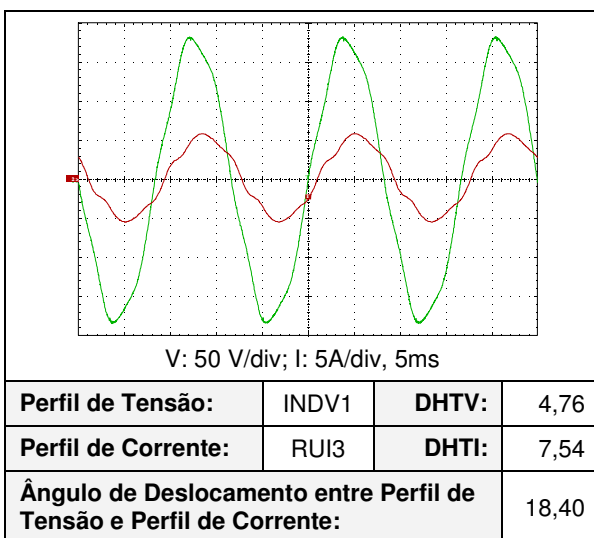


Figura 3.25 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-RUI3

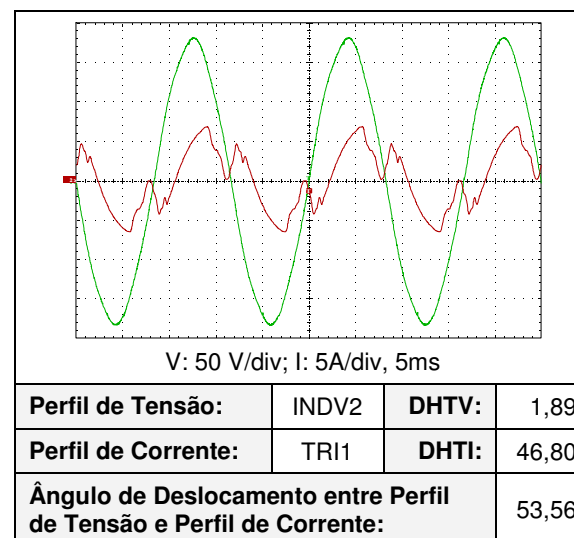


Figura 3.26 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-TRI1

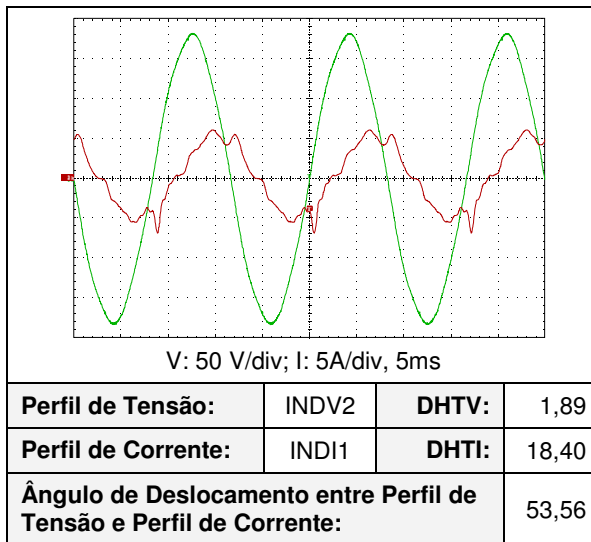


Figura 3.27 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-INDI1

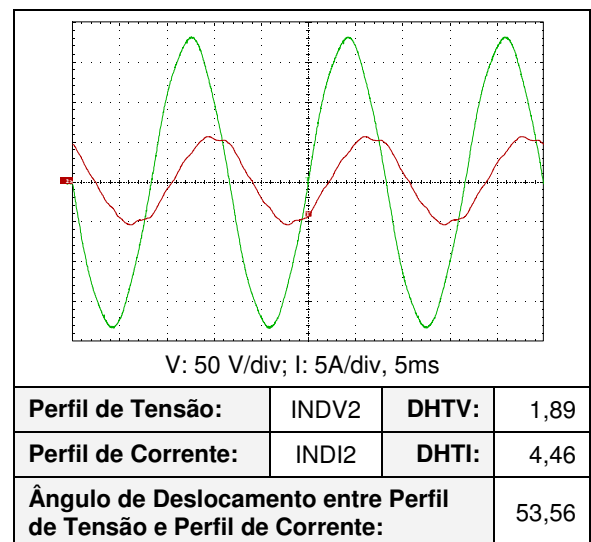


Figura 3.28 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-INDI2

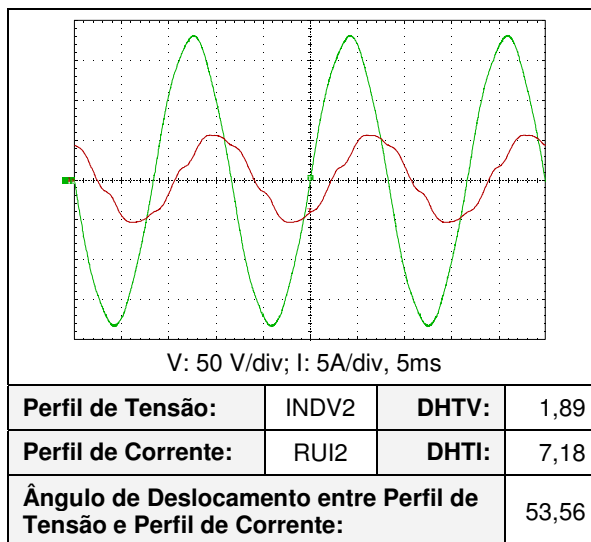


Figura 3.29 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-RUI2

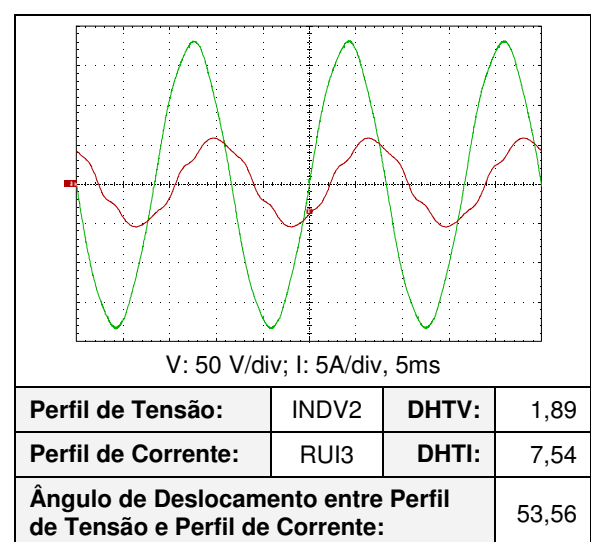


Figura 3.30 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-RUI3

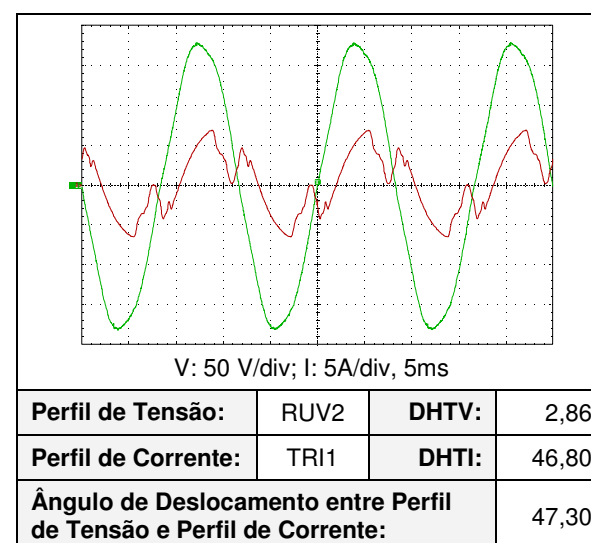


Figura 3.31 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-TRI1

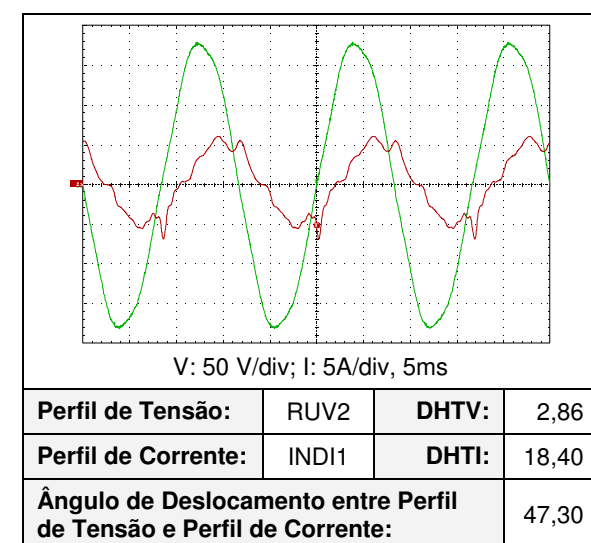


Figura 3.32 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-INDI1

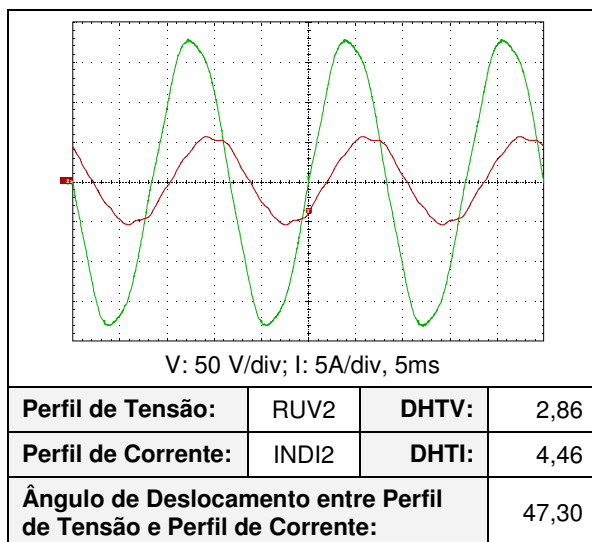


Figura 3.33 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-INDI2

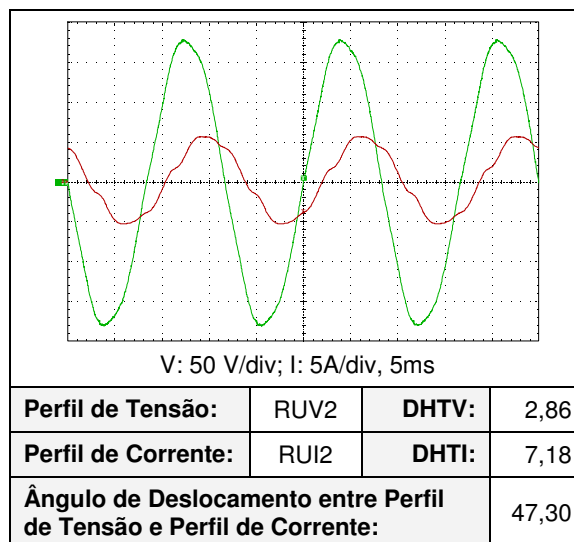


Figura 3.34 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-RUI2

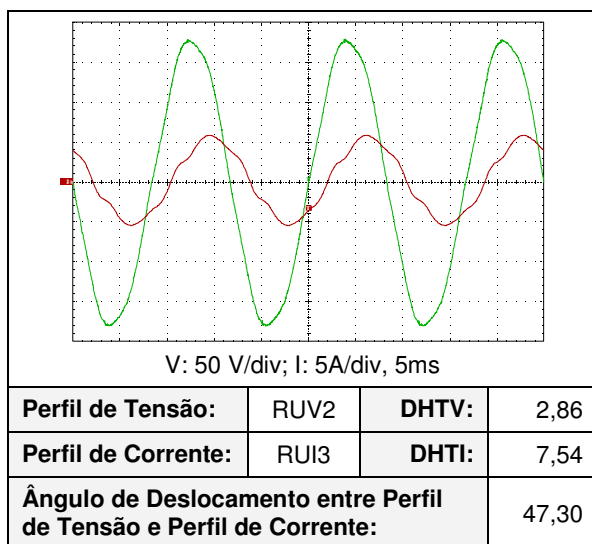


Figura 3.35 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-RUI3

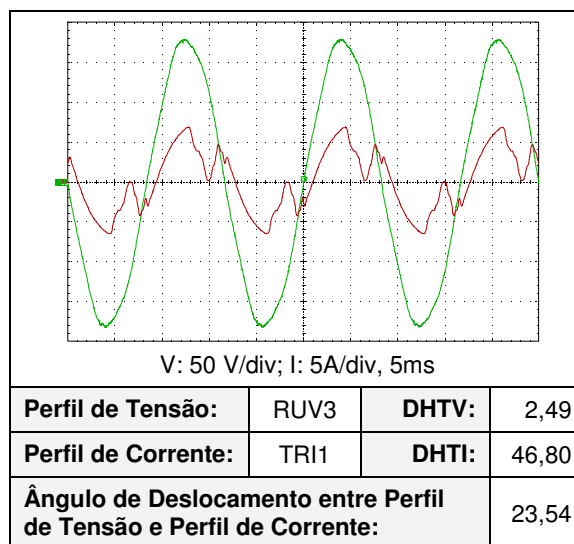


Figura 3.36 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-TRI1

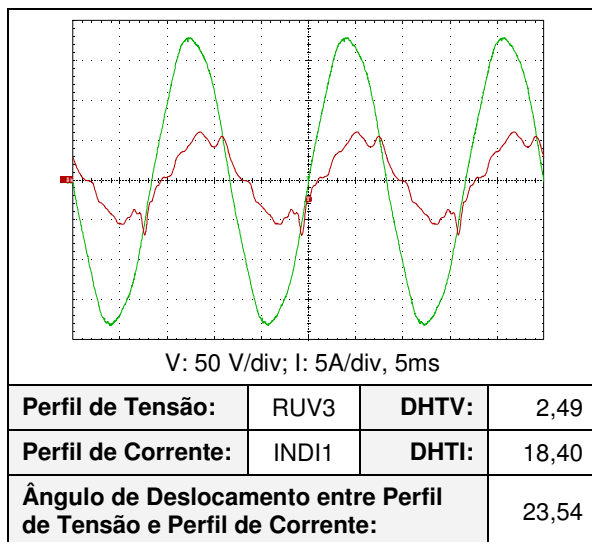


Figura 3.37 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-INDI1

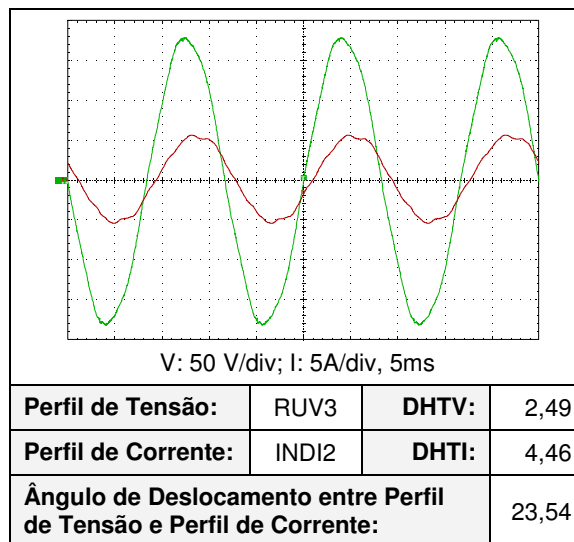


Figura 3.38 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-INDI2

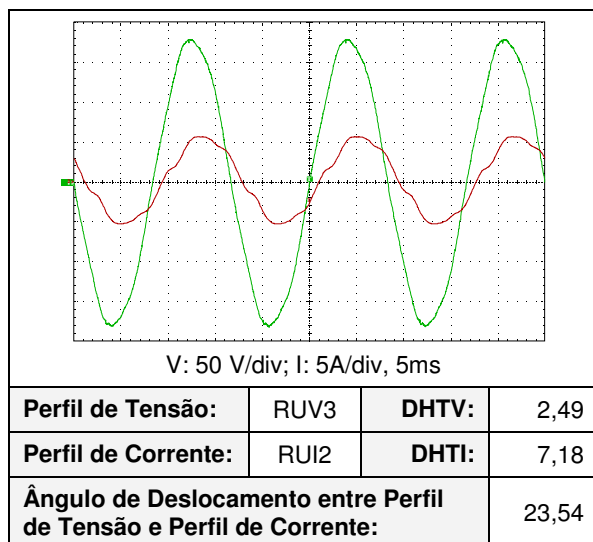


Figura 3.39 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-RUI2

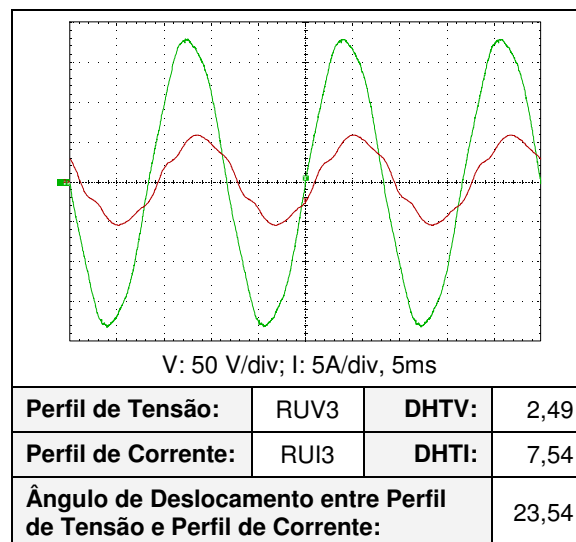


Figura 3.40 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-RUI3

3.5.2 - Perfis de Tensão e Corrente para Sistema Desequilibrado

Admitiu-se um número limitado de perfis para ensaios com desequilíbrios de 3% e 5%, estabelecendo-se 11 (onze) diferentes cenários para experimentação, incluindo-se o caso puramente senoidal e desequilibrado, conforme Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Pares tensão-corrente para análises com desequilíbrios (3% e 5%)

NOMENCLATURA DOS PERFIS V-I
V0-I0
TV1-TRI1
INDV1-TRI1
INDV2-TRI1
RUV2-TRI1
RUV3-TRI1
TV1-INDI1
INDV1-INDI1
TV1-INDI2
RUV3-INDI2
INDV1-RUI3

As formas de onda para correntes e tensões aplicadas aos ensaios dos medidores eletrônicos trifásicos, considerando-se desequilíbrios de 3% e 5%, são apresentadas nas Figuras de 3.41 até 3.62.

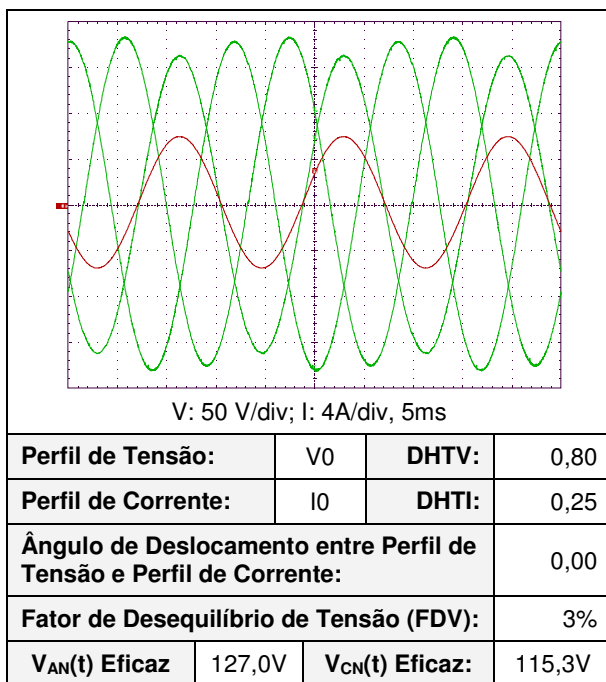


Figura 3.41 - Formas de onda referentes ao Perfil V0-I0 apresentando FDV 3%

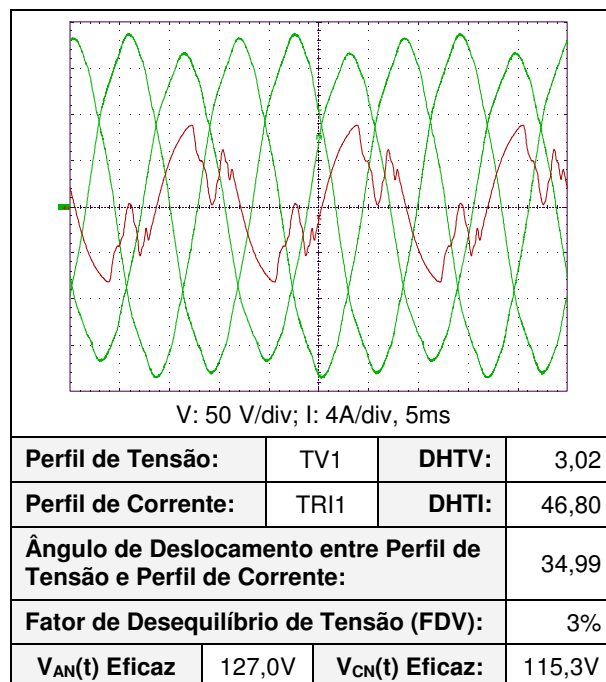


Figura 3.42 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-TRI1 apresentando FDV 3%

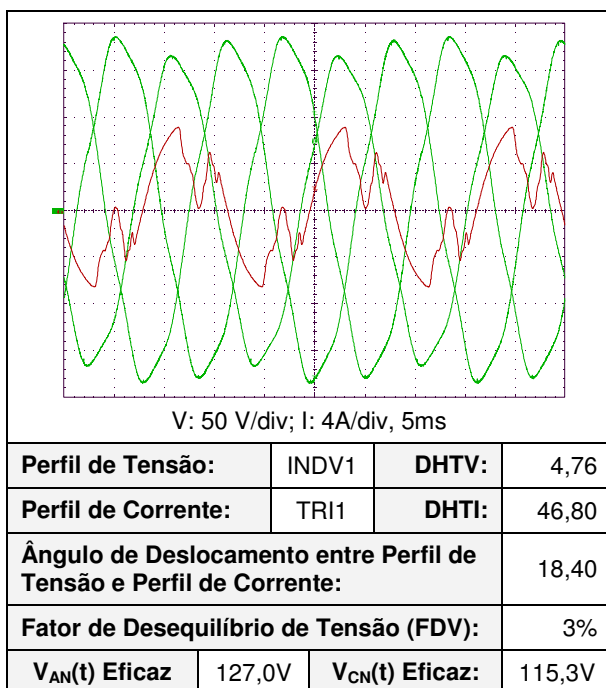


Figura 3.43 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-TRI1 apresentando FDV 3%

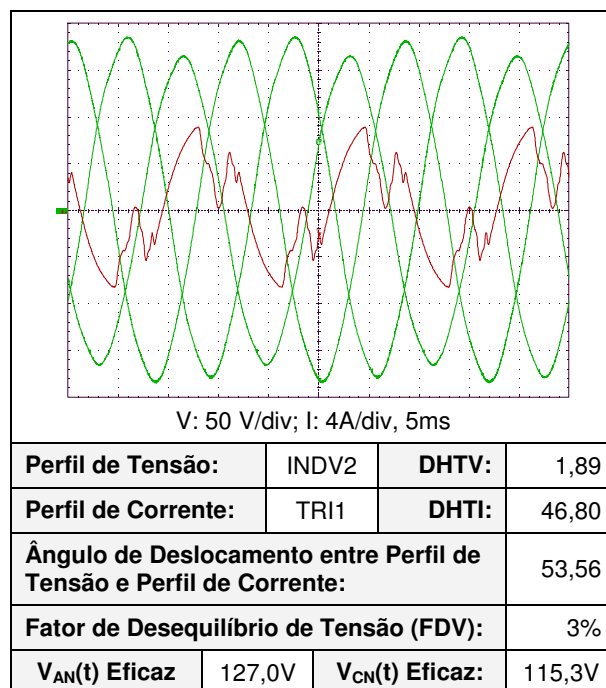


Figura 3.44 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-TRI1 apresentando FDV 3%

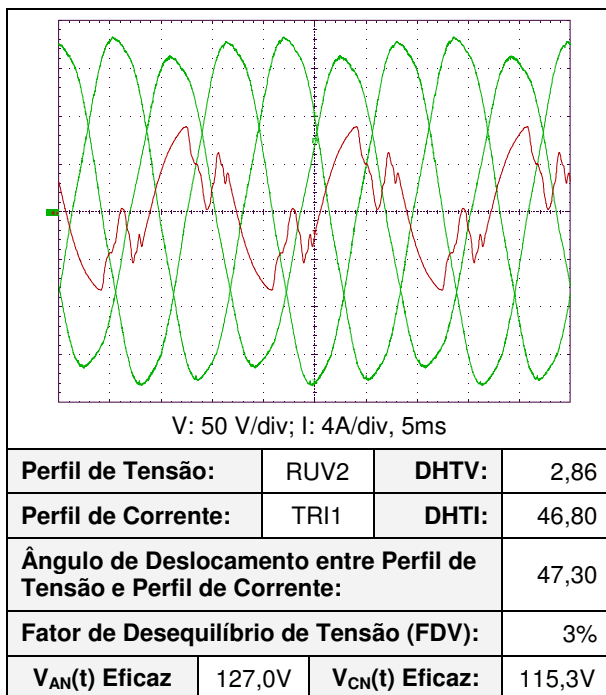


Figura 3.45 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-TRI1 apresentando FDV 3%

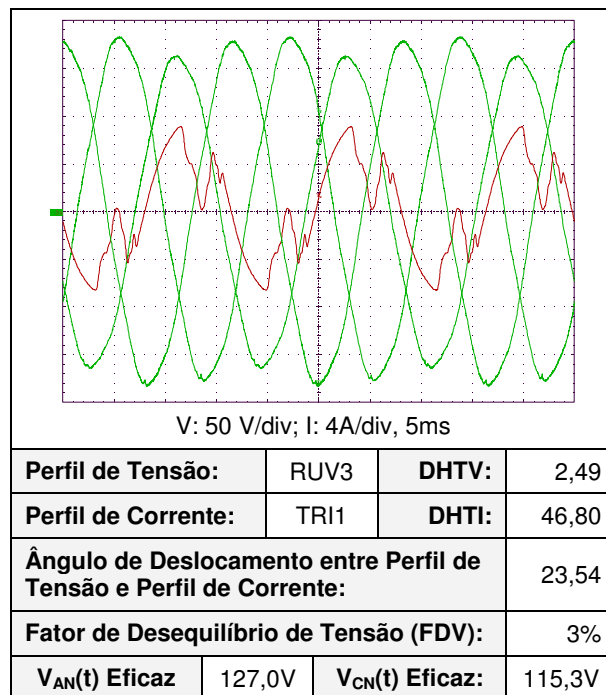


Figura 3.46 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-TRI1 apresentando FDV 3%

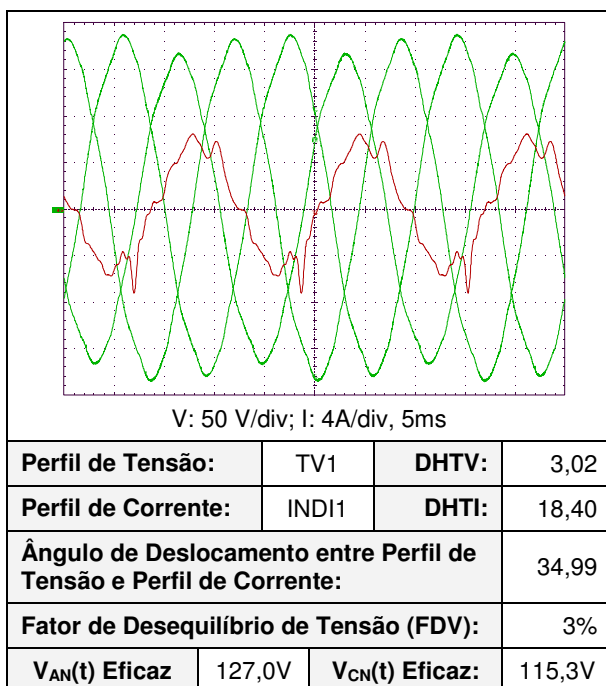


Figura 3.47 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI1 apresentando FDV 3%

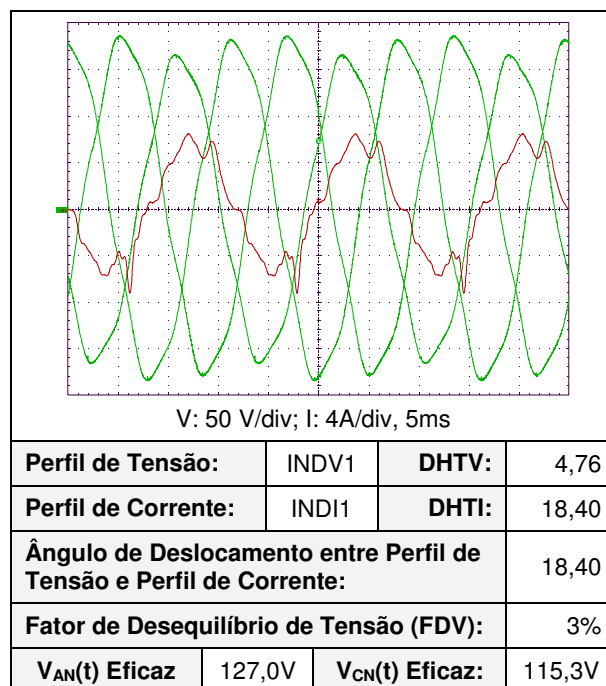


Figura 3.48 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-INDI1 apresentando FDV 3%

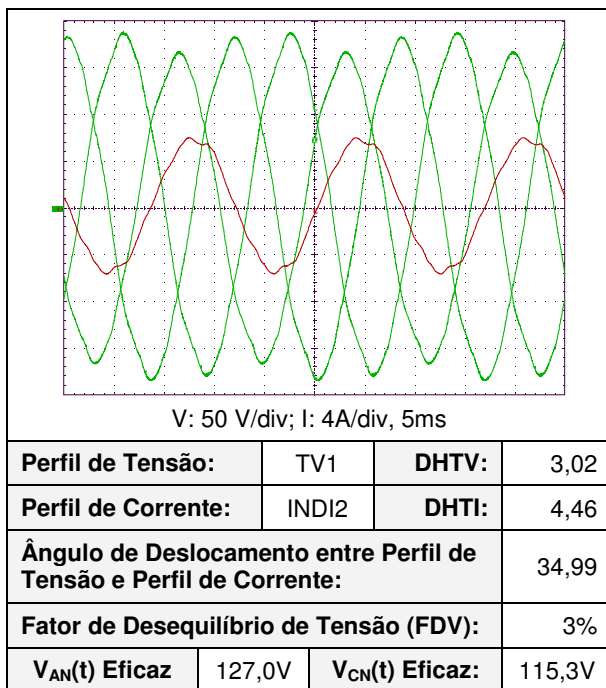


Figura 3.49 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI2 apresentando FDV 3%

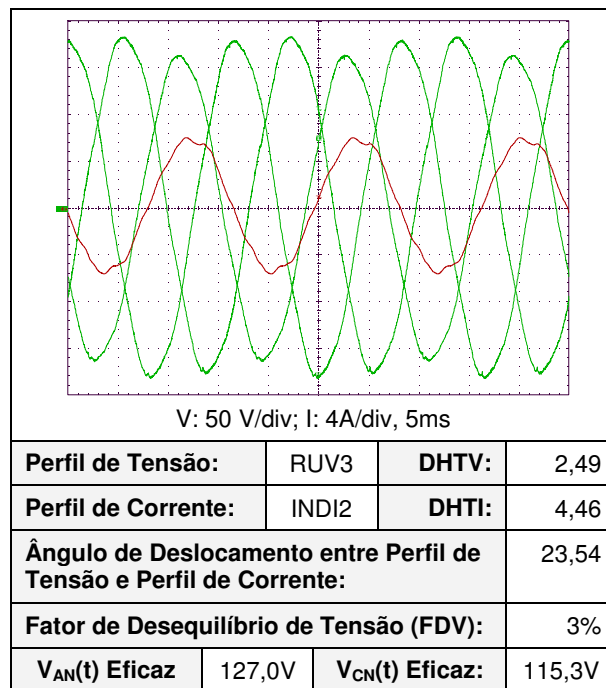


Figura 3.50 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-INDI2 apresentando FDV 3%

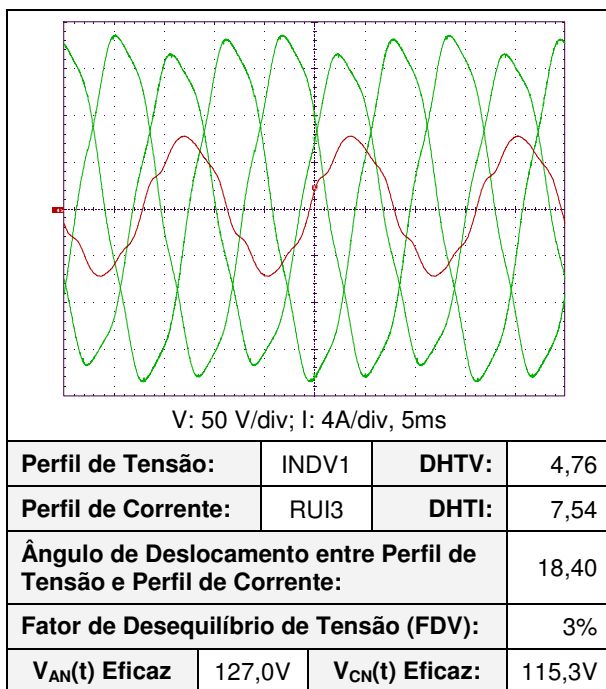


Figura 3.51 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-RUI3 apresentando FDV 3%

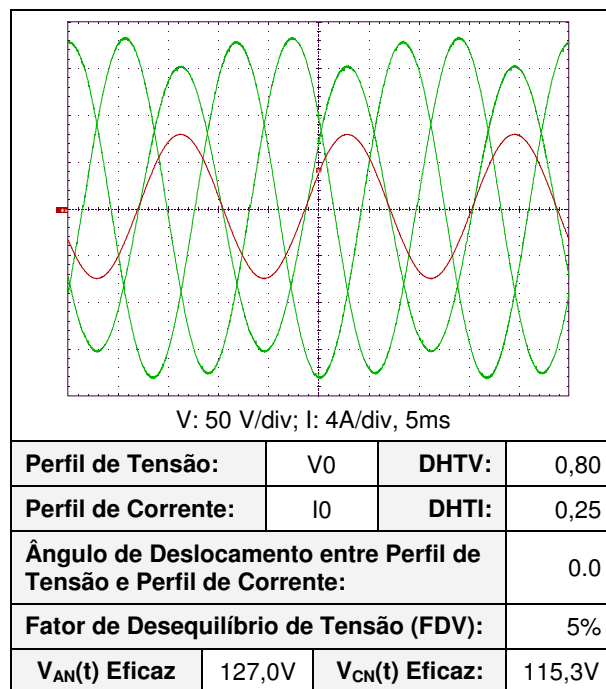


Figura 3.52 - Formas de onda referentes ao Perfil V0-I0 apresentando FDV 5%

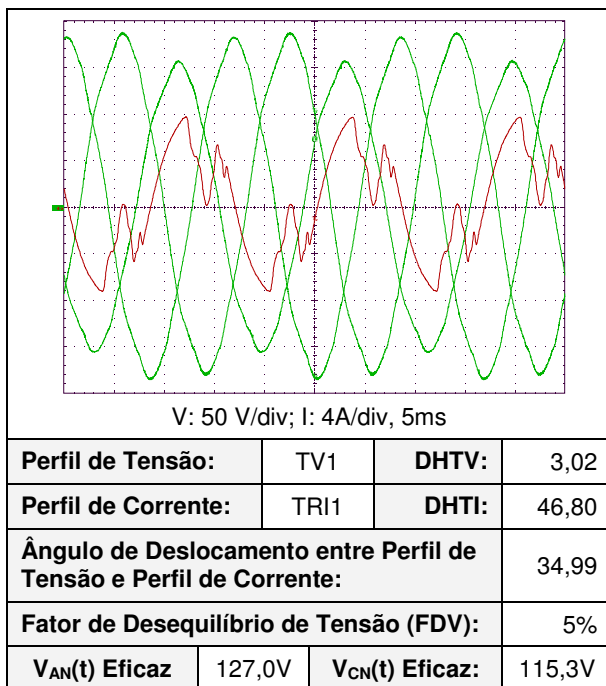


Figura 3.53 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-TRI1 apresentando FDV 5%

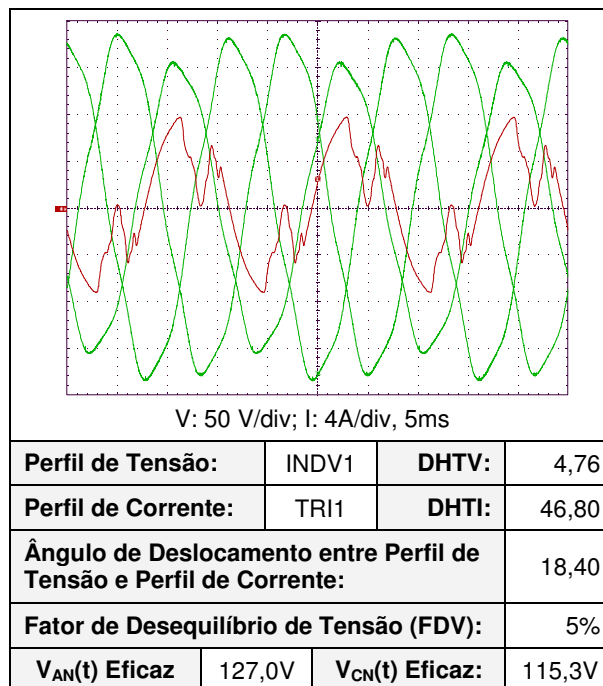


Figura 3.54 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-TRI1 apresentando FDV 5%

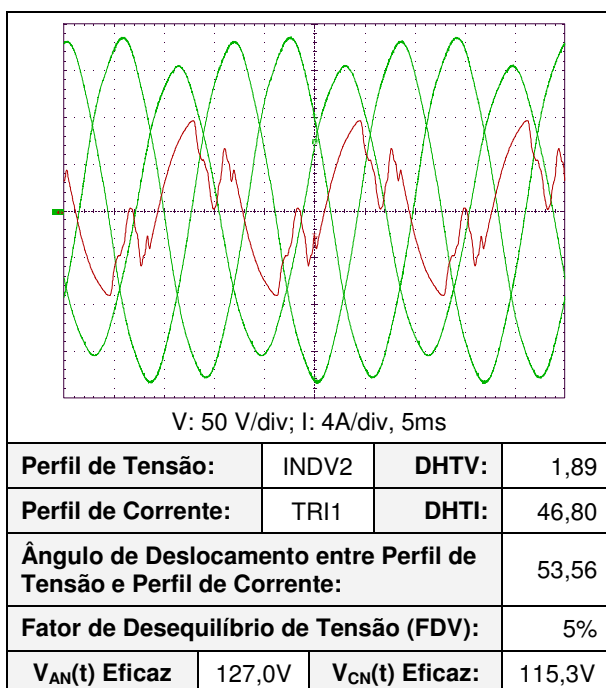


Figura 3.55 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV2-TRI1 apresentando FDV 5%

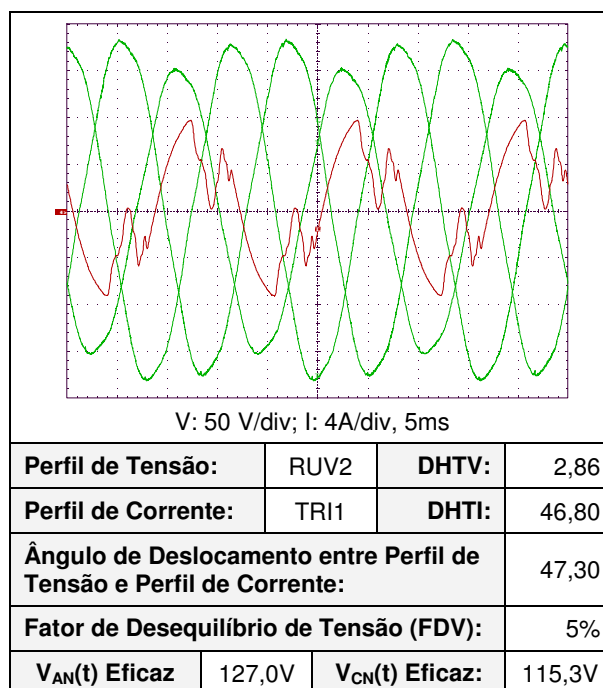


Figura 3.56 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV2-TRI1 apresentando FDV 5%

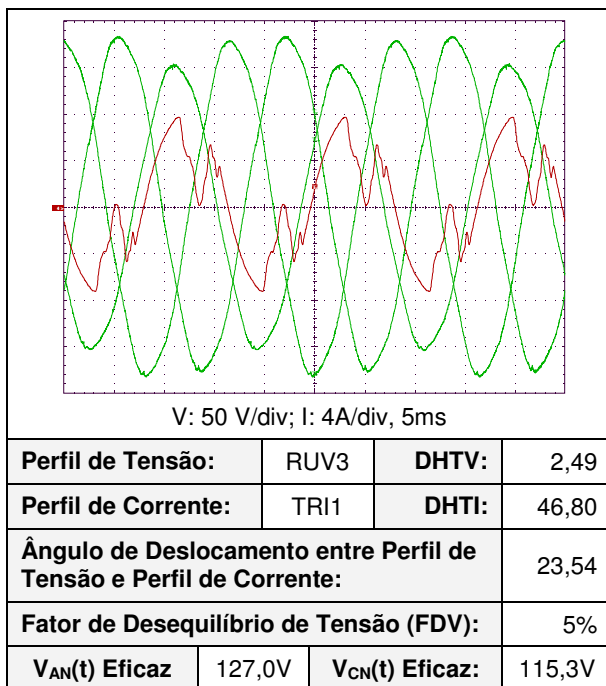


Figura 3.57 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-TRI1 apresentando FDV 5%

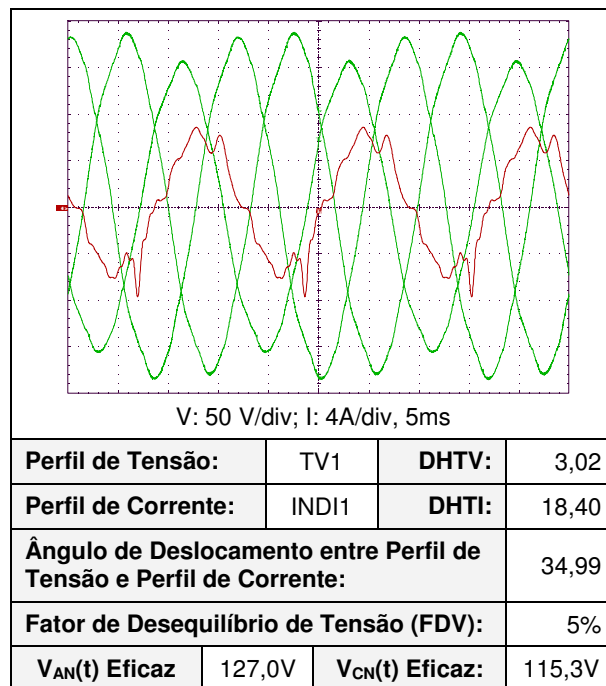


Figura 3.58 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI1 apresentando FDV 5%

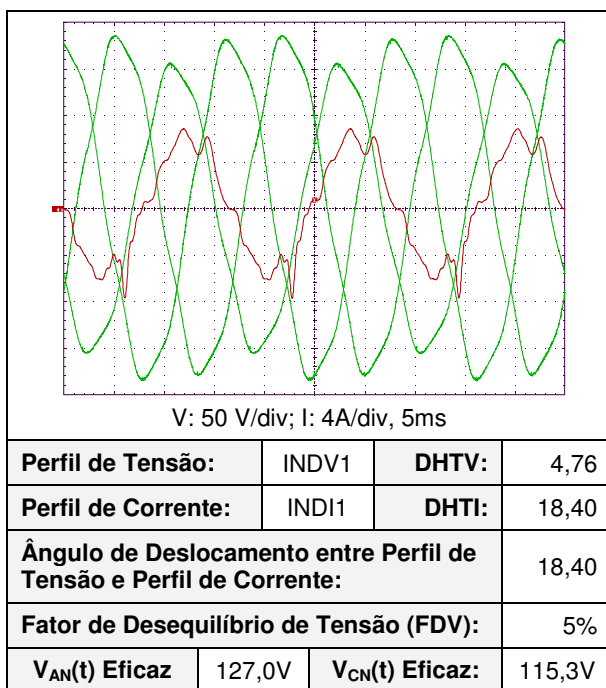


Figura 3.59 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-INDI1 apresentando FDV 5%

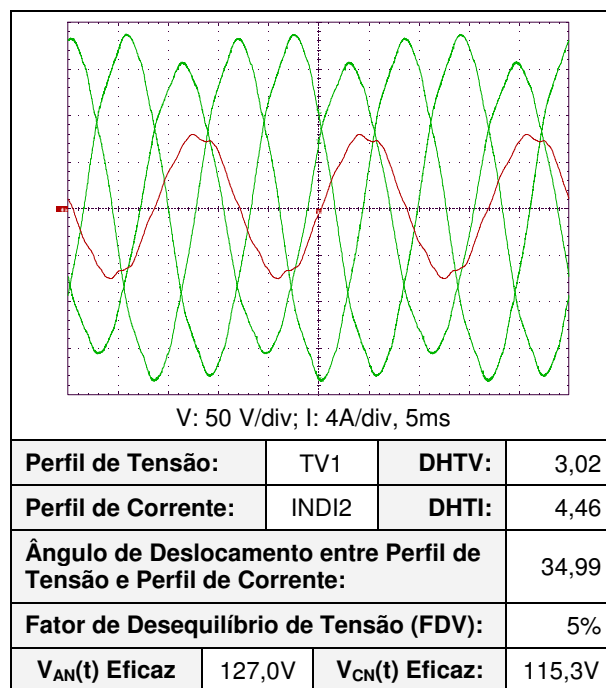


Figura 3.60 - Formas de onda referentes ao Perfil TV1-INDI2 apresentando FDV 5%

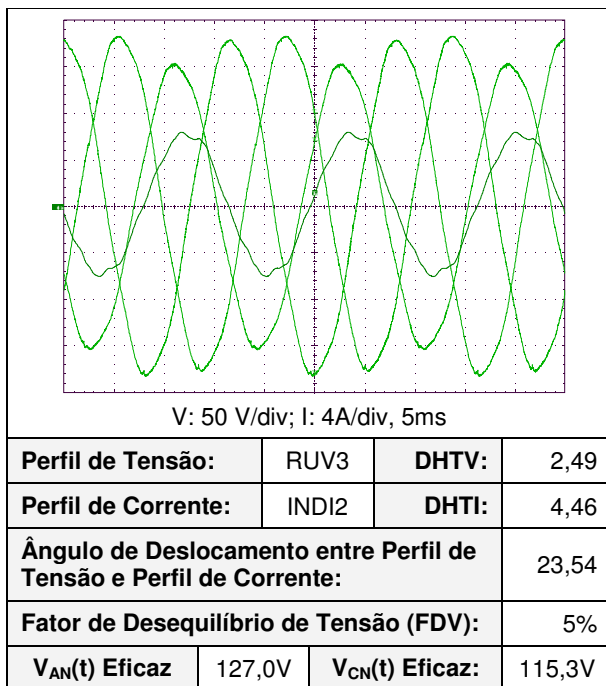


Figura 3.61 - Formas de onda referentes ao Perfil RUV3-INDI2 apresentando FDV 5%

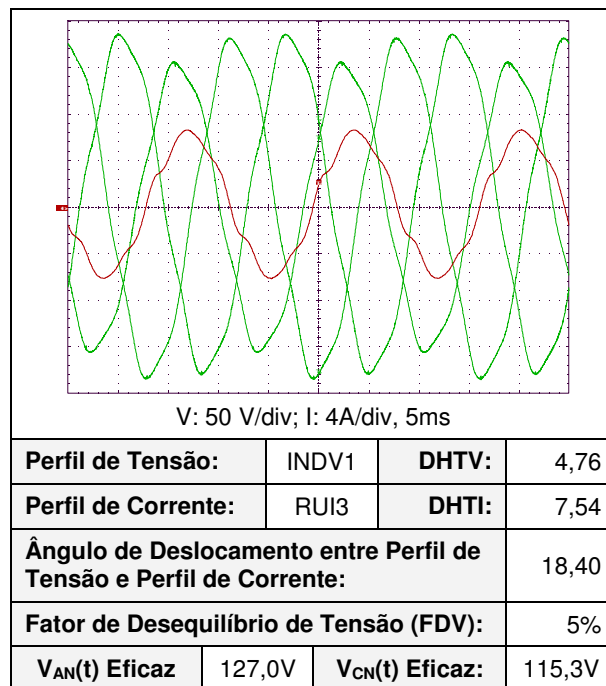


Figura 3.62 - Formas de onda referentes ao Perfil INDV1-RUI3 apresentando FDV 5%

3.6 - Considerações Finais

Neste capítulo foram descritas a metodologia de seleção das amostras dos medidores a ser ensaiadas, a montagem do arranjo laboratorial utilizado na pesquisa, o sistema de aquisição de dados, e, apresentados os pares tensão-corrente de interesse para os ensaios laboratoriais dos medidores selecionados.

Os medidores de energia elétrica foram selecionados a partir de um banco de dados de uma distribuidora de energia elétrica, levando em consideração a quantidade de medidores existentes na área de concessão da empresa e também os medidores que eram significativos e representativos, em termos percentuais, em relação ao montante de consumo médio registrado, definindo-se como a categoria de interesse para a pesquisa os medidores eletrônicos trifásicos.

Posteriormente, foi apresentada a concepção da montagem laboratorial com a exposição dos equipamentos responsáveis por cada etapa. A estrutura laboratorial foi elaborada para que fosse possível programar formas de onda de tensão e corrente em equipamentos separados, possibilitando assim a geração de perfis distintos de tensão e corrente.

Na geração do perfil de corrente utilizou-se uma fonte de alimentação trifásica acoplada a um dispositivo gerador de formas de onda. Na geração dos perfis de tensão aplicou-se dois equipamentos, uma placa de geração de sinais responsável pela geração das formas de onda de tensão, com capacidade limitada de saída de 20V de pico a pico, sendo necessário o uso de um amplificador de sinais para que as formas de onda geradas pela placa alcance níveis de tensões requeridos para emular a existência de um perfil de tensão específico nos sensores de tensão dos medidores.

Como as formas de onda são implementadas separadamente, foi necessário o uso de um equipamento que fizesse o sincronismo entre elas. Para isso, utilizou-se um dispositivo FPGA que monitora a forma de onda de corrente imposta e determina o exato instante da passagem do semiciclo negativo para o semiciclo positivo, ou seja, o cruzamento por zero, possibilitando assim que no instante de transição o dispositivo FPGA acione a placa de geração de sinais de tensões, com um trem de pulsos de “clock”, controlando a geração das formas de onda de maneira síncrona.

Apresentou-se ainda o sistema de aquisição de dados focando as adequações necessárias em virtude da forma da coleta do sinal proporcional referente ao consumo de watt-hora registrado pelos medidores, com o objetivo de efetuar o

ensaio de vários equipamentos simultaneamente. Considerando as diferenças das famílias selecionadas à serem submetidas aos ensaios de distorções harmônicas e desequilíbrios, e as características funcionais de cada equipamento, determinou-se que a metodologia de aquisição de informação referente ao consumo de watt-hora registrado pelo medidor seria com base nas sinalizações do “led” na grande parcela dos casos e, através da porta de comunicação óptica nos casos complementares.

Houve a necessidade de desenvolvimento e implementação de uma interface de conexão entre a porta digital do sistema de aquisição e o sinal proveniente dos medidores de forma a gerenciar os ensaios experimentais em um conjunto de até doze amostras. Com base na análise dos dados de esforços de corrente, foram criados conjuntos de amostras a serem ensaiadas ao mesmo tempo, resultando assim, na determinação de cinco conjuntos.

Um protocolo de medição foi estabelecido, considerando os procedimentos de inicialização e os aplicativos desenvolvidos para o gerenciamento automático dos ensaios, e, a escolha do medidor padrão admitido para as comparações de erro do medidor ensaiado.

O medidor padrão selecionado foi o Yokogawa modelo WT230 que fornece as intensidades consideradas padrões para os dados aferidos (potência ativa, correntes e tensões eficazes em cada fase e o consumo total em watt-hora).

Ao final do capítulo apresenta-se a seleção das formas de onda de tensões e correntes para sistemas equilibrados e desequilibrados, as quais foram selecionadas através de aquisições realizadas em consumidores da área da concessionária admitida para análise, proporcionando perfis com distintas distorções, tanto de tensões, quanto de correntes.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DOS ENSAIOS, ANÁLISES E DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO

4.1 - Introdução

Este capítulo é dedicado à apresentação e interpretação dos resultados obtidos para cada uma das famílias dos medidores selecionados para ensaios. Apresenta também, as superfícies tridimensionais dos erros médios experimentais para tensões equilibradas e desequilibradas, considerando-se os diversos perfis de tensões e correntes com distorções harmônicas apresentados no capítulo anterior.

Considerando-se os resultados experimentais obtidos, este capítulo apresenta ainda uma técnica de modelação para os erros de medição dos medidores eletrônicos de energia elétrica ativa, considerando-se distorções harmônicas de tensões e correntes e desequilíbrios de tensões.

Finalmente, apresenta-se o desenvolvimento de um aplicativo em plataforma amigável Delphi, para análise dos modelos de erros dos medidores analisados, bem como, ferramentas de análises complementares de erros de medição, considerando-se o parque de medidores da concessionária de referência e sua distribuição física na respectiva área de concessão da mesma.

4.2 - Análise dos Resultados

Neste tópico serão apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios das famílias de medidores eletrônicos selecionados.

Inicialmente, será analisado o caso onde se aplicam apenas as distorções harmônicas nas formas de onda de tensões e correntes, e, posteriormente, a avaliação será realizada com o resultado das medições onde foram impostas também desequilíbrios de tensões.

Observa-se que os erros serão analisados considerando-se as curvas de erros para as três repetições ensaiadas para cada família, exceção feita à família III (duas repetições), devido aos erros de uma das amostras estarem fora das margens de calibração estabelecidas por norma, e, apresentados resumidamente em tabelas apenas para as condições que extrapolarem o limite do índice de classe do medidor.

Adotou-se como referência a maior classe de exatidão dos medidores eletrônicos avaliados, ou seja, o índice de classe de $\pm 1\%$.

Todos os demais resultados obtidos, para todos os perfis avaliados, encontram-se nas tabelas do Apêndice A deste trabalho.

Apresenta-se ainda, a implementação dos modelos de erros obtidos para os medidores ensaiados, através de uma ferramenta de análise em “ambiente amigável”, desenvolvida em Delphi, incluindo-se diversos aplicativos de análises complementares.

4.2.1 - Resultados obtidos nos Ensaios Experimentais dos Medidores Eletrônicos Trifásicos, Sistemas Equilibrados

Para facilitar a análise, os resultados para os erros que ultrapassarem o limite admissível do índice de classe dos medidores serão apresentados em forma de tabelas. Adotou-se como referência a maior classe de exatidão dos medidores eletrônicos avaliados, ou seja, o índice de classe de $\pm 1\%$.

Nas Tabelas 4.1 a 4.3 constam os erros relativos percentuais médios, em relação ao padrão Yokogawa modelo WT230, encontrados para o kWh aferido pelo medidor sob ensaio e pelo método de integração dos sinais instantâneos aquisitados. As tabelas com os dados completos referentes aos ensaios dos medidores podem ser encontradas no Apêndice A da dissertação. Em seguida, apresentam-se os gráficos referentes aos ensaios de cada amostra com suas respectivas repetições, fazendo a relação do erro de medição com a DHTI e o cosseno do ângulo de defasagem entre os sinais instantâneos de tensão e corrente, para diferentes perfis e pares tensões-correntes apresentados no Capítulo III.

As figuras das superfícies relativas somente ao pré-processamento dos erros médios, encontrados para os ensaios experimentais dos medidores eletrônicos, sem considerar desequilíbrios de tensão, são apresentadas nas Figuras 4.1 até 4.5, considerando-se as repetições (amostras) ensaiadas.

Tabela 4.1 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores I, sem desequilíbrio de tensão

N.	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	1,25391
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	1,18185
1	INDV1	RUI2	4,76	7,18	18,40	0%	1,07220
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	1,52670
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	1,09145
1	RUV3	INDI1	2,49	18,40	23,54	0%	1,10679

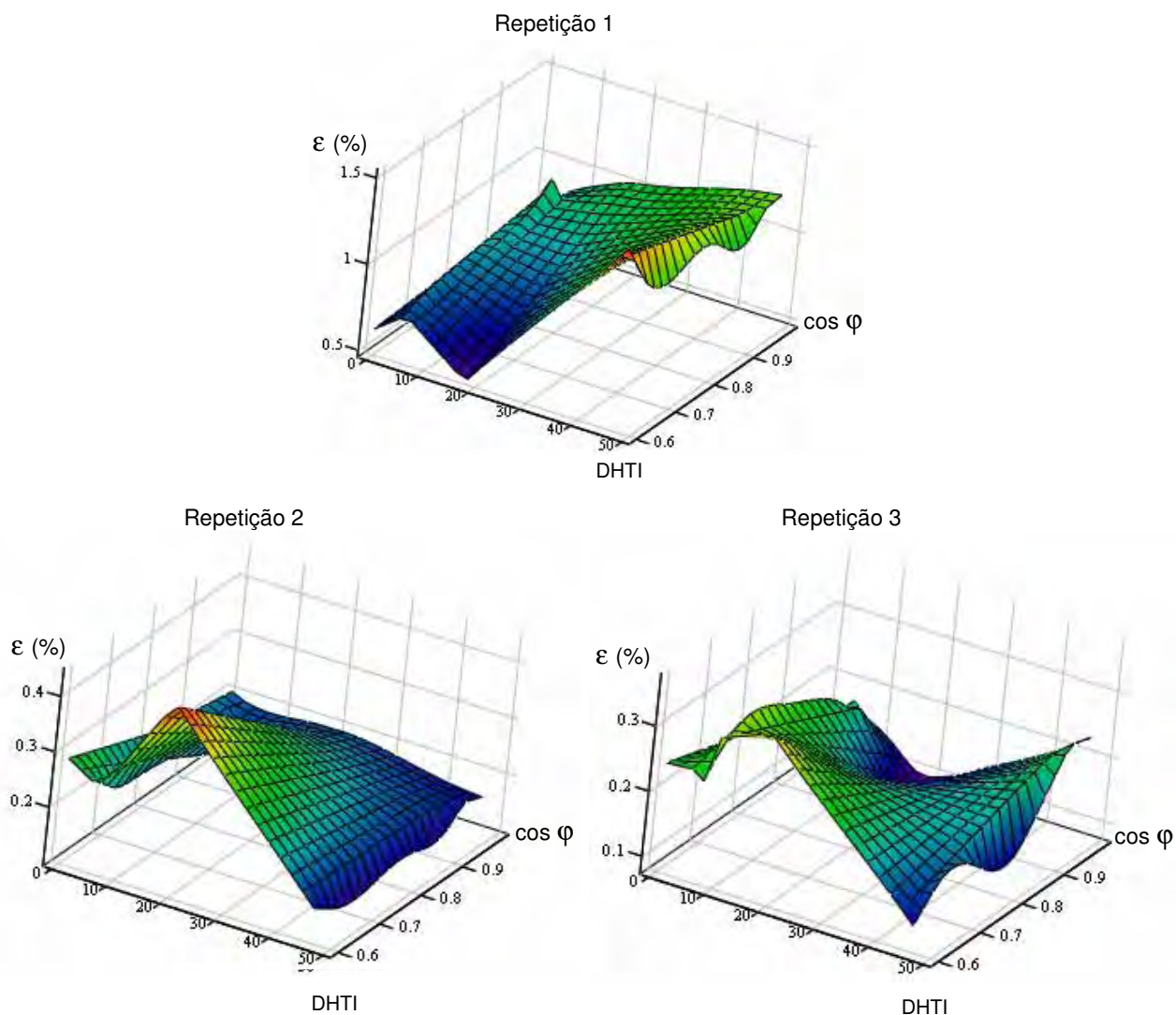
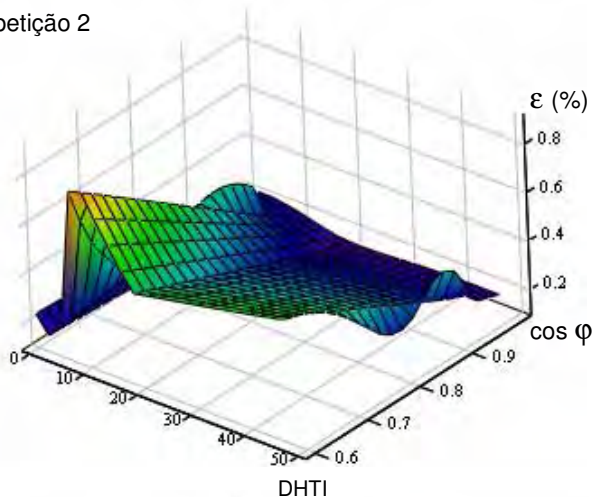


Figura 4.1 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores I, sem desequilíbrio de tensão

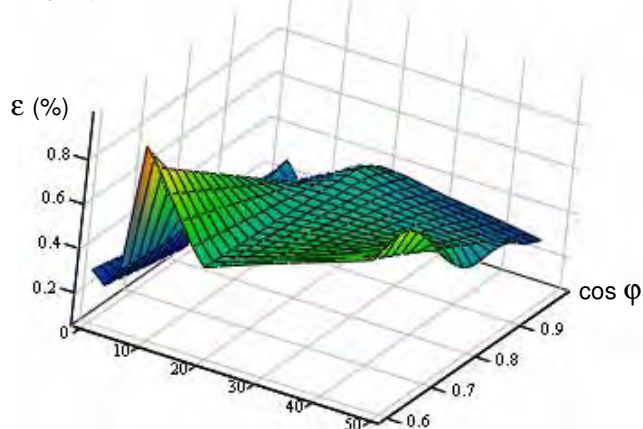
Tabela 4.2 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores II, sem desequilíbrio de tensão

N.	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO
3	INDV2	RUI2	1.89	7.18	53.56	0%	1.02518

Repetição 2



Repetição 2



Repetição 3

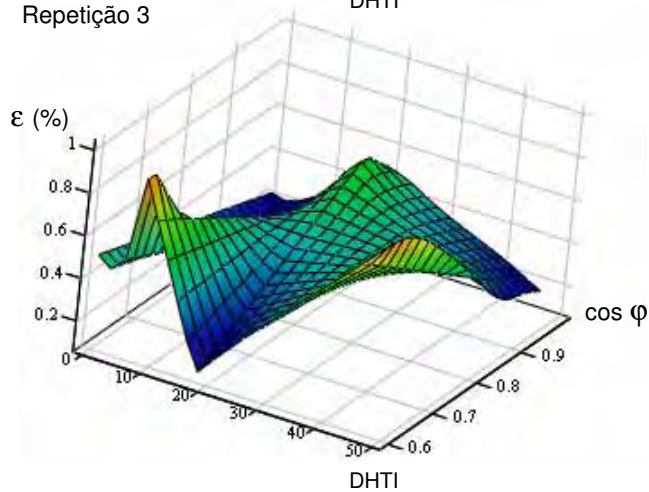


Figura 4.2 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores II, sem desequilíbrio de tensão

Os erros obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores III, sem desequilíbrio de tensão, não ultrapassaram o limite admissível do índice de classe de exatidão adotado para as amostras ($\pm 1\%$).

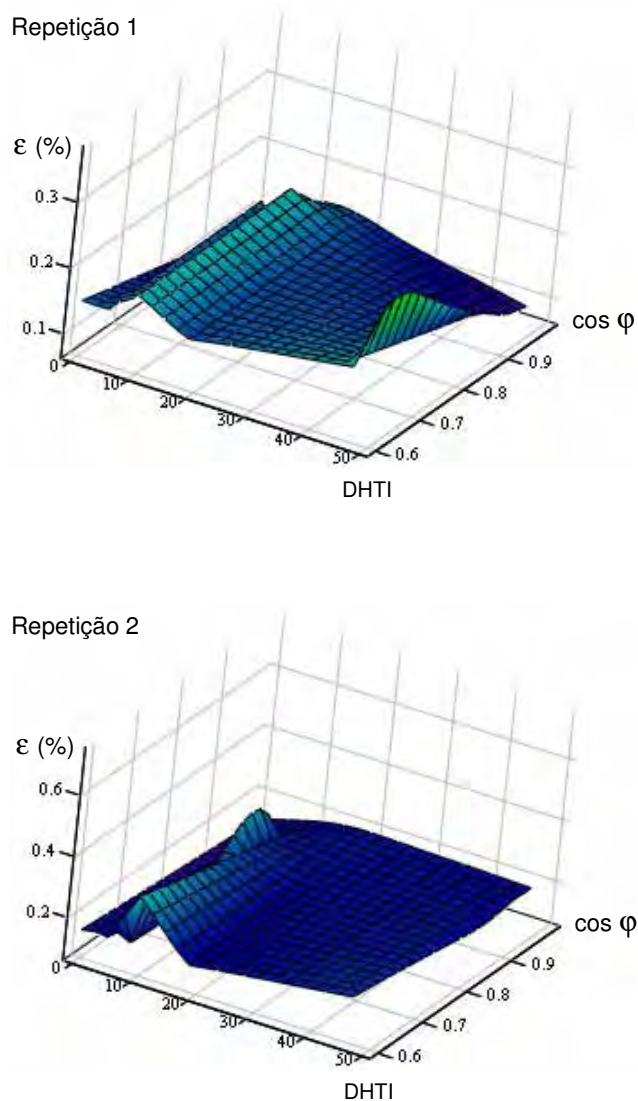


Figura 4.3 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores III, sem desequilíbrio de tensão

Os erros obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores IV, sem desequilíbrio de tensão, não ultrapassaram o limite admissível do índice de classe de exatidão adotado para as amostras ($\pm 1\%$).

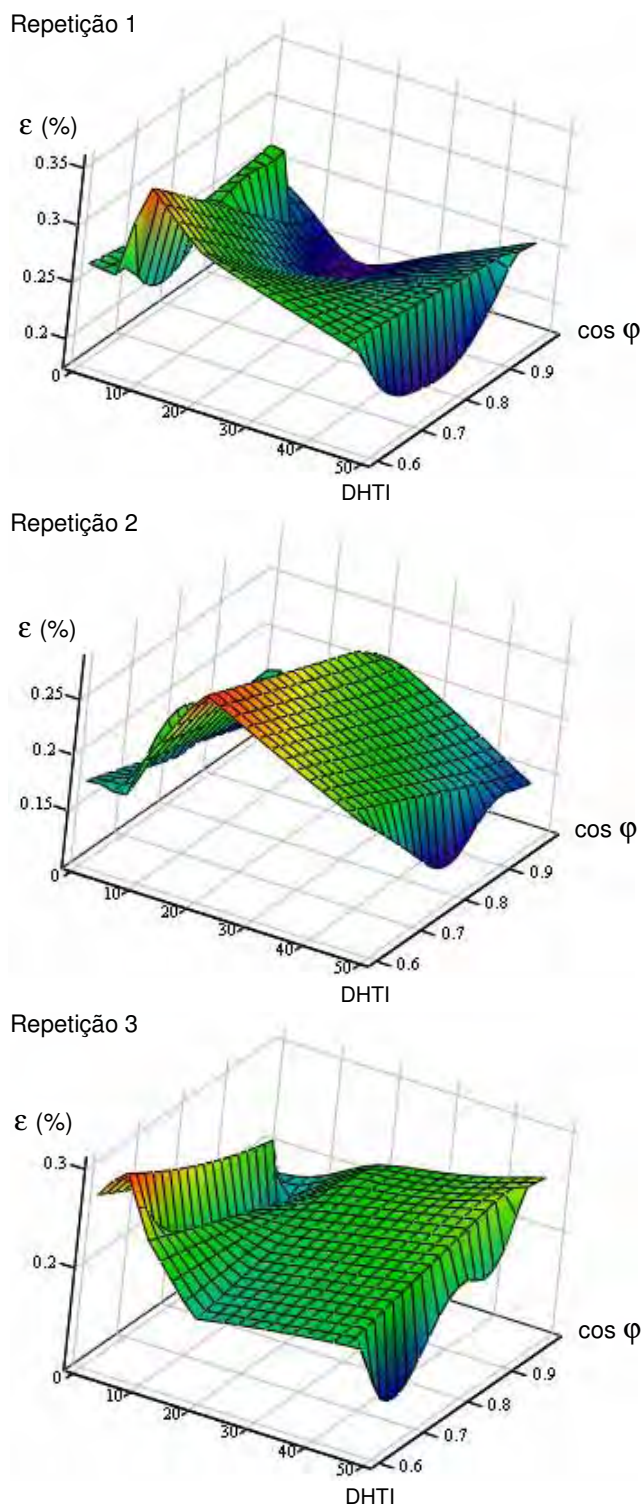


Figura 4.4 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores IV, sem desequilíbrio de tensão

Tabela 4.3 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores V, sem desequilíbrio de tensão

N.	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO
3	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	1.31174
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	1.01626
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	1.04848
1	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	1.10694
2	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	1.07765
1	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	1.23207
3	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	1.95927
3	RUV2	RUI2	2.86	7.18	47.30	0%	1.63032
1	RUV2	RUI3	2.86	7.54	47.30	0%	1.61350

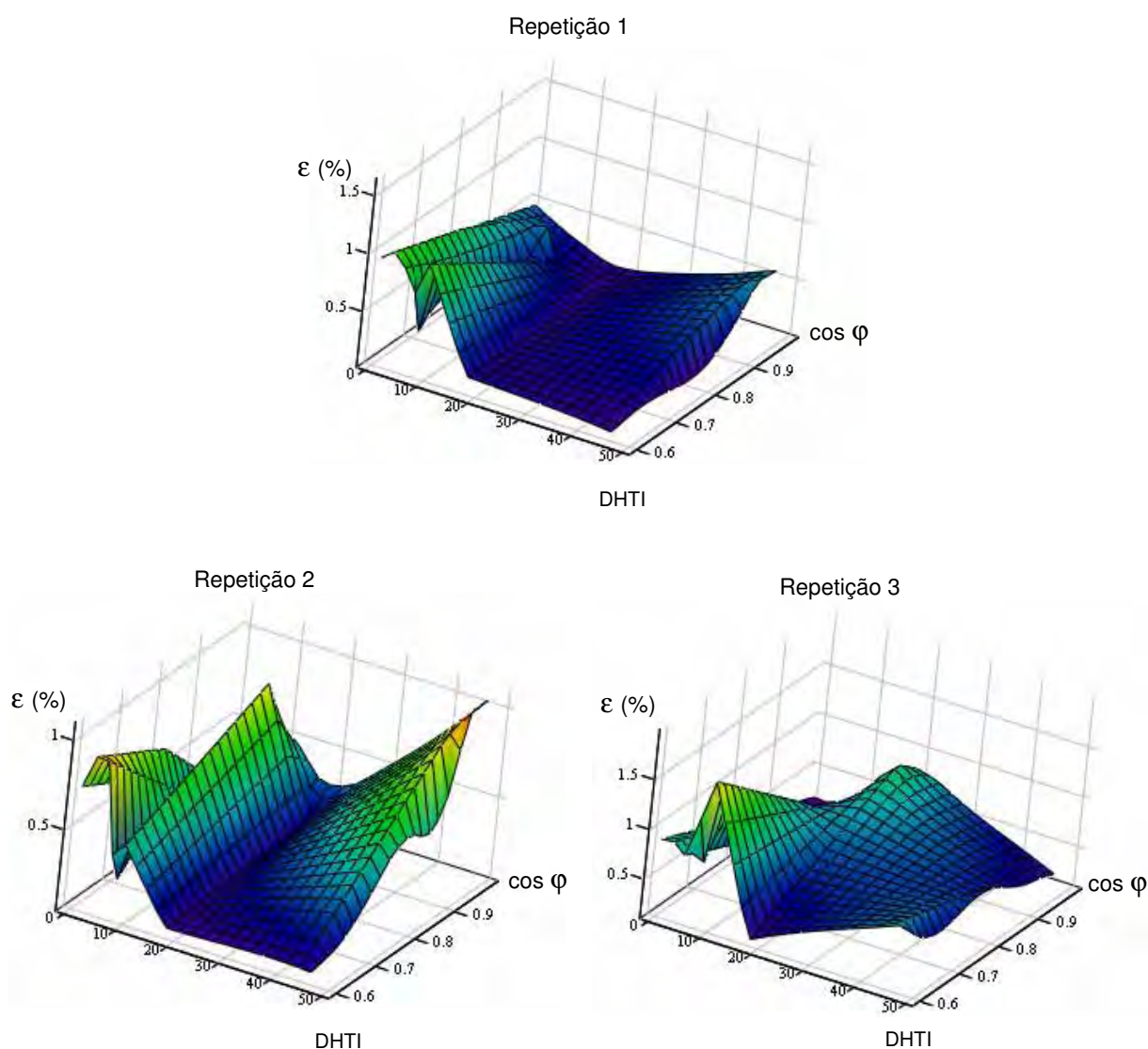


Figura 4.5 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores V, sem desequilíbrio de tensão

4.2.2 - Resultados obtidos nos Ensaios Experimentais dos Medidores Eletrônicos Trifásicos, Sistemas Desequilibrados

De maneira análoga, as Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam o resumo dos dados obtidos nos ensaios, bem como, as Figuras 4.6 até 4.10 apresentam as superfícies referentes aos erros percentuais médios obtidos para os ensaios dos medidores eletrônicos, considerando desequilíbrio de tensão de 3%, para as repetições ensaiadas.

Tabela 4.4 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores I, com desequilíbrio de tensão de 3%

N.	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	3%	1,09727
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	3%	1,02971
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	3%	1,27957
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	3%	1,10662

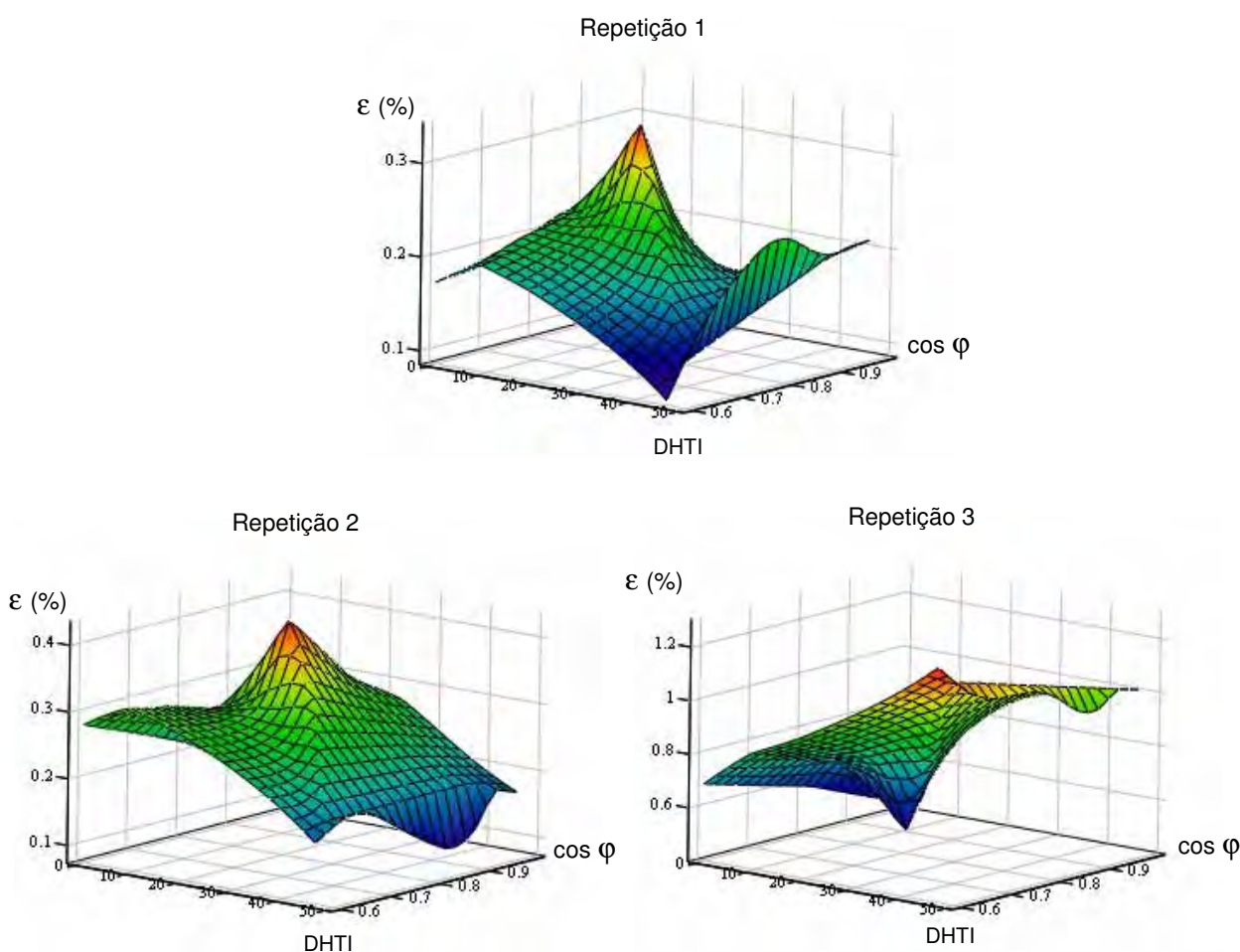
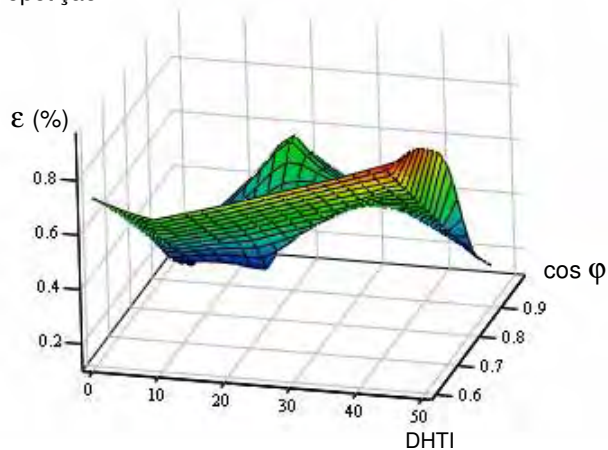


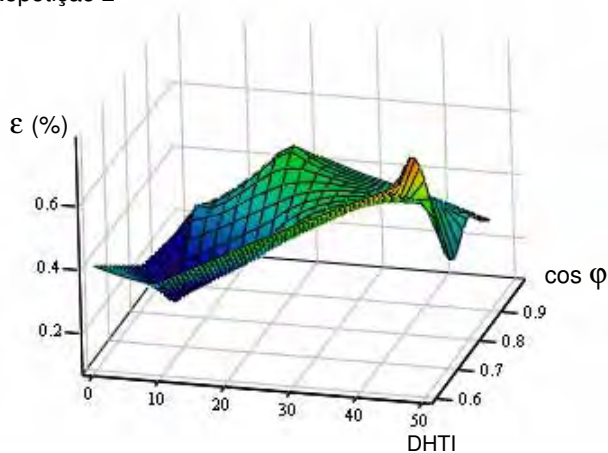
Figura 4.6 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores I, considerando desequilíbrio de tensão de 3%

Os erros obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores II, com desequilíbrio de tensão de 3%, não ultrapassaram o limite admissível do índice de classe de exatidão adotado para as amostras ($\pm 1\%$).

Repetição 1



Repetição 2



Repetição 3

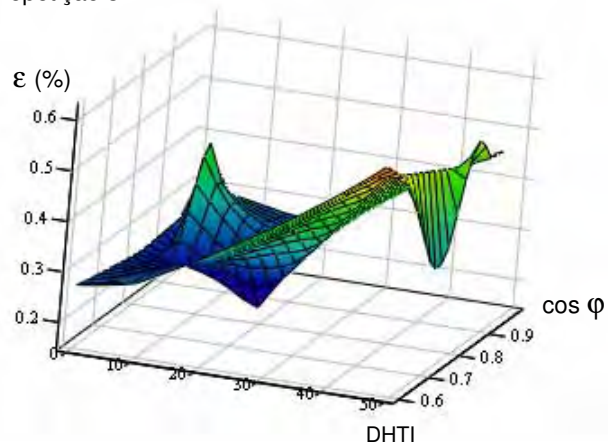
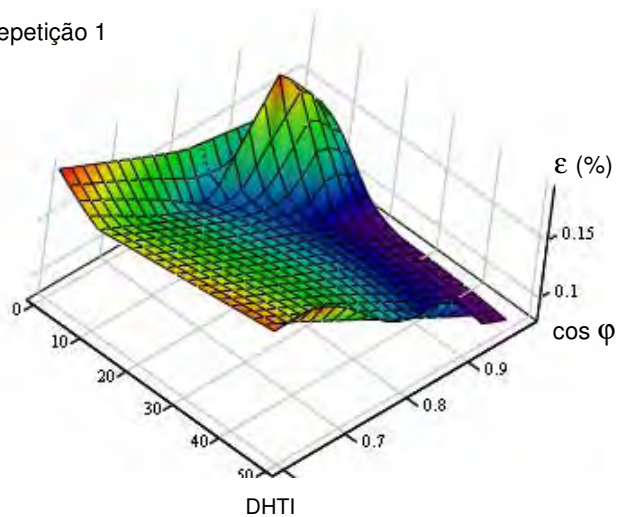


Figura 4.7 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores II, considerando desequilíbrio de tensão de 3%

Os erros obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores III, com desequilíbrio de tensão de 3%, não ultrapassaram o limite admissível do índice de classe de exatidão adotado para as amostras ($\pm 1\%$).

Repetição 1



Repetição 2

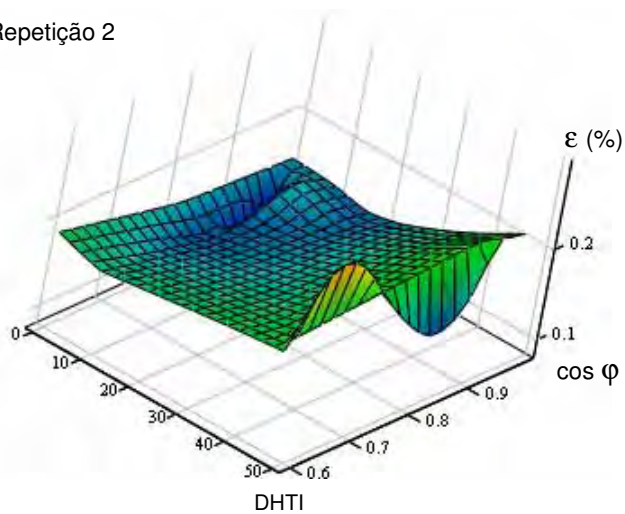


Figura 4.8 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores III, considerando desequilíbrio de tensão de 3%

Os erros obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores IV, com desequilíbrio de tensão de 3%, não ultrapassaram o limite admissível do índice de classe de exatidão adotado para as amostras ($\pm 1\%$).

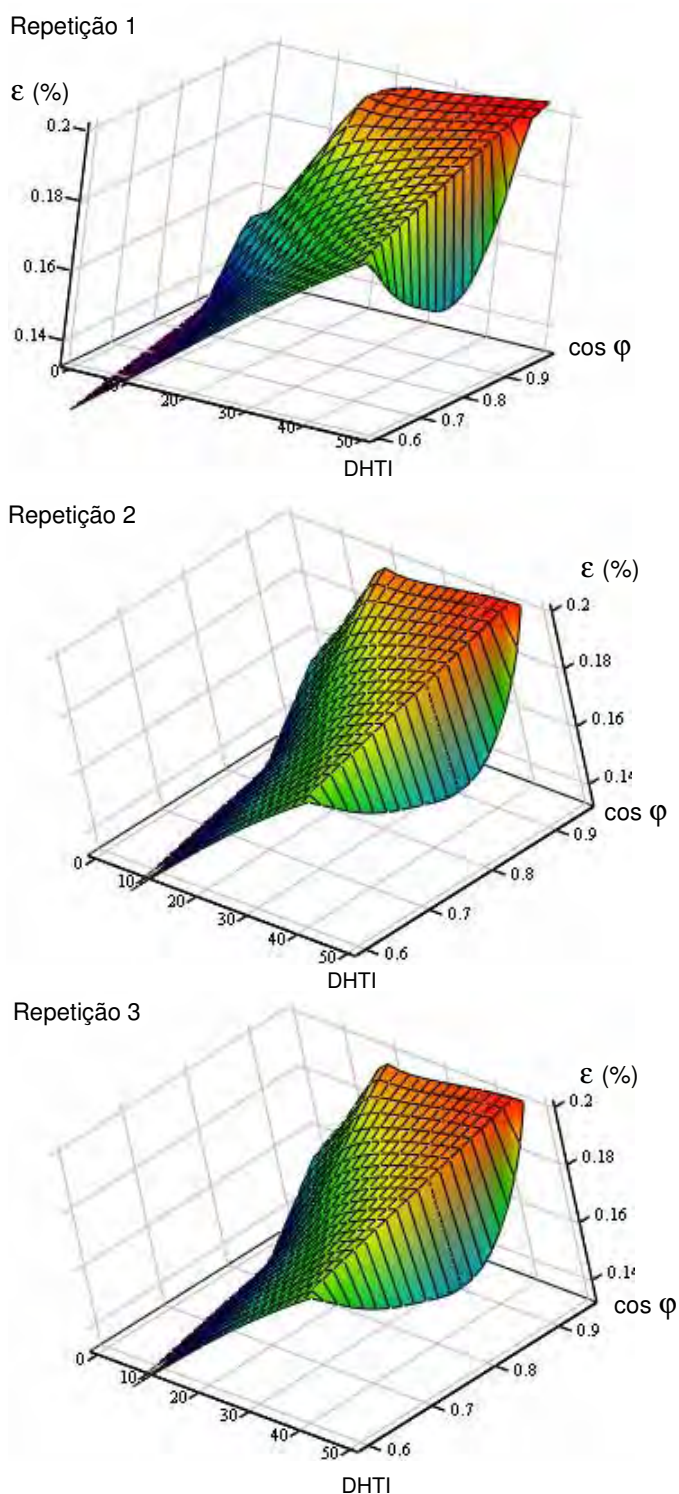
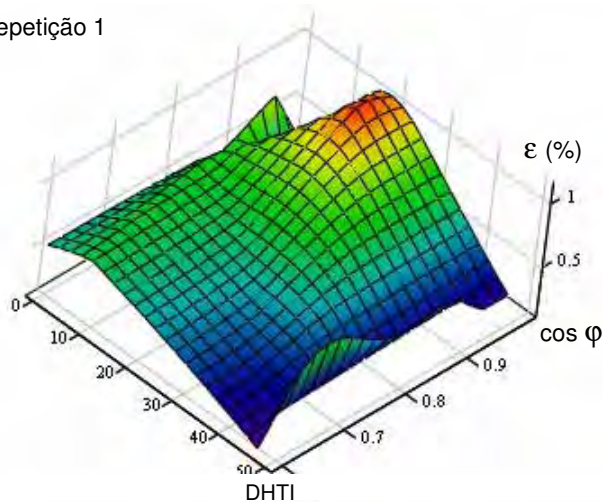


Figura 4.9 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores IV, considerando desequilíbrio de tensão de 3%

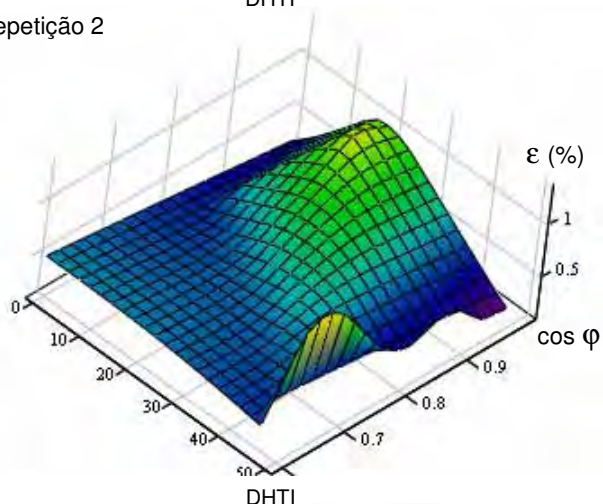
Tabela 4.5 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores V com desequilíbrio de tensão de 3%

N.	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	1.14520
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	1.09521
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	3%	1.35560

Repetição 1



Repetição 2



Repetição 3

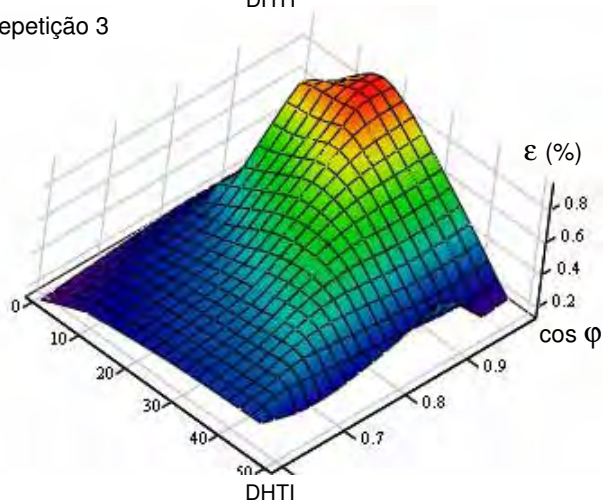


Figura 4.10 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores V, considerando desequilíbrio de tensão de 3%

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam o resumo dos dados obtidos nos ensaios, considerando-se desequilíbrios de 5% nas tensões. As superfícies referentes aos erros percentuais médios obtidos para os ensaios dos medidores eletrônicos, considerando desequilíbrio de tensão de 5%, são apresentadas nas Figuras de 4.11 até 4.15, para as repetições (amostras) ensaiadas.

Tabela 4.6 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores I com desequilíbrio de tensão de 5%

N.	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	5%	1,06820	1,39472
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	5%	1,22351	2,87700
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	5%	1,07493	2,14577

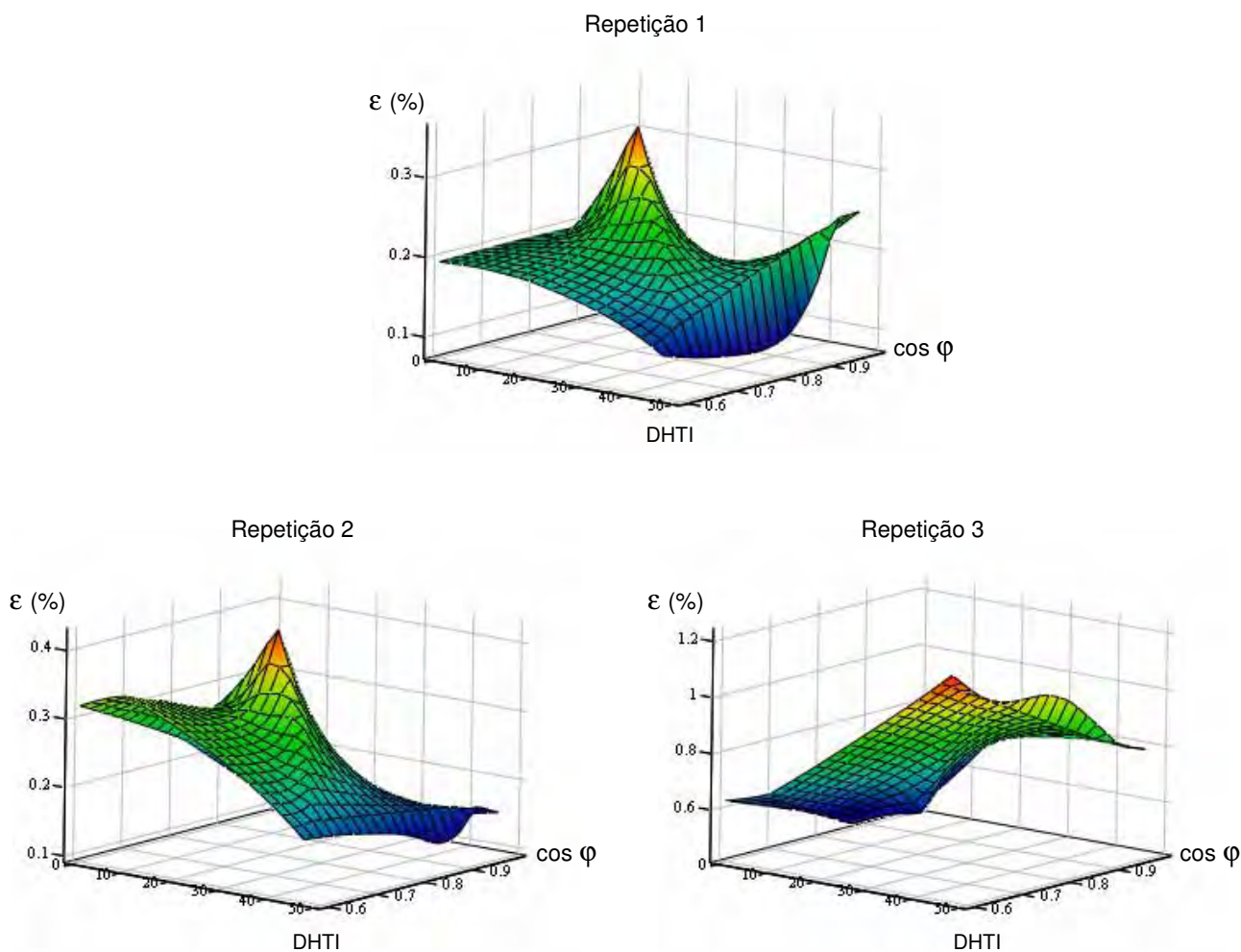
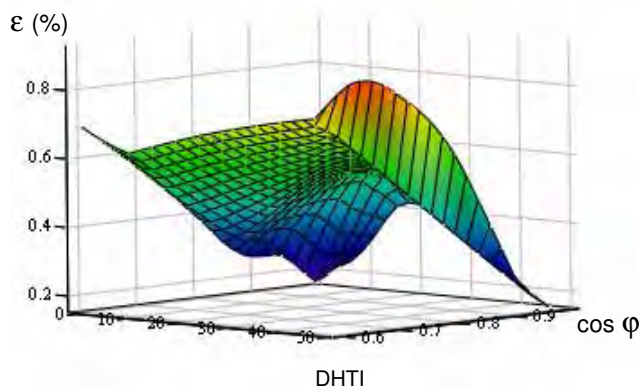


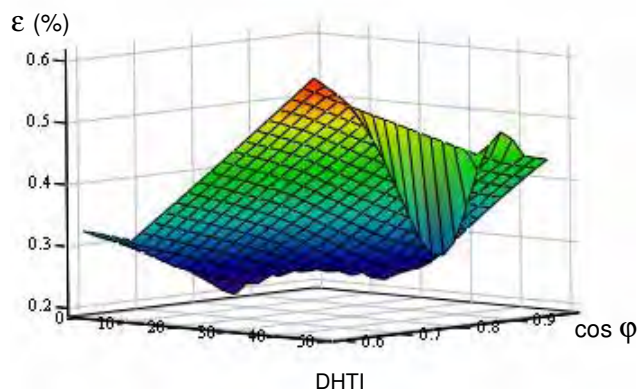
Figura 4.11 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores I, considerando desequilíbrio de tensão de 5%

Os erros obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores II, com desequilíbrio de tensão de 5%, não ultrapassaram o limite admissível do índice de classe de exatidão adotado para as amostras ($\pm 1\%$).

Repetição 1



Repetição 2



Repetição 3

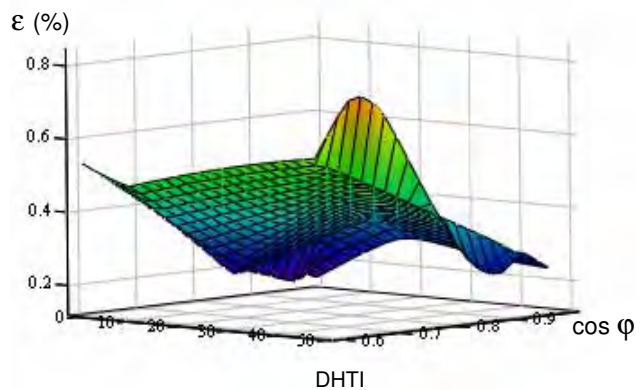
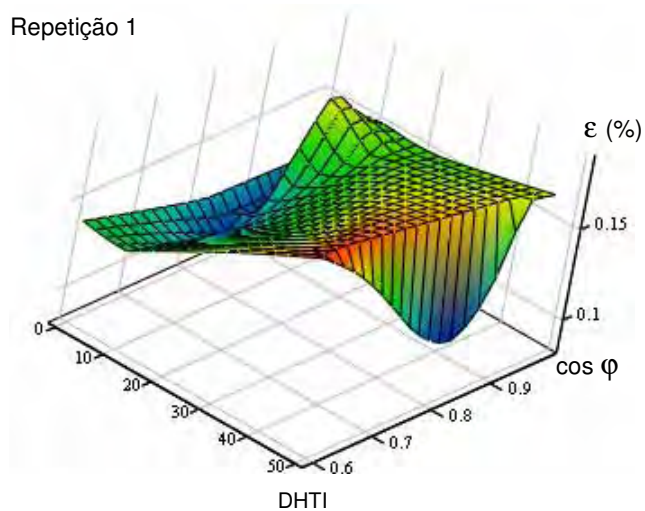


Figura 4.12 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores II, considerando desequilíbrio de tensão de 5%

Os erros obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores III, com desequilíbrio de tensão de 5%, não ultrapassaram o limite admissível do índice de classe de exatidão adotado para as amostras ($\pm 1\%$).

Repetição 1



Repetição 2

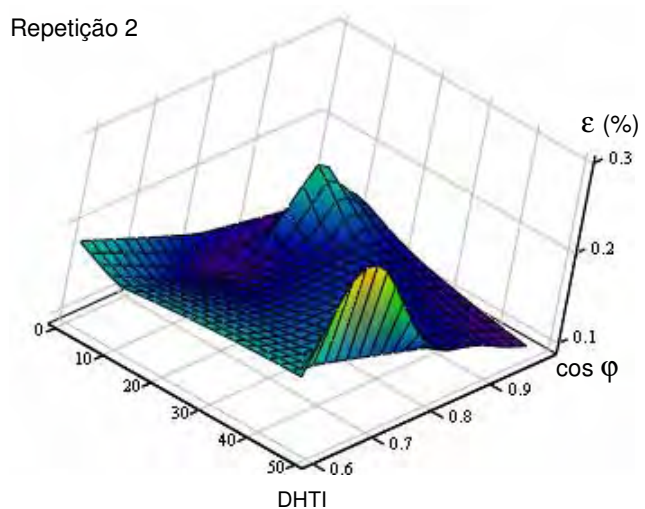


Figura 4.13 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores III, considerando desequilíbrio de tensão de 5%

Os erros obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores IV, com desequilíbrio de tensão de 5%, não ultrapassaram o limite admissível do índice de classe de exatidão adotado para as amostras ($\pm 1\%$).

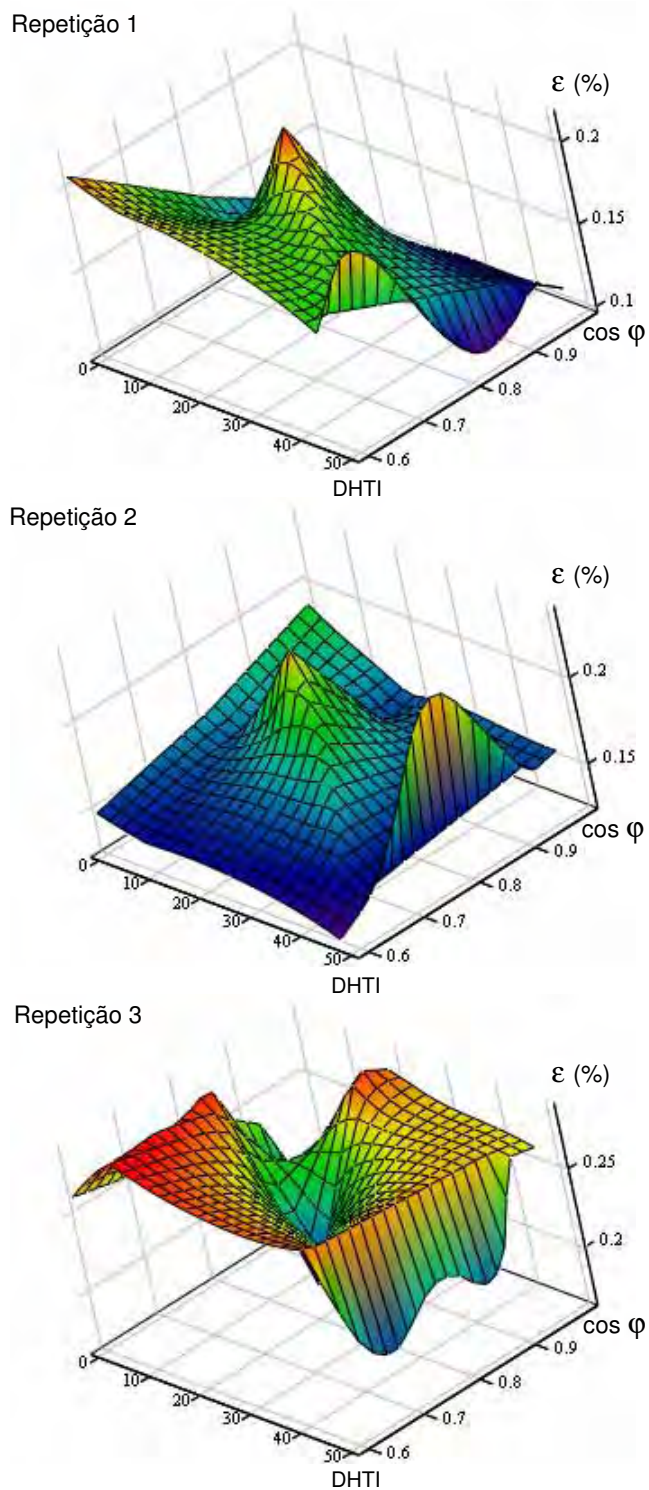
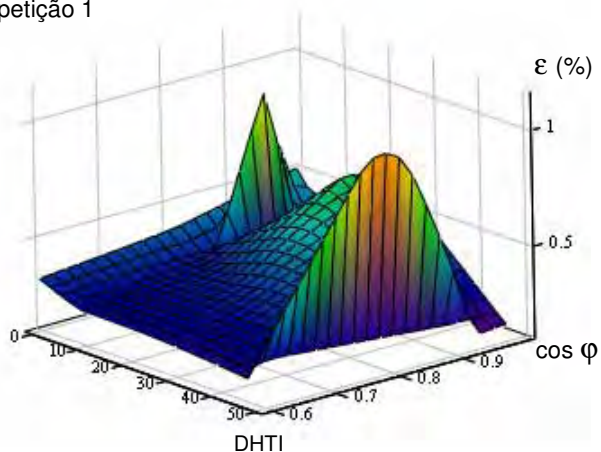


Figura 4.14 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores IV, considerando desequilíbrio de tensão de 5%

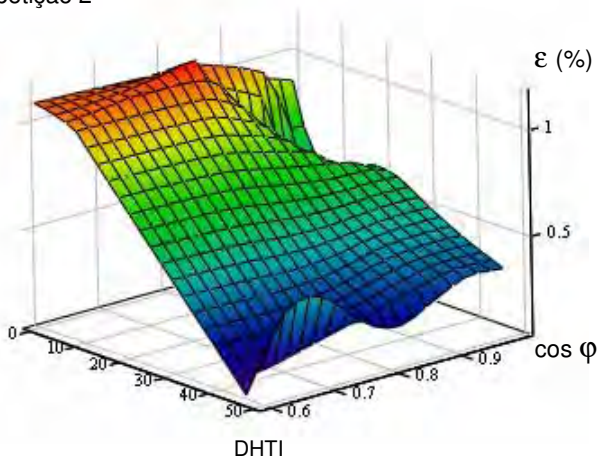
Tabela 4.7 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios experimentais para a família de medidores V, com desequilíbrio de tensão de 5%

N.	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	5%	1.13681
1	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	5%	1.51048
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	5%	1.16297
1	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	5%	1.08202
2	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	5%	1.02041

Repetição 1



Repetição 2



Repetição 3

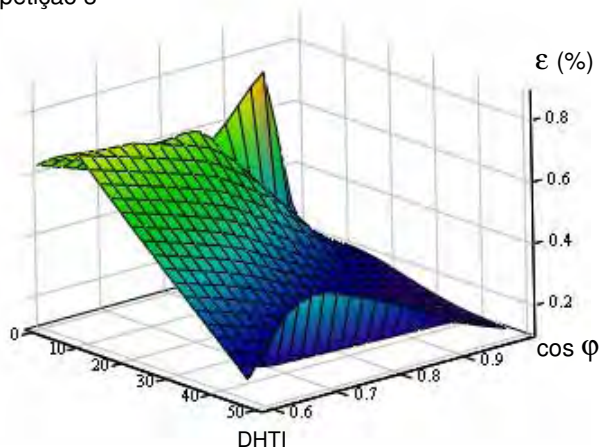


Figura 4.15 - Superfícies dos erros médios encontrados para a família de medidores V, considerando desequilíbrio de tensão de 5%

4.3 - Análise Estatística dos Dados e Modelação dos Erros dos Medidores

Uma vez concluída a etapa de armazenamento de dados referentes a todo o processo de ensaios experimentais programados para cada família de medidores, a etapa realizada posteriormente consistiu na análise estatística do universo total dos conjuntos de dados coletados e pré-processados com relação aos valores de erro absoluto.

Considerando a grande dificuldade em se desenvolver uma modelação teórica dos medidores eletrônicos de energia elétrica que seja consistente e precisa, uma vez que a determinação de modelos teóricos envolve diversos fatores que tornam sua obtenção complexa (sistemas de aquisição, transdutores, circuitos de condicionamentos, rotinas de cálculo nem sempre disponibilizadas pelos fabricantes, etc.), dificuldades estas relatadas em vários trabalhos científicos apresentados na literatura, partiu-se para uma abordagem diferenciada, de tal forma a se obter uma modelação comportamental através dos resultados experimentais/laboratoriais [43].

Assim sendo, através de análises dos resultados dos ensaios laboratoriais dos medidores de energia sujeitos às distorções harmônicas nas formas de onda de tensões e correntes, com distintos conteúdos, definiram-se os parâmetros mais relevantes referentes aos erros de medição dos medidores, e, com esses dados, pode-se estabelecer um modelo matemático dos erros para cada medidor ensaiado.

Desta forma, pode-se analisar o comportamento de cada medidor frente a perfis de tensões e correntes com distintas distorções harmônicas, baseando-se numa modelação comportamental, obtida através dos resultados experimentais apresentados.

Diferentes métodos estatísticos foram analisados tendo como objetivo principal a determinação de um modelo matemático que conseguisse representar com um maior índice de confiabilidade, tanto o equipamento adotado como padrão (Yokogawa WT230), quanto os medidores ensaiados.

No decorrer destas análises matemáticas constatou-se que a influência nos resultados do erro com relação à variável DHT de tensão, para os perfis de tensão utilizados nos ensaios experimentais, era muito pequena. Portanto, esta variável poderia ser desconsiderada, na análise dos dados obtidos, uma vez que DHT de tensão não apresentava variações significativas em sua amplitude, variando em torno de 2,8% a 3,3%. Adicionalmente, considerando-se que as DHT das tensões,

por normas de distribuição, devem estar restritas a valores inferiores a 5%, o que significa que, mesmo a variável apresentando seu máximo valor permitido ainda não representaria uma variação tão acentuada com relação às amplitudes utilizadas nos ensaios experimentais, resultando em pequena influência nos erros dos medidores, considerando-se o universo dos sinais (tensões e correntes e suas DHT) analisados.

Entretanto, há de se destacar que os modelos obtidos podem ser utilizados com precisão, dentro das limitações quantitativas desta variável (DHT de tensões). Por outro lado, verificou-se que o valor do erro calculado possui uma sensibilidade grande com relação ao parâmetro de amplitude da DHT de corrente, e, portanto, esta variável é de grande relevância para a determinação dos modelos.

Outra constatação foi a de que o ângulo de deslocamento referente à passagem por zero das formas de onda de correntes e tensões, que implica diretamente no valor da potência ativa transferida para a carga, também é uma variável de elevada significância nos resultados dos erros. Desta forma, com o objetivo de tornar linear o comportamento das funções relacionadas com estes valores de ângulos de deslocamentos entre as formas de ondas instantâneas de tensões e correntes, efetuou-se uma transformação nesta variável através da adoção de seu valor co-senoidal.

Portanto, chegou-se a conclusão que os modelos requeridos deveriam estar relacionados com o valor da DHT do perfil de corrente utilizado e com o valor do cosseno do ângulo de deslocamento entre as formas de onda instantâneas de tensão e corrente, considerando-se as limitadas variações das DHT de tensões analisadas.

Assim, a análise estatística realizada consistiu na realização de regressões lineares em todos os conjuntos de dados considerando cada par de perfis corrente e tensão como um ponto discreto. De maneira aleatória, setenta e cinco por cento (75%) dos pontos foram selecionados na determinação das funções nas execuções das regressões lineares, e, os pontos restantes, foram utilizados como pontos de teste para a validação das expressões determinadas.

Uma vez determinadas as funções matemáticas que representam os modelos dos medidores (padrão e equipamento ensaiado), foi realizada a composição da expressão matemática do erro para cada família de medidores, resultando em uma expressão matemática polinomial, onde o denominador representa o modelo matemático do equipamento adotado como padrão e o numerador representa a diferença entre os modelos do medidor sob ensaio e do modelo do padrão.

4.3.1 - Modelo Matemático do Erro

O desenvolvimento e a obtenção do modelo matemático do erro através dos resultados experimentais são descritos a seguir.

O primeiro passo consistiu em montar uma matriz, denominada de “X”, contendo os valores do operador co-senoidal dos ângulos de cada combinação dos perfis de tensões e correntes ensaiados, e, os valores das distorções harmônicas de cada perfil de corrente. O exemplo do formato para a matriz do modelo matemático para medidores trifásicos pode ser verificado na equação (4.1), em que “n” representa o número de perfis experimentais ensaiados (disponíveis no banco de dados).

$$X = \begin{bmatrix} \cos(\hat{angulo}_1) & (\cos(\hat{angulo}_1))^2 & (\cos(\hat{angulo}_1))^3 & (DHTi_1)^2 & DHTi_1 \times \cos(\hat{angulo}_1) & 1 \\ \cos(\hat{angulo}_2) & (\cos(\hat{angulo}_2))^2 & (\cos(\hat{angulo}_2))^3 & (DHTi_2)^2 & DHTi_2 \times \cos(\hat{angulo}_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\hat{angulo}_n) & (\cos(\hat{angulo}_n))^2 & (\cos(\hat{angulo}_n))^3 & (DHTi_n)^2 & DHTi_n \times \cos(\hat{angulo}_n) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

A seguir, foram definidas duas outras matrizes, uma referente aos valores registrados pelo medidor submetido aos ensaios e outra referente aos valores registrados pelo medidor padrão Yokogawa, conforme (4.2) e (4.3).

$$Y_{_medidor} = \begin{bmatrix} Wh_{_medidor_1} \\ Wh_{_medidor_2} \\ \vdots \\ Wh_{_medidor_n} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$Y_{_yokogawa} = \begin{bmatrix} Wh_{_yokogawa_1} \\ Wh_{_yokogawa_2} \\ \vdots \\ Wh_{_yokogawa_n} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Dessas “n” observações, foi necessário separar aleatoriamente em torno de 75% para treino da função e 25% para testes. Com os dados de treino, encontra-se a ponderação (peso) através da equação (4.4).

$$w = (X^T \cdot X + \alpha^2 \cdot I)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (4.4)$$

Sendo que:

α = é um parâmetro a ser otimizado (ele proporciona uma resposta mais confiável e repetível para a análise dos dados).

Observa-se que o treino foi utilizado na equação (4.4) para encontrar o “ w ”, e o teste é utilizado para avaliar um erro para valores diferentes de “ α ”. O melhor valor será aquele que apresentar o menor erro de teste.

Definindo a variável “ w ” através da equação (4.5), é possível montar a equação matricial que descreve a função paramétrica do método de regressão linear empregado, dada por (4.6).

$$w = [a \ b \ c \ d \ e \ f]^T \quad (4.5)$$

$$y = a.\cos(\hat{\text{ângulo}}) + b.\cos(\hat{\text{ângulo}})^2 + c.\cos(\hat{\text{ângulo}})^3 + d.DHTI^2 + e.DHTI.\cos(\hat{\text{ângulo}}) + f \quad (4.6)$$

Em seguida, encontram-se as ponderações (pesos) referentes aos dados do medidor de energia elétrica ativa sob ensaio e também do medidor padrão Yokogawa, ou seja, o vetor “ w ”.

Assim, os erros estimados dos medidores podem ser expressos pela equação (4.7).

$$\hat{E} = \frac{W_{\text{-medidor}} - W_{\text{Yokogawa}}}{W_{\text{Yokogawa}}} . X + \text{bias} \pm \text{desvio} \quad (4.7)$$

Onde:

$$\text{bias} = \text{média} \left(\text{Erro} - \frac{W_{\text{-medidor}} - W_{\text{Yokogawa}}}{W_{\text{Yokogawa}}} . X \right) \quad (4.8)$$

$$\text{desvio} = 1,96 \text{std} \left(\text{Erro} - \frac{W_{\text{-medidor}} - W_{\text{Yokogawa}}}{W_{\text{Yokogawa}}} . X \right) \quad (4.9)$$

4.3.2 - Resultados da Modelação dos Erros dos Medidores

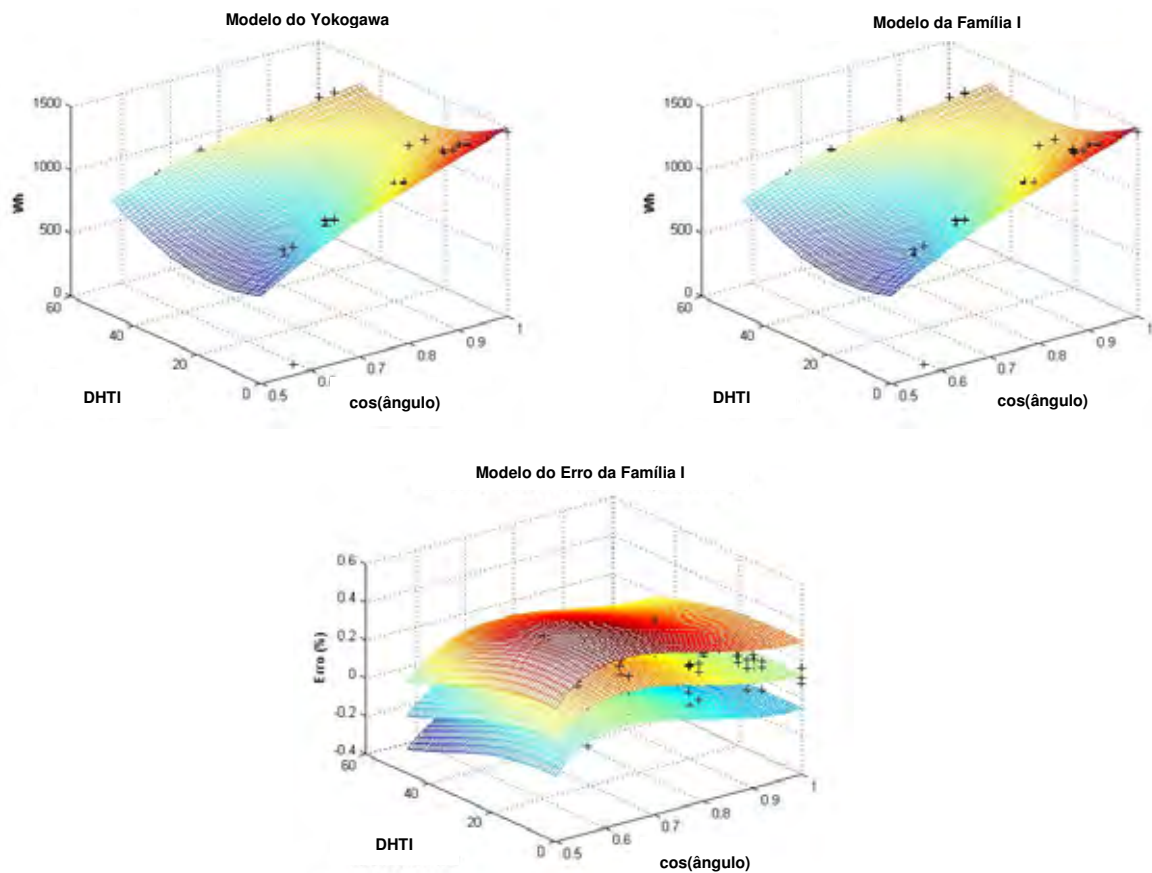
Os modelos obtidos para os medidores eletrônicos analisados são apresentados nos próximos subitens. Os resultados para os modelos do padrão e dos medidores são apresentados na forma de gráficos de superfície tridimensional, mostrando-se os pontos obtidos através dos ensaios experimentais e o comportamento do plano determinado.

Adicionalmente, na apresentação da superfície relacionada com o erro percentual são apresentados três planos, que representam as regiões do intervalo de confiança (IC_95%) adotado para o desenvolvimento dos modelos. Desta maneira, a região compreendida entre os planos limites inferior e superior, foi capaz de representar no mínimo 95% do conjunto dos pontos testados.

Os resultados apresentados pelos modelos propostos permitem a modelação dos erros dos medidores ensaiados, considerando-se o universo de DHT analisadas.

As funções de erros obtidas foram implementadas no Aplicativo/Software desenvolvido, para análise completa dos medidores selecionados para ensaios e análise global de erros de medição da concessionária, na continuidade da pesquisa.

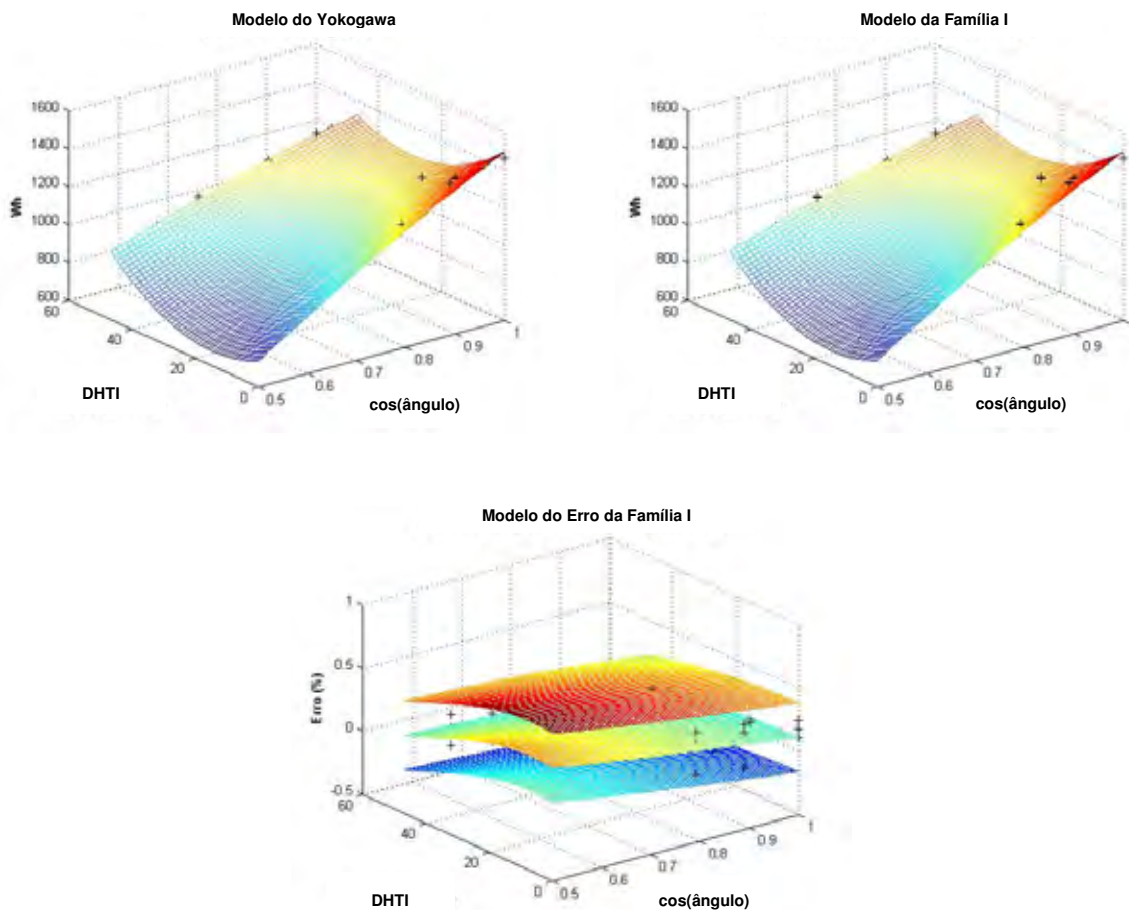
As Figuras de 4.16 até 4.30 apresentam as superfícies obtidas para as expressões dos modelos determinados para o equipamento padrão, para a família de medidor, para o erro porcentual e a expressão matemática determinada para o erro porcentual para os ensaios sem desequilíbrio de tensão, e, para os ensaios considerando-se desequilíbrios de 3% e 5%.



$$Erro = -0,0050728 + \frac{122 \cdot \cos(angulo) - 136 \cdot \cos(angulo)^2 + 48 \cdot \cos(angulo)^3 - 32}{15232 \cdot \cos(angulo) - 15432 \cdot \cos(angulo)^2 + 5670 \cdot \cos(angulo)^3 - 17 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 3971}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,17409$$

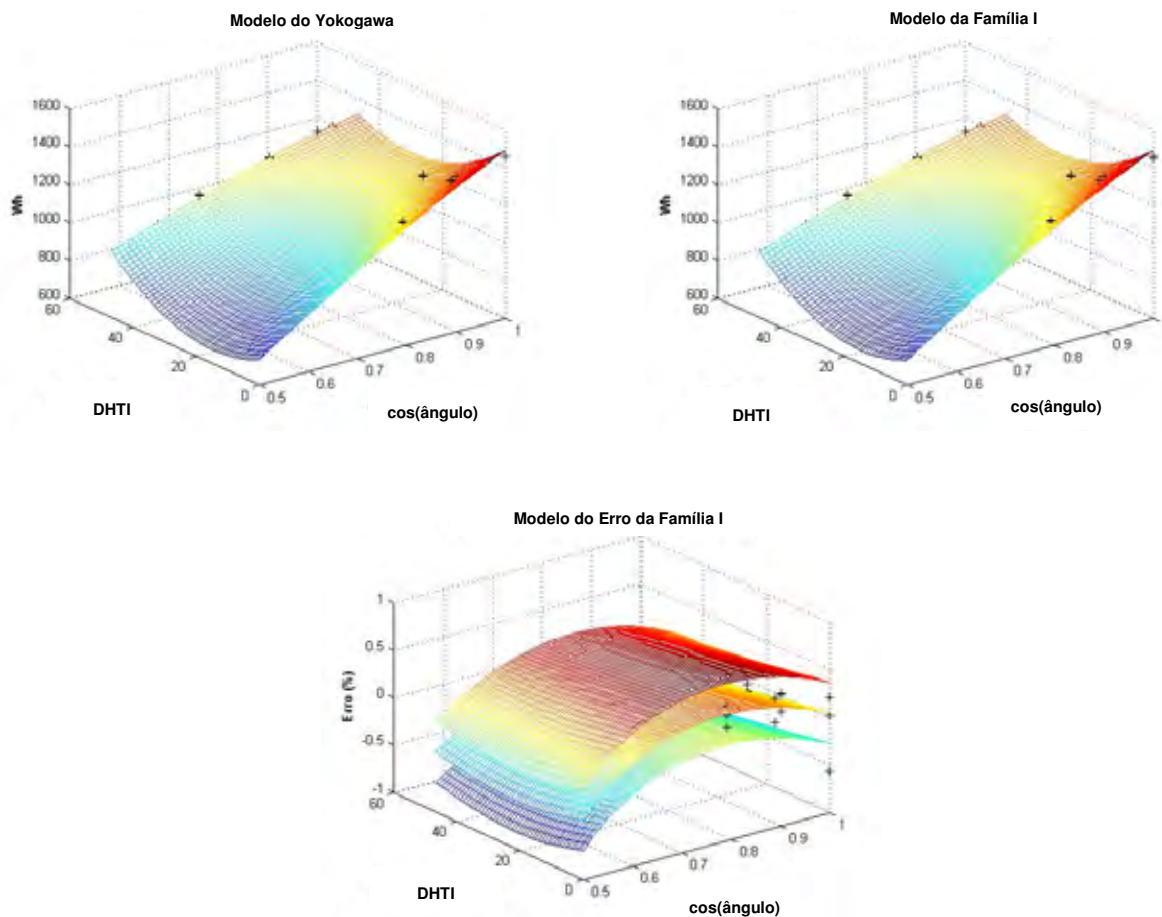
Figura 4.16 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores I, sem desequilíbrio de tensão



$$Erro = 0,016041 + \frac{5 \cdot \cos(angulo) - 2 \cdot \cos(angulo)^2 - 3 \cdot \cos(angulo)^3 + 1}{1253 \cdot \cos(angulo) + 819 \cdot \cos(angulo)^2 - 558 \cdot \cos(angulo)^3 - 16 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 22}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,27267$$

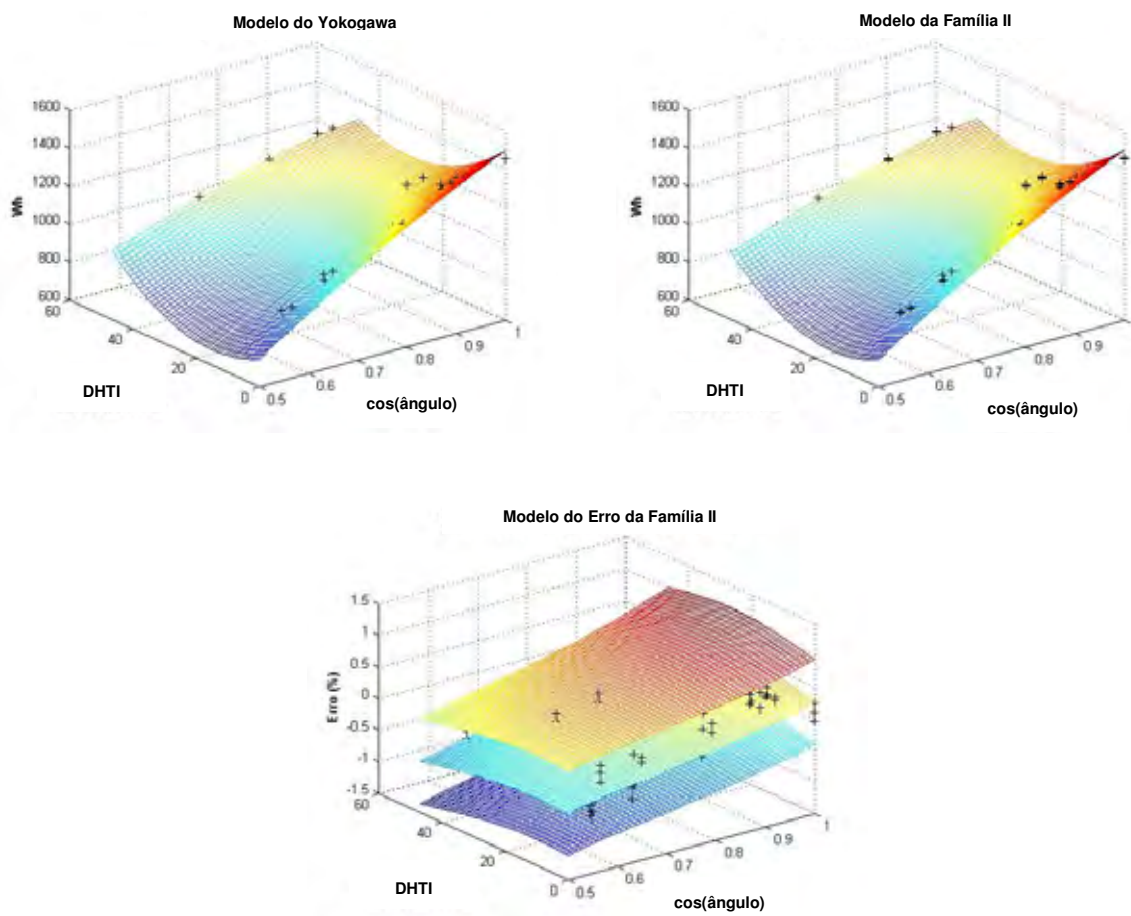
Figura 4.17 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores I, considerando desequilíbrio de tensão de 3%



$$Erro = 0,002617 + \frac{43 \cdot \cos(angulo) + 31 \cdot \cos(angulo)^2 - 47 \cdot \cos(angulo)^3 - 26}{1310 \cdot \cos(angulo) + 844 \cdot \cos(angulo)^2 - 609 \cdot \cos(angulo)^3 - 16 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 55}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0.32464$$

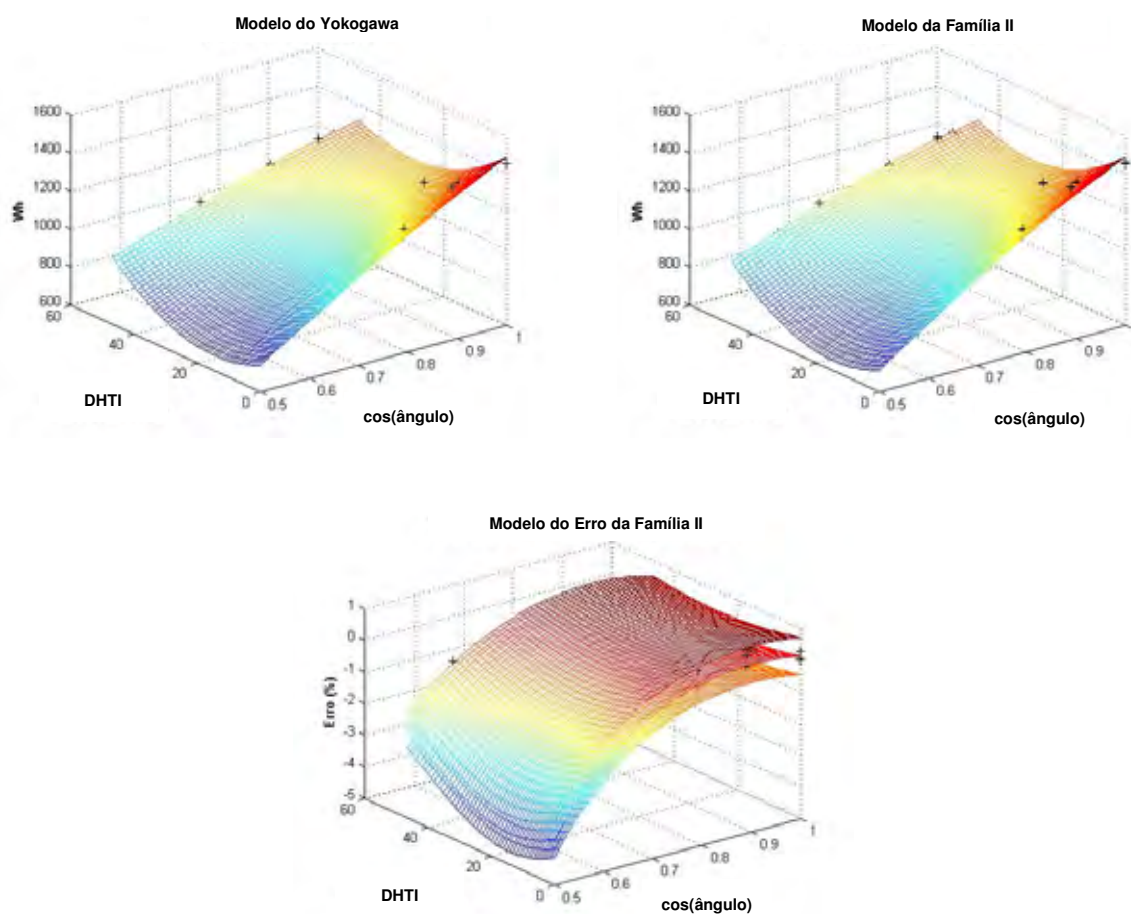
Figura 4.18 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores I, considerando desequilíbrio de tensão de 5%



$$Erro = 0,023862 + \frac{52 \cdot \cos(angulo) - 84 \cdot \cos(angulo)^2 + 50 \cdot \cos(angulo)^3 - 15}{1255 \cdot \cos(angulo) + 983 \cdot \cos(angulo)^2 - 705 \cdot \cos(angulo)^3 - 17 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 37}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,66828$$

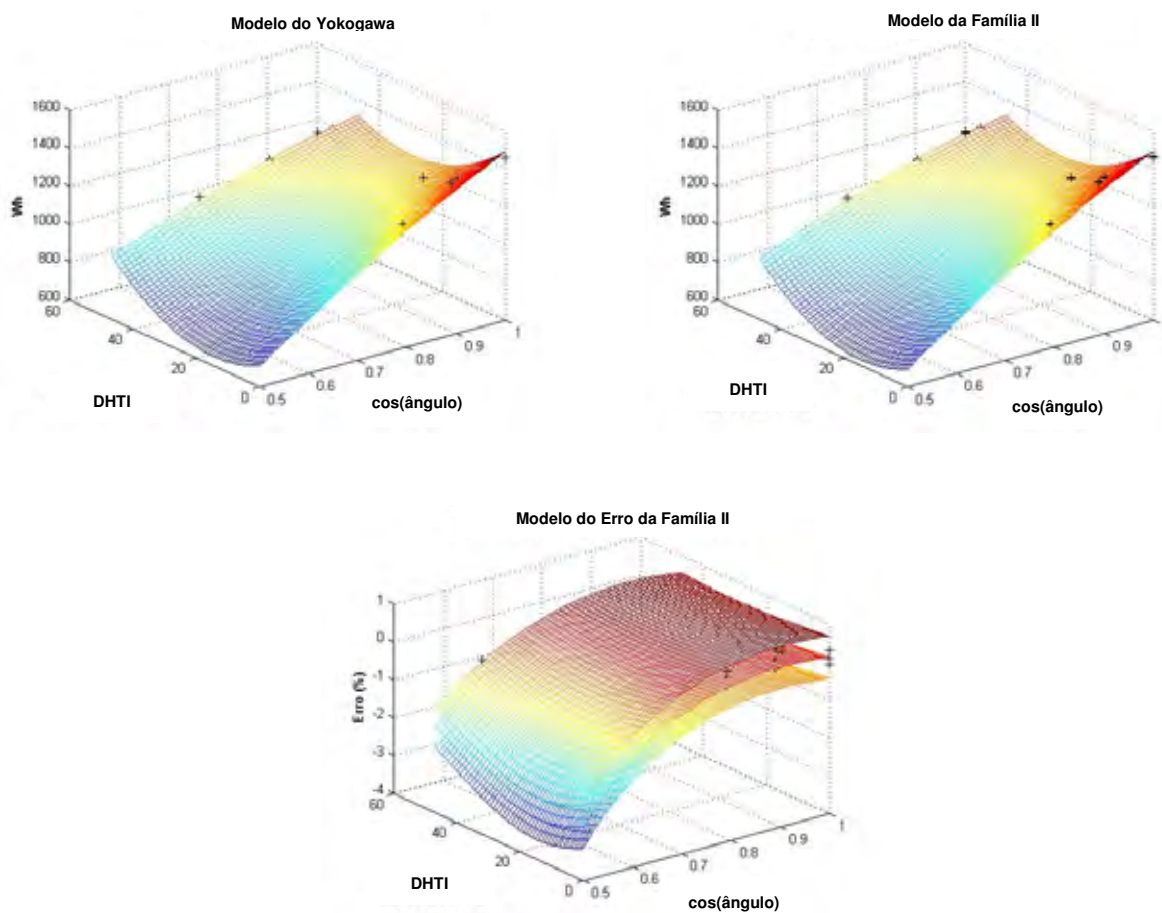
Figura 4.19 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores II, sem desequilíbrio de tensão



$$Erro = 0,024902 + \frac{114 \cdot \cos(angulo) + 107 \cdot \cos(angulo)^2 - 125 \cdot \cos(angulo)^3 - 94}{1259 \cdot \cos(angulo) + 812 \cdot \cos(angulo)^2 - 564 \cdot \cos(angulo)^3 - 16 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 21}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,58097$$

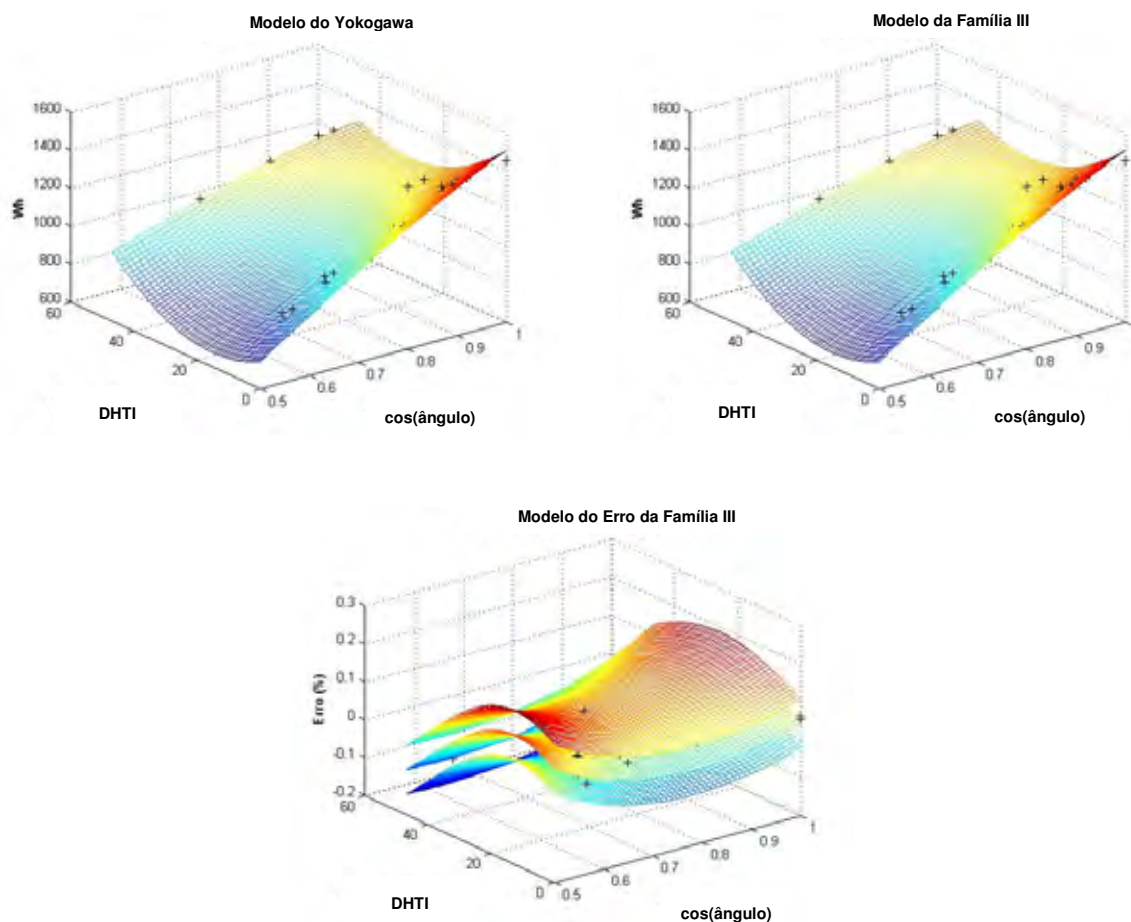
Figura 4.20 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores II, considerando desequilíbrio de tensão de 3%



$$Erro = 0,00047784 + \frac{78 \cdot \cos(angulo) + 72 \cdot \cos(angulo)^2 - 83 \cdot \cos(angulo)^3 - 65}{1385 \cdot \cos(angulo) + 874 \cdot \cos(angulo)^2 - 653 \cdot \cos(angulo)^3 - 17 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 117}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,56191$$

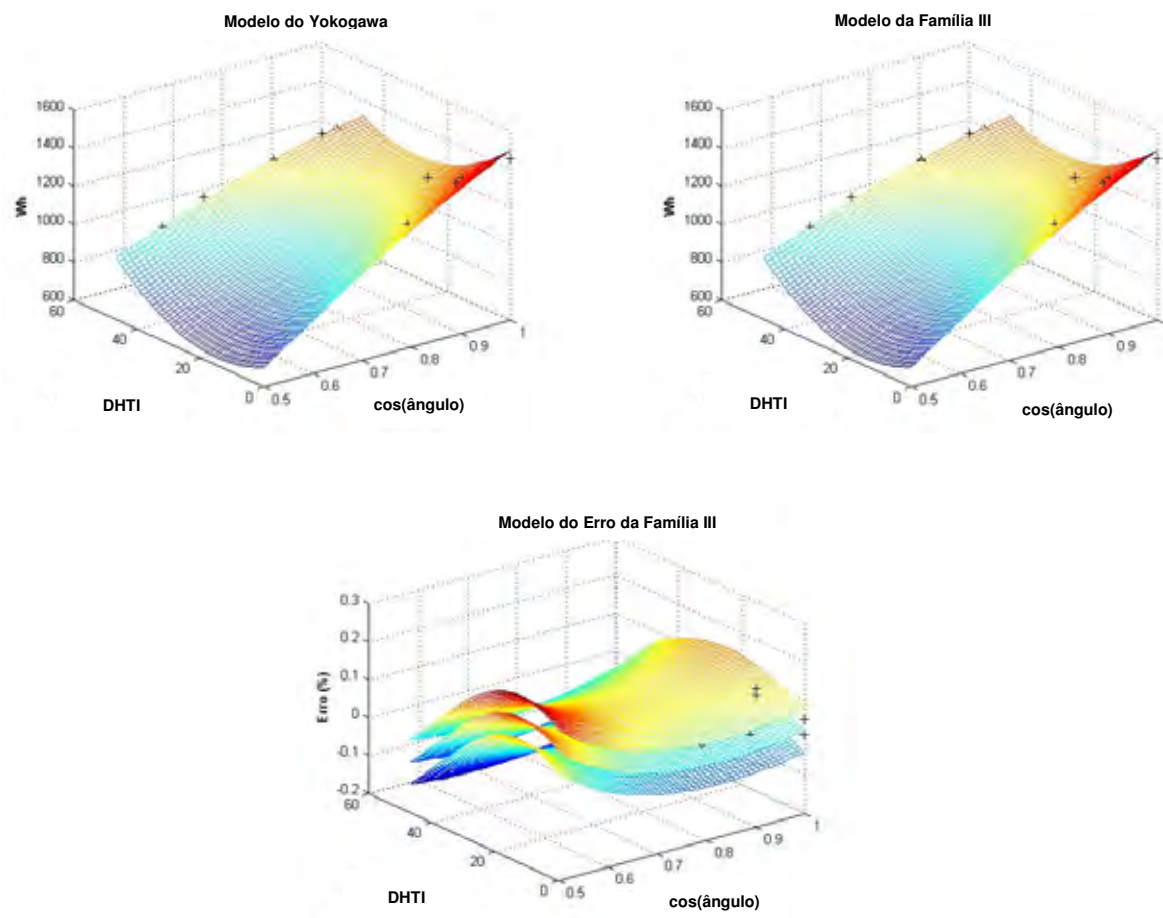
Figura 4.21 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores II, considerando desequilíbrio de tensão de 5%



$$Erro = -0,0064256 + \frac{2 \cdot \cos(angulo) - 16 \cdot \cos(angulo)^2 + 12 \cdot \cos(angulo)^3 + 2}{1036 \cdot \cos(angulo) + 1263 \cdot \cos(angulo)^2 - 803 \cdot \cos(angulo)^3 - 18 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI + 13}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,064624$$

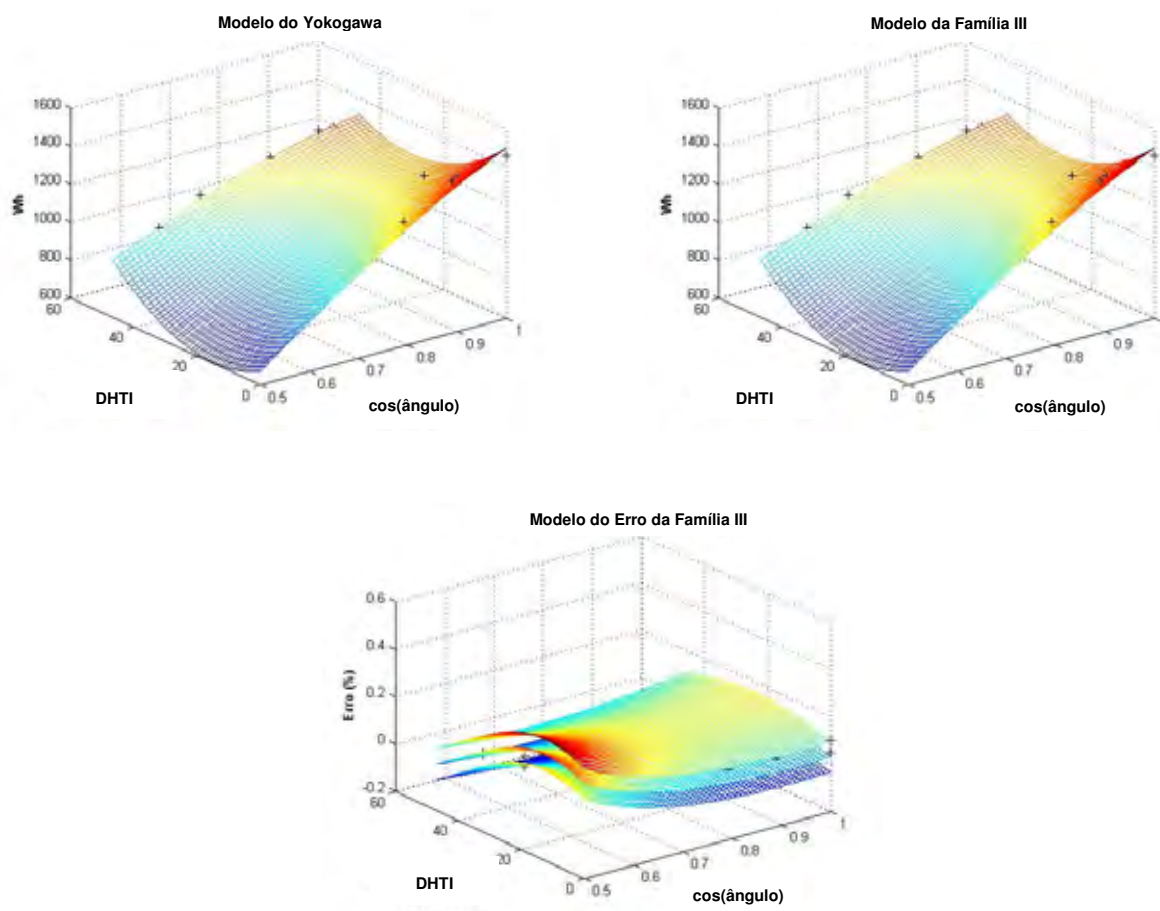
Figura 4.22 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores III, sem desequilíbrio de tensão



$$Erro = -0,0039261 + \frac{-8 \cdot \cos(angulo) - 1 \cdot \cos(angulo)^2 + 5 \cdot \cos(angulo)^3 + 5}{1090 \cdot \cos(angulo) + 1347 \cdot \cos(angulo)^2 - 874 \cdot \cos(angulo)^3 - 17 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 67}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,058144$$

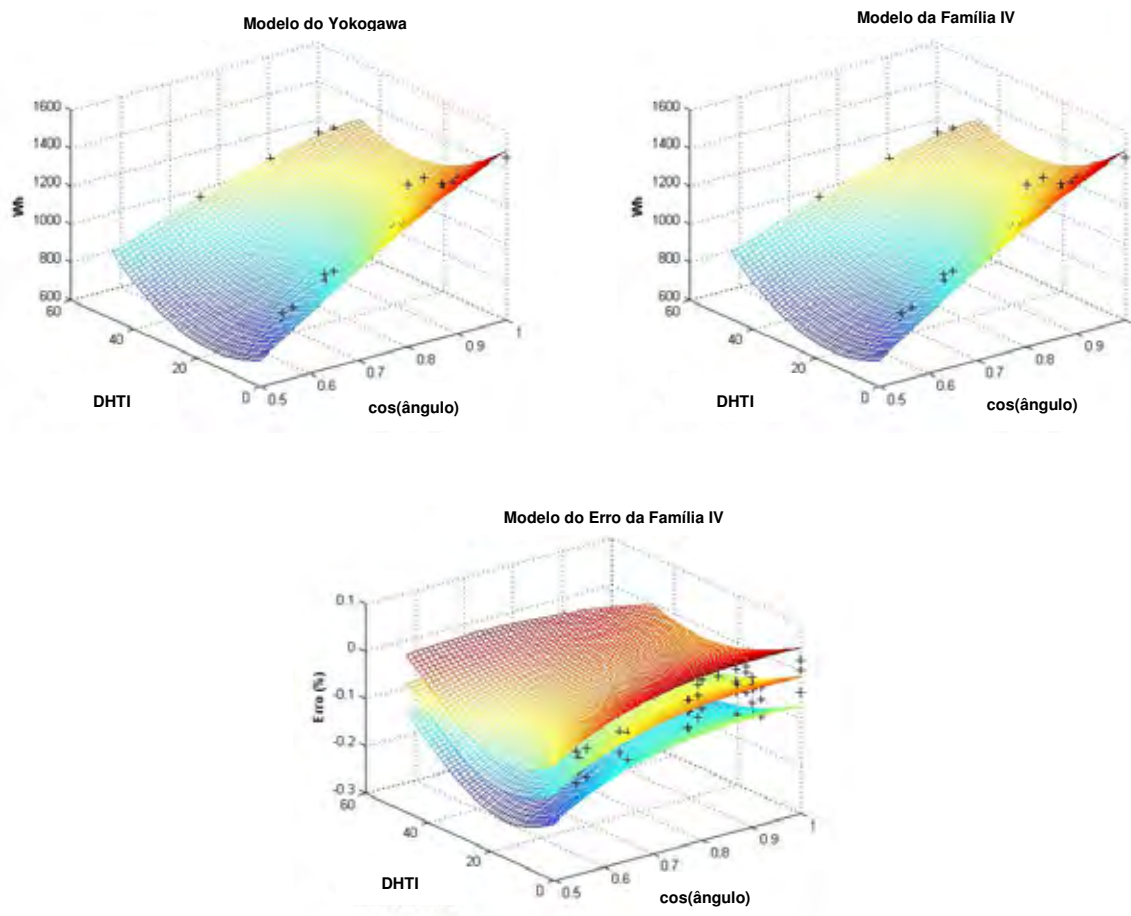
Figura 4.23 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores III, considerando desequilíbrio de tensão de 3%



$$Erro = -0,0031513 + \frac{-4 \cdot \cos(angulo) - 3 \cdot \cos(angulo)^2 + 4 \cdot \cos(angulo)^3 + 4}{1233 \cdot \cos(angulo) + 1421 \cdot \cos(angulo)^2 - 977 \cdot \cos(angulo)^3 - 18 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 178}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,065324$$

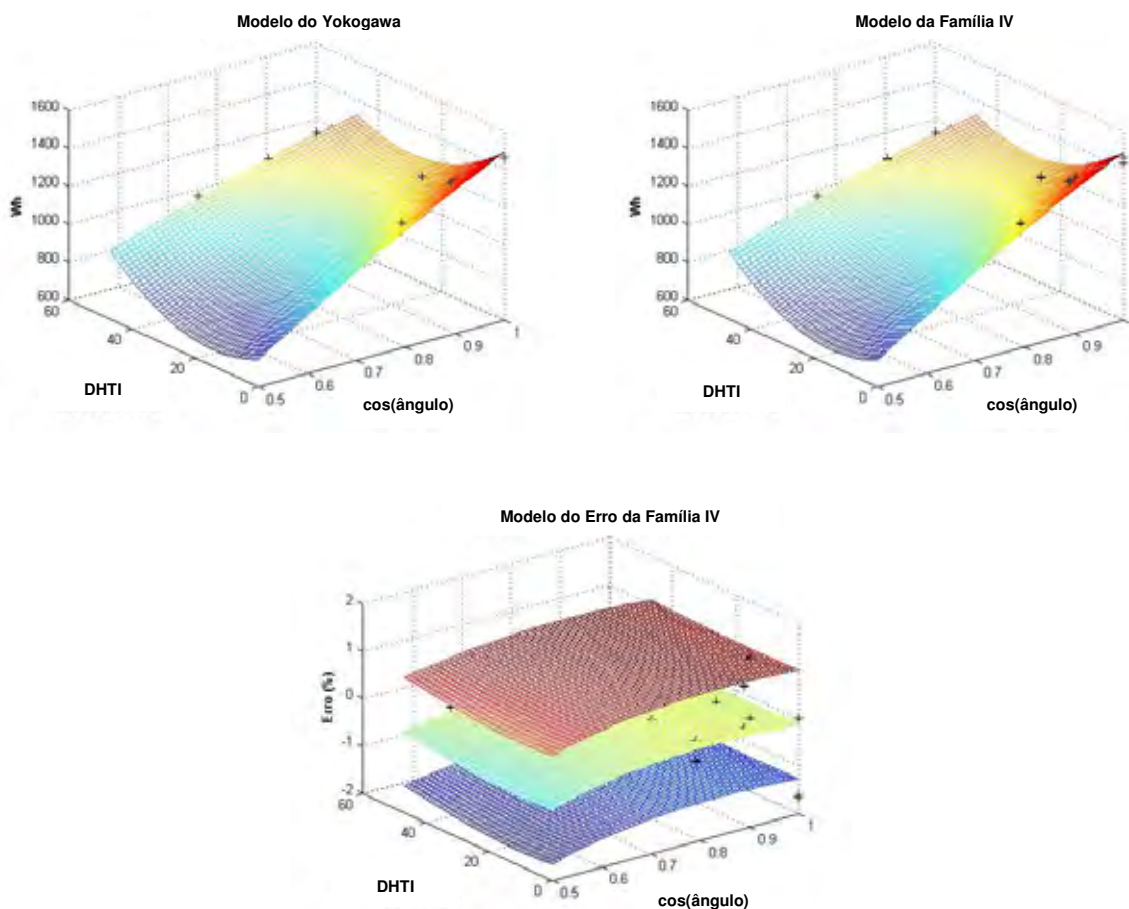
Figura 4.24 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores III, considerando desequilíbrio de tensão de 5%



$$Erro = 0,0040556 + \frac{4 \cdot \cos(angulo) + 1 \cdot \cos(angulo)^2 - 2 \cdot \cos(angulo)^3 - 3}{1337 \cdot \cos(angulo) + 964 \cdot \cos(angulo)^2 - 727 \cdot \cos(angulo)^3 - 17 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 76}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,060902$$

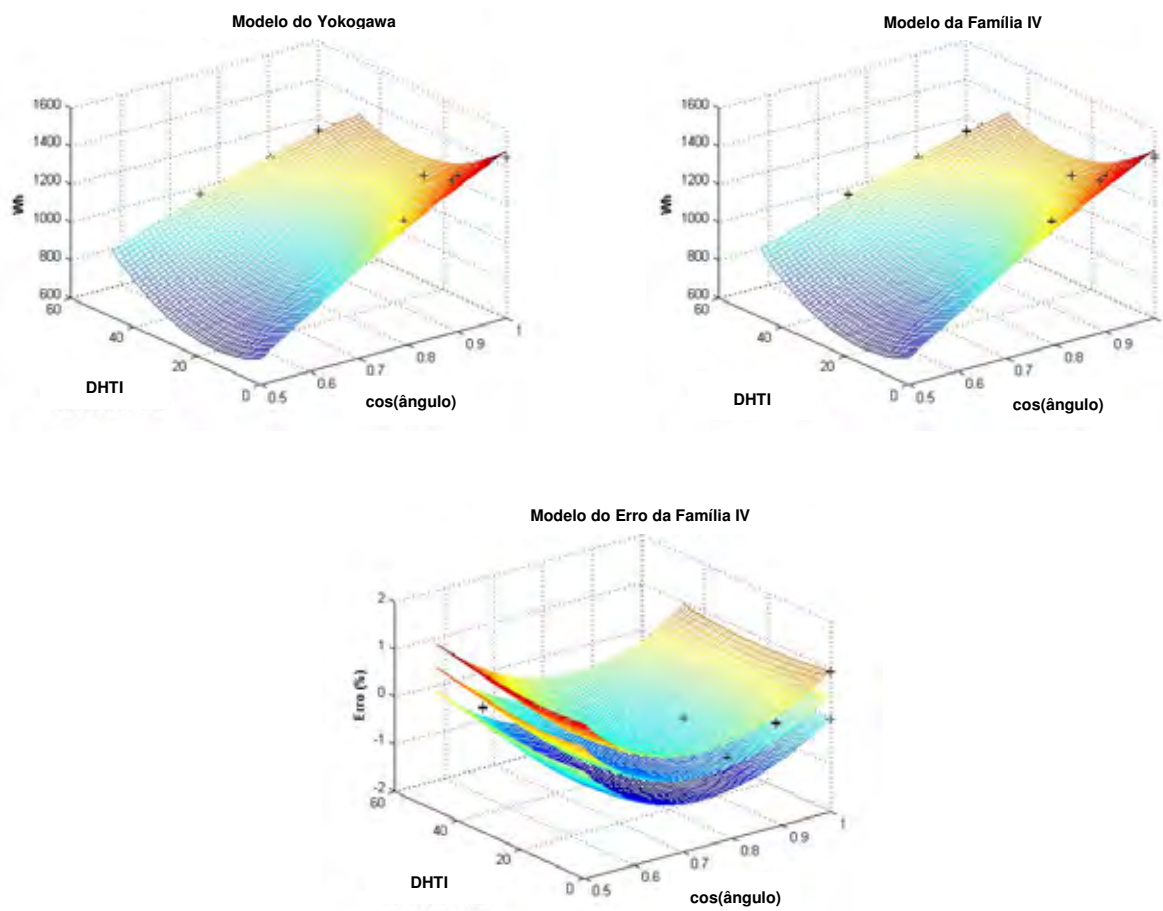
Figura 4.25 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores IV, sem desequilíbrio de tensão



$$Erro = 0,01877 + \frac{10 \cdot \cos(angulo) + 24 \cdot \cos(angulo)^2 - 24 \cdot \cos(angulo)^3 - 12}{1255 \cdot \cos(angulo) + 794 \cdot \cos(angulo)^2 - 552 \cdot \cos(angulo)^3 - 16 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 10}$$

$$IC_{95\%} = \pm 1,1466$$

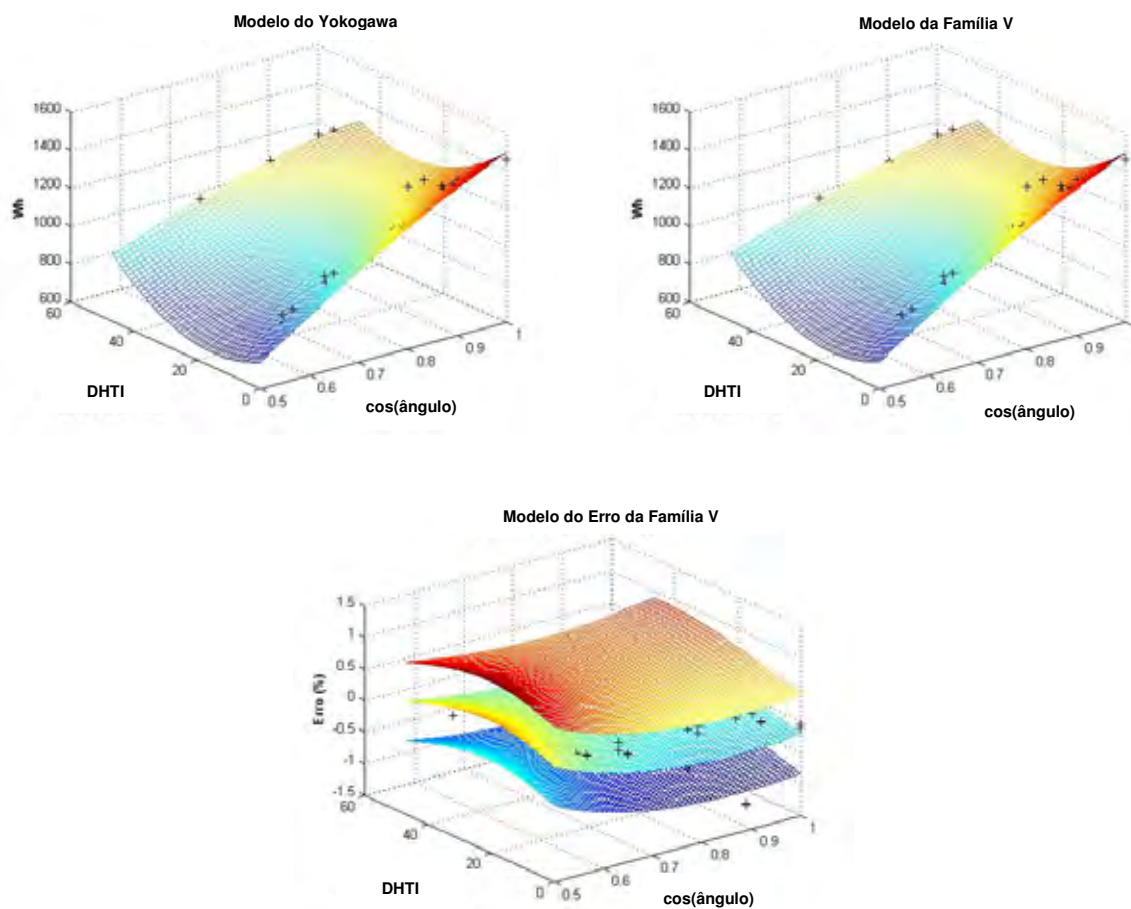
Figura 4.26 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores IV, considerando desequilíbrio de tensão de 3%



$$Erro = 0,017508 + \frac{-101 \cdot \cos(angulo) - 65 \cdot \cos(angulo)^2 + 115 \cdot \cos(angulo)^3 + 58}{1337 \cdot \cos(angulo) + 862 \cdot \cos(angulo)^2 - 654 \cdot \cos(angulo)^3 - 16 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 64}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,50042$$

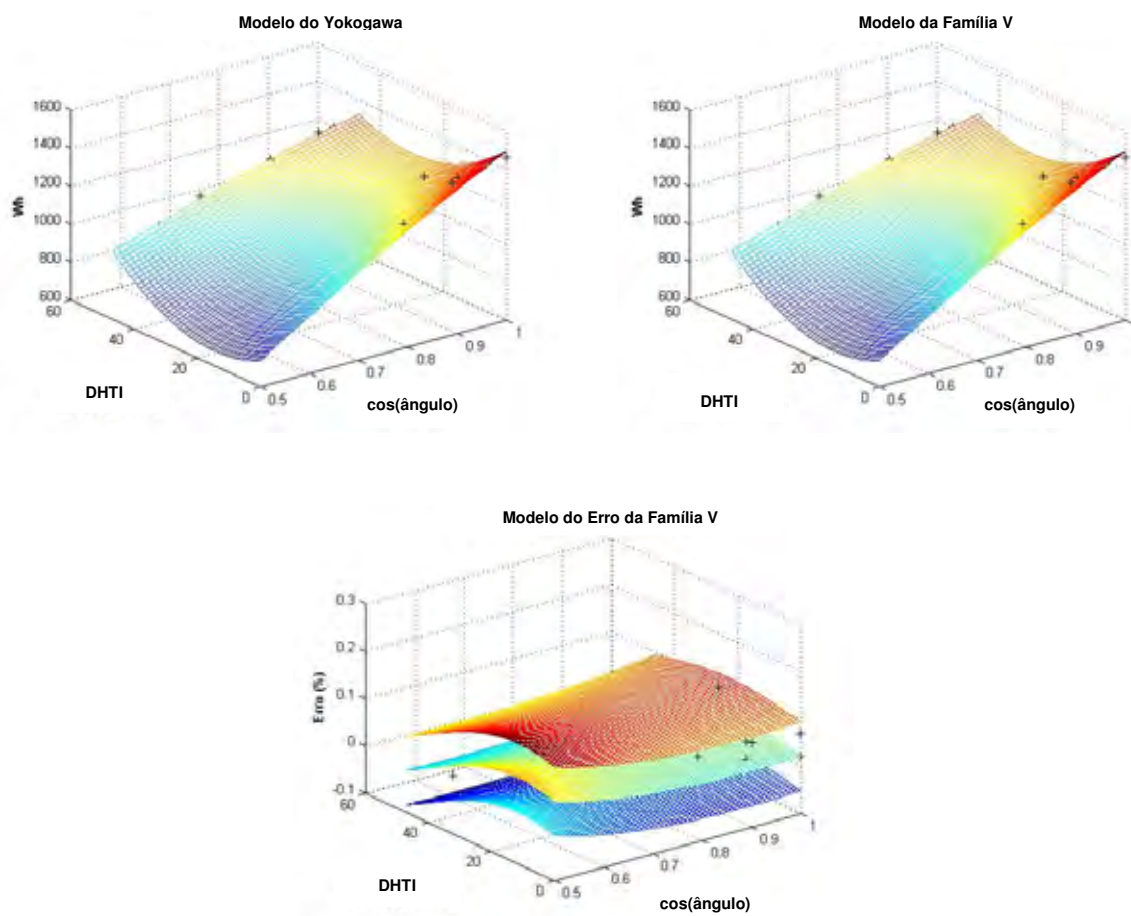
Figura 4.27 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores IV, considerando desequilíbrio de tensão de 5%



$$Erro = -0,042661 + \frac{-11 \cdot \cos(angulo) - 37 \cdot \cos(angulo)^2 + 31 \cdot \cos(angulo)^3 + 13}{1337 \cdot \cos(angulo) + 964 \cdot \cos(angulo)^2 - 727 \cdot \cos(angulo)^3 - 17 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 76}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,62222$$

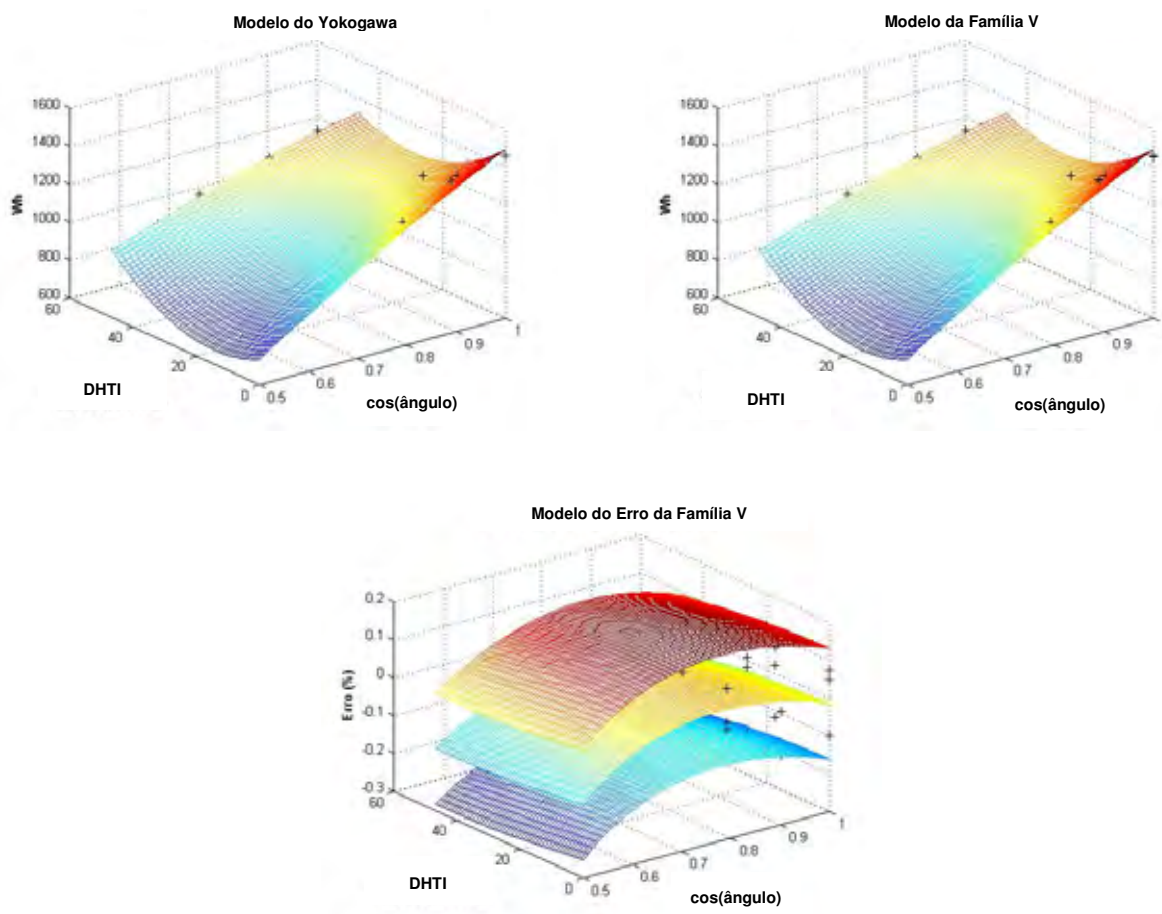
Figura 4.28 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores V, sem desequilíbrio de tensão



$$Erro = -0,0062147 + \frac{-1 \cdot \cos(angulo) - 1 \cdot \cos(angulo)^2 + 2 \cdot \cos(angulo)^3 + 1}{1237 \cdot \cos(angulo) + 799 \cdot \cos(angulo)^2 - 534 \cdot \cos(angulo)^3 - 16 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 11}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,072683$$

Figura 4.29 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores V, considerando desequilíbrio de tensão de 3%



$$Erro = 0,0064856 + \frac{+10 \cdot \cos(angulo) + 4 \cdot \cos(angulo)^2 - 9 \cdot \cos(angulo)^3 - 6}{1268 \cdot \cos(angulo) + 821 \cdot \cos(angulo)^2 - 567 \cdot \cos(angulo)^3 - 16 \cdot \cos(angulo) \cdot TDHI - 32}$$

$$IC_{95\%} = \pm 0,14601$$

Figura 4.30 - Superfícies dos modelos encontrados para a família de medidores V, considerando desequilíbrio de tensão de 5%

4.3.3 - Resumos dos Resultados de Intervalos de Confiança (IC)

Um resumo dos intervalos de confiança obtidos nos modelos desenvolvidos, considerando uma área de abrangência mínima de 95% dos pontos de ensaios experimentais, é apresentado na Tabela 4.8.

Como o valor do erro de medição total apresentado pelo modelo é composto pela soma de uma constante (erro) mais ou menos o intervalo de confiança, isto significa que existe a possibilidade do erro de medição para o equipamento, obtido segundo o modelo comportamental/experimental, ultrapassar o limite permitido pela sua classe de exatidão, em determinadas regiões (condições) de operação.

Por outro lado, o intervalo limite imposto pelo intervalo de confiança pode ser estreitado, permitindo-se um grau de liberdade menos rigoroso, refletindo em uma abrangência de pontos menor que 95%, o que resultaria em novos modelos, porém, não com a precisão dos modelos aqui adotados. Adicionalmente, informa-se que a determinação do caso ótimo para o percentual de confiança para os equipamentos ensaiados poderia ser estudado, considerando-se os casos onde os índices ultrapassarem os limites da classe de exatidão dos equipamentos sob ensaios.

Tabela 4.8 - Resumo dos resultados obtidos para o intervalo IC das famílias de medidores eletrônicos

FDV	Família I	Família II	Família III	Família IV	Família V
0%	$IC_{95\%} = \pm 0,17409$	$IC_{95\%} = \pm 0,66828$	$IC_{95\%} = \pm 0,064624$	$IC_{95\%} = \pm 0,060902$	$IC_{95\%} = \pm 0,62222$
3%	$IC_{95\%} = \pm 0,27267$	$IC_{95\%} = \pm 0,58097$	$IC_{95\%} = \pm 0,058144$	$IC_{95\%} = \pm 1,1466$	$IC_{95\%} = \pm 0,072683$
4%	$IC_{95\%} = \pm 0,32464$	$IC_{95\%} = \pm 0,56191$	$IC_{95\%} = \pm 0,065324$	$IC_{95\%} = \pm 0,50042$	$IC_{95\%} = \pm 0,14601$

4.4 - Desenvolvimento do Aplicativo

Com a finalidade do desenvolvimento de um aplicativo em plataforma amigável para o tratamento e análise dos modelos obtidos, este item apresenta as ferramentas implementadas em Delphi, com o objetivo de propiciar a análise, processamento e visualização de todos os resultados apurados e armazenados em um banco de dados operando em um servidor de dados MySQL. O aplicativo desenvolvido recebeu o nome de WhERAN, que representa a abreviação de “Wh Error Analyzer”, como ilustra a Figura 4.31.



Figura 4.31 - Imagem da tela inicial do aplicativo WhERAN v1.0

No planejamento do desenvolvimento do aplicativo na plataforma Delphi estipulou-se que a ferramenta principal deveria ser composta por um conjunto de ferramentas auxiliares para atender as necessidades previstas no trabalho de pesquisa, tais como:

- Gerenciador de consultas e atualizações das informações no banco de dados de medidores, empregando o padrão MySQL;
- Aplicativos de cálculo dos erros de medição, considerando-se modelação comportamental baseada em resultados experimentais por medidor e família;
- Aplicativos de quantificação do erro médio de registro de kWh para cada família de medidores selecionada para o estudo, através da composição de cenários escolhidos pelo usuário;

- Aplicativo de quantificação de erro de registro de kWh no parque de medidores da concessionária de referência, também considerando-se diversos cenários para as famílias de medidores.

Assim, as ferramentas básicas são:

(a) Banco de dados de medidores, com ferramentas de buscas por equipamentos, considerando-se suas áreas de distribuição, número de equipamentos instalados, histórico de registro de consumo (kWh), considerando a média de 12 (doze) meses, e dados percentuais relativos (ao consumo total médio em kWh e parque de medidores);

(b) Análise de erros dos medidores selecionados para ensaios, considerados como amostras significativas do parque de medidores da concessionária de referência, permitindo a quantificação do erro de determinado equipamento, considerando-se sua operação com distorções harmônicas de tensões (limite máximo estabelecido de 5%) e correntes (limite máximo estabelecido de 50%), e, desequilíbrios de tensões (de 3%, ou, 5%). A análise de erro resulta de modelação obtida através da descrição comportamental destes erros, obtida através de um extenso banco de dados experimentais;

(c) Quantificação do erro médio de registro em kWh, considerando-se o parque real dos medidores admitidos para ensaios, e, os limites estabelecidos para as análises de erros de medição destes medidores, admitindo-se diferentes cenários de distorções harmônicas e desequilíbrios para esta quantificação. Cenários estes compostos pelo usuário do aplicativo, envolvendo as famílias de medidores e suas distribuições nas diversas regionais da concessionária de referência.

4.4.1 - Cadastro/Análise do Parque de Medidores

A ferramenta relativa às operações com o banco de dados é responsável por proporcionar ao usuário o acesso e atualização de todas as informações quantitativas utilizadas pelos aplicativos de cálculo de erro e quantificação de erros médios totais.

O aplicativo da ferramenta de consulta de medidores possui um poderoso sistema de filtragem de dados, contemplando várias características do medidor, bem com de sua localização física, quantidade, idade (mais ou menos de 20 anos), dados

de registro de kWh médio por mês, média de kWh em percentual do total de kWh registrado por todos os medidores da empresa, conforme se verifica na Figura 4.32.

Modelo	Fabricante	Fases	Zona	Regional	Quantidade	Mas de 20 Anos	Média kWh	% Méd. kWh Total
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	A	1	não	3250376,50	0,34799
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	B	2	não	6551268,57	0,69967
X	DEMAIS MARCAS	3	RR	D	2	não	3339937,14	0,35666
X	DEMAIS MARCAS	3	RR	C	3	não	6582498,71	0,70300
X	DEMAIS MARCAS	3	RR	F	1	não	64173,50	0,00685
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	H	5	não	55020216,71	5,87608
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	A	2	não	1395999,36	0,14909
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	C	2	não	15670589,64	1,67360
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	D	5	não	20608795,36	2,20099
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	E	4	não	19066494,79	2,03628
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	F	1	não	1604935,71	0,17140
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	G	1	não	2448955,57	0,26155
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	H	3	não	47783358,43	5,10320
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	B	1	não	8278225,00	0,86371
X	DEMAIS MARCAS	3	UB	F	1	não	4069649,14	0,43463

Figura 4.32 - Aplicativo de consultas de medidores na área de concessão da empresa de referência

Especificamente, as opções de filtragem dos dados podem ser configuradas à partir dos seguintes itens:

- Modelo: modelo do equipamento desejado;
- Fases: tipo de medição (monofásica, bifásica e trifásica);
- Tipo medidor: do tipo indução e do tipo eletrônicos;
- Fabricante: descrição do fabricante do produto;
- Consumo: faixa de consumo desejada (se estiver em branco, não se considera o item na expressão de filtragem);
- Zona: especifica a sub-localização dos medidores que deverão ser apresentados podendo ser zona rural ou urbana;
- Consulta normal ou agrupar por modelo: determina o modo de apresentação dos dados, agrupada por modelos ou separada item a item;
- Regionais: determina a localização dos medidores que deverão ser apresentados.

O aplicativo é uma ferramenta importante de consulta ao parque de medidores da empresa, podendo-se com os filtros (opções de busca) selecionar equipamentos instalados nas diversas regionais, zonas rural/urbana, número de fases, faixa de consumo e ferramenta de agrupamento geral por modelo de medidor escolhido.

Assim, esta ferramenta é capaz de oferecer ao usuário análises estatísticas das características dos medidores cadastrados e das famílias existentes, permitindo uma visualização detalhada da situação do parque de medidores instalados da empresa de referência.

Adicionalmente, esta ferramenta possibilita a geração de um relatório referente a consulta efetuada no formato de planilha Excel, com extensão “.xls”, como ilustra a Figura 4.33.

Resultados da Pesquisa (Consulta Mensal)									
Modelo	Fabricante	Fases	Zona	Regional	Quantidade	Plan de 20 Anos	Média kWh	% Méd. kWh Total	% Méd. kWh na Família
30L6200	OMHATS MARKAS	3	PP	A	1	-80	80139,50	0,30909	0,24852
30L6200	OMHATS MARKAS	3	SB	A	1	-80	2278376,20	0,24799	178,118
30L5270	OMHATS MARKAS	3	SB	F	1	-80	8551268,57	0,89967	350,133
30L6400	OMHATS MARKAS	3	PP	F	1	-80	3226517,18	0,36666	180,555
30L6400	OMHATS MARKAS	3	RR	G	3	-80	6582486,71	0,20204	359,820
30L6400	OMHATS MARKAS	3	RR	H	1	-80	84173,50	0,00885	0,01006
30L6400	OMHATS MARKAS	3	SB	B	2	-80	55810218,71	387,408	3,007463
30L6400	OMHATS MARKAS	3	SB	C	2	-80	1292995,26	0,14992	62,512
30L6400	OMHATS MARKAS	3	SB	D	2	-80	1581059,64	167,300	266,638
30L6400	OMHATS MARKAS	3	SB	E	5	-80	20800725,36	220,099	1,148174
30L6400	OMHATS MARKAS	3	SB	O	4	-80	13066814,79	231,528	1,242204
30L6500	OMHATS MARKAS	3	SB	B	1	-80	1604325,71	0,11240	0,37733
30L6500	OMHATS MARKAS	3	SB	C	1	-80	2448935,37	0,28130	133,971
30L6500	OMHATS MARKAS	3	SB	E	2	-80	4778338,43	310,000	2,812262
30L6500	OMHATS MARKAS	3	SB	F	1	-80	5279225,50	0,56271	289,533
30L6500	OMHATS MARKAS	3	SB	S	1	-80	4068449,14	0,43463	222,468
TOTAL					2222		352173527,00	41,00	

Figura 4.33 - Exemplo de relatório criado pela ferramenta de consulta de medidores

4.4.2 - Cadastro/Análise de Perfis de Tensões e Correntes, e, Pares Tensão/Corrente, considerando-se Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensões

Esta ferramenta propicia a visualização e o armazenamento dos dados de perfis de tensões e correntes, que poderão ser usados nas análises de erros de medição de energia elétrica ativa.

Diversos perfis foram estabelecidos e experimentados laboratorialmente, levando à modelação experimental/comportamental dos erros dos medidores admitidos para ensaios. Estes perfis não podem ser alterados e fazem parte de um banco de dados fixo e definido. Entretanto, quaisquer outras combinações com estes perfis são possíveis, assim como, a importação de quaisquer sinais de tensões e correntes (perfil tensão/corrente), para a composição de um novo cenário de análise, desde que, dentro dos limites estabelecidos na modelação experimental (distorção harmônica total de tensão inferior a 5% e distorção harmônica total de corrente inferior a 50%).

Apresenta-se a seguir um exemplo deste aplicativo, onde o usuário pode visualizar os perfis de tensões e correntes cadastrados, acionando a aplicação “Cadastro de Perfis (tensões/correntes)”, dentro do menu “Arquivo” da tela principal do aplicativo, conforme Figuras 4.34 e 4.35.

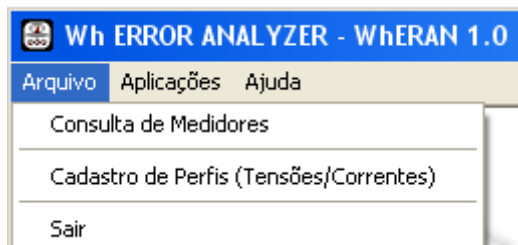


Figura 4.34 - Menu Arquivo do Aplicativo Principal

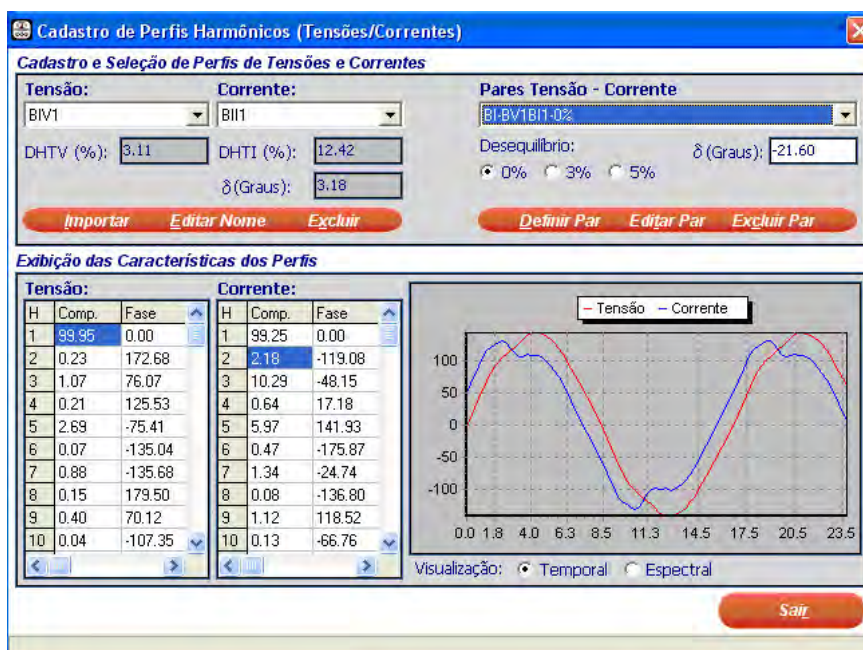


Figura 4.35 - Aplicativo de Cadastro de Perfis Harmônicos (Tensões/Correntes)

Um conjunto de dados iniciais de perfis de correntes e tensões, bem como de pares de perfis tensão-corrente estão previamente programados no aplicativo. Estes dados são provenientes dos ensaios laboratoriais efetuados no desenvolvimento do trabalho, e, conseqüentemente, são protegidos pelo aplicativo, que permite somente a visualização dos mesmos pelos usuários.

Adicionalmente, considerando-se a necessidade de importação de perfis quaisquer, dentro dos limites estabelecidos na pesquisa, novos perfis de correntes e tensões podem ser adicionados através de importação de dados pelos usuários, a partir de arquivos no formato planilha com extensão “.xls” gerados pelo analisador TOPAS. A importação dos perfis no padrão do software TOPAS foi especialmente selecionada pois este padrão é largamente utilizado pela empresa de referência, e

constitui um eficiente meio de comunicação na aquisição de dados de dispositivos de medição.

As Figuras de 4.36 e 4.37 ilustram os principais passos a serem executados para a efetuação de uma importação de dados de formas de onda para perfis (tensão/corrente), utilizando a ferramenta desenvolvida.

A Figura 4.36 ilustra a primeira tela do assistente de importação, onde o usuário deverá informar a localização do arquivo gerado pelo TOPAS, o qual contém os perfis que se deseja importar. Avançando para o próximo passo no assistente de importação, o mesmo efetua a leitura dos dados e disponibiliza as opções de importação (somente perfis de corrente, somente perfis de tensão, pares de perfis), de acordo com o conteúdo do arquivo base.

Adicionalmente, no caso da importação de pares de perfis ou somente de perfis de corrente, o aplicativo solicita ao usuário que informe o ângulo de deslocamento que será adotado como referencial para o sincronismo entre os perfis de tensão e corrente. Este ângulo de referência é determinado através da localização do instante de cruzamento por zero, transição do semi-ciclo negativo para o semi-ciclo positivo (“1”), da forma de onda do perfil de corrente, como ilustra a Figura 4.37.

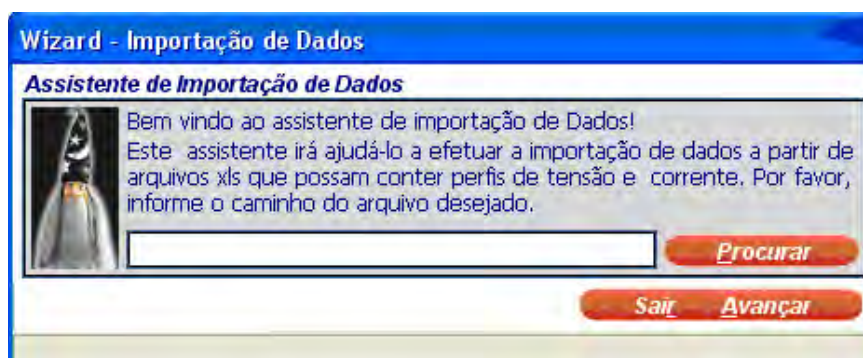


Figura 4.36 - Assistente de Importação de Dados - adição de perfis extras através de arquivo no formato TOPAS

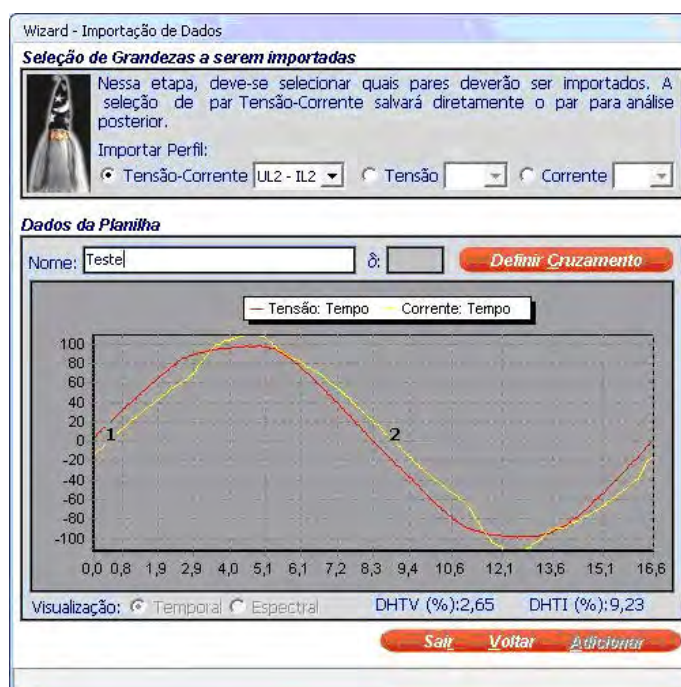


Figura 4.37 - Assistente de Importação de Dados - requerendo a indicação do cruzamento por zero que indicará o ângulo de deslocamento entre tensão e corrente

4.4.3 - Análise de Erros de Medição em Medidores de Energia Elétrica Ativa, selecionados para Análises Experimentais

Considerando que os perfis desejados para análise dos erros dos medidores admitidos para ensaios (englobando banco de dados de perfis, pares tensão-corrente) estão disponíveis para utilização através do aplicativo descrito no item 4.4.2, uma nova ferramenta foi desenvolvida com o objetivo de apresentar os modelos de erros dos medidores analisados experimentalmente, e, o de propiciar a análise e determinação do erro médio modelado para cada condição de operação (considerando-se pares de tensões e correntes, com ou sem desequilíbrios de tensões), e, as restrições quantitativas para as distorções de tensões e correntes admitidas para análises.

O aplicativo de Análise de Erros de Medição, considerando-se determinado cenário de distorções harmônicas de tensões e correntes (pares de tensões e correntes), assim como, desequilíbrios de tensões (3% ou 5%), para determinado medidor admitido nas análises experimentais, é acionado através do menu “Aplicações” e Sub-Menu “Erros na Medição”, conforme Figura 4.38. A Figura 4.39 mostra uma visão geral das opções de configuração e análises disponíveis no aplicativo.

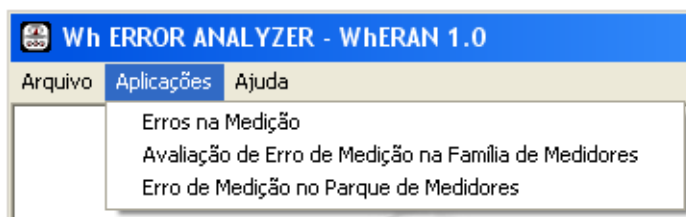


Figura 4.38 - Menu Aplicações do Aplicativo Principal

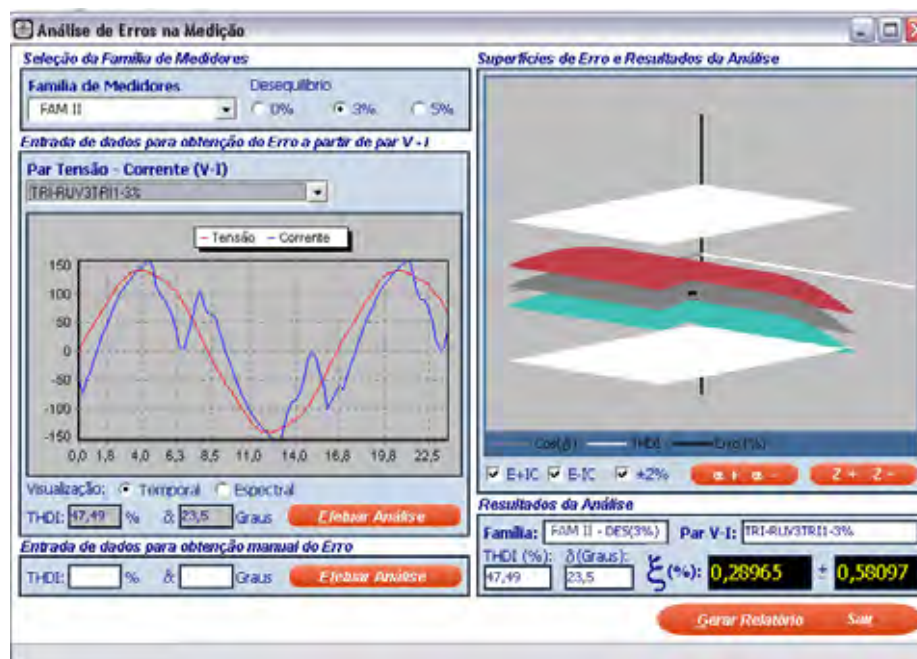


Figura 4.39 - Aplicativo de Análise de Erros de Medição

As análises de erro podem ser efetuadas selecionando-se um par de perfis tensão-corrente ou pela inclusão manual de Distorção Harmônica de Corrente (DHTI) e defasagem angular (δ). Observa-se que esta defasagem nada tem a ver com defasagens entre componentes harmônicas, nem sequer, com a defasagem entre as componentes fundamentais de tensões e correntes. Como já informado anteriormente, esta defasagem representa o deslocamento temporal entre os sinais instantâneos de tensões e correntes.

A superfície de erro para cada tipo de medidor analisado determinará qual o erro médio percentual modelado para as condições admitidas para análise.

O usuário pode visualizar a superfície do erro de medição apresentada pelo medidor em análise, e gerar um relatório no padrão Excel da análise efetuada, conforme Figura 4.40. Adicionalmente, a ferramenta possibilita ao usuário, inserir planos correspondentes aos limites impostos pelas classes de exatidão (no caso sempre +/-2%), e planos correspondentes aos limites impostos pelos coeficientes IC

(Intervalo de Confiança), a visualização na superfície do ponto correspondente a um par (tensão/corrente) analisado (ou ponto resultante para dada DHT de corrente e “ δ ”, na “análise manual”), além de permitir a rotação das superfícies nos eixos “x” e “z”, modificando o ângulo de visão das mesmas, da forma desejada pelo usuário para sua melhor visualização.

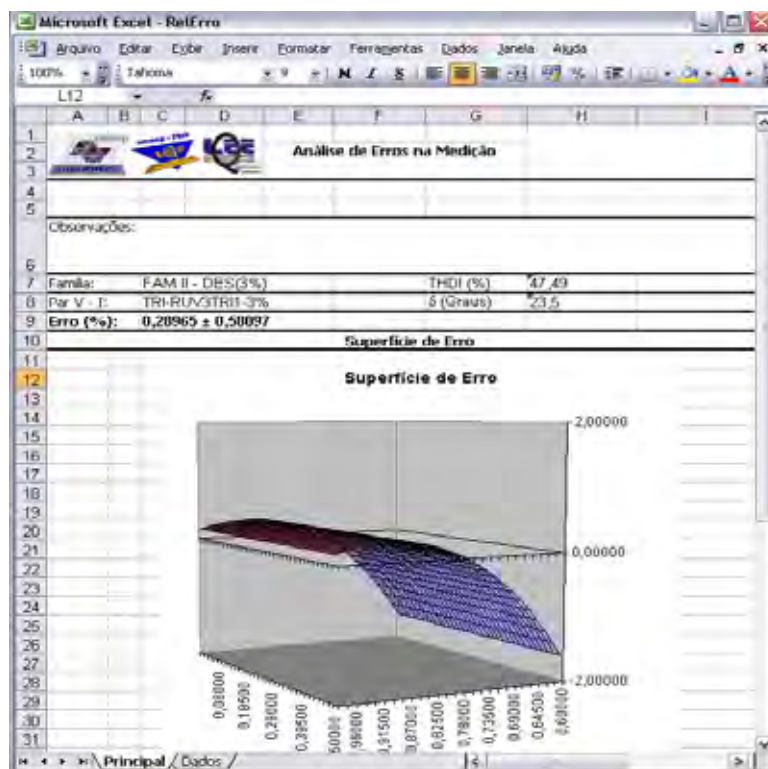


Figura 4.40 - Exemplo de relatório criado pela ferramenta de análise de erros de medição

4.4.4 - Análise de Erros de Medição em Famílias de Medidores de Energia Elétrica Ativa, considerando-se diversos Cenários de Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensões

Esta ferramenta foi desenvolvida para propiciar a construção de diferentes "cenários" de operação para uma determinada família de medidores (selecionado para modelação de erro de medição), permitindo a análise do erro de uma família de cada vez, através da montagem de diferentes cenários compostos para cada uma das regionais onde se encontram instalados, admitindo-se como base a enorme diversidade possível para os reais cenários de distorções harmônicas de tensões e correntes. Os resultados desta aplicação poderão ser usados para a determinação de uma estimativa da quantificação do erro de registro em kWh na área de concessão da empresa de referência, considerando-se seu parque de medidores (total), ou, diferentes agrupamentos desejados para análise.

A Figura 4.41 ilustra a tela inicial da ferramenta de construção de cenários. Neste aplicativo a informação inicial a ser especificada pelo usuário está relacionada a qual tipo de família de medidores o mesmo deseja efetuar as análises. Uma vez especificada a família de medidores que será analisada, o usuário pode acionar o aplicativo auxiliar de construção de cenários (clicando em adicionar “cenário”, ou, importando um cenário pré-existente), e especificar as configurações desejadas para compor tal cenário, como ilustra a Figura 4.42.

As configurações podem ser: escolha da regional, porcentagem do consumo kWh do medidor especificado na regional empregado, situação de tensão e corrente ao qual este cenário será submetido (em função de seleção de par tensão e corrente, ou, dada determinada DHT de corrente e ângulo δ).

Cenário	DHTI (%)	δ (Graus)	Desequilíbrio (%)	ϵ (%)	Regional	Perc. da Regional (%)	kWh Médio
---------	----------	------------------	-------------------	----------------	----------	-----------------------	-----------

Figura 4.41 - Aplicativo de Avaliação do Erro Percentual na Família de Medidores

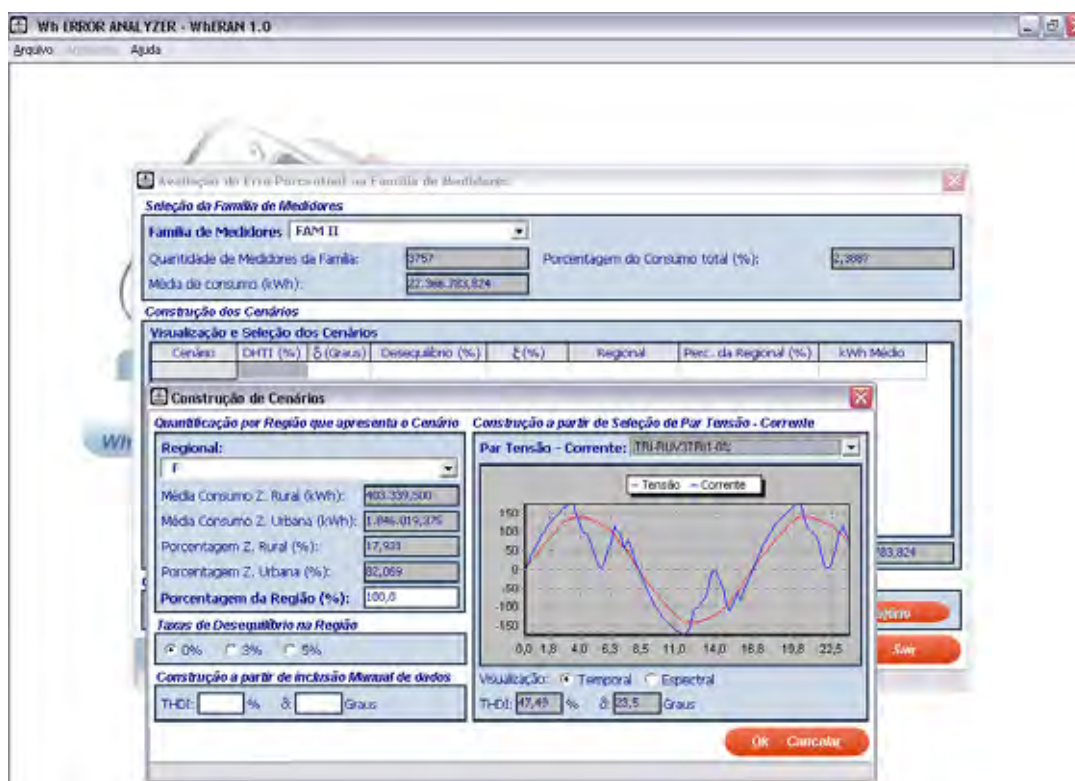


Figura 4.42 - Ferramenta auxiliar de construção de cenários para utilização no aplicativo de avaliação de Erro Percentual na Família de Medidores

O aplicativo permite ao usuário a criação de casos/cenários considerando-se o limite como sendo a utilização da porcentagem total de consumo kWh médio disponível para utilização na regional desejada, para esta família de medidores.

Assim, a Figura 4.43 ilustra o exemplo de uma análise efetuada considerando a construção de um cenário com 3 regionais, para família de medidores II, e estipulando a utilização de 100% do kWh médio apresentado pela família de medidores analisada em determinadas regionais.

O aplicativo efetua a ponderação dos erros através de cada caso inserido para compor o cenário total/resultante e apresenta como resultado o erro percentual resultante ponderado para os cenários estabelecidos.

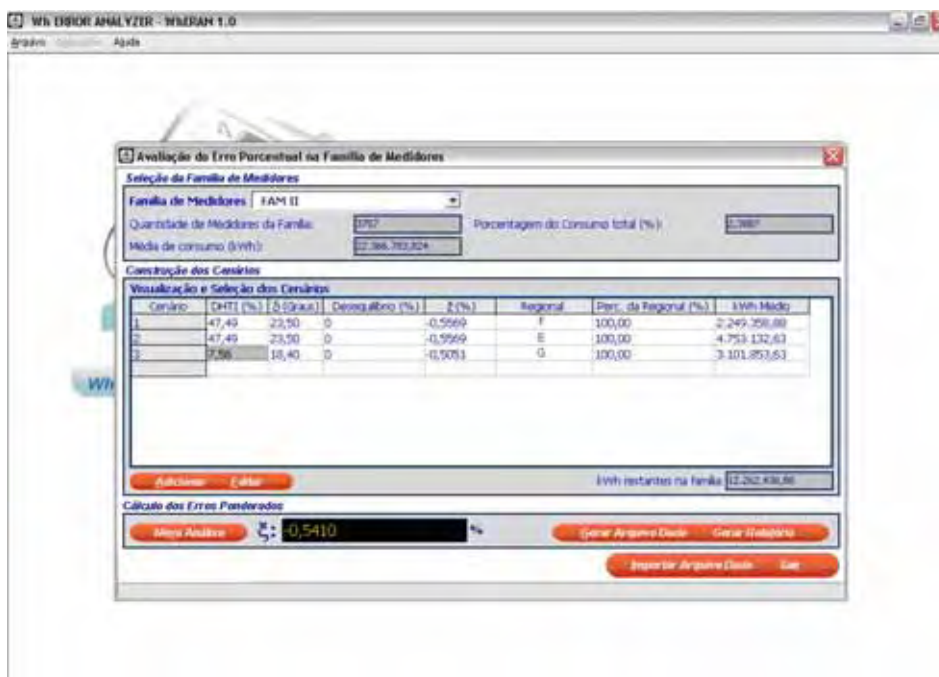


Figura 4.43 - Exemplo da Avaliação do Erro Percentual na Família de medidores, considerando cenário composto por duas situações criadas pelo usuário

Adicionalmente, o aplicativo permite ao usuário gerar um relatório com as informações referentes à análise realizada, conforme Figura 4.44, e ainda armazenar o cenário criado para a uma possível composição com outros cenários na ferramenta de avaliação do erro de medição no parque total de medidores, considerando-se diferentes famílias e cenários.

Relatório de Quantificação do Erro para Famílias de Medidores							
Observações:							
Família de Medidores:		FAM II					
Quantidade de Medidores da Família:		3757					
Média de Consumo (kWh):		22.366.783,824					
Porcentagem do Consumo total (%):		2,3887					
Erro Ponderado (%):		-0,5410					
Visualização dos Cenários							
Cenário	DHTI(%)	δ (Graus)	Deseq. (%)	ξ (%)	Regional	Perc. da Regional (%)	kWh Médio
1	47,49	23,50	0	-0,5569	F	100,00	2.249.358,88
2	47,49	23,50	0	-0,5569	E	100,00	4.753.132,63
3	7,56	18,40	0	-0,5051	G	100,00	3.101.853,63

Figura 4.44 - Exemplo de relatório criado pela ferramenta de Avaliação do Erro Percentual na Família de Medidores

4.4.5 - Análise de Erros de Medição no Parque de Medidores de Energia Elétrica Ativa, considerando-se diversas Famílias de Medidores e Cenários de Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensões

Esta ferramenta basicamente efetua a mesma análise descrita no item 4.4.4, entretanto não está limitada à análise de uma única família de medidores, podendo se estender a todo o Parque de Medidores da empresa de referência. Assim, o usuário pode compor casos empregando diferentes famílias e diferentes cenários. A importação dos cenários para cada família é efetuada através do carregamento do arquivo de configuração de cenário que pode ser salvo na ferramenta do item 4.4.4.

Neste sentido, esta ferramenta é muito importante, permitindo ao usuário quantificar em kWh o montante de energia elétrica ativa que está relacionada com o erro de medição modelado no cenário composto em análise, isso considerando diferentes tipos de cenários envolvendo diferentes tipos de famílias de medidores, regionais, porcentagens de kWh, cenários estes com desequilíbrios e/ou distorções harmônicas.

A Figura 4.45 ilustra o aplicativo de Análise de Erros de Medição no Parque de Medidores da empresa de referência.




Figura 4.45 - Aplicativo de Análise de Erros de Medição no Parque de Medidores da empresa de referência, com resultado em kWh

Esta ferramenta, obviamente, deve ser utilizada com rigor e crítica, considerando-se que os cenários hipotéticos somente serão de interesse, quanto mais próximos estiverem da representação real das formas de ondas e conteúdos

harmônicos de correntes e tensões a que estão submetidos os medidores em análise no campo (na(s) área(s)/regional(is) de interesse).

Caso a reprodução destes cenários tenha correlação com as formas de ondas (incluindo conteúdos harmônicos) reais às quais estão submetidos os medidores em análise, esta ferramenta pode se tornar um instrumento eficaz para a modelação das perdas em kWh no ambiente em análise, ou, até, no parque de medidores da concessionária de referência.

De maneira análoga aos outros aplicativos, um relatório no padrão planilha eletrônica Excel também pode ser gerado com os resultados das análises efetuadas, conforme ilustra a Figura 4.46.

 Relatório de Quantificação do Erro no Parque de Medidores			
Observações:			
Erro Médio Ponderado em kWh (cenários/famílias):	-355.336,719		
Resumo dos Arquivos Dados: Configuração do Parque de Medidores			
Arquivo: E:\Unidade1\Projetos\Elektro\Relatorios\Aplicativo\test5.dat			
Família: I			
kWh Médio (kWh): 22.765.216,420			
Erro (%): -1,0328			

--			
Arquivo: E:\Unidade1\Projetos\Elektro\Relatorios\Aplicativo\test6.dat			
Família: III			
kWh Médio (kWh): 20.922.956,220			
Erro (%): -0,5458			

--			
Arquivo: E:\Unidade1\Projetos\Elektro\Relatorios\Aplicativo\testx.dat			
Família: II			
kWh Médio (kWh): 802.680,430			
Erro (%): -0,7500			

Figura 4.46 - Exemplo de relatório criado pela ferramenta de Quantificação do Erro no Parque de Medidores

4.4.6 - Help - Ferramenta de Apoio ao Usuário

Com o objetivo de auxiliar a utilização dos aplicativos por parte dos usuários, o software desenvolvido também apresenta uma ferramenta de apoio ao usuário. Os documentos que compõem a ferramenta de apoio foram escritos utilizando o formato HTML, e apresentam a descrição de todas as opções disponíveis em cada aplicativo integrante do WhERAN, através de exemplos. Desta maneira, o usuário pode utilizar

as informações disponibilizadas pelos documentos para solucionar eventuais dúvidas com relação à execução de algum procedimento, ou, até mesmo utilizar o material como documento base para aprendizado de operação do software.

A Figura 4.47 ilustra a ferramenta de apoio ao usuário informando como proceder para efetuar uma consulta no banco de dados de medidores.

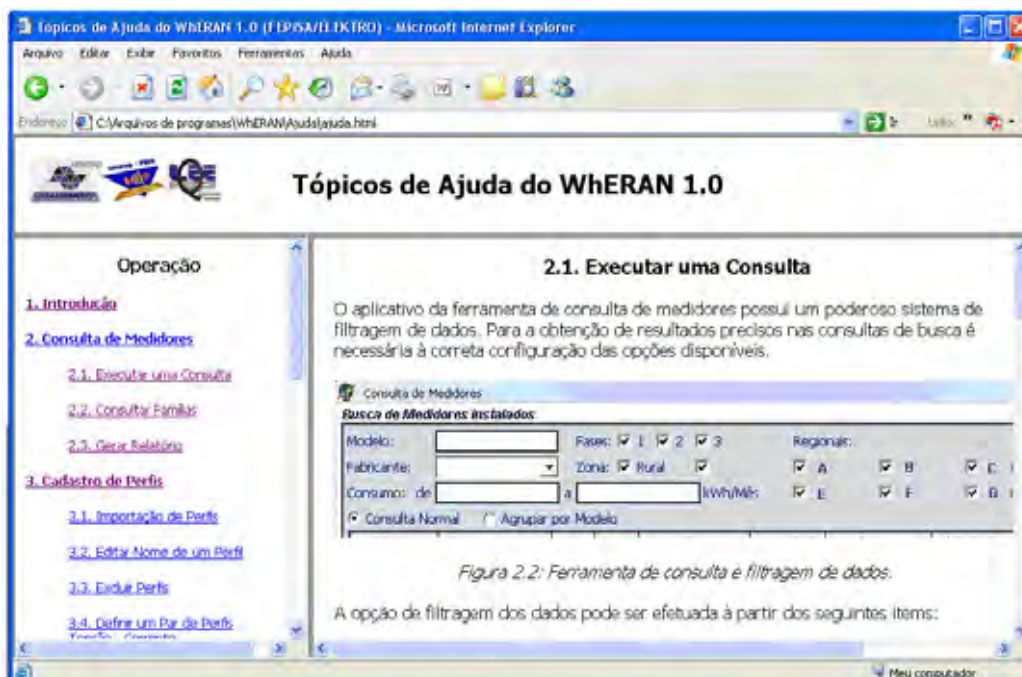


Figura 4.47 - Tela dos tópicos de ajuda do aplicativo WhERAN v1.0

4.4.7 - Aplicativo de Instalação - Setup

Considerando que o software WhERAN v1.0 é composto basicamente de um aplicativo Delphi “stand-alone” acionando um banco de dados operando no MySQL, a utilização do WhERAN em outros microcomputadores necessariamente requer a instalação dos bancos de dados de informações em um servidor MySQL, a configuração dos usuários de acesso e a instalação de um “driver” de comunicação ODBC-MySQL.

Assim, o desenvolvimento de um aplicativo de instalação se fez necessário para automatizar os processos de configuração e instalação do software das partes integrantes do WhERAN v1.0. O aplicativo apresenta as opções usuais de configuração dos aplicativos de instalação, tais como: menus em duas línguas (inglês e português), senha de proteção, escolha da pasta de instalação, criação de ícones de acesso na área do menu de programas/menu de acesso rápido, e ferramenta de “uninstall” automática.

A Figura 4.48 apresenta uma das telas do aplicativo de instalação desenvolvido.



Figura 4.48 - Imagem da tela do assistente de instalação do WhERAN v1.0

4.5 - Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados e analisados os resultados dos ensaios, e também, a modelação dos erros dos medidores eletrônicos de energia elétrica ativa. Os resultados foram colocados em forma de tabelas, facilitando a análise, e em seguida, foram apresentados gráficos tridimensionais, relacionando os erros de medição de energia com o nível de distorção harmônica da corrente e o operador cossenoidal do ângulo de defasagem entre tensões e correntes, das diversas combinações de perfis de tensões e correntes ensaiadas.

Ao analisar os resultados, percebeu-se que ocorreram erros de medição em todos os ensaios, porém, foram apresentados nas tabelas somente os resultados em que os erros foram superiores ao limite permitido pelo índice de classe dos medidores. Considerando-se que os medidores ensaiados são de índice de classe 1% e 0,2%, não podendo exceder, respectivamente, a $\pm 1\%$ e $\pm 0,2\%$ de erros na medição.

Verificou-se também que outro parâmetro que deve ser considerado é o operador cossenoidal do ângulo de defasagem entre tensões e correntes, para cada combinação dos perfis de corrente e tensão ensaiados, uma vez que o mesmo está diretamente relacionado com a energia elétrica ativa consumida pela carga associada ao sistema.

Observou-se que os erros de medição tendem a ser negativos com o aumento do nível de distorção harmônica da corrente e desequilíbrios nas tensões, resultando perda de receita das empresas concessionárias de energia elétrica.

Com os dados das análises experimentais, foi possível desenvolver um modelo matemático para os erros de cada medidor de energia analisado, considerando-se os limites de distorções harmônicas ensaiados. Foram levados em consideração os parâmetros que mais influenciaram nos erros de medição dos medidores analisados, ou seja, a distorção harmônica total de corrente e o operador cossenoidal do ângulo de defasagem entre tensões e correntes.

Observa-se que, considerando-se os limites (5%) nas taxas de distorção harmônica das tensões ensaiadas, os modelos obtidos necessitam ainda de validação, no que se refere à sua precisão para representar os erros de medição dos medidores investigados, para condições de grandes amplitudes tanto das distorções harmônicas das correntes, quanto das tensões.

Desta forma, no Anexo “A” deste trabalho é apresentada uma análise complementar de erros de medição considerando algumas das famílias de medidores selecionadas e submetidas a cinco perfis de tensão-corrente adicionais, não inclusos no banco de dados do software desenvolvido.

Verificou-se que, quando as famílias dos medidores foram submetidas a níveis de distorções harmônicas de correntes mais elevados (superior a 50%), houve amostras que extrapolaram o índice de classe de exatidão, ou seja, com tendências de registros de erros negativos e/ou positivos. Ao mesmo tempo, duas das quatro famílias avaliadas mostraram-se imunes quando submetidas às estas condições atípicas.

Finalmente, apresentou-se todo o processo de desenvolvimento do Aplicativo de Análise de Erros em Medidores de Energia Elétrica Ativa, sujeitos a distorções harmônicas de tensões e correntes, e, desequilíbrios de tensões, considerando-se modelação experimental/comportamental dos erros de medição e limites impostos para a validade destes modelos estabelecidos (DHT de tensões até 5%, DHT de correntes até 50%, defasagens entre as formas instantâneas de tensões e correntes entre -22 graus e +36 graus, e, desequilíbrios de 3% e 5%).

Uma ferramenta importante, incluída no aplicativo desenvolvido, proporciona condições para a análise de erros médios de registros de kWh, em diferentes cenários compostos, para agrupamentos de medidores de uma mesma família, ou, de famílias distintas, permitindo a possibilidade da gestão de perdas de faturamento devido a erros de medição de energia elétrica ativa.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS

5.1 - Conclusões Gerais

Os medidores eletrônicos de energia elétrica são os equipamentos responsáveis pela medição de um montante considerável da energia faturada dos consumidores, cativos ou livres, dos diversos segmentos de mercado atendidos pelas concessionárias de energia elétrica.

Estes equipamentos são projetados, fabricados, regulamentados e homologados pelo órgão metrológico nacional, onde são ensaiados e calibrados para operarem sob condições ideais, ou seja, frequência constante, formas de onda de tensão e corrente senoidais e em sistema equilibrado. Entretanto, tais condições não refletem a atual realidade do sistema de distribuição de energia elétrica do país.

Um dos fatores que corrobora com a assertiva são a constante modificação e atualização das cargas características nos setores comercial, residencial e industrial, refletindo no aumento significativo do nível de distorção harmônica de correntes e tensões nas redes de distribuição de energia elétrica.

De uma maneira geral, o desempenho dos dispositivos presentes nos sistemas de distribuição, incluindo-se os medidores eletrônicos de energia elétrica ativa, é afetado, resultando em problemas operacionais, redução da vida útil e possíveis erros no registro de consumo.

No cenário atual de progressivo aumento das cargas não lineares, é imperativo que sejam identificadas as origens das componentes harmônicas, as formas de propagação e seus efeitos sobre os componentes dos sistemas elétricos, particularmente os medidores eletrônicos de energia, os quais influenciam diretamente no desempenho financeiro das empresas distribuidoras de energia elétrica e a relação concessionária/cliente.

Adicionalmente, os desequilíbrios existentes nas tensões podem afetar significativamente o desempenho destes medidores, devendo-se avaliar em conjunto as presenças de correntes e tensões com distorções harmônicas.

Considerando-se as características construtivas dos medidores eletrônicos de energia elétrica ativa, modelos desenvolvidos de maneira totalmente teórica não são

adequados, uma vez que estão sujeitos a erros/incertezas resultantes da grande dificuldade de se representar todas as variáveis que afetam o desempenho destes equipamentos (sistemas de aquisição, condicionamento e tratamento de sinais, diversidade de softwares de computação dos sinais de tensões e correntes, etc.), frente à presença de correntes e/ou tensões não senoidais.

Pelas considerações supracitadas, a proposta deste trabalho foi avaliar os erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletrônicos trifásicos, sujeitos à distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados, através de uma análise laboratorial/experimental, permitindo-se sua modelação comportamental.

Apresentando-se uma síntese do trabalho proposto, o capítulo inicial foi dedicado a identificar os fatores motivadores que levaram ao início da pesquisa e o diferencial desta em relação às referências bibliográficas analisadas. Destacou-se ainda na introdução geral, a importância da energia elétrica sob diversas óticas, as exigências cada vez maiores dos órgãos reguladores, assim como, dos consumidores quanto à exatidão na medição e da qualidade da energia elétrica fornecida pelas empresas distribuidoras, considerando-se o panorama geral da recente reestruturação do setor elétrico nacional.

No capítulo seguinte, realizou-se uma revisão bibliográfica do estado da arte relacionada a influências dos fenômenos associados aos distúrbios nos sistemas elétricos sobre os medidores eletrônicos de energia elétrica ativa, voltada aos interesses do desenvolvimento do trabalho. Fez-se um breve relato sobre a qualidade da energia elétrica e dentre os principais fenômenos, relacionou-se os harmônicos e desequilíbrios de tensões. Apresentou-se uma descrição genérica das características principais de um medidor eletrônico de energia elétrica, a sua regulamentação metrológica e os aspectos normativos vigentes, bem como, uma visão geral do sistema tarifário brasileiro, situando-se neste contexto, os equipamentos que foram analisados na pesquisa. Foi destacado também, o cenário mundial e de mercado das tendências da medição de energia elétrica, que converge para os sistemas automatizados aplicando-se medidores eletrônicos, vindo de encontro aos interesses da presente dissertação.

O Capítulo III foi destinado à apresentação dos procedimentos, protocolos para os ensaios e arranjo laboratorial proposto para o desenvolvimento da pesquisa. Foram apresentadas as condições estabelecidas para a seleção dos medidores para

análise, sendo os mesmos selecionados a partir de um banco de dados de uma concessionária de energia elétrica. Os equipamentos selecionados foram os medidores mais significativos e representativos, em termos percentuais, em relação ao montante de consumo médio (kWh) registrado pela concessionária de referência, resultando na categoria de interesse para a pesquisa, os medidores eletrônicos trifásicos.

Posteriormente, foi apresentada a concepção da montagem laboratorial com a exposição dos equipamentos responsáveis por cada etapa. A estrutura laboratorial foi elaborada para que fosse possível programar formas de onda de tensão e corrente em equipamentos separados, possibilitando assim a geração de perfis distintos. Na geração do perfil de corrente utilizou-se uma fonte de alimentação trifásica acoplada a um dispositivo gerador de formas de onda. Na geração dos perfis de tensão aplicaram-se dois equipamentos, uma placa de geração de sinais responsável pela geração das formas de onda de tensão, com capacidade limitada de saída, sendo necessário o uso de um amplificador de sinais para que as formas de onda geradas pela placa alcance níveis de tensões requeridos para emular a existência de um perfil de tensão específico nos sensores de tensão dos medidores. Como as formas de onda foram implementadas separadamente, foi necessário o uso de um equipamento que fizesse o sincronismo entre elas. Para isso, utilizou-se um dispositivo FPGA que monitora a forma de onda de corrente imposta e determina o exato instante da passagem do semiciclo negativo para o semiciclo positivo, ou seja, o cruzamento por zero, possibilitando assim que no instante de transição o dispositivo FPGA acione a placa de geração de sinais de tensões, com um trem de pulsos de “clock”, controlando a geração das formas de onda de maneira síncrona.

Apresentou-se ainda o sistema de aquisição de dados focando as adequações necessárias em virtude da forma da coleta do sinal proporcional referente ao consumo de watt-hora registrado pelos medidores, com o objetivo de efetuar o ensaio de vários equipamentos simultaneamente. Considerando as diferenças das famílias selecionadas e submetidas aos ensaios de distorções harmônicas e desequilíbrios, e as características funcionais de cada equipamento, determinou-se que a metodologia de aquisição de informação referente ao consumo de watt-hora registrado pelo medidor seria com base nas sinalizações do “led” (indicador de potência ativa) na grande parcela dos casos e, através da porta de comunicação óptica nos casos complementares.

Desenvolveu-se uma interface de conexão entre a porta digital do sistema de aquisição e o sinal proveniente dos medidores de forma a gerenciar os ensaios experimentais em um conjunto de até doze amostras. A seguir, foi estabelecido o protocolo de medição, considerando os procedimentos de inicialização e os aplicativos desenvolvidos para o gerenciamento automático dos ensaios, e, a escolha do medidor padrão admitido para as comparações de erro do medidor ensaiado.

Ao final do capítulo apresenta-se a seleção das formas de onda de tensões e correntes para sistemas equilibrados e desequilibrados, as quais foram selecionadas através de aquisições realizadas em consumidores da área da concessionária admitida para análise, proporcionando perfis com distintas distorções, tanto de tensões, quanto de correntes.

Já no capítulo IV, foram apresentados e avaliados os resultados dos ensaios, assim como, a modelação dos erros dos medidores eletrônicos trifásicos de energia ativa.

De forma geral, as principais conclusões que podem ser extraídas dos resultados das medições são:

- ✓ Os medidores, quando submetidos às condições para as quais eles foram projetados, ou seja, frequência de 60Hz, sistema equilibrado, tensão e corrente com formas de onda senoidal, respondem dentro da classe de exatidão definida;
- ✓ Quando os medidores foram submetidos apenas a formas de onda de tensões e correntes com diferentes níveis de distorções harmônicas, verificou-se uma forte correlação do aumento dos erros de medição com o aumento dos níveis de distorção harmônica da corrente. Entretanto, não se observou uma tendência única para todos os medidores analisados, com relação aos desequilíbrios impostos nas tensões, dentro dos limites analisados;
- ✓ Outro parâmetro que deve ser considerado é o ângulo de defasagem instantâneo entre as tensões e correntes para cada combinação dos perfis ensaiados, sendo o mesmo diretamente responsável pela energia elétrica ativa consumida pela carga associada ao sistema e, influenciando assim, nos erros de medição;

- ✓ No geral, os resultados dos erros de medição apurados tendem a ser negativos quando sujeitos a níveis de distorções harmônicas de corrente e desequilíbrios nas tensões, impactando assim, em perda de receita para a concessionária de energia elétrica;
- ✓ Com os dados resultantes das análises experimentais, foi possível desenvolver curvas percentuais de erros médios de medição em relação ao conteúdo e componentes harmônicas, incluindo-se desequilíbrios de tensões, para todas as famílias dos medidores eletrônicos trifásicos ensaiados, permitindo uma avaliação das possíveis perdas médias de faturamento, considerando que estes medidores são os mais significativos para o registro/faturamento de energia elétrica ativa da empresa de distribuição de referência.

Após a análise dos resultados dos medidores eletrônicos de energia elétrica sujeitos a distorções harmônicas de tensões e correntes, em sistemas equilibrados e desequilibrados, verificou-se que os parâmetros que mais influenciaram na medição de energia elétrica ativa foram o nível de distorção harmônica da corrente e o ângulo de defasagem entre a forma de onda de tensão e corrente, considerando-se os limites de distorções harmônicas, 5%, impostos aos sinais de tensões analisados. Partindo dessas considerações, foi possível desenvolver um modelo matemático para os erros de medição referente a cada medidor ensaiado, proporcionando uma análise do comportamento de cada medidor quando submetido a formas de onda de correntes com diferentes níveis de distorção harmônica.

Considerando-se os limites nas taxas de distorção harmônica das tensões ensaiadas (5%), observou-se que os modelos obtidos necessitam ainda de validação, no que se refere à sua exatidão para representar os erros de medição dos medidores investigados, para condições de grandes amplitudes tanto das distorções harmônicas das correntes, quanto das tensões.

Portanto, apresentou-se uma análise complementar de erros de medição considerando algumas das famílias de medidores selecionadas e submetidas a perfis de tensão-corrente adicionais simulando cenários atípicos com descontinuidade da corrente, e índices elevados de DHTI, não inclusos no banco de dados do software desenvolvido. Concluiu-se que, quando as famílias dos medidores foram submetidas a níveis de distorções harmônicas de correntes mais elevados (superior a 50%), houve amostras que extrapolaram o índice de classe de

exatidão, ou seja, com tendências de registros de erros negativos e/ou positivos. Concomitantemente, duas das quatro famílias avaliadas mostraram-se imunes quando submetidas às estas condições atípicas.

Foi desenvolvido ainda um software de gerenciamento dos modelos de erros dos medidores analisados, com interface gráfica e amigável ao usuário, levando-se em conta a modelação experimental/comportamental dos erros de medição e limites impostos para a validade destes modelos estabelecidos (DHT de tensões até 5%, DHT de correntes até 50%, defasagens entre as formas instantâneas de tensões e correntes entre -22graus e +36graus, e, desequilíbrios de 3% e 5%), possibilitando a predição do erro de medição esperado pelo equipamento.

Ferramentas adicionais foram incluídas no aplicativo desenvolvido, as quais proporcionam condições para a análise de erros médios de registros de kWh, em diferentes cenários compostos, para agrupamentos de medidores de uma mesma família, ou, de famílias distintas, em todas as diferentes regionais (áreas de concessão) da empresa de distribuição de referência, permitindo a possibilidade da gestão de perdas de faturamento devido a erros de medição de energia elétrica ativa, além de subsidiar estudos de avaliação das perdas técnicas médias, custos marginais e de revisão tarifária da concessionária de referência.

Com base em estudos similares a esta pesquisa, porém com o foco em modelos de medidores polifásicos do tipo indução, pode-se concluir que este trabalho desenvolvido deve subsidiar a concessionária de referência, na tomada de decisão em relação à viabilidade da substituição dos medidores eletromecânicos por medidores eletrônicos de energia ativa (digitais), em função da avaliação dos erros de registro (considerando-se distorções harmônicas e desequilíbrios).

Considerando-se as mesmas condições dos ensaios experimentais realizados em laboratório, ou seja, com a programação de perfis de formas de onda (I e V) distintas, banco de dados representando casos reais registrados em diferentes tipos de consumidores (industrial, comercial, rural e residencial), observou-se que as famílias dos medidores eletrônicos de energia elétrica ativa, são menos sensíveis a desvios de erros de medição quando submetidos a distorções harmônicas de tensões e correntes, em sistemas equilibrados e desequilibrados.

Neste contexto, com relação aos resultados encontrados e analisados anteriormente, a tecnologia eletrônica se apresenta como alternativa atraente para todos os propósitos de medição. Propicia melhor desempenho de exatidão do

sistema de medição e oferece vantagens para a associação de periféricos de comunicação destinados à sua automação (conectividade).

Espera-se que nos próximos anos, a utilização de medidores baseados nessa tecnologia estará bastante intensificada, especialmente porque seus custos já estão competitivos com os da tecnologia eletromecânica, além das diversas possibilidades e potencialidades que oferece, dentre estas, a alternativa de considerar e/ou corrigir os erros percentuais de medição quando operando com tensões e correntes não senoidais.

Portanto, considerando as grandes dificuldades relatadas nas referências bibliográficas pesquisadas, para a obtenção de um modelo matemático para os medidores eletrônicos de energia elétrica ativa, devido à grande quantidade de parâmetros a serem avaliados, um modelo comportamental/experimental para o erro de medição desses medidores é uma contribuição inédita para esse tipo de análise.

5.2 - Propostas para Trabalhos Futuros

Com a conclusão deste trabalho verifica-se que ainda existem muitas questões a serem respondidas e estudadas em relação ao assunto abordado, pois se trata de um tema bastante amplo e complexo, podendo ser objeto de novas pesquisas e desenvolvimentos. Portanto, destaca-se a seguir algumas propostas para trabalhos futuros:

- ✓ Dar continuidade à pesquisa com um maior número de combinações de perfis de tensões e correntes a serem ensaiados com diferentes níveis de distorções harmônicas, de maiores amplitudes;
 - ✓ Refinamento dos modelos matemáticos desenvolvidos e análise de novas expressões na determinação das regressões;
 - ✓ Análise de erros de medição considerando-se perfis “dinâmicos” de pares tensões e correntes, com distorções harmônicas distintas para determinados períodos de tempo (curva de demanda com distorção harmônica co-relacionada);
 - ✓ Análise experimental de erros de medição de energia elétrica reativa em medidores eletrônicos, sujeitos a distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados;
 - ✓ Análise de erros para formas de ondas com elevados conteúdos harmônicos (tensões e correntes) e com componentes CC;
-

- ✓ Análise de erros de medição para equipamentos eletrônicos de medição direta para consumidores de baixo consumo (monofásicos e polifásicos);
 - ✓ Pesquisar o desempenho de transformadores de instrumentos e outros transdutores de sinais (tensões e correntes), utilizados em medição de energia elétrica para faturamento, quando operando sob condições não senoidais.
-

REFERÊNCIAS

- [01] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2005. 243p. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/01-Introducao\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/01-Introducao(3).pdf)>. Acesso em: 5 jul. 2008.
- [02] MEDEIROS, S. F. **Medição de energia elétrica**. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1986. 483p.
- [03] CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. **O Setor elétrico brasileiro**. [s.l. : s.n., 2004?]. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br/cceeinterdsm/v/index.jsp?vgnextoid=e1f9a5c1de88a010VgnVCM100000aa01a8c0RCRD>>. Acesso em: 5 jul. 2008.
- [04] MAKRAM E.; WRIGHT C.; GIRGIS A. A. Harmonic analysis of the induction watt-hour meter's registration error. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.7, n.3, p.1080-1088, 1992.
- [05] VELASCO, L. N. **Análise experimental de erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletromagnéticos tipo indução, sujeitos a distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados**. 2007. 187f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.
- [06] CAVALLINI, A.; MAZZANTI, G.; MONTANARI, G. C. The effect of nonsinusoidal supply on life performance of electrical insulating systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER - IEEE - ICHQP96, 7, 1996, Las Vegas. **Conference...** Las Vegas: IEEE, 1996. p.442-447.
- [07] SICARD, P. et al. Performance evaluation of harmonics detection methods applied to harmonics compensation in presence of common power quality problems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION, 3, 2003, Amsterdam. **Conference...** Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2003. p.363-375.
-

- [08] SANGSUN, K. Harmonic reference current generation for unbalanced nonlinear loads. In: IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 34, 2003, Houston. **Conference...** Houston: IEEE, 2003. v.2, p.773-778.
- [09] DURANTE, L. G. ; GHOSH, P. K. Active power measurement in nonsinusoidal environments. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.15, n.3, p.1142-1147, 2000.
- [10] CHAMBERS, R. G. Early diagnosis of tariff metering faults by a systematic analysis of main/check metering discrepancies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METERING AND TARIFFS FOR ENERGY SUPPLY, 9, 1999, Birmingham. **Conference...** Birmingham: IEEE Publications, 1999. p.213-217.
- [11] RUEGGER, M. H. ; ROTHLIN, A. J. Meter testing of the future [power system metering]. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METERING AND TARIFFS FOR ENERGY SUPPLY, 8, 1996, Brighton. **Conference...** Brighton: IEEE Publications, 1996. p.248-253.
- [12] GRAY, F. M. Meter design-factors affecting consumer safety [electricity meters]. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METERING AND TARIFFS FOR ENERGY SUPPLY, 8, 1996, Brighton. **Conference...** Brighton: IEEE, 1996. p.199-202, 1996.
- [13] FILIPSKI, P. S. ; ARSENEAU, R. Calibration of three-phase revenue meters under distorted waveform conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METERING APPARATUS AND TARIFFS FOR ELECTRICITY SUPPLY, 6, 1990, Manchester. **Conference....** Manchester: IEEE Publications, 1990. p.236-240.
- [14] GIRGS, A. A. et al. Testing the performance of three-phase induction watt-hour meters in the presence of harmonic distortion. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v.26, n.4, p.689-695, 1990.
- [15] SAIED, M. M. On the accuracy of watt-hour meters in nonsinusoidal environment. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v.3, n.1, p.2219-2225, 1995.
- [16] EMANUEL, A. E. **Tutorial course**: nonsinusoidal situations: effects on the performance of meters and definitions of power. New York: IEEE Publications, 1990. p.1377-1389.
-

- [17] FILIPSKI, P. S. ; ARSENEAU, R. Behavior of wattmeters and watthourmeters under distorted waveform conditions. In: **IEEE tutorial course**: nonsinusoidal situations: effects on the performance of meters and definitions of power. New York: IEEE Publications, 1991. p.13-22.
- [18] CARULLO, A. ; PARVIS, M. Power meter for highly distorted three-phase systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 46, n.3, p.1262-1267, 1997.
- [19] SASDELLI, R. et al. Revenue metering in the presence of distortion and unbalance: myths and reality. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 8, 1998, Athens. **Conference...** Athens: [s.n.], 1998. v.1, p. 42-47.
- [20] SILVA, R. V. R. **Análise do desempenho dos medidores de watt-hora indutivo sob condições não senoidais**. 1998. 160f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1998.
- [21] WILLIAMS, C. W. Watthour meter accuracy under controlled unbalanced harmonic voltage and current conditions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.11, n.1, p.64-72, 1996.
- [22] GIRGIS, A. A. et al. Evaluating power system unbalance in the presence of harmonic distortion. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.18, n.2, p.393-397, 2003.
- [23] LIU, Q. A microcomputer-compensated digital power meter. In: CONFERENCE ON PRECISION ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS, CEPÉM'90, 1990, Ottawa. **Conference...** Ottawa: IEEE Publications, 1990. p.144.
- [24] DRIESEN, J. et al. The registration of harmonic powers by analog and digital power meters. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v.47, n.1, p.195-198, 1998.
- [25] TUNIA, H. ; MIKOLAJUK K. ; MAYER D. et al. IEEE working group on nonsinusoidal situations: effects on meter performance and definitions of power. IEEE/PES, 1995. **IEEE/Power Engineering Society PES**. New York, v.11, n.1, p.79-101, 1995.
-

- [26] DEVANEY, M. J. Fuzzy-based adaptive digital power metering using a genetic algorithm. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v.47, n.1, p.183-188, 1998.
- [27] RUEGGER, M. ; ROTHLIN, A. Integrated test of new generation kWh-meters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METERING APPARATUS AND TARIFFS FOR ELECTRICITY SUPPLY, 7, 1992, Glasgow. **Conference...** Glasgow: IEEE Publications, 1992. p.169-173.
- [28] RUEGGER, M. ; ROTHLIN, A. New generation test equipment for new generation kWh-meters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METERING APPARATUS AND TARIFFS FOR ELECTRICITY SUPPLY, 6, 1990, Manchester. **Conference...** Manchester: IEEE Publications, 1990. p. 245-249.
- [29] ROBINSON, P. B. A watt-hour meter-the solid state polyphase kind. **IEEE Potentials**, New York, v.15, n.1, p.9-13, 1996.
- [30] DE VRE, R.; HUYBRECHTS, R. ; EUGENE, C. Electronic energy meters-principles, performances and tests. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, CIRED, 12, 1993, Birmingham. **Conference...** Birmingham: IEEE Publications, 1993, p.5.8/1-5.8/5.
- [31] HENRIQUES, A. L. **Medição de energia elétrica para faturamento: estudo comparativo de medidores eletrônicos e eletromecânicos, com foco no desempenho de condições não senoidais**. 2002. 134f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- [32] SCHNEIDER ELECTRIC/PROCOBRE. Qualidade de energia: harmônicas. In: WORKSHOP INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO, 1, 2003, Campinas. **Workshop...** Campinas: [s.n.], 2003. p.4.
- [33] FERREIRA FILHO, A. L.; OLIVEIRA, M. A.; PINTO, M. G. S. Ferramenta computacional para quantificação do desequilíbrio de tensão. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO EM QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 6, 2005, Belém. **Anais...** Belém: NESCE, 2005. p.93-98.
- [34] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Contribuições para a normalização da qualidade da energia elétrica - desequilíbrios nas redes elétricas**. Uberlândia: UFB, 2001. p.8-10.
-

- [35] LANDIS+GYR EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA. **Manual do usuário Z.D318**. Curitiba: LANDIS, 2005. (Medidor de Energia Ativa e Reativa).
- [36] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Conheça o Inmetro**. [s.l.: s.n., 1996]. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/inmetro/>>. Acesso em: 02 set. 2008.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14519**: medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) - especificação. Rio de Janeiro, 2000. 23p.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14520**: medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2000. 21p.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14521**: aceitação de lotes de medidores eletrônicos - procedimentos. Rio de Janeiro, 2000. 11p.
- [40] DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS - DIEESE. **As tarifas de energia elétrica no Brasil**: sistemática de correção e evolução dos valores. São Paulo: DIEESE, 2007. (Nota Técnica, 58).
- [41] DELGADO, A.C.V.; ARANGO, H.; PRADO, C.C.; GUIMARÃES, C.A.M.; CABRAL, S.S.; MATSUO, N.M. Projeto integrado de qualidade de energia. Normalização, medição e tarifação. Tarifação e medição de sistemas distorcidos. In: FEIRA E CONGRESSO, 99, 1999, São Paulo. **Enershow...** São Paulo: [s.n.], 1999. p.4.
- [42] ITRON SISTEMAS E TECNOLOGIA. **Cenário mundial da medição residencial**. Campinas: ITRON, 2005. (Informativo/maio/2005).
- [43] CANESIN, C.A.; GONÇALVES, F.A.S.; PINTO, J.O.P. et al. Modelação de erros de medição em medidores de energia elétrica ativa baseada em ensaios experimentais. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 7, 2007, Santos. **Anais...** Santos: CBQEE, 2007. p.1-6.
-

APÊNDICE A

Resultados das Análises

As Tabelas A.1 até A.10 apresentam os resultados das análises para os medidores eletrônicos, considerando-se os arranjos propostos para os ensaios, e os perfis de tensão e corrente. Os resultados apresentados envolvem os dados obtidos para os medidores em análise, resultados para o medidor padrão (Yokogawa) e aqueles para o método de integração auxiliar (WaveBook).

Observa-se que, para o caso do medidor da família I, conforme Tabelas A.3 e A.8, uma das amostras apresentou problemas de aferição/calibração, e, portanto, não foi incluída na análise aqui apresentada, apesar de ter sido ensaiada. Considerando-se o resultado para este medidor, serão analisados apenas os resultados para as duas amostras para a modelação do mesmo.

Tabela A.1 - Erros da família de medidores I, sistema equilibrado

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,63465	0,17798	1446,60	1454,01	1454,30
2	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,12302	0,24380	1460,10	1457,14	1458,70
3	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,19798	0,24380	1461,00	1457,14	1458,70
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	1,25391	1,47267	1203,90	1236,28	1217,10
2	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,09019	1,36819	1221,90	1239,21	1221,50
3	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,14727	1,36819	1221,30	1239,21	1221,50
1	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,57838	3,38075	1047,90	1089,69	1052,90
2	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,37314	3,38841	1055,10	1088,53	1050,90
3	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,29730	3,38841	1054,50	1088,53	1050,90
1	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,94901	2,48087	1192,80	1233,37	1201,40
2	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,27378	2,47393	1202,40	1230,11	1199,20
3	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,24903	2,47393	1202,10	1230,11	1199,20
1	TV1	RUI2	3,02	7,18	34,99	0%	0,89255	2,91946	1125,00	1168,65	1133,90
2	TV1	RUI2	3,02	7,18	34,99	0%	0,24117	2,87606	1138,20	1170,33	1135,40
3	TV1	RUI2	3,02	7,18	34,99	0%	0,19411	2,87606	1137,30	1170,33	1135,40
1	TV1	RUI3	3,02	7,54	34,99	0%	0,92172	2,69095	1154,10	1195,48	1163,00
2	TV1	RUI3	3,02	7,54	34,99	0%	0,22150	2,69729	1165,80	1195,89	1163,10
3	TV1	RUI3	3,02	7,54	34,99	0%	0,16608	2,69729	1165,20	1195,89	1163,10
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	1,18185	0,41489	1280,10	1298,78	1292,60
2	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,23703	0,41254	1291,80	1298,51	1292,80
3	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,16739	0,41254	1292,10	1298,51	1292,80
1	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,98769	1,97365	1239,30	1275,97	1250,40
2	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,08014	1,94970	1248,30	1273,47	1247,70
3	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,20712	1,94970	1247,70	1273,47	1247,70
1	INDV1	INDI2	4,76	4,46	18,40	0%	0,84506	1,26077	1356,30	1385,04	1366,30
2	INDV1	INDI2	4,76	4,46	18,40	0%	0,17899	1,31598	1363,20	1380,74	1360,40
3	INDV1	INDI2	4,76	4,46	18,40	0%	0,19708	1,31598	1362,90	1380,74	1360,40
1	INDV1	RUI2	4,76	7,18	18,40	0%	1,07220	1,60533	1303,20	1336,76	1314,70
2	INDV1	RUI2	4,76	7,18	18,40	0%	0,17580	1,59216	1316,40	1336,46	1314,10
3	INDV1	RUI2	4,76	7,18	18,40	0%	0,14589	1,59216	1315,80	1336,46	1314,10
1	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,90122	1,45685	1321,50	1351,98	1331,30
2	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,22085	1,47287	1333,50	1350,43	1330,00

3	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,18196	1,47287	1332,90	1350,43	1330,00
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	1,52670	2,93675	1010,40	1055,77	1024,20
2	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,11673	2,96598	1024,50	1055,03	1023,20
3	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,16084	2,96598	1023,60	1055,03	1023,20
1	INDV2	INDI1	1,89	18,40	53,56	0%	0,48713	6,29894	728,40	778,60	731,48
2	INDV2	INDI1	1,89	18,40	53,56	0%	0,33603	6,30626	732,60	776,86	730,04
3	INDV2	INDI1	1,89	18,40	53,56	0%	0,44284	6,30626	733,50	776,86	730,04
1	INDV2	RUI2	1,89	7,18	53,56	0%	0,72800	5,34662	825,30	876,83	830,57
2	INDV2	RUI2	1,89	7,18	53,56	0%	0,22057	5,28500	834,90	878,33	832,86
3	INDV2	RUI2	1,89	7,18	53,56	0%	0,27477	5,28500	834,90	878,33	832,86
1	INDV2	RUI3	1,89	7,54	53,56	0%	0,71872	4,91247	865,50	915,21	871,42
2	INDV2	RUI3	1,89	7,54	53,56	0%	0,29927	4,94230	875,40	917,13	872,74
3	INDV2	RUI3	1,89	7,54	53,56	0%	0,26920	4,94230	875,40	917,13	872,74
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	1,09145	2,10562	1113,60	1149,38	1124,80
2	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,18479	2,25800	1123,50	1147,93	1121,50
3	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,11544	2,25800	1122,90	1147,93	1121,50
1	RUV2	INDI1	2,86	18,40	47,30	0%	0,68661	4,74647	874,50	922,93	880,09
2	RUV2	INDI1	2,86	18,40	47,30	0%	0,30115	4,80187	880,80	922,36	878,24
3	RUV2	INDI1	2,86	18,40	47,30	0%	0,30609	4,80187	881,10	922,36	878,24
1	RUV2	INDI2	2,86	4,46	47,30	0%	0,79736	3,44843	1046,40	1091,06	1053,40
2	RUV2	INDI2	2,86	4,46	47,30	0%	0,26490	3,40646	1059,60	1093,52	1056,40
3	RUV2	INDI2	2,86	4,46	47,30	0%	0,19892	3,40646	1058,70	1093,52	1056,40
1	RUV2	RUI2	2,86	7,18	47,30	0%	0,67680	4,07305	969,60	1016,59	975,48
2	RUV2	RUI2	2,86	7,18	47,30	0%	0,33129	4,03354	979,80	1017,04	976,23
3	RUV2	RUI2	2,86	7,18	47,30	0%	0,27680	4,03354	979,20	1017,04	976,23
1	RUV2	RUI3	2,86	7,54	47,30	0%	0,87368	3,70331	1013,70	1060,98	1021,50
2	RUV2	RUI3	2,86	7,54	47,30	0%	0,29971	3,76977	1017,60	1053,70	1014,20
3	RUV2	RUI3	2,86	7,54	47,30	0%	0,23842	3,76977	1017,00	1053,70	1014,20
1	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,89298	0,49076	1281,30	1298,31	1291,30
2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,20082	0,56712	1288,80	1296,98	1288,80
3	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,10260	0,56712	1289,10	1296,98	1288,80
1	RUV3	INDI1	2,49	18,40	23,54	0%	1,10679	2,10039	1223,10	1261,40	1234,20
2	RUV3	INDI1	2,49	18,40	23,54	0%	0,18665	2,11667	1233,90	1259,21	1231,90
3	RUV3	INDI1	2,49	18,40	23,54	0%	0,13586	2,11667	1233,60	1259,21	1231,90
1	RUV3	RUI2	2,49	7,18	23,54	0%	0,83199	1,73304	1292,70	1325,83	1302,10
2	RUV3	RUI2	2,49	7,18	23,54	0%	0,25238	1,73354	1304,40	1325,50	1301,50
3	RUV3	RUI2	2,49	7,18	23,54	0%	0,15747	1,73354	1304,10	1325,50	1301,50
1	RUV3	RUI3	2,49	7,54	23,54	0%	0,79307	1,56145	1311,90	1343,06	1321,20
2	RUV3	RUI3	2,49	7,54	23,54	0%	0,26452	1,54859	1323,60	1341,81	1320,20
3	RUV3	RUI3	2,49	7,54	23,54	0%	0,20089	1,54859	1323,30	1341,81	1320,20

Tabela A.2 - Erros da família de medidores II, sistema equilibrado

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.19104	0.28550	1454.40	1448.94	1451.10
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.11048	0.28550	1452.60	1448.94	1451.10
3	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.21462	0.28550	1450.20	1448.94	1451.10
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.19072	1.34658	1221.00	1235.79	1218.40
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.34019	1.34658	1217.10	1235.79	1218.40
3	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.52129	1.34658	1213.20	1235.79	1218.40
1	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	0.17044	3.37750	1050.00	1086.96	1049.90
2	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	0.30251	3.37750	1049.10	1086.96	1049.90
3	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	0.27959	3.37750	1048.50	1086.96	1049.90
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.17901	2.42296	1201.20	1229.27	1198.90
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.07745	2.42296	1199.70	1229.27	1198.90
3	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.28836	2.42296	1197.30	1229.27	1198.90
1	TV1	RUI2	3.02	7.18	34.99	0%	0.44857	2.95204	1138.50	1167.85	1133.10
2	TV1	RUI2	3.02	7.18	34.99	0%	0.26829	2.95204	1136.40	1167.85	1133.10
3	TV1	RUI2	3.02	7.18	34.99	0%	0.08035	2.95204	1133.70	1167.85	1133.10
1	TV1	RUI3	3.02	7.54	34.99	0%	0.21488	2.68514	1160.10	1192.67	1160.40

2	TV1	RUI3	3.02	7.54	34.99	0%	0.27193	2.68514	1158.60	1192.67	1160.40
3	TV1	RUI3	3.02	7.54	34.99	0%	0.50849	2.68514	1155.90	1192.67	1160.40
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.19324	0.42947	1293.00	1296.86	1290.00
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.30760	0.42947	1294.50	1296.86	1290.00
3	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.21545	0.42947	1292.40	1296.86	1290.00
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.16755	1.93219	1249.80	1272.58	1247.80
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.43328	1.93219	1245.00	1272.58	1247.80
3	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.63068	1.93219	1242.00	1272.58	1247.80
1	INDV1	INDI2	4.76	4.46	18.40	0%	0.33427	1.24094	1364.40	1378.12	1359.50
2	INDV1	INDI2	4.76	4.46	18.40	0%	0.28319	1.24094	1363.50	1378.12	1359.50
3	INDV1	INDI2	4.76	4.46	18.40	0%	0.15396	1.24094	1362.00	1378.12	1359.50
1	INDV1	RUI2	4.76	7.18	18.40	0%	0.33423	1.66536	1315.50	1334.53	1311.20
2	INDV1	RUI2	4.76	7.18	18.40	0%	0.40081	1.66536	1317.00	1334.53	1311.20
3	INDV1	RUI2	4.76	7.18	18.40	0%	0.31606	1.66536	1315.50	1334.53	1311.20
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.24789	1.43112	1336.50	1353.22	1332.70
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.24255	1.43112	1335.90	1353.22	1332.70
3	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.18055	1.43112	1334.10	1353.22	1332.70
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.61092	2.83594	1023.90	1058.53	1028.10
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.73252	2.83594	1022.70	1058.53	1028.10
3	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.91270	2.83594	1020.90	1058.53	1028.10
1	INDV2	INDI1	1.89	18.40	53.56	0%	0.48111	6.28509	733.20	776.52	729.38
2	INDV2	INDI1	1.89	18.40	53.56	0%	0.46113	6.28509	732.30	776.52	729.38
3	INDV2	INDI1	1.89	18.40	53.56	0%	0.10423	6.28509	729.30	776.52	729.38
1	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	0.11495	4.59015	919.80	963.21	919.77
2	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	0.20712	4.59015	918.90	963.21	919.77
3	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	0.42435	4.59015	917.40	963.21	919.77
1	INDV2	RUI2	1.89	7.18	53.56	0%	0.76847	5.31615	825.60	876.59	830.85
2	INDV2	RUI2	1.89	7.18	53.56	0%	0.99153	5.31615	824.40	876.59	830.85
3	INDV2	RUI2	1.89	7.18	53.56	0%	1.02518	5.31615	822.60	876.59	830.85
1	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	0.90053	4.77645	873.90	923.19	879.95
2	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	0.92671	4.77645	873.30	923.19	879.95
3	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	0.89883	4.77645	872.40	923.19	879.95
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.54584	2.19281	1116.90	1147.91	1122.00
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.79673	2.19281	1115.10	1147.91	1122.00
3	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.90074	2.19281	1113.30	1147.91	1122.00
1	RUV2	INDI1	2.86	18.40	47.30	0%	0.62476	4.74544	883.80	920.65	877.92
2	RUV2	INDI1	2.86	18.40	47.30	0%	0.49074	4.74544	882.60	920.65	877.92
3	RUV2	INDI1	2.86	18.40	47.30	0%	0.41855	4.74544	882.00	920.65	877.92
1	RUV2	INDI2	2.86	4.46	47.30	0%	0.23673	3.54951	1052.70	1091.77	1053.00
2	RUV2	INDI2	2.86	4.46	47.30	0%	0.21130	3.54951	1051.80	1091.77	1053.00
3	RUV2	INDI2	2.86	4.46	47.30	0%	0.29348	3.54951	1050.90	1091.77	1053.00
1	RUV2	RUI2	2.86	7.18	47.30	0%	0.12747	3.97557	981.60	1022.51	982.08
2	RUV2	RUI2	2.86	7.18	47.30	0%	0.33758	3.97557	979.50	1022.51	982.08
3	RUV2	RUI2	2.86	7.18	47.30	0%	0.58383	3.97557	977.10	1022.51	982.08
1	RUV2	RUI3	2.86	7.54	47.30	0%	0.74983	3.69743	1007.10	1050.89	1012.60
2	RUV2	RUI3	2.86	7.54	47.30	0%	0.78393	3.69743	1006.50	1050.89	1012.60
3	RUV2	RUI3	2.86	7.54	47.30	0%	0.80167	3.69743	1005.00	1050.89	1012.60
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.56374	0.47052	1295.70	1294.69	1287.90
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.41276	0.47052	1293.30	1294.69	1287.90
3	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.16880	0.47052	1289.10	1294.69	1287.90
1	RUV3	INDI1	2.49	18.40	23.54	0%	0.14797	2.07096	1231.20	1258.19	1231.40
2	RUV3	INDI1	2.49	18.40	23.54	0%	0.37292	2.07096	1228.50	1258.19	1231.40
3	RUV3	INDI1	2.49	18.40	23.54	0%	0.47924	2.07096	1226.70	1258.19	1231.40
1	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.45474	1.45631	1355.10	1369.14	1348.40
2	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.26533	1.45631	1351.80	1369.14	1348.40
3	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.15392	1.45631	1350.00	1369.14	1348.40

1	RUV3	RUI2	2.49	7.18	23.54	0%	0.54870	1.73221	1305.90	1322.18	1298.00
2	RUV3	RUI2	2.49	7.18	23.54	0%	0.42942	1.73221	1304.40	1322.18	1298.00
3	RUV3	RUI2	2.49	7.18	23.54	0%	0.23765	1.73221	1301.70	1322.18	1298.00
1	RUV3	RUI3	2.49	7.54	23.54	0%	0.34315	1.52264	1322.40	1338.58	1317.40
2	RUV3	RUI3	2.49	7.54	23.54	0%	0.21834	1.52264	1320.60	1338.58	1317.40
3	RUV3	RUI3	2.49	7.54	23.54	0%	0.27220	1.52264	1316.70	1338.58	1317.40

Tabela A.3 - Erros da família de medidores III, sistema equilibrado (2 amostras)

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.07510	0.28550	1452.00	1448.94	1451.10
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.11057	0.28550	1452.00	1448.94	1451.10
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.16443	1.34658	1218.00	1235.79	1218.40
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.16896	1.34658	1218.00	1235.79	1218.40
1	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	0.12470	3.37750	1050.60	1086.96	1049.90
2	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	0.13083	3.37750	1050.00	1086.96	1049.90
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.10082	2.42296	1199.40	1229.27	1198.90
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.16715	2.42296	1198.80	1229.27	1198.90
1	TV1	RUI2	3.02	7.18	34.99	0%	0.12331	2.95204	1133.40	1167.85	1133.10
2	TV1	RUI2	3.02	7.18	34.99	0%	0.12532	2.95204	1133.40	1167.85	1133.10
1	TV1	RUI3	3.02	7.54	34.99	0%	0.07707	2.68514	1161.00	1192.67	1160.40
2	TV1	RUI3	3.02	7.54	34.99	0%	0.14391	2.68514	1161.00	1192.67	1160.40
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.09176	0.42947	1290.60	1296.86	1290.00
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.16912	0.42947	1290.00	1296.86	1290.00
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.14616	1.93219	1248.60	1272.58	1247.80
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.18564	1.93219	1248.60	1272.58	1247.80
1	INDV1	INDI2	4.76	4.46	18.40	0%	0.16734	1.24094	1359.60	1378.12	1359.50
2	INDV1	INDI2	4.76	4.46	18.40	0%	0.08121	1.24094	1359.60	1378.12	1359.50
1	INDV1	RUI2	4.76	7.18	18.40	0%	0.08055	1.66536	1311.60	1334.53	1311.20
2	INDV1	RUI2	4.76	7.18	18.40	0%	0.07716	1.66536	1311.60	1334.53	1311.20
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.19358	1.43112	1333.80	1353.22	1332.70
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.17873	1.43112	1333.80	1353.22	1332.70
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.17944	2.83594	1027.20	1058.53	1028.10
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.22014	2.83594	1027.20	1058.53	1028.10
1	INDV2	INDI1	1.89	18.40	53.56	0%	0.14221	6.28509	730.20	776.52	729.38
2	INDV2	INDI1	1.89	18.40	53.56	0%	0.15345	6.28509	730.20	776.52	729.38
1	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	0.14815	4.59015	919.80	963.21	919.77
2	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	0.17190	4.59015	919.80	963.21	919.77
1	INDV2	RUI2	1.89	7.18	53.56	0%	0.15609	5.31615	831.60	876.59	830.85
2	INDV2	RUI2	1.89	7.18	53.56	0%	0.10268	5.31615	831.00	876.59	830.85
1	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	0.19377	4.77645	880.20	923.19	879.95
2	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	0.36268	4.77645	880.80	923.19	879.95
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.26442	2.19281	1120.80	1147.91	1122.00
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.20324	2.19281	1121.40	1147.91	1122.00
1	RUV2	INDI1	2.86	18.40	47.30	0%	0.37768	4.74544	879.00	920.65	877.92
2	RUV2	INDI1	2.86	18.40	47.30	0%	0.32140	4.74544	878.40	920.65	877.92
1	RUV2	INDI2	2.86	4.46	47.30	0%	0.22974	3.54951	1053.00	1091.77	1053.00
2	RUV2	INDI2	2.86	4.46	47.30	0%	0.18868	3.54951	1053.60	1091.77	1053.00
1	RUV2	RUI2	2.86	7.18	47.30	0%	0.18480	3.97557	982.80	1022.51	982.08
2	RUV2	RUI2	2.86	7.18	47.30	0%	0.13346	3.97557	982.20	1022.51	982.08
1	RUV2	RUI3	2.86	7.54	47.30	0%	0.07039	3.69743	1012.80	1050.89	1012.60
2	RUV2	RUI3	2.86	7.54	47.30	0%	0.08601	3.69743	1012.20	1050.89	1012.60
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.10799	0.47052	1288.20	1294.69	1287.90
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.14272	0.47052	1287.60	1294.69	1287.90
1	RUV3	INDI1	2.49	18.40	23.54	0%	0.13757	2.07096	1232.40	1258.19	1231.40
2	RUV3	INDI1	2.49	18.40	23.54	0%	0.12488	2.07096	1231.80	1258.19	1231.40

1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,18104	1,45631	1348,80	1369,14	1348,40
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,20230	1,45631	1348,20	1369,14	1348,40
1	RUV3	RUI2	2,49	7,18	23,54	0%	0,10457	1,73221	1299,00	1322,18	1298,00
2	RUV3	RUI2	2,49	7,18	23,54	0%	0,74049	1,73221	1297,20	1322,18	1298,00
1	RUV3	RUI3	2,49	7,54	23,54	0%	0,09638	1,52264	1318,20	1338,58	1317,40
2	RUV3	RUI3	2,49	7,54	23,54	0%	0,11180	1,52264	1317,60	1338,58	1317,40

Tabela A.4 - Erros da família de medidores IV, sistema equilibrado

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,23253	0,22752	1456,00	1455,58	1456,80
2	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,11711	0,22752	1457,00	1455,58	1456,80
3	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,17232	0,22752	1456,60	1455,58	1456,80
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,18108	1,26810	1220,80	1238,22	1221,30
2	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,10263	1,26810	1221,40	1238,22	1221,30
3	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,21470	1,26810	1221,00	1238,22	1221,30
1	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,31767	3,20060	1058,00	1093,92	1059,00
2	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,19308	3,20060	1058,60	1093,92	1059,00
3	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,17501	3,20060	1058,40	1093,92	1059,00
1	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,30066	2,22066	1196,80	1224,58	1198,00
2	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,13641	2,22066	1197,60	1224,58	1198,00
3	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,19832	2,22066	1197,20	1224,58	1198,00
1	TV1	RUI2	3,02	7,18	34,99	0%	0,31372	2,75016	1140,00	1174,08	1141,20
2	TV1	RUI2	3,02	7,18	34,99	0%	0,17426	2,75016	1140,80	1174,08	1141,20
3	TV1	RUI2	3,02	7,18	34,99	0%	0,20681	2,75016	1140,60	1174,08	1141,20
1	TV1	RUI3	3,02	7,54	34,99	0%	0,28526	2,71616	1160,60	1195,59	1161,80
2	TV1	RUI3	3,02	7,54	34,99	0%	0,17038	2,71616	1161,20	1195,59	1161,80
3	TV1	RUI3	3,02	7,54	34,99	0%	0,20560	2,71616	1161,00	1195,59	1161,80
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,25342	0,32567	1290,80	1296,54	1291,70
2	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,14501	0,32567	1291,40	1296,54	1291,70
3	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,25578	0,32567	1291,20	1296,54	1291,70
1	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,17886	1,82747	1247,60	1273,15	1248,70
2	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,22668	1,82747	1248,20	1273,15	1248,70
3	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,21905	1,82747	1248,00	1273,15	1248,70
1	INDV1	INDI2	4,76	4,46	18,40	0%	0,28289	1,15055	1359,80	1377,66	1361,00
2	INDV1	INDI2	4,76	4,46	18,40	0%	0,18502	1,15055	1360,60	1377,66	1361,00
3	INDV1	INDI2	4,76	4,46	18,40	0%	0,24491	1,15055	1360,20	1377,66	1361,00
1	INDV1	RUI2	4,76	7,18	18,40	0%	0,29578	1,50157	1316,00	1338,11	1317,20
2	INDV1	RUI2	4,76	7,18	18,40	0%	0,20441	1,50157	1316,80	1338,11	1317,20
3	INDV1	RUI2	4,76	7,18	18,40	0%	0,14534	1,50157	1316,80	1338,11	1317,20
1	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,22673	1,48875	1327,80	1349,34	1328,90
2	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,15211	1,48875	1328,60	1349,34	1328,90
3	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,16735	1,48875	1328,20	1349,34	1328,90
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,26328	2,84272	1023,20	1054,83	1024,10
2	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,21691	2,84272	1023,80	1054,83	1024,10
3	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,20479	2,84272	1023,60	1054,83	1024,10
1	INDV2	INDI1	1,89	18,40	53,56	0%	0,30623	6,16670	730,00	776,55	730,92
2	INDV2	INDI1	1,89	18,40	53,56	0%	0,28518	6,16670	730,40	776,55	730,92
3	INDV2	INDI1	1,89	18,40	53,56	0%	0,18214	6,16670	730,40	776,55	730,92
1	INDV2	INDI2	1,89	4,46	53,56	0%	0,26314	4,52334	919,60	963,64	920,69
2	INDV2	INDI2	1,89	4,46	53,56	0%	0,17857	4,52334	920,20	963,64	920,69
3	INDV2	INDI2	1,89	4,46	53,56	0%	0,30689	4,52334	919,80	963,64	920,69
1	INDV2	RUI2	1,89	7,18	53,56	0%	0,26365	5,21143	831,20	877,05	832,21
2	INDV2	RUI2	1,89	7,18	53,56	0%	0,15146	5,21143	831,80	877,05	832,21

3	INDV2	RUI2	1,89	7,18	53,56	0%	0,29035	5,21143	831,40	877,05	832,21
1	INDV2	RUI3	1,89	7,54	53,56	0%	0,35676	4,94668	870,60	916,93	871,69
2	INDV2	RUI3	1,89	7,54	53,56	0%	0,19275	4,94668	871,20	916,93	871,69
3	INDV2	RUI3	1,89	7,54	53,56	0%	0,25890	4,94668	871,00	916,93	871,69
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,19586	2,09075	1120,80	1147,41	1121,50
2	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,17680	2,09075	1121,40	1147,41	1121,50
3	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,10180	2,09075	1121,40	1147,41	1121,50
1	RUV2	INDI1	2,86	18,40	47,30	0%	0,21366	4,59736	877,60	920,09	878,49
2	RUV2	INDI1	2,86	18,40	47,30	0%	0,20010	4,59736	878,00	920,09	878,49
3	RUV2	INDI1	2,86	18,40	47,30	0%	0,22999	4,59736	878,00	920,09	878,49
1	RUV2	INDI2	2,86	4,46	47,30	0%	0,26469	3,41413	1052,40	1091,11	1053,50
2	RUV2	INDI2	2,86	4,46	47,30	0%	0,22756	3,41413	1053,00	1091,11	1053,50
3	RUV2	INDI2	2,86	4,46	47,30	0%	0,15582	3,41413	1052,80	1091,11	1053,50
1	RUV2	RUI2	2,86	7,18	47,30	0%	0,19339	3,92094	982,40	1023,41	983,37
2	RUV2	RUI2	2,86	7,18	47,30	0%	0,26667	3,92094	983,00	1023,41	983,37
3	RUV2	RUI2	2,86	7,18	47,30	0%	0,21561	3,92094	982,80	1023,41	983,37
1	RUV2	RUI3	2,86	7,54	47,30	0%	0,26932	3,55254	1012,40	1051,57	1013,30
2	RUV2	RUI3	2,86	7,54	47,30	0%	0,21903	3,55254	1013,00	1051,57	1013,30
3	RUV2	RUI3	2,86	7,54	47,30	0%	0,11655	3,55254	1013,00	1051,57	1013,30
1	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,21562	0,43113	1289,00	1296,45	1289,90
2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,15998	0,43113	1289,60	1296,45	1289,90
3	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,15377	0,43113	1289,40	1296,45	1289,90
1	RUV3	INDI1	2,49	18,40	23,54	0%	0,29427	2,03486	1231,20	1258,11	1232,50
2	RUV3	INDI1	2,49	18,40	23,54	0%	0,22334	2,03486	1232,00	1258,11	1232,50
3	RUV3	INDI1	2,49	18,40	23,54	0%	0,21506	2,03486	1231,80	1258,11	1232,50
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,23225	1,28201	1350,00	1369,26	1350,90
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,17456	1,28201	1350,80	1369,26	1350,90
3	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,13359	1,28201	1350,60	1369,26	1350,90
1	RUV3	RUI2	2,49	7,18	23,54	0%	0,25257	1,59017	1304,20	1326,81	1305,40
2	RUV3	RUI2	2,49	7,18	23,54	0%	0,15957	1,59017	1305,00	1326,81	1305,40
3	RUV3	RUI2	2,49	7,18	23,54	0%	0,14077	1,59017	1304,80	1326,81	1305,40
1	RUV3	RUI3	2,49	7,54	23,54	0%	0,22845	1,38297	1097,60	1340,49	1319,80
2	RUV3	RUI3	2,49	7,54	23,54	0%	0,17928	1,38297	1167,80	1340,49	1319,80
3	RUV3	RUI3	2,49	7,54	23,54	0%	0,21969	1,38297	1060,00	1340,49	1319,80

Tabela A.5 - Erros da família de medidores V, sistema equilibrado

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.45500	0.23301	1456.20	1453.96	1455.10
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.21944	0.23301	1454.40	1453.96	1455.10
3	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.20170	0.23301	1454.40	1453.96	1455.10
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.06245	1.48749	1216.80	1236.67	1217.60
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.60891	1.48749	1216.80	1236.67	1217.60
3	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.58191	1.48749	1216.80	1236.67	1217.60
1	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	0.83564	3.24567	1060.20	1095.69	1059.90
2	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	0.27732	3.24567	1060.20	1095.69	1059.90
3	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	1.31174	3.24567	1060.20	1095.69	1059.90
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.22779	2.33335	1198.80	1229.58	1200.20
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.43203	2.33335	1200.60	1229.58	1200.20
3	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.17666	2.33335	1198.80	1229.58	1200.20
1	TV1	RUI2	3.02	7.18	34.99	0%	0.09690	2.95444	1134.00	1169.98	1135.40
2	TV1	RUI2	3.02	7.18	34.99	0%	0.44088	2.95444	1135.80	1169.98	1135.40
3	TV1	RUI2	3.02	7.18	34.99	0%	0.19312	2.95444	1134.00	1169.98	1135.40

1	TV1	RUI3	3.02	7.54	34.99	0%	0.05871	2.70674	1162.80	1195.54	1163.20
2	TV1	RUI3	3.02	7.54	34.99	0%	0.26447	2.70674	1162.80	1195.54	1163.20
3	TV1	RUI3	3.02	7.54	34.99	0%	0.44082	2.70674	1162.80	1195.54	1163.20
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.57131	0.43521	1292.40	1297.94	1292.60
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	1.01626	0.43521	1292.40	1297.94	1292.60
3	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.27883	0.43521	1292.40	1297.94	1292.60
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.15002	1.87829	1249.20	1274.67	1249.90
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.16731	1.87829	1249.20	1274.67	1249.90
3	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.99685	1.87829	1249.20	1274.67	1249.90
1	INDV1	INDI2	4.76	4.46	18.40	0%	0.46171	1.16473	1360.80	1377.80	1361.00
2	INDV1	INDI2	4.76	4.46	18.40	0%	0.11874	1.16473	1360.80	1377.80	1361.00
3	INDV1	INDI2	4.76	4.46	18.40	0%	0.15009	1.16473	1359.00	1377.80	1361.00
1	INDV1	RUI2	4.76	7.18	18.40	0%	0.59754	1.65646	1314.00	1336.95	1313.90
2	INDV1	RUI2	4.76	7.18	18.40	0%	0.07748	1.65646	1314.00	1336.95	1313.90
3	INDV1	RUI2	4.76	7.18	18.40	0%	0.21523	1.65646	1312.20	1336.95	1313.90
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.23376	1.46910	1330.20	1350.44	1329.80
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	1.04848	1.46910	1330.20	1350.44	1329.80
3	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.19636	1.46910	1328.40	1350.44	1329.80
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.11624	3.01001	1022.40	1055.52	1023.40
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.12830	3.01001	1022.40	1055.52	1023.40
3	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.79777	3.01001	1022.40	1055.52	1023.40
1	INDV2	INDI1	1.89	18.40	53.56	0%	0.19309	6.23821	730.80	777.86	731.31
2	INDV2	INDI1	1.89	18.40	53.56	0%	0.11820	6.23821	730.80	777.86	731.31
3	INDV2	INDI1	1.89	18.40	53.56	0%	0.18226	6.23821	729.00	777.86	731.31
1	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	1.10694	4.73647	923.40	967.12	921.98
2	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	1.07765	4.73647	923.40	967.12	921.98
3	INDV2	INDI2	1.89	4.46	53.56	0%	0.92123	4.73647	921.60	967.12	921.98
1	INDV2	RUI2	1.89	7.18	53.56	0%	0.09236	5.31045	833.40	878.69	833.64
2	INDV2	RUI2	1.89	7.18	53.56	0%	0.12996	5.31045	833.40	878.69	833.64
3	INDV2	RUI2	1.89	7.18	53.56	0%	0.25242	5.31045	831.60	878.69	833.64
1	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	1.23207	4.93780	873.00	917.53	872.73
2	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	0.58169	4.93780	873.00	917.53	872.73
3	INDV2	RUI3	1.89	7.54	53.56	0%	1.95927	4.93780	873.00	917.53	872.73
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.17480	2.23632	1126.80	1154.05	1127.80
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.17474	2.23632	1126.80	1154.05	1127.80
3	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.37662	2.23632	1126.80	1154.05	1127.80
1	RUV2	INDI1	2.86	18.40	47.30	0%	0.13372	4.68303	878.40	921.66	878.89
2	RUV2	INDI1	2.86	18.40	47.30	0%	0.25513	4.68303	878.40	921.66	878.89
3	RUV2	INDI1	2.86	18.40	47.30	0%	0.77822	4.68303	878.40	921.66	878.89
1	RUV2	INDI2	2.86	4.46	47.30	0%	0.07480	3.53548	1054.80	1092.24	1054.60
2	RUV2	INDI2	2.86	4.46	47.30	0%	0.07178	3.53548	1054.80	1092.24	1054.60
3	RUV2	INDI2	2.86	4.46	47.30	0%	0.32399	3.53548	1053.00	1092.24	1054.60
1	RUV2	RUI2	2.86	7.18	47.30	0%	0.61356	4.11369	975.60	1018.30	976.48
2	RUV2	RUI2	2.86	7.18	47.30	0%	0.49693	4.11369	977.40	1018.30	976.48
3	RUV2	RUI2	2.86	7.18	47.30	0%	1.63032	4.11369	975.60	1018.30	976.48
1	RUV2	RUI3	2.86	7.54	47.30	0%	1.61350	3.81118	1015.20	1054.32	1014.20
2	RUV2	RUI3	2.86	7.54	47.30	0%	0.15839	3.81118	1013.40	1054.32	1014.20
3	RUV2	RUI3	2.86	7.54	47.30	0%	0.53130	3.81118	1013.40	1054.32	1014.20
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.33733	0.45404	1290.60	1297.22	1291.00
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.27594	0.45404	1290.60	1297.22	1291.00
3	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.26529	0.45404	1290.60	1297.22	1291.00
1	RUV3	INDI1	2.49	18.40	23.54	0%	0.09891	2.00591	1233.00	1259.35	1233.00
2	RUV3	INDI1	2.49	18.40	23.54	0%	0.55452	2.00591	1233.00	1259.35	1233.00

3	RUV3	INDI1	2.49	18.40	23.54	0%	0.15169	2.00591	1231.20	1259.35	1233.00
1	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.30318	1.46647	1333.80	1354.69	1333.80
2	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.47213	1.46647	1333.80	1354.69	1333.80
3	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.15222	1.46647	1332.00	1354.69	1333.80
1	RUV3	RUI2	2.49	7.18	23.54	0%	0.32734	1.78600	1301.40	1325.68	1301.50
2	RUV3	RUI2	2.49	7.18	23.54	0%	0.52811	1.78600	1301.40	1325.68	1301.50
3	RUV3	RUI2	2.49	7.18	23.54	0%	0.26727	1.78600	1301.40	1325.68	1301.50
1	RUV3	RUI3	2.49	7.54	23.54	0%	1.07445	1.58328	1321.20	1342.63	1320.20
2	RUV3	RUI3	2.49	7.54	23.54	0%	0.11952	1.58328	1319.40	1342.63	1320.20
3	RUV3	RUI3	2.49	7.54	23.54	0%	0.16006	1.58328	1319.40	1342.63	1320.20

As Tabelas A.6 até A.10 apresentam os resultados parciais das análises para os medidores eletrônicos, considerando-se os arranjos propostos para ensaios, e os perfis de tensão considerando o desequilíbrio de tensões.

Tabela A.6 - Erros da família de medidores I, sistema desequilibrado

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,63465	0,17798	1446,60	1454,01	1454,30
1	V0	I0	0,80	0,25	0,00	3%	0,42304	0,25780	1451,10	1454,16	1456,10
1	V0	I0	0,80	0,25	0,00	5%	0,43435	0,18930	1449,00	1452,47	1453,20
2	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,12302	0,24380	1460,10	1457,14	1458,70
2	V0	I0	0,80	0,25	0,00	3%	0,09617	0,21690	1456,80	1453,96	1455,20
2	V0	I0	0,80	0,25	0,00	5%	0,10879	0,26391	1455,30	1451,69	1453,60
3	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,19798	0,24380	1461,00	1457,14	1458,70
3	V0	I0	0,80	0,25	0,00	3%	0,15111	0,20488	1456,80	1453,53	1454,40
3	V0	I0	0,80	0,25	0,00	5%	0,19078	0,21906	1457,70	1453,52	1454,60
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	1,25391	1,47267	1203,90	1236,28	1217,10
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	3%	1,09727	1,41789	1205,10	1235,26	1217,00
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	5%	1,06820	1,39472	1209,00	1237,35	1220,00
2	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,09019	1,36819	1221,90	1239,21	1221,50
2	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	3%	0,12249	1,47558	1217,10	1235,88	1216,40
2	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	5%	0,15135	1,37697	1217,70	1234,25	1216,60
3	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,14727	1,36819	1221,30	1239,21	1221,50
3	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	3%	0,24546	1,38898	1218,60	1236,55	1218,70
3	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	5%	0,09770	1,17589	1218,30	1233,60	1218,10
1	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,57838	3,38075	1047,90	1089,69	1052,90
1	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	3%	0,44838	3,28948	1049,70	1089,24	1053,00
1	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	5%	0,53341	3,27337	1047,60	1086,99	1051,00
2	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,37314	3,38841	1055,10	1088,53	1050,90
2	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	3%	0,42632	3,38971	1057,50	1089,65	1052,50
2	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	5%	0,42315	3,33860	1064,40	1096,76	1059,60
3	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,29730	3,38841	1054,50	1088,53	1050,90
3	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	3%	0,33688	3,36694	1056,60	1089,37	1052,70
3	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	5%	0,35925	3,11219	1056,00	1086,21	1051,80
1	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,94901	2,48087	1192,80	1233,37	1201,40
1	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	3%	0,67997	2,49155	1194,00	1231,30	1200,40
1	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	5%	0,46094	2,34028	1203,00	1236,68	1206,90
2	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,27378	2,47393	1202,40	1230,11	1199,20
2	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	3%	0,26588	2,39691	1204,80	1231,24	1201,10
2	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	5%	0,27455	2,42759	1204,50	1231,13	1200,90

3	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,24903	2,47393	1202,10	1230,11	1199,20
3	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	3%	0,22359	0,39790	1203,90	1206,98	1201,50
3	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	5%	0,19932	2,33144	1209,90	1236,37	1207,30
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	1,18185	0,41489	1280,10	1298,78	1292,60
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	3%	1,02971	0,36818	1282,80	1299,07	1293,50
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	5%	0,81327	0,32208	1283,10	1297,65	1292,50
2	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,23703	0,41254	1291,80	1298,51	1292,80
2	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	3%	0,17872	0,46089	1291,80	1299,50	1292,70
2	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	5%	0,16859	0,35710	1293,30	1299,04	1293,80
3	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,16739	0,41254	1292,10	1298,51	1292,80
3	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	3%	0,20523	0,42693	1292,70	1299,66	1293,20
3	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	5%	0,24412	0,23038	1292,10	1295,46	1292,50
1	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,98769	1,97365	1239,30	1275,97	1250,40
1	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	3%	0,97259	1,88863	1239,30	1273,84	1249,10
1	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	5%	0,82508	1,91846	1240,80	1273,44	1248,40
2	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,08014	1,94970	1248,30	1273,47	1247,70
2	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	3%	0,30767	1,89083	1332,60	1354,93	1328,10
2	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	5%	0,13095	1,94358	1251,60	1274,83	1249,80
3	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,20712	1,94970	1247,70	1273,47	1247,70
3	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	3%	0,11242	0,17942	1250,70	1249,61	1249,90
3	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	5%	0,07988	1,88325	1251,90	1276,13	1251,20
1	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,90122	1,45685	1321,50	1351,98	1331,30
1	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	3%	0,46562	1,37598	1324,50	1349,62	1330,30
1	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	5%	0,63546	1,38461	1322,40	1347,23	1328,10
3	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,18196	1,47287	1332,90	1350,43	1330,00
3	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	3%	0,22177	1,38989	1337,10	1354,33	1334,50
3	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	5%	0,19086	1,40157	1332,30	1349,25	1329,60
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	1,52670	2,93675	1010,40	1055,77	1024,20
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	3%	1,27957	2,93264	1011,90	1055,26	1023,90
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	5%	1,22351	2,87700	1012,20	1053,93	1023,40
2	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,11673	2,96598	1024,50	1055,03	1023,20
2	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	3%	0,16642	2,90346	1032,00	1060,96	1030,10
2	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	5%	0,18296	2,86979	1025,70	1054,18	1023,60
3	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,16084	2,96598	1023,60	1055,03	1023,20
3	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	3%	0,09172	2,95634	1025,40	1056,13	1024,40
3	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	5%	0,12718	2,71186	1024,50	1052,79	1023,50
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	1,09145	2,10562	1113,60	1149,38	1124,80
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	3%	1,10662	2,17774	1111,20	1148,55	1122,80
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	5%	1,07493	2,14577	1111,80	1147,61	1122,40
2	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,18479	2,25800	1123,50	1147,93	1121,50
2	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	3%	0,20699	2,20518	1125,60	1149,09	1123,10
2	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	5%	0,17583	2,15303	1126,80	1150,32	1124,80
3	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,11544	2,25800	1122,90	1147,93	1121,50
3	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	3%	0,17929	2,21396	1124,40	1149,17	1123,30
3	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	5%	0,11056	1,97027	1124,10	1145,85	1122,90
1	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,89298	0,49076	1281,30	1298,31	1291,30
1	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	3%	0,87873	0,50548	1280,10	1297,32	1289,90
1	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	5%	0,87896	0,46950	1280,10	1296,14	1289,60
2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,20082	0,56712	1288,80	1296,98	1288,80
2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	3%	0,08222	0,48813	1293,00	1300,01	1292,40
2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	5%	0,09907	0,49563	1291,20	1298,10	1290,70
3	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,10260	0,56712	1289,10	1296,98	1288,80
3	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	3%	0,18905	0,52251	1291,50	1298,42	1290,90

3	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	5%	0,13792	0,27337	1293,00	1296,47	1292,00
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,75812	1,35562	1347,00	1375,08	1355,60
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	3%	0,61996	1,42080	1342,80	1370,09	1350,00
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	5%	0,51698	1,30791	1349,10	1372,41	1353,70
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	3%	0,21816	1,31243	1354,20	1369,55	1350,90
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	5%	0,22199	1,35617	1353,90	1370,10	1350,40
3	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,09024	1,35562	1356,75	1375,08	1355,60
3	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	3%	0,21783	0,77798	1353,90	1342,55	1351,30
3	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	5%	0,17625	1,31596	1357,50	1373,71	1354,70

Tabela A.7 - Erros da família de medidores II, sistema desequilibrado

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.19104	0.28550	1454.40	1448.94	1451.10
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.11048	0.28550	1452.60	1448.94	1451.10
3	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.21462	0.28550	1450.20	1448.94	1451.10
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	3%	0.25803	0.21578	1455.60	1450.13	1451.20
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	3%	0.16187	0.21578	1452.00	1450.13	1451.20
3	V0	I0	0.80	0.25	0.00	3%	0.20604	0.21578	1451.40	1450.13	1451.20
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	5%	0.28923	0.20511	1458.90	1453.64	1454.40
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	5%	0.14732	0.20511	1455.60	1453.64	1454.40
3	V0	I0	0.80	0.25	0.00	5%	0.25374	0.20511	1453.50	1453.64	1454.40
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.19072	1.34658	1221.00	1235.79	1218.40
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.34019	1.34658	1217.10	1235.79	1218.40
3	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.52129	1.34658	1213.20	1235.79	1218.40
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	3%	0.23972	1.42768	1218.00	1233.44	1214.80
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	3%	0.22417	1.42768	1213.80	1233.44	1214.80
3	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	3%	0.73662	1.42768	1208.40	1233.44	1214.80
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	5%	0.22958	1.38983	1218.00	1234.30	1215.50
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	5%	0.37006	1.38983	1214.40	1234.30	1215.50
3	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	5%	0.70609	1.38983	1209.30	1234.30	1215.50
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.17901	2.42296	1201.20	1229.27	1198.90
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.07745	2.42296	1199.70	1229.27	1198.90
3	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.28836	2.42296	1197.30	1229.27	1198.90
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	3%	0.22580	2.45883	1202.10	1230.17	1199.10
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	3%	0.08973	2.45883	1199.40	1230.17	1199.10
3	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	3%	0.26090	2.45883	1197.30	1230.17	1199.10
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	5%	0.19732	4.68475	1201.50	1256.65	1198.80
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	5%	0.19040	4.68475	1199.40	1256.65	1198.80
3	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	5%	0.28831	4.68475	1197.30	1256.65	1198.80
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.19324	0.42947	1293.00	1296.86	1290.00
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.30760	0.42947	1294.50	1296.86	1290.00
3	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.21545	0.42947	1292.40	1296.86	1290.00
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	3%	0.45717	0.43976	1296.00	1295.86	1289.90
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	3%	0.30188	0.43976	1293.60	1295.86	1289.90
3	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	3%	0.21863	0.43976	1291.80	1295.86	1289.90
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	5%	0.44366	0.42087	1296.60	1296.15	1290.10
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	5%	0.29119	0.42087	1294.50	1296.15	1290.10
3	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	5%	0.21918	0.42087	1292.40	1296.15	1290.10
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.16755	1.93219	1249.80	1272.58	1247.80
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.43328	1.93219	1245.00	1272.58	1247.80
3	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.63068	1.93219	1242.00	1272.58	1247.80
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	0.26149	1.97398	1246.50	1273.48	1247.80

2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	0.50314	1.97398	1244.10	1273.48	1247.80
3	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	0.64290	1.97398	1241.70	1273.48	1247.80
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	5%	0.21545	4.19169	1247.10	1300.75	1247.10
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	5%	0.34723	4.19169	1244.10	1300.75	1247.10
3	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	5%	0.53467	4.19169	1241.70	1300.75	1247.10
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.24789	1.43112	1336.50	1353.22	1332.70
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.24255	1.43112	1335.90	1353.22	1332.70
3	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.18055	1.43112	1334.10	1353.22	1332.70
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	3%	0.36989	1.37780	1334.10	1348.91	1329.10
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	3%	0.22193	1.37780	1332.60	1348.91	1329.10
3	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	3%	0.12466	1.37780	1330.80	1348.91	1329.10
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	5%	0.42667	3.63948	1332.90	1376.96	1327.20
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	5%	0.27391	3.63948	1331.10	1376.96	1327.20
3	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	5%	0.17142	3.63948	1329.30	1376.96	1327.20
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.61092	2.83594	1023.90	1058.53	1028.10
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.73252	2.83594	1022.70	1058.53	1028.10
3	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.91270	2.83594	1020.90	1058.53	1028.10
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	3%	0.59710	2.96823	1017.60	1053.78	1022.30
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	3%	0.73526	2.96823	1016.10	1053.78	1022.30
3	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	3%	0.95233	2.96823	1014.60	1053.78	1022.30
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	5%	0.60761	4.70238	1003.20	1058.30	1007.00
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	5%	0.60493	4.70238	1002.00	1058.30	1007.00
3	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	5%	0.77942	4.70238	1000.50	1058.30	1007.00
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.54584	2.19281	1116.90	1147.91	1122.00
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.79673	2.19281	1115.10	1147.91	1122.00
3	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.90074	2.19281	1113.30	1147.91	1122.00
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	3%	0.53448	2.23535	1116.30	1148.01	1121.30
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	3%	0.79933	2.23535	1113.90	1148.01	1121.30
3	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	3%	0.91962	2.23535	1112.10	1148.01	1121.30
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	5%	0.54196	4.46289	1116.30	1172.22	1121.10
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	5%	0.82817	4.46289	1113.90	1172.22	1121.10
3	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	5%	0.91049	4.46289	1112.40	1172.22	1121.10
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.56374	0.47052	1295.70	1294.69	1287.90
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.41276	0.47052	1293.30	1294.69	1287.90
3	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.16880	0.47052	1289.10	1294.69	1287.90
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	3%	0.62161	0.49494	1296.90	1295.51	1288.30
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	3%	0.43632	0.49494	1294.80	1295.51	1288.30
3	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	3%	0.22370	0.49494	1287.30	1295.51	1288.30
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	5%	0.58713	2.69103	1297.80	1326.24	1289.80
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	5%	0.14692	2.69103	1291.80	1326.24	1289.80
3	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	5%	0.34337	2.69103	1287.00	1326.24	1289.80
1	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.45474	1.45631	1355.10	1369.14	1348.40
2	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.26533	1.45631	1351.80	1369.14	1348.40
3	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.15392	1.45631	1350.00	1369.14	1348.40
1	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	3%	0.45394	1.38189	1355.10	1368.21	1348.50
2	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	3%	0.31951	1.38189	1353.00	1368.21	1348.50
3	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	3%	0.12368	1.38189	1348.20	1368.21	1348.50
1	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	5%	0.41175	3.58259	1354.20	1397.86	1348.00
2	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	5%	0.13611	3.58259	1350.30	1397.86	1348.00
3	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	5%	0.27953	3.58259	1347.30	1397.86	1348.00

Tabela A.8 - Erros da família de medidores III, sistema desequilibrado (2 amostras)

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.07510	0.28550	1452.00	1448.94	1451.10
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.11057	0.28550	1452.00	1448.94	1451.10
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	3%	0.12594	0.21578	1452.00	1450.13	1451.20
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	3%	0.14926	0.21578	1451.40	1450.13	1451.20
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	5%	0.11722	0.20511	1455.60	1453.64	1454.40
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	5%	0.10073	0.20511	1455.00	1453.64	1454.40
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.16443	1.34658	1218.00	1235.79	1218.40
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.16896	1.34658	1218.00	1235.79	1218.40
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	3%	0.11981	1.42768	1214.40	1233.44	1214.80
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	3%	0.15032	1.42768	1213.80	1233.44	1214.80
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	5%	0.10503	1.38983	1215.60	1234.30	1215.50
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	5%	0.12757	1.38983	1215.00	1234.30	1215.50
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.10082	2.42296	1199.40	1229.27	1198.90
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.16715	2.42296	1198.80	1229.27	1198.90
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	3%	0.10777	2.45883	1199.40	1230.17	1199.10
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	3%	0.13332	2.45883	1198.80	1230.17	1199.10
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	5%	0.10545	4.68475	1199.40	1256.65	1198.80
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	5%	0.09354	4.68475	1199.40	1256.65	1198.80
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.09176	0.42947	1290.60	1296.86	1290.00
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.16912	0.42947	1290.00	1296.86	1290.00
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	3%	0.08255	0.43976	1290.00	1295.86	1289.90
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	3%	0.21490	0.43976	1289.40	1295.86	1289.90
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	5%	0.16799	0.42087	1290.60	1296.15	1290.10
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	5%	0.09949	0.42087	1290.00	1296.15	1290.10
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.14616	1.93219	1248.60	1272.58	1247.80
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.18564	1.93219	1248.60	1272.58	1247.80
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	0.08779	1.97398	1248.60	1273.48	1247.80
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	0.14280	1.97398	1248.60	1273.48	1247.80
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	5%	0.15090	4.19169	1248.60	1300.75	1247.10
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	5%	0.13048	4.19169	1248.00	1300.75	1247.10
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.19358	1.43112	1333.80	1353.22	1332.70
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.17873	1.43112	1333.80	1353.22	1332.70
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	3%	0.17957	1.37780	1330.80	1348.91	1329.10
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	3%	0.16150	1.37780	1330.20	1348.91	1329.10
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	5%	0.17401	3.63948	1327.80	1376.96	1327.20
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	5%	0.19460	3.63948	1327.20	1376.96	1327.20
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.17944	2.83594	1027.20	1058.53	1028.10
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.22014	2.83594	1027.20	1058.53	1028.10
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	3%	0.18868	2.96823	1021.80	1053.78	1022.30
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	3%	0.19585	2.96823	1021.20	1053.78	1022.30
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	5%	0.18832	4.70238	1006.20	1058.30	1007.00
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	5%	0.17161	4.70238	1006.20	1058.30	1007.00
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.26442	2.19281	1120.80	1147.91	1122.00
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.20324	2.19281	1121.40	1147.91	1122.00
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	3%	0.18971	2.23535	1120.20	1148.01	1121.30
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	3%	0.29345	2.23535	1120.20	1148.01	1121.30
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	5%	0.16623	4.46289	1120.20	1172.22	1121.10
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	5%	0.30161	4.46289	1119.60	1172.22	1121.10
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.10799	0.47052	1288.20	1294.69	1287.90
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.14272	0.47052	1287.60	1294.69	1287.90
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	3%	0.13049	0.49494	1288.20	1295.51	1288.30

2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	3%	0,10979	0,49494	1288,20	1295,51	1288,30
1	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	5%	0,10171	2,69103	1290,00	1326,24	1289,80
2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	5%	0,11647	2,69103	1290,00	1326,24	1289,80
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,18104	1,45631	1348,80	1369,14	1348,40
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,20230	1,45631	1348,20	1369,14	1348,40
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	3%	0,19449	1,38189	1348,80	1368,21	1348,50
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	3%	0,08522	1,38189	1348,80	1368,21	1348,50
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	5%	0,08467	3,58259	1348,80	1397,86	1348,00
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	5%	0,11824	3,58259	1348,80	1397,86	1348,00

Tabela A.9 - Erros da família de medidores IV, sistema desequilibrado

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,23253	0,22752	1456,00	1455,58	1456,80
1	V0	I0	0,80	0,25	0,00	3%	0,08361	0,24066	1455,20	1453,58	1455,00
1	V0	I0	0,80	0,25	0,00	5%	0,19007	0,13398	1442,00	1444,57	1442,70
2	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,11711	0,22752	1457,00	1455,58	1456,80
2	V0	I0	0,80	0,25	0,00	3%	0,13619	0,33278	1455,40	1451,51	1455,10
2	V0	I0	0,80	0,25	0,00	5%	0,10805	0,18790	1456,40	1455,49	1456,20
3	V0	I0	0,80	0,25	0,00	0%	0,17232	0,22752	1456,60	1455,58	1456,80
3	V0	I0	0,80	0,25	0,00	3%	0,17021	0,33278	1454,80	1451,51	1455,10
3	V0	I0	0,80	0,25	0,00	5%	0,18853	0,18790	1456,20	1455,49	1456,20
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,18108	1,26810	1220,80	1238,22	1221,30
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	3%	0,21630	1,27975	1220,80	1237,50	1221,10
1	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	5%	0,23018	1,36684	1216,60	1235,75	1217,60
2	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,10263	1,26810	1221,40	1238,22	1221,30
2	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	3%	0,15274	1,40003	1216,80	1235,50	1217,40
2	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	5%	0,09994	1,37859	1215,60	1234,41	1215,50
3	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	0%	0,21470	1,26810	1221,00	1238,22	1221,30
3	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	3%	0,13206	1,40003	1217,20	1235,50	1217,40
3	TV1	TRI1	3,02	46,80	34,99	5%	0,23804	1,37859	1215,20	1234,41	1215,50
1	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,31767	3,20060	1058,00	1093,92	1059,00
1	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	3%	0,17680	3,29640	1057,80	1094,32	1058,50
1	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	5%	0,17526	3,28909	1058,00	1095,16	1058,80
2	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,19308	3,20060	1058,60	1093,92	1059,00
2	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	3%	0,16772	3,30026	1053,00	1088,43	1053,10
2	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	5%	0,21559	3,38831	1050,00	1087,45	1050,30
3	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	0%	0,17501	3,20060	1058,40	1093,92	1059,00
3	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	3%	0,19618	3,30026	1052,80	1088,43	1053,10
3	TV1	INDI1	3,02	18,40	34,99	5%	0,22264	3,38831	1049,80	1087,45	1050,30
1	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,30066	2,22066	1196,80	1224,58	1198,00
1	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	3%	0,20104	2,37997	1205,80	1236,92	1206,70
1	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	5%	0,28782	2,36481	1205,00	1236,03	1206,10
2	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,13641	2,22066	1197,60	1224,58	1198,00
2	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	3%	0,13428	2,41267	1200,60	1230,67	1201,00
2	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	5%	0,13567	2,40537	1200,00	1229,93	1200,00
3	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	0%	0,19832	2,22066	1197,20	1224,58	1198,00
3	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	3%	0,25647	2,41267	1200,20	1230,67	1201,00
3	TV1	INDI2	3,02	4,46	34,99	5%	0,15722	2,40537	1199,80	1229,93	1200,00
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,25342	0,32567	1290,80	1296,54	1291,70
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	3%	0,17095	0,33428	1291,80	1297,09	1292,10
1	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	5%	0,26476	0,33252	1285,80	1291,56	1286,70
2	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,14501	0,32567	1291,40	1296,54	1291,70

2	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	3%	0,20055	0,39620	1291,60	1298,15	1292,50
2	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	5%	0,12181	0,39860	1291,60	1298,50	1291,50
3	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	0%	0,25578	0,32567	1291,20	1296,54	1291,70
3	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	3%	0,19431	0,39620	1292,20	1298,15	1292,50
3	INDV1	TRI1	4,76	46,80	18,40	5%	0,15104	0,39860	1291,20	1298,50	1291,50
1	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,17886	1,82747	1247,60	1273,15	1248,70
1	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	3%	0,20618	1,91652	1253,40	1279,70	1254,20
1	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	5%	0,28839	1,92814	1247,60	1273,79	1248,70
2	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,22668	1,82747	1248,20	1273,15	1248,70
2	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	3%	0,19594	1,89318	1248,40	1272,89	1248,80
2	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	5%	0,11181	1,86823	1247,20	1272,05	1247,50
3	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	0%	0,21905	1,82747	1248,00	1273,15	1248,70
3	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	3%	0,25058	1,89318	1248,20	1272,89	1248,80
3	INDV1	INDI1	4,76	18,40	18,40	5%	0,14937	1,86823	1247,00	1272,05	1247,50
1	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,22673	1,48875	1327,80	1349,34	1328,90
1	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	5%	0,18814	1,40921	1331,20	1352,33	1332,30
2	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,15211	1,48875	1328,60	1349,34	1328,90
3	INDV1	RUI3	4,76	7,54	18,40	0%	0,16735	1,48875	1328,20	1349,34	1328,90
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,26328	2,84272	1023,20	1054,83	1024,10
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	3%	0,20156	2,85849	1023,60	1054,23	1024,10
1	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	5%	0,28528	2,90769	397,60	1054,08	1023,20
2	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,21691	2,84272	1023,80	1054,83	1024,10
2	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	3%	0,18119	2,93873	1023,60	1055,32	1024,20
2	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	5%	0,16666	2,87070	1022,40	1053,09	1022,60
3	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	0%	0,20479	2,84272	1023,60	1054,83	1024,10
3	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	3%	0,17035	2,93873	1024,00	1055,32	1024,20
3	INDV2	TRI1	1,89	46,80	53,56	5%	0,12733	2,87070	1022,40	1053,09	1022,60
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,19586	2,09075	1120,80	1147,41	1121,50
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	3%	0,19127	2,10730	1123,00	1147,71	1123,10
1	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	5%	0,18098	2,14322	1122,80	1148,13	1123,20
2	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,17680	2,09075	1121,40	1147,41	1121,50
2	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	3%	0,16445	2,19476	1123,00	1149,07	1123,50
2	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	5%	0,21613	2,16060	1121,00	1147,17	1121,00
3	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	0%	0,10180	2,09075	1121,40	1147,41	1121,50
3	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	3%	0,09794	2,19476	1123,40	1149,07	1123,50
3	RUV2	TRI1	2,86	46,80	47,30	5%	0,14345	2,16060	1120,80	1147,17	1121,00
1	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,21562	0,43113	1289,00	1296,45	1289,90
1	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	3%	0,17751	0,41730	1289,80	1296,61	1290,00
1	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	5%	0,16603	0,44883	1290,80	1298,18	1291,60
2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,15998	0,43113	1289,60	1296,45	1289,90
2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	3%	0,17222	0,48713	1290,00	1297,63	1290,70
2	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	5%	0,09983	0,48892	1288,60	1295,65	1288,60
3	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	0%	0,15377	0,43113	1289,40	1296,45	1289,90
3	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	3%	0,16296	0,48713	1290,60	1297,63	1290,70
3	RUV3	TRI1	2,49	46,80	23,54	5%	0,17161	0,48892	1288,20	1295,65	1288,60
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,23225	1,28201	1350,00	1369,26	1350,90
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	3%	0,24565	1,34710	1349,00	1368,77	1350,00
1	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	5%	0,18639	1,35627	1348,20	1369,24	1349,00
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,17456	1,28201	1350,80	1369,26	1350,90
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	3%	0,15886	1,33354	1360,80	1380,46	1360,90
2	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	5%	0,12201	1,38282	1348,60	1368,67	1348,60
3	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	0%	0,13359	1,28201	1350,60	1369,26	1350,90
3	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	3%	0,20475	1,33354	1360,60	1380,46	1360,90
3	RUV3	INDI2	2,49	4,46	23,54	5%	0,16853	1,38282	1348,40	1368,67	1348,60

Tabela A.10 - Erros da família de medidores V, sistema desequilibrado

Nº	PERFIL V	PERFIL I	DHTV	DHTI	Ângulo	FDV	E% PULSO	E% INT	Wh Pulso	Wh Int	Wh YOKO
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.45500	0.23301	1456.20	1453.96	1455.10
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.21944	0.23301	1454.40	1453.96	1455.10
3	V0	I0	0.80	0.25	0.00	0%	0.20170	0.23301	1454.40	1453.96	1455.10
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	3%	0.27567	0.16692	1456.20	1455.67	1455.60
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	3%	0.21325	0.16692	1456.20	1455.67	1455.60
3	V0	I0	0.80	0.25	0.00	3%	0.21370	0.16692	1454.40	1455.67	1455.60
1	V0	I0	0.80	0.25	0.00	5%	0.50337	0.26250	1454.40	1451.87	1453.10
2	V0	I0	0.80	0.25	0.00	5%	0.87068	0.26250	1454.40	1451.87	1453.10
3	V0	I0	0.80	0.25	0.00	5%	0.12102	0.26250	1450.80	1451.87	1453.10
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.06245	1.48749	1216.80	1236.67	1217.60
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.60891	1.48749	1216.80	1236.67	1217.60
3	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	0%	0.58191	1.48749	1216.80	1236.67	1217.60
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	3%	0.33710	1.40778	1216.80	1235.94	1217.50
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	3%	0.15900	1.40778	1216.80	1235.94	1217.50
3	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	3%	0.32044	1.40778	1215.00	1235.94	1217.50
1	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	5%	1.13681	1.38700	1216.80	1233.85	1216.40
2	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	5%	0.13834	1.38700	1215.00	1233.85	1216.40
3	TV1	TRI1	3.02	46.80	34.99	5%	0.29848	1.38700	1215.00	1233.85	1216.40
1	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	0.83564	3.24567	1060.20	1095.69	1059.90
2	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	0.27732	3.24567	1060.20	1095.69	1059.90
3	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	0%	1.31174	3.24567	1060.20	1095.69	1059.90
1	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	3%	0.57690	3.34523	1051.20	1088.08	1051.70
2	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	3%	0.56065	3.34523	1051.20	1088.08	1051.70
3	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	3%	0.79516	3.34523	1051.20	1088.08	1051.70
1	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	5%	1.51048	3.39928	1051.20	1087.74	1051.40
2	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	5%	0.89021	3.39928	1051.20	1087.74	1051.40
3	TV1	INDI1	3.02	18.40	34.99	5%	0.73634	3.39928	1051.20	1087.74	1051.40
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.22779	2.33335	1198.80	1229.58	1200.20
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.43203	2.33335	1200.60	1229.58	1200.20
3	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	0%	0.17666	2.33335	1198.80	1229.58	1200.20
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	3%	0.70726	2.40554	1202.40	1230.84	1201.20
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	3%	0.35101	2.40554	1200.60	1230.84	1201.20
3	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	3%	0.32009	2.40554	1200.60	1230.84	1201.20
1	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	5%	0.31039	2.46253	1200.60	1231.83	1200.50
2	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	5%	1.16297	2.46253	1200.60	1231.83	1200.50
3	TV1	INDI2	3.02	4.46	34.99	5%	0.64668	2.46253	1200.60	1231.83	1200.50
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.57131	0.43521	1292.40	1297.94	1292.60
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	1.01626	0.43521	1292.40	1297.94	1292.60
3	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	0%	0.27883	0.43521	1292.40	1297.94	1292.60
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	3%	0.19521	0.41826	1292.40	1299.07	1292.50
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	3%	0.12840	0.41826	1292.40	1299.07	1292.50
3	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	3%	0.15411	0.41826	1290.60	1299.07	1292.50
1	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	5%	0.13086	0.39286	1292.40	1298.11	1291.60
2	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	5%	0.33998	0.39286	1292.40	1298.11	1291.60
3	INDV1	TRI1	4.76	46.80	18.40	5%	0.14892	0.39286	1290.60	1298.11	1291.60
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.15002	1.87829	1249.20	1274.67	1249.90
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.16731	1.87829	1249.20	1274.67	1249.90
3	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	0%	0.99685	1.87829	1249.20	1274.67	1249.90
1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	1.14520	1.90940	1252.80	1275.90	1251.00
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	1.09521	1.90940	1251.00	1275.90	1251.00
3	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	3%	0.94738	1.90940	1249.20	1275.90	1251.00

1	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	5%	0.64638	1.97703	1249.20	1274.65	1248.90
2	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	5%	0.67183	1.97703	1249.20	1274.65	1248.90
3	INDV1	INDI1	4.76	18.40	18.40	5%	0.22611	1.97703	1247.40	1274.65	1248.90
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.23376	1.46910	1330.20	1350.44	1329.80
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	1.04848	1.46910	1330.20	1350.44	1329.80
3	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	0%	0.19636	1.46910	1328.40	1350.44	1329.80
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	3%	0.50834	1.37555	1328.40	1348.43	1328.90
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	3%	0.50756	1.37555	1330.20	1348.43	1328.90
3	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	3%	0.90588	1.37555	1328.40	1348.43	1328.90
1	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	5%	0.20510	1.28521	1330.20	1347.82	1329.70
2	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	5%	0.14873	1.28521	1328.40	1347.82	1329.70
3	INDV1	RUI3	4.76	7.54	18.40	5%	0.29236	1.28521	1328.40	1347.82	1329.70
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.11624	3.01001	1022.40	1055.52	1023.40
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.12830	3.01001	1022.40	1055.52	1023.40
3	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	0%	0.79777	3.01001	1022.40	1055.52	1023.40
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	3%	0.13507	2.93814	1024.20	1055.73	1024.10
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	3%	0.36672	2.93814	1024.20	1055.73	1024.10
3	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	3%	0.31684	2.93814	1022.40	1055.73	1024.10
1	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	5%	0.21489	2.92446	1022.40	1054.82	1023.80
2	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	5%	0.06455	2.92446	1022.40	1054.82	1023.80
3	INDV2	TRI1	1.89	46.80	53.56	5%	0.17381	2.92446	1022.40	1054.82	1023.80
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.17480	2.23632	1126.80	1154.05	1127.80
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.17474	2.23632	1126.80	1154.05	1127.80
3	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	0%	0.37662	2.23632	1126.80	1154.05	1127.80
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	3%	0.78977	2.18884	1123.20	1148.80	1123.20
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	3%	1.35560	2.18884	1123.20	1148.80	1123.20
3	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	3%	0.21214	2.18884	1121.40	1148.80	1123.20
1	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	5%	0.57011	2.01352	1125.00	1148.20	1124.50
2	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	5%	0.54098	2.01352	1125.00	1148.20	1124.50
3	RUV2	TRI1	2.86	46.80	47.30	5%	0.42324	2.01352	1123.20	1148.20	1124.50
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.33733	0.45404	1290.60	1297.22	1291.00
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.27594	0.45404	1290.60	1297.22	1291.00
3	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	0%	0.26529	0.45404	1290.60	1297.22	1291.00
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	3%	0.54673	0.46526	1292.40	1298.17	1291.90
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	3%	0.59911	0.46526	1292.40	1298.17	1291.90
3	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	3%	0.51992	0.46526	1290.60	1298.17	1291.90
1	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	5%	0.51935	0.33122	1292.40	1297.02	1291.90
2	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	5%	0.31751	0.33122	1292.40	1297.02	1291.90
3	RUV3	TRI1	2.49	46.80	23.54	5%	0.17920	0.33122	1290.60	1297.02	1291.90
1	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.30318	1.46647	1333.80	1354.69	1333.80
2	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.47213	1.46647	1333.80	1354.69	1333.80
3	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	0%	0.15222	1.46647	1332.00	1354.69	1333.80
1	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	3%	0.97904	1.32822	1351.80	1369.93	1350.20
2	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	3%	0.34031	1.32822	1350.00	1369.93	1350.20
3	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	3%	0.23495	1.32822	1348.20	1369.93	1350.20
1	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	5%	1.08202	1.21562	1353.60	1368.79	1352.00
2	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	5%	1.02041	1.21562	1353.60	1368.79	1352.00
3	RUV3	INDI2	2.49	4.46	23.54	5%	0.87743	1.21562	1351.80	1368.79	1352.00

ANEXO A

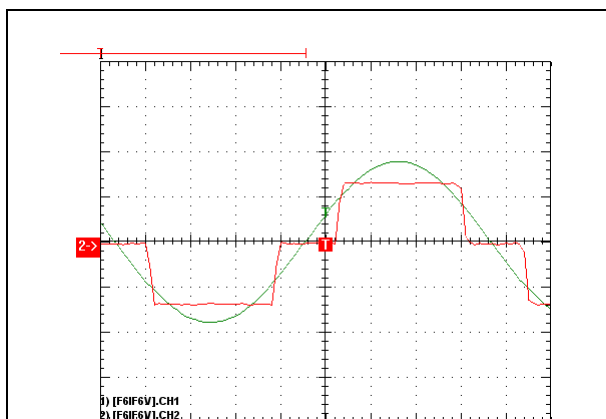
Análise Complementar de Erros de Medição, considerando-se Pares de Tensão-Corrente Adicionais, não incluídos no Aplicativo Desenvolvido

A realização de uma análise complementar dos erros de medição considerando algumas famílias de medidores selecionadas submetidas a cinco casos adicionais, não inclusos no banco de dados do software desenvolvido, é apresentada neste anexo. Os cinco casos adicionais abrangem cenários atípicos apresentando descontinuidade da corrente, e índices elevados de DHT da corrente.

A Tabela A.11 mostra um resumo dos valores dos índices das DHT das tensões e correntes consideradas nos pares de perfis utilizados para a realização das análises dos casos atípicos. As formas de onda para as correntes e tensões aplicadas aos medidores eletrônicos trifásicos selecionados nos ensaios experimentais são apresentadas nas Figuras de A.1 até A.5.

Tabela A.11 - Resumo dos valores dos índices das DHT das tensões e correntes consideradas nos pares de perfis utilizados para a realização das análises dos casos atípicos

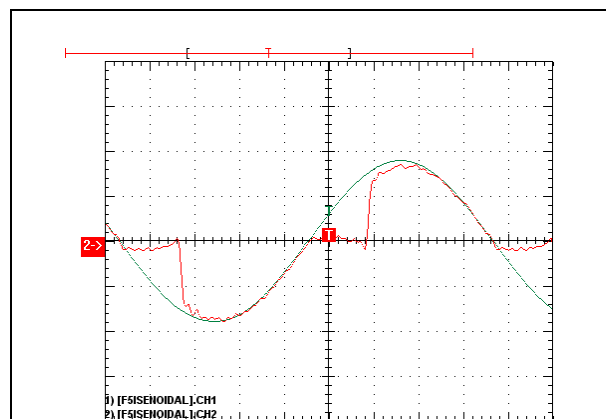
Par Perfil	DHTV	DHTI	Potência Ativa	Informação
XP0 (F6I-F6V)	1,13	27,02	1206 W	Descontinuidade
XP1 (F5I-F0V)	0,73	33,40	1145 W	Descontinuidade
XP2 (F8I-F6V)	0,95	49,54	1021 W	DHTI Limite Modelo
XP3 (F2I-F1V)	1,37	87,15	713 W	DHTI Nível Elevado
XP4 (F1I-F2V)	0,74	89,24	651 W	DHTI Nível Elevado



V: 100 V/div; I: 5A/div, 2ms

Perfil de Tensão:	F6V	DHTV:	1,13
Perfil de Corrente:	F6I	DHTI:	27,02
Ângulo de Deslocamento entre Perfil de Tensão e Perfil de Corrente:			---

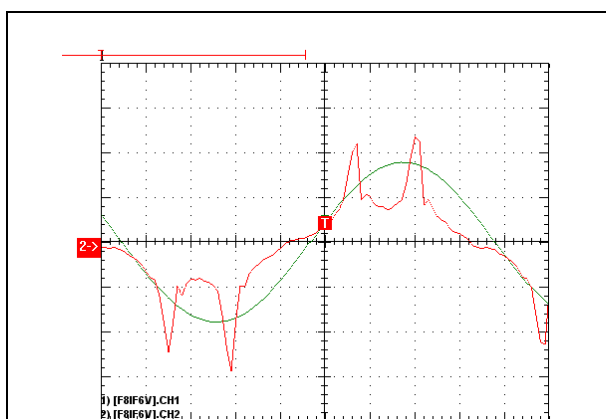
Figura A.1 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP0 (F6V-F6I)



V: 100 V/div; I: 5A/div, 2ms

Perfil de Tensão:	F0V	DHTV:	0,73
Perfil de Corrente:	F5I	DHTI:	33,40
Ângulo de Deslocamento entre Perfil de Tensão e Perfil de Corrente:			---

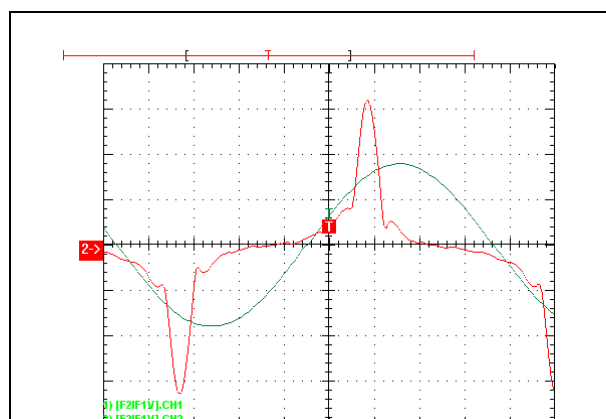
Figura A.2 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP1 (F0V-F5I)



V: 100 V/div; I: 5A/div, 2ms

Perfil de Tensão:	F6V	DHTV:	0,95
Perfil de Corrente:	F8I	DHTI:	49,54
Ângulo de Deslocamento entre Perfil de Tensão e Perfil de Corrente:			---

Figura A.3 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP2 (F6V-F8I)



V: 100 V/div; I: 5A/div, 2ms

Perfil de Tensão:	F1V	DHTV:	1,37
Perfil de Corrente:	F2I	DHTI:	87,15
Ângulo de Deslocamento entre Perfil de Tensão e Perfil de Corrente:			---

Figura A.4 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP3 (F1V-F2I)

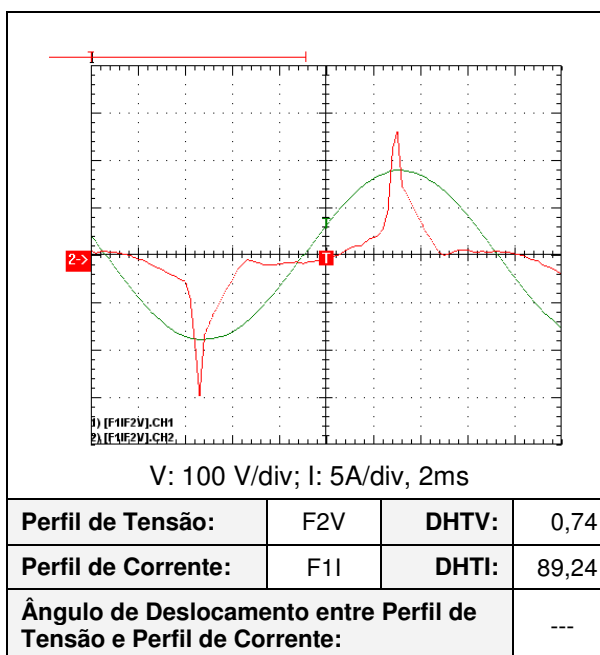


Figura A.5 - Formas de onda referentes ao par Perfil XP4 (F2V-F1I)

A Tabela A.12 apresenta o resumo dos dados obtidos para os erros de medição, considerando os medidores eletrônicos submetidos às condições propiciadas pelos casos adicionais selecionados.

Tabela A.12 - Resumo dos resultados obtidos para os erros de medição nos medidores eletrônicos considerando a determinação do erro porcentual absoluto para os casos adicionais

DHTV	DHTI	Par Perfil	Erros % Família I			Erros % Família II			Erros % Família III		Erros % Família IV		
1.13	27.02	XP0	0.11	0.07	0.30	-0.27	-0.48	-0.61	0,01	0.12	-0.02	0.03	0.02
0.73	33.4	XP1	0.10	-0.66	0.09	-0.05	0.21	0.40	-0.07	-0.07	-0.06	0.02	0.01
0.95	49.54	XP2	-6.20	-2.57	-1.77	-9.14	-7.34	-10.97	-0.63	-0.66	-0.12	0.04	0.02
1.37	87.15	XP3	-17.85	-1.47	-0.38	0.56	0.87	2.08	0.02	0.07	-0.01	0.04	-0,01
0.74	89.24	XP4	-16.56	0.02	-0.02	4.69	4.14	2.39	-0.22	-0.17	-0.02	0.02	-0,01