



unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Avaliação Experimental de Medidores
Watt-Hora Operando em Condições
Não-Senoidais**

Luciana Carvalho Caldeirão

Ilha Solteira - SP

2005

1210001567



unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MEDIDORES
WATT-HORA OPERANDO EM CONDIÇÕES
NÃO-SENOIDAIAS**

Luciana Carvalho Caldeirão

Insc. 055/05 - NRD 47

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
06.04.05	30.04.05
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	Te. 1567
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Woods Auto R\$ 1000	C746a

Dissertação submetida à
Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira - Unesp, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção
do título de mestre.

Orientador: José Carlos Rossi

Co Sys 295580
Sys 51730

Ilha Solteira
2005

FICHA CATALOGRÁFICA

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

Caldeirão, Luciana Carvalho

C146a Avaliação experimental de medidores watt-hora operando em condições não-senoidais / Luciana Carvalho Caldeirão. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2005
108 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005

Orientador: José Carlos Rossi

Bibliografia: p. 105-108

1. Energia - Consumo. 2. Energia elétrica - Qualidade. 3. Medidor de watt-hora. 4. Distorção harmônica.

DATA DE CATEGORIA	DATA DE TOMBO
REGISTRADO POR	TOMBO
AQUISICÃO	CLASSIFICAÇÃO

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MEDIDORES DE WATT-HORA OPERANDO EM
CONDIÇÕES NÃO-SENOIDAIAS

AUTORA: LUCIANA CARVALHO CALDEIRÃO

ORIENTADOR: Dr. JOSE CARLOS ROSSI

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

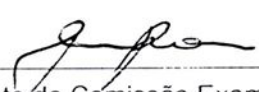
Dr. JOSE CARLOS ROSSI

Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN

Dr. IVAN NUNES DA SILVA



Data da realização: 21 de fevereiro de 2005



Presidente da Comissão Examinadora
Dr. JOSE CARLOS ROSSI

*Este trabalho é dedicado às pessoas que
mais estimo e admiro:*

*Aos meus pais: **José Antonio e Helena;***

*Às Minhas Irmãs: **Ana Carla e Denise;***

*Ao meu namorado: **Fábio;***

*Ao Meu cunhado: **Luis Carlos;***

E à todos os meus amigos,

*Por todo apoio e incentivo que me foi
oferecido nos momentos mais difíceis, e acima de
tudo, pela amizade e confiança que me foi
depositada.*

AGRADECIMENTOS

“Agradeço, primeiramente, a Deus por ter-me dado saúde e força para enfrentar todos os obstáculos e conduzir até o fim este trabalho.

Agradeço aos meus pais, José Antonio Caldeirão e Helena Carvalho Caldeirão, às minhas irmãs Ana Carla Carvalho Caldeirão e Denise Carvalho Caldeirão e ao meu cunhado Luís Carlos Pires Videira, pelo apoio incondicional em todos os momentos, inclusive nos mais difíceis.

Ao Fábio Cassucci Gaino, um agradecimento especial, pelo apoio incondicional e pelo carinho que me tem dedicado.

Ao amigo Rodrigo Nunes de Oliveira (Magaiver) pela sua amizade e por seu apoio, atenção e auxílio durante toda a execução deste trabalho.

À todos os meus mestres, desde aqueles que me ensinaram as primeiras letras, até os que atualmente orientam minhas atividades. A eles devo a minha formação intelectual e profissional.

Ao professor Miguel Ângelo de Menezes, pelo seu apoio e consideração nos momentos mais difíceis da realização deste trabalho.

Ao professor Sérgio Azevedo de Oliveira, pela disposição em sanar minhas dúvidas.

Aos professores Luís Carlos Origa de Oliveira, Carlos Alberto Canesin e Júlio Borges de Souza, pelo auxílio na realização deste trabalho, contribuindo com sugestões valiosas.

Aos professores membros e suplentes da Comissão Examinadora, pela disposição em participar do exame geral de qualificação e da defesa.

Ao professor José Carlos Rossi, pela orientação na realização deste trabalho.

Aos colegas de laboratório e de pós-graduação que sempre tiveram disposição em ajudar.

À todos os funcionários da Unesp, que realizam um excelente trabalho e se comportam como verdadeiros amigos.

À Unesp, em particular à FEIS, por ter-me dado a oportunidade de vivenciar este momento.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

É muito difícil agradecer a todos sem esquecer, inevitavelmente, de alguém, mas aos que esqueci, meu pedido de perdão e meus agradecimentos sinceros.”



RESUMO

A aplicação da eletrônica de potência em muitos equipamentos conectados às redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como a utilização de equipamentos cujas características são não lineares, fazem com que as tensões de fornecimento apresentem distorções em suas formas de onda originais, ou seja, senoidais. Desta forma, torna-se necessário investigar o comportamento de equipamentos instalados nestes sistemas elétricos quando os mesmos operam sob estas condições, ou seja, com tensões e/ou correntes distorcidas.

Neste contexto estão os medidores de energia elétrica ativa, que funcionam pelo princípio de indução, os quais são projetados para funcionar em ambientes com mínimas distorções harmônicas de tensão e corrente.

Pelo exposto, o presente texto se propõe ao estudo e a análise experimental de medidores de energia elétrica ativa, kWatt-hora, monofásicos e trifásicos de dois elementos, quando os mesmos operam com formas de onda de tensões e ou correntes distorcidas ou seja, em ambientes para os quais não foram idealizados.

Todo o processo é conduzido comparando-se as leituras dos medidores de kWatt-hora com os valores obtidos através de um sistema de aquisição de dados de 16 bits, em tempo real. Os resultados são apresentados em forma de tabelas e gráficos.

ABSTRACT

The application of power electronics in a lot of equipment connected to the electric power transmission and distribution networks, as well as the use of equipment whose characteristics are not linear, produce distortions on the original sine waveforms of the supply voltage. Therefore, it becomes necessary to investigate the behavior of equipment installed in electric systems with this kind of loads.

In this context are the active electric power meters which are projected to work in a free voltage and current distortion environment.

The present dissertation is related with the experimental analysis of two elements, single-phase and three-phase, active electric power meters when operating with distorted voltages and/or currents waveforms.

The whole process is conducted comparing the readings of the kWatt-hour meters with the values obtained using a 16 bits data acquisition system in real time. The results are presented in form of tables and graphs.



Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2- ESTADO DA ARTE	2
1.3- OBJETIVOS DO TRABALHO.....	5
1.3.1- <i>Algoritmo básico do procedimento metodológico adotado:</i>	6
1.4- ESTRUTURA DO TRABALHO	7
CAPÍTULO 2 - SISTEMA DE TARIFICAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	8
2.1- INTRODUÇÃO	8
2.2- SISTEMA TARIFÁRIO	8
2.2.1- <i>Definições Básicas</i>	9
2.3- REGULAMENTAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	10
2.3.1- <i>Aspectos Gerais da Legislação</i>	11
2.3.2- <i>Cálculo do Fator de Potência</i>	12
2.4- ESTRUTURA TARIFÁRIA.....	12
2.4.1- <i>Classificação dos Consumidores</i>	12
2.4.2- <i>Tarificação Convencional</i>	13
2.4.3- <i>Tarificação Horo-Sazonal (Azul e Verde)</i>	13
2.4.3.1- <i>Tarificação Horo-Sazonal Azul (THA)</i>	14
2.4.3.2- <i>Tarificação Horo-Sazonal Verde (THV)</i>	14
2.5- SUGESTÃO DE UM MÉTODO DE TARIFICAÇÃO NA PRESENÇA DE THDS	14
CAPÍTULO 3 - MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA	17
3.1- INTRODUÇÃO	17
3.2- CLASSIFICAÇÃO DOS MEDIDORES DE ENERGIA.....	17
3.2.1- <i>Quanto ao tipo de energia a ser medida</i>	18
3.2.2- <i>Quanto ao número de elementos/fios</i>	18
3.2.3- <i>Quanto ao tipo de ligação à carga</i>	19
3.2.4- <i>Medidores Especiais</i>	19
3.3- REP – REGISTRADOR ELETRÔNICO PROGRAMÁVEL	19
3.4- MEDIDOR WATT-HORA TIPO INDUÇÃO (MWHI)	20
3.4.1- <i>Partes Componentes do Medidor de Energia Tipo Indução</i>	20
3.5- PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MWHI.....	23
3.5.1- <i>Circuitos Elétrico e Magnético do Medidor Watt-hora Tipo indução</i>	24
3.5.2- <i>Equações de Produção de Conjugado do Medidor</i>	28
3.5.2.1- <i>Conjugado motor</i>	28
3.5.2.2- <i>Conjugado resistente</i>	32
3.5.3- <i>Velocidade de rotação do disco</i>	35



3.6- AFERIÇÃO E CALIBRAÇÃO.....	37
3.6.1- Aferição.....	37
3.6.2- Calibração	38
3.6.2.1- Calibração na carga nominal ou calibração de plena carga	40
3.6.2.2- Calibração na carga leve.....	41
3.6.2.3- Calibração na carga indutiva ou calibração do fator de potência	41
3.6.3- Erros do processo de aferição/calibração e após colocados em funcionamento	42
3.7- ERROS DO MEDIDOR WATT-HORA TIPO INDUÇÃO	43
3.7.1- Erros Compensados Através de Ajustes.....	43
3.7.1.1- Dispositivos de compensação automática	43
3.7.1.2- Ajuste do ângulo em 90°:.....	44
3.7.1.3- Compensação do atrito	46
3.7.1.4- Compensação da Sobrecarga ou sobrecorrente.....	46
3.7.1.5- Compensação da Variação de Temperatura	47
3.7.1.6- Compensação da Variação da Tensão.....	47
3.7.2- Influências Externas ao Medidor.....	48
3.7.2.1- Influência devido à presença de harmônicas	48
3.7.2.2- Influência devido tensões e/ou correntes desequilibradas ou desbalanceadas	49
CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	51
4.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS	51
4.2- METODOLOGIA	51
4.2.1- – Medidas de Referência.....	51
4.3- CALIBRAÇÃO DOS MEDIDORES	52
4.4- PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DAS MEDIDAS.....	52
4.4.1- Medidor de Watt-hora Monofásico.....	53
4.4.2- Medidor de Watt-hora Trifásico.....	53
4.5- DESENVOLVIMENTO DAS ROTINAS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	54
4.5.1- Fluxograma para Ensaio do Medidor Monofásico.....	54
4.5.1.1- Quantificação da Potência do Medidor	55
4.5.1.2 - Potência através dos valores de Tensão e Corrente Instantâneos	55
4.5.2- Fluxograma para Ensaio do Medidor Trifásico.....	56
4.5.2.1 - Quantificação da Potência do Medidor	57
4.5.2.2 - Medida dos watt-hora pelo Sistema de Aquisição de dados	57
4.6- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS EXPERIÊNCIAS	58
4.6.1- Medidor de Watt-hora Monofásico.....	58
4.6.1.1 – Cargas utilizadas nos ensaios experimentais	58
4.6.2- Medidor de Watt-hora Trifásico.....	58
4.6.2.1 – Cargas utilizadas nos ensaios experimentais	59
4.7-EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E CALIBRAÇÃO	59
4.8- COMPOSIÇÃO DO CONTEÚDO HARMÔNICA DA TENSÃO IMPOSTA	60
4.8.1- Medidor de Watt-hora Monofásico.....	60



4.8.2- Medidor de Watt-hora Trifásico	61
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	63
5.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS	63
5.2- MEDIDOR WATT-HORA MONOFÁSICO TIPO INDUÇÃO(MWHI).....	63
5.2.1- Carga Resistiva	63
5.2.1.1- Tensões e Correntes Senoidais	63
5.2.1.2- Tensões não senoidais com THD = 5%	64
5.2.1.3- Tensões não senoidais com THD = 15%	65
5.2.2- Carga RC	68
5.2.2.1- Tensões e Correntes Senoidais	68
5.2.2.2- Tensões não senoidais com THD = 5%	68
5.2.2.3- Tensões não senoidais com THD = 15%	69
5.2.3- Carga RL.....	72
5.2.3.1- Tensões e Correntes Senoidais	72
5.2.3.2- Tensões não senoidais com THD = 5%	72
5.2.3.3- Tensões não senoidais com THD = 15%	73
5.2.4- Retificador Monofásico de Meia Onda	76
5.2.4.1- Tensões e Correntes Senoidais	76
5.2.4.2- Tensões não senoidais com THD = 5%	76
5.2.4.3- Tensões não senoidais com THD = 15%	77
5.2.5- Retificador Monofásico de Onda Completa	80
5.2.5.1- Tensões e Correntes Senoidais	80
5.2.5.2- Tensões não senoidais com THD = 5%	80
5.2.5.3- Tensões não senoidais com THD = 15%	81
5.3- MEDIDOR WATT-HORA TRIFÁSICO TIPO INDUÇÃO(MWHI).....	84
5.3.1- Carga Resistiva	84
5.3.1.1- Tensões e Correntes Senoidais	84
5.3.1.2- Tensões não senoidais com THD = 5%	85
5.3.1.3- Tensões não senoidais com THD = 15%	85
5.3.2- Carga RL.....	89
5.3.2.1- Tensões e Correntes Senoidais	89
5.3.2.2- Tensões não senoidais com THD = 5%	89
5.3.2.3- Tensões não senoidais com THD = 15%	90
5.3.3- Retificador Trifásico de Seis Pulsos	93
5.3.3.1- Tensões e Correntes Senoidais	93
5.3.3.2- Tensões não senoidais com THD = 5%	93
5.3.3.3- Tensões não senoidais com THD = 15%	94
5.3.4- Desbalanceamento de Tensão – Carga R.....	97
5.3.4.1- Tensões e Correntes Senoidais com 5% de Desbalanceamento	97
5.3.4.2- Tensões e Correntes Senoidais com 10% de Desbalanceamento	97
5.3.4.3- Tensões e Correntes Senoidais com 15% de Desbalanceamento	98
5.3.5- Desbalanceamento de Tensão – Carga RL	98
5.3.5.1- Tensões e Correntes Senoidais com 5% de Desbalanceamento	99

5.3.5.2- Tensões e Correntes Senoidais com 10% de Desbalanceamento	99
5.3.5.3- Tensões e Correntes Senoidais com 15% de Desbalanceamento	99

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E DISCUSSÕES 101

6.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	101
6.2- DISCUSSÕES DOS RESULTADOS APRESENTADOS.....	101
6.3- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
6.4- TRABALHOS FUTUROS.....	104



CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1- Considerações Iniciais

Atualmente a energia elétrica é uma das principais fontes de energia, sendo empregada para geração de força motriz, iluminação e alimentação dos mais diversos tipos de cargas elétricas.

A fim de atender à crescente demanda de energia elétrica, são necessários investimentos em todas as suas fases (geração, transmissão, distribuição) bem como um uso cada vez mais racional, com investimentos em programas de conservação de energia. O uso racional dos insumos é um dos princípios básicos da competitividade no mundo globalizado. No Brasil para muitas empresas, o consumo de energia elétrica chega a 5% do seu faturamento. Assim, as metodologias que visam a eficiência energética tem como meta fundamental a diminuição dos custos, tanto no setor industrial, quanto nos setores comercial e residencial.

O conceito e os princípios da conservação de energia elétrica são bem conhecidos, mas nunca foram aceitos como uma alternativa real e como instrumento de planejamento a ser levado a sério. Se o fossem, certamente medidas mais contundentes teriam começado em 1998 quando já estavam aparentes os riscos de desabastecimento, fato que culminou com a crise de energia elétrica de 2001. Os responsáveis pelo planejamento do setor elétrico brasileiro devem considerar a importância da gestão da demanda como uma questão básica de política energética, pois esta é a opção mais barata para os consumidores, para as concessionárias e para o país.

Para controlar o uso da energia elétrica é necessário medir o seu consumo, e para tanto, é necessário a existência de um equipamento capaz de medi-lo. Esse equipamento é o medidor de energia elétrica. O valor obtido com essa medição deve ser o mais exato possível, pois estão envolvidos interesses econômicos de empresas geradoras e distribuidoras de energia, bem como dos consumidores, que devem ter seus direitos respeitados. Com o propósito de manter os medidores dentro dos padrões rígidos exigidos, estes devem ser calibrados de acordo com normas específicas. Estar calibrado quer dizer que o medidor está ajustado para medir o consumo de energia elétrica, dentro dos erros admissíveis.



Atualmente, as empresas que fabricam medidores incorporam, antes da calibração propriamente dita, uma fase de pré-calibração. Trata-se de um ajuste grosseiro de calibração, pois este geralmente se dá em paralelo (vários medidores simultaneamente).

As aferições (determinação do erro) e os ajustes (calibração propriamente dita) realizados na etapa de pré-calibração, não são exatamente os determinados em norma. Os ajustes grosseiros são importantes para facilitar as aferições e ajustes de calibração (estipulados por norma) e, conseqüentemente, para que o valor medido do consumo de energia seja o mais exato possível (o erro do medidor deverá estar dentro da faixa estipulada por norma específica). A exatidão do aparelho em medir o consumo de energia elétrica é uma das qualidades essenciais para o medidor ganhar a confiança de seus clientes.

Dentro deste escopo, o presente trabalho se propõe a analisar experimentalmente (em laboratório) o comportamento dos medidores de kWatt-hora, do tipo indução, monofásico e trifásico de dois elementos, quando os mesmos estão operando sob condições de tensões e correntes não idealizadas.

As análises são direcionadas no sentido de se observar os possíveis erros destes medidores quando submetidos a fenômenos como desbalanceamento de tensões, além de distorções harmônicas de tensões e correntes.

1.2- Estado da Arte

Vários estudos foram realizados para analisar as condições elétricas dos medidores watt-hora de indução. Alguns estão apresentados a seguir:

1) Autor: Chih-Ju Chou, Chun-Chang Liu

“Analysis of the performance of induction watthour meter in the presence of harmonics (a new model approach)” – (Elsevier Science – Electric Power Systems Research 32 (1995) 71-79) [1].

Neste trabalho, o autor desenvolve um modelo para estudar o erro de medida de medidores watt-hora tipo indução na presença de harmônicas. O erro de medida é determinado pelas respostas em frequência das componentes harmônicas; suas relações são expressadas numa função de erro simples usada no modelo, que fornece uma sólida base



analítica para descrever todo o fenômeno de resposta em frequência e resposta harmônica dos medidores. Todos os parâmetros dos medidores foram medidos: as medidas dos princípios e procedimentos são descritos neste artigo. A capacidade e precisão são verificadas por comparações experimentais e resultados computacionais dos medidores watt-hora de indução monofásicos e trifásicos.

O autor determina, através da avaliação experimental, a influência das harmônicas no medidor e apresenta algumas sugestões para melhoria do desempenho do medidor. Estas sugestões se destinam às concessionárias e aos fabricantes. O autor ressalta que a viabilidade da aplicação destas sugestões devem ser estudadas técnica e economicamente, antes de serem adotadas.

2) Autor: *Paul B. Robinson*

"A Watt-hour meter – The solid state polyphase kind" (Potentials, IEEE, Volume: 15, Issue: 1, Páginas: 9 – 13 - Fevereiro – Março de 1996)[2].

Neste artigo, o autor descreve um típico medidor que funciona em regime permanente (em particular o medidor eletrônico General Electrics trifásico), o qual registra o consumo de energia e fornece mais funções do que o medidor eletromecânico.

3) Autor: *Piotr S. Filipski*

"A TDM Wattmeter with 0.5-MHz Carrier Frequency" (Artigo IEEE Transactions of instrumentation and measurement – Vol. 39 - Nº1 – Fevereiro 1990)[3]

Neste artigo, o autor descreve o funcionamento de um medidor Watt-hora padrão time-division multiplier (TDM) que se sobressai onde a alta precisão, a linearidade e a estabilidade são muito importantes. O medidor encontra aplicação em situações em que são necessárias medidas precisas de potência em condições distorcidas e baixo fator de potência, e também é utilizado como padrão para comparações interlaboratoriais.

4) Autor: *Piotr S. Filipski, Rejean Arseneau, John J. Zelle*

"Watt and Voltampere Transfer Standard" (Artigo IEEE Transactions of instrumentation and measurement – Vol. 42 - Nº2 – Abril 1993)[4]

Neste artigo, os autores descrevem um novo instrumento, o qual foi usado como um dispositivo padrão da Rede Nacional Canadense no Conselho de Pesquisa Nacional do Canadá e o comparam com o atual dispositivo mantido pelas empresas de eletricidade canadense e medidores elétricos manufaturados. O erro relativo encontrado do novo padrão é

menor do que 50 ppm para medidas de potência e 100 ppm para medidas de volt-ampere.

5) Autor: *Roberto P. Caldas, Landulfo M. Alvarenga, Alberto Campos, José C. de Abreu, Fausto A. da Cunha Lima, Iony P. Siqueira*

“Requisitos de Medição de Energia para o Novo Modelo Competitivo Brasileiro”
(Artigo SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – Foz do Iguaçu - PR - GPC/07 - Outubro 1999)[5]

Neste artigo, os autores apresentam um resumo das definições e dos requisitos técnicos referentes ao novo sistema de medição, para atendimento da operação do Mercado Atacadista de Energia Elétrica – MAE no Brasil.

6) Autor: *Edson da Costa Bortoni, Walmir Pinheiro Araújo, Ricardo Gomes Donadio*

“Desempenho de Medidores Watt-hora Tipo induções em Ambientes Não Senoidais”
(Artigo UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá - EFEI Energy News - Artigos)[6]

Neste artigo, os autores avaliam o desempenho dos medidores de energia ativa que utilizam o princípio de indução, quando estão operando em ambientes com componentes harmônicas. Visando identificar os pontos onde devem se concentrar as medidas de redução de erro, os autores apresentam uma modelagem teórica do funcionamento do medidor. Os autores apresentam ainda resultados dos testes realizados em medidores de três diferentes fabricantes nacionais feitos em laboratórios do INMETRO e, uma série de medidas para mitigar o efeito de componentes harmônicas sobre o erro do medidor.

7) Autor: *Gilvana Antunes de Melo*

“A Eficiência Energética Sob a Ótica da Qualidade de Energia Elétrica”
(Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, FEIS, 2001).[7]

Neste trabalho, o autor apresenta um estudo dos problemas relacionados com a qualidade de energia, decorrentes de ações na busca da eficiência energética, objetivando sua caracterização e quantificação. Este trabalho apresenta um enfoque do ponto de vista da oferta de energia (concessionárias) e da demanda (consumidores).

8) Autor: : *Tongxin Zheng, Elham B. Makram, Adly A. Girgis*

“Evaluating Power System Unbalance in the Presence of Harmonic Distortion”
(Artigo IEEE Transactions on Power Delivery – Vol. 18 - Nº2 – Abril 1993)[8]

Neste artigo, os autores apresentam um novo método para avaliar o desequilíbrio em



sistemas de potência na presença de distorção harmônica. A componente equilibrada, a primeira desequilibrada e a segunda desequilibrada são obtidas dos fasores trifásicos originais de tensão e corrente para cada componente harmônica. Os equivalentes valores eficazes das tensões e correntes, são então decompostos em componente fundamental equilibrada, componente fundamental desequilibrada, componente harmônica equilibrada e componente harmônica desequilibrada. A mesma decomposição é aplicada para a potência aparente, e o sistema desequilibrado pode então ser avaliado através do fator de distorção do sistema desequilibrado proposto. Os fatores de distorção de desequilíbrio da fundamental, de equilíbrio da harmônica, e de desequilíbrio da harmônica são definidos. Estes fatores de distorção tornam mais claro a relação entre o desequilíbrio e a distorção harmônica.

9) Autor: : Russel R. Sherburne

“Driving Torque Equations for the Watthour Meter Based on the Ferraris Principle”
(Artigo IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems – Vol. PAS-90 - Nº1 – Janeiro/fevereiro 1971)[9]

Neste artigo, o autor apresenta o desenvolvimentos de equações matemáticas para o torque no disco de um medidor Watt-hora em função da tensão aplicada, da corrente de carga e do ângulo do fator de potência, baseado no princípio de Ferraris. Este equacionamento do medidor Watt-hora é feito para situações ideais (tensões e correntes senoidais).

1.3- Objetivos do Trabalho

De um modo geral, os medidores de energia elétrica ativa, que utilizam o princípio de indução são projetados para operar em regime permanente e na frequência nominal. No entanto, o seu funcionamento em situações onde as tensões e correntes apresentam formas de onda não senoidais e também desbalanceadas são objetos de intensos estudos tanto no meio acadêmico quanto nas concessionárias de energia elétrica.

Dessa forma, o presente trabalho segue na direção de investigar experimentalmente os medidores elétricos de potência ativa, com princípio de indução, quando os mesmos são submetidos aos fenômenos que se manifestam nos sistemas elétricos nos dias atuais.

Um sensor óptico deverá ser inserido junto ao disco do medidor, este sensor emite um

pulso para cada volta completa do disco, e os pulsos são contabilizados e multiplicados pelo valor do kd específico do medidor, para a obtenção dos kWatt-hora que o medidor estará registrando. Foram feitas algumas marcações no disco do medidor, visando obter um maior número de pontos lidos pelo sensor, em menor tempo, e o kd também foi fracionado pelo mesmo número de marcações. A seguir, será feita a aquisição de correntes e tensões instantâneas, utilizando um sistema de aquisição de dados, e será calculado o valor de kWatt-hora através de algumas equações. Os dois valores de kWatt-hora encontrados serão então comparados para a obtenção do erro do medidor.

Ao analisar os erros encontrados, um cuidado especial deve ser tomado, pois deve-se considerar a precisão dos transdutores de tensão e das ponteiras de corrente.

O objetivo deste trabalho não é identificar ou quantificar o erro do medidor de potência ativa. O objetivo é observar o seu desempenho de leitura e avaliar este desempenho, quando está submetido à condições não senoidais.

1.3.1- Algoritmo básico do procedimento metodológico adotado:

- (1) Levantamento bibliográfico sobre os assuntos envolvidos na pesquisa, realizado através de consultas a trabalhos científicos publicados e as referências bibliográficas específicas.

- (2) **Escolha dos dispositivos a serem utilizados no estudo.**

Como o objetivo é estudar o desempenho de medidores de kWatt-hora tipo indução em ambientes não idealizados, optou-se por medidores monofásicos e trifásicos de dois elementos que são freqüentemente utilizados no Brasil. Os equipamentos dos tipos REP (registrador eletrônico programável) e medidores eletrônicos não foram analisados devido o fato de não se conseguir nenhum destes juntos as concessionárias consultadas.

- (3) **Ensaio dos dispositivos em laboratório.**

Utilizando equipamentos de medição adequados, realizou-se o diagnóstico do desempenho dos medidores de kWatt-hora no que diz respeito a possíveis erros provocados pelo fato dos mesmos não estarem operando em ambientes para os quais foram idealizados.



-
- (4) Apresentação dos resultados experimentais.
 - (5) Análise dos resultados obtidos.
 - (6) Conclusão final.

1.4- Estrutura do Trabalho

Com a finalidade de atingir as metas propostas, este trabalho apresenta-se organizado em capítulos, quais sejam:

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

Trata de introduzir o que foi realizado neste trabalho e em que contexto ele é inserido.

CAPITULO 2 – SISTEMA DE TARIFICAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Descreve como é o sistema tarifário praticado nos dias atuais pelas concessionária de energia, e as principais definições presentes nas faturas da energia.

Apresenta também uma sugestão, feita por um P&D da CPFL com outras universidades), para a cobrança de energia quando o consumidor apresenta distorções harmônicas nos seus ramais alimentadores.

CAPITULO 3 – MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA

Apresenta a classificação e as principais partes componentes dos medidor kWatt-hora, princípio de indução, além de descrever seu princípio de funcionamento.

CAPITULO 4 –PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Apresenta os procedimentos adotados para a realização dos testes experimentais.

CAPITULO 5 –RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Apresenta os resultados obtidos experimentalmente.

CAPITULO 6 –CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

Comparação dos resultados e conclusão.



CAPÍTULO 2 - SISTEMA DE TARIFICAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1- Introdução

Para a implantação de um projeto de efficientização energética em plantas comerciais, industriais ou residenciais, a análise das faturas mensais de fornecimento deve ser primeiramente verificada antes de qualquer outra iniciativa. Através da análise destas, pode ser observado as condições gerais de utilização da energia elétrica e determinar quais serão os passos seguintes. Um bom conhecimento da legislação que regulamenta o fornecimento e o faturamento da energia elétrica é importante para que essa análise resulte em redução efetiva de custos.

As auditorias energéticas realizadas atualmente tem como objetivo básico a busca da otimização dos custos através de análises e estudos baseados na tarifação praticada. Assim, os procedimentos adotados referem-se basicamente a três fatores: o primeiro relaciona-se com a escolha, quando possível, do sistema tarifário e a sua adequação nos contratos de demanda em função das curvas de carga apresentadas pelos consumidores; o segundo relaciona-se com a identificação e eliminação de sobretaxas oriunda de faturamento do excedente de reativos; e o terceiro, quando for o caso, realiza-se um levantamento da parcela da carga total instalada que está diretamente associada ao processo produtivo do consumidor, no sentido de promover a recuperação de parte do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços).

2.2- Sistema Tarifário

O sistema tarifário de energia elétrica vigente no Brasil é um conjunto de normas e regulamentos que tem por finalidade estabelecer o preço da eletricidade para os diversos tipos de consumidores. A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), além de suas atribuições específicas, incorpora também as funções de órgão regulador do extinto Departamento



Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE).

Segundo o conceito moderno, a tarifa de energia elétrica visa tanto prover um retorno financeiro satisfatório para os agentes que realizam investimentos e operam o sistema, como para passar sinais econômicos para os consumidores, indicando onde e quando o fornecimento de energia elétrica é mais barato [7].

As tarifas podem ser, basicamente, de dois tipos: monômias, quando somente o consumo efetivo de energia é cobrado, ou binômias, quando acrescenta-se um componente que remunera a capacidade colocada a disposição dos consumidores e ainda é incorporado preços diferenciados de energia, dependendo da hora do dia e época do ano. Além da tarifa propriamente dita, o preço final da energia a ser pago pelo consumidor inclui ainda parcelas referentes à encargos e aos impostos e independem do consumo. Os impostos dependem da política tributária vigente.

Os usuários de energia elétrica são enquadrados nestas estruturas em função de suas características predominantes de consumo.

2.2.1- Definições Básicas

A legislação que regulamenta a tarifação de energia elétrica no Brasil é baseada nos seguintes conceitos e definições:

A **demanda** é o consumo de energia da instalação dividido pelo tempo no qual se verificou tal consumo. Para o faturamento de energia pela concessionária, utiliza-se intervalos de integração de 15 minutos. Assim, a sua demanda de energia (medida em kW), é igual ao consumo a cada 15 minutos (medido em kWh) dividido por 1/4 (15 minutos é igual a 1/4 de hora). A concessionária de energia elétrica escolherá o valor mais alto, ainda que tenha sido verificado apenas uma vez. A demanda se classifica em:

- **Demanda Registrada – DR (kW):** é o maior valor da demanda efetivamente registrada em intervalos de 15 minutos durante o período de funcionamento.
 - **Demanda Faturada – DF (kW):** é o valor da demanda efetivamente utilizada para efeito de faturamento.
 - **Demanda Contratada– DC (kW):** é o valor da demanda que a concessionária se compromete, através do contrato de fornecimento, a manter disponível ao consumidor.
-

O **consumo (CA)** é a quantidade de energia elétrica ativa (medida em kWh) efetivamente medida no período de faturamento.

A **tolerância de ultrapassagem de demanda** é uma tolerância dada aos consumidores das tarifas horo-sazonais para fins de faturamento de ultrapassagem de demanda.. Esta tolerância é de 5% para os consumidores atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV; 10% para os consumidores atendidos em tensão inferior a 69 kV (a grande maioria), e demanda contratada superior a 100 kW; e 20% para os consumidores atendidos em tensão inferior a 69 kV, e demanda contratada de 50 a 100 kW.

As **Tarifas de Ultrapassagem** são as tarifas aplicadas à parcela da demanda medida que superar o valor da demanda contratada, no caso de Tarifas Horo-Sazonais, respeitados os respectivos limites de tolerância.

O **período úmido (u)** é aquele onde, devido à estação de chuvas, os reservatórios de nossas usinas hidrelétricas estão mais altos. Como o potencial hidráulico das usinas cresce, existe um incentivo (tarifas mais baixas) para que o consumo de energia seja maior neste período. Os meses úmidos são de dezembro a abril do ano seguinte.

O **período seco (s)** é aquele onde, devido à falta de chuvas, os reservatórios de nossas usinas hidrelétricas estão mais baixos. Como o potencial hidráulico das usinas diminui, existe um acréscimo nas tarifas para que o consumo de energia seja menor neste período. Os meses secos são de maio a novembro de um mesmo ano.

O **horário de ponta** corresponde ao intervalo de três horas consecutivas, definido por cada concessionária local, compreendido entre as 17 e 22 horas, de segunda à sexta-feira. O **horário fora de ponta** corresponde às horas complementares às três horas do horário de ponta, acrescido do total das horas dos sábados e domingos.

O **fator de potência** é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente numa instalação.

2.3- Regulamentação do Fator de Potência

O fator de potência (*FP*) é um índice que reflete a energia que está sendo utilizada, ou seja, a relação entre a potência ativa (realmente útil) e a potência aparente (potência total) numa instalação. Como a maioria das cargas de uma instalação elétrica são indutivas, elas

geram um campo magnético através da circulação de corrente. Com a relação entre estes dois valores determina-se o fator de potência (FP) num determinado período [10].

2.3.1- Aspectos Gerais da Legislação

- Os consumidores e as concessionárias devem manter o fator de potência de seus sistemas o mais próximo possível da unidade ($FP=1$).
- O fator de potência de referência estabelecido como limite para cobrança de energia reativa excedente por parte da concessionária é 0,92 [31], independentemente da modalidade tarifária.

Quando o fator de potência é baixo, surge uma série de inconvenientes elétricos para a indústria e para a concessionária. Valores altos de fator de potência (próximos a 1,0) indicam uso eficiente da energia elétrica, enquanto que fatores baixos indicam seu mau aproveitamento, além de representar uma sobrecarga para todo sistema elétrico. [7]

A Potência Total ou Aparente é dada em kVA, e é a soma vetorial das potências ativa e reativa, como mostra a figura acima. A energia reativa capacitiva é medida no período de 0h a 6h, a indutiva das 6h às 24h.

- O Cálculo do fator de potência pode ser feito por avaliação horária ou mensal.

O fator de potência é sempre um número entre 0 e 1 e pode ser capacitivo ou indutivo, dependendo se o consumo de energia reativa for capacitivo ou indutivo. Para faturamento de energia, o fator de potência é registrado de hora em hora. Assim como no caso da demanda, os mecanismos de tarifação levarão em conta o pior valor de fator de potência registrado ao longo do mês [10].

- O excedente reativo indutivo ou capacitivo que ocorre quando o fator de potência indutivo ou capacitivo é inferior ao fator de potência de referência, 0,92, é cobrado como tarifas de fornecimento de energia ativa. Surge, então, o conceito de energia reativa reprimida, ou seja, a cobrança pela circulação de excedente reativo no sistema elétrico [11].

Em alguns casos, a instalação de um banco de capacitores resolverá os problemas de ajuste do fator de potência, além de melhorar o sistema elétrico.

2.3.2- Cálculo do Fator de Potência

Para tarifação do fator de potência, utiliza-se a energia elétrica ativa faturada (kWh) e a energia elétrica reativa faturada (kVArh) através da expressão:

$$FP = \cos \left[\arctg \left(\frac{kVArh}{kWh} \right) \right] \quad (2.1)$$

2.4- Estrutura Tarifária

2.4.1- Classificação dos Consumidores

A energia elétrica pode ser cobrada de diversas maneiras, dependendo do enquadramento tarifário de cada consumidor. Resumidamente, a classificação dos consumidores é feita conforme abaixo [7]:

- **Grupo A:** Engloba os consumidores que recebem energia em tensões acima de 220V. Possui três tipos de tarifação: convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde. Nesta categoria, os consumidores pagam pelo consumo, pela demanda e por baixo fator de potência.
- **Grupo B:** Engloba os demais consumidores, divididos em três tipos de tarifação: residencial, comercial e rural. Neste grupo, os consumidores pagam apenas pelo consumo medido.

A maioria das pequenas e médias empresas (industriais ou comerciais) brasileiras se encaixa no Grupo A. Estes consumidores podem ser enquadrados na tarifação convencional, ou na tarifação horo-sazonal (azul ou verde). Os custos por kWh são mais baixos nas tarifas horo-sazonais, mas as multas por ultrapassagem de demanda são mais altas. Assim, para a escolha do melhor enquadramento tarifário (quando facultado ao cliente) é necessária uma avaliação específica.

2.4.2- Tarificação Convencional

Na tarificação convencional, o consumidor paga à concessionária até três parcelas: consumo, demanda e ajuste de fator de potência. O faturamento do consumo de energia (CA) não apresenta a divisão do dia em horário de ponta e fora de ponta e será aquele verificado pela medição no período de funcionamento. Acumula-se o total de kWh consumidos, e aplica-se uma tarifa de consumo para chegar à parcela de faturamento de consumo.

O valor de demanda faturada (DF) é obtido pela aplicação de uma tarifa de demanda à demanda faturada, que é o maior valor entre: a demanda registrada (DR) no mês, a demanda contratada (DC), caso haja contrato de fornecimento de energia, e 85% da máxima demanda registrada (DR) nos últimos 11 meses. Com isso, é muito importante o controle de demanda, pois um pico de demanda na tarificação convencional pode significar acréscimos na conta de energia por até 12 meses.

Para determinar o valor da fatura (VF), utiliza-se a expressão[11]:

$$VF = (CA \cdot TC + DF \cdot TD) \cdot \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (2.2)$$

Para o cálculo da parcela de ajuste de fator de potência, o dia é dividido em duas partes: horário capacitivo e o restante. Se o fator de potência do consumidor estiver fora dos limites estipulados pela legislação, haverá penalização por baixo fator de potência. Se o fator de potência do consumidor estiver dentro dos limites preestabelecidos, esta parcela não é cobrada.

2.4.3- Tarificação Horo-Sazonal (Azul e Verde)

Na tarificação horo-sazonal (azul ou verde), os dias são divididos em períodos fora de ponta e de ponta, para faturamento de demanda, e em horário capacitivo e o restante, para faturamento de fator de potência. Além disto, o ano é dividido em um período seco e outro período úmido.

Assim, para o faturamento do consumo, acumula-se o total de kWh consumidos em cada período: fora de ponta seca ou fora de ponta úmida, e ponta seca ou ponta úmida. Para cada um destes períodos, aplica-se uma tarifa de consumo diferenciada, e o total é a parcela de faturamento de consumo [10].

2.4.3.1 Tarificação Horo-Sazonal Azul (THA)

Na tarificação horo-sazonal azul, o faturamento da parcela de demanda será igualmente composto por parcelas relativas à cada período: fora de ponta seca ou fora de ponta úmida, e ponta seca ou ponta úmida [10].

2.4.3.2 Tarificação Horo-Sazonal Verde (THV)

Na tarifa verde, o consumidor contrata apenas dois valores de demanda, um para o período úmido e outro para o período seco. Não existe contrato diferenciado de demanda no horário de ponta, como na tarifa azul. Assim, o faturamento da parcela de demanda será composto uma por parcela apenas, relativa ao período seco ou ao período úmido, usando o mesmo critério acima [10].

2.5- Sugestão de um Método de Tarificação na Presença de THDs

Esta tarificação consiste na verificação da ocupação da capacidade do alimentador, quando este está suprindo uma carga, conforme sugerido na referência [12]. A ocupação adicional além da tolerância é cobrada. Para efeito de tarificação, o deslocamento e a distorção são separados, o que permite cobrar de forma independente e com pesos diferenciados, os excedentes reativos e harmônicos.

Existem muitas formas de tarifas, baseadas nas grandezas físicas elétricas, e cada uma tem suas vantagens e desvantagens. Uma forma mais adequada de tarificação deve possibilitar uma alocação mais justa da responsabilidade pelos custos adicionais no sistema, causados pelas distorções harmônicas.

Esta sugestão de tarificação é baseada no fator de potência harmônico, de forma análoga à tarificação de “excedentes” de carga reativa, usada atualmente no Brasil. Aqui consideraremos somente o caso de rede distorcida equilibrada, mas essa proposta pode ser estendida a redes desequilibradas.

No caso de carga reativa, a expressão para a tarificação do “excedente” é:

$$R = \left(\frac{FR}{FP} - 1 \right) \cdot (TA) \quad (2.3)$$

Onde:

R : faturamento de excedente

FR : fator de referência (o valor 0,92 é usado no Brasil)

FP : fator de potência

TA : tarifa de medição ativa (energia ou demanda de potência)

Esse procedimento é a aplicação de um sistema de cobrança pela ocupação da capacidade do sistema. Quando uma carga com potência ativa P e fator de potência FP é alimentada, ela ocupa no sistema alimentador uma capacidade igual à potência aparente $S=P/FP$ e há uma ocupação supérflua em relação à mínima capacidade necessária para entregar a potência P . Em termos de FP , a ocupação supérflua é:

$$S - P = \left(\frac{1}{FP} - 1 \right) \cdot P \quad (2.4)$$

A expressão (2.3) representa uma cobrança adicional ao faturamento da energia ou potência ativa (demanda) medida de um sistema de tarifação que cobra no mínimo o equivalente ao consumo de uma energia (ou demanda) ativa proporcional a S , ou seja, igual a R , quando o fator de potência do consumidor for inferior a FR .

O excedente a ser pago é:

$$X = FR \cdot S - P = \left(\frac{FR}{FP} - 1 \right) \cdot P \quad (2.5)$$

que mostra o significado da expressão (2.3).

Se usar o fator de potência verdadeiro (FP_t) na expressão (2.5), com um fator de referência (FR_t) apropriado, obtém-se uma forma de faturamento global de excedentes, que inclui também o efeito de harmônicos.

Esse mesmo procedimento pode ser aplicado para uma tarifação de harmônicos separada, baseada no conceito de ocupação do sistema e no desmembramento do fator de potência verdadeiro (FPT) em sub-fatores:

$$FPT = FP_1 \cdot FP_H \quad (2.6)$$

Onde:

FP_t : fator de potência verdadeiro

FP_1 : fator de potência fundamental

FP_H : fator de potência harmônico

Estes fatores de Potência são dados por:

$$FP_t = \frac{P}{V_{rms} \cdot I_{rms}}$$

$$FP_1 = \frac{P_1}{V_1 \cdot I_1} \quad (2.7)$$

$$FP_H = \frac{1 + \frac{P_H}{P_1}}{\sqrt{1 + THD_I^2} \cdot \sqrt{1 + THD_V^2}}$$

Onde:

P_1 : potência ativa da componente fundamental

V_1 : tensão da componente fundamental

I_1 : tensão da componente fundamental

Nesse caso, a ocupação supérflua pode ser expressa como:

$$S - P = \left(\frac{1}{FP_1} - 1 \right) \cdot P + \left(\frac{1}{FP_H} - 1 \right) \cdot \frac{1}{FP_1} \cdot P \quad (2.8)$$

A expressão para o “excedente” pode ser expressa por:

$$X = \left(\frac{FR_1}{FP_1} - 1 \right) \cdot P + \left(\left(\frac{FR_H}{FP_H} - 1 \right) \cdot \frac{1}{FP_1} \right) \cdot P \quad (2.9)$$

Os termos do lado direito das expressões (2.8) e (2.9) não são completamente desacoplados com respeito aos dois fatores de potência. O primeiro termo só depende de FP_1 , mas o segundo termo depende de FP_H e de FP_1 , podendo criar a impressão de uma tarifação dupla do excedente reativo devido à presença de FP_1 em ambos os termos. Do ponto de vista prático, é vantajoso e justificável usar uma fórmula de tarifação que apresente separadamente os fenômenos envolvidos, pois isso permitiria uma indicação ao consumidor sobre a causa da tarifação excedente e permitiria praticar custos diferenciados para cada tipo de efeito. Assim, é sugerido o uso da seguinte expressão:

$$X = \left(\frac{FR_1}{FP_1} - 1 \right) \cdot P + \left(\frac{FR_H}{FP_H} - 1 \right) \cdot P \quad (2.10)$$

Essa modificação não traria diferenças significativas em relação ao total de excedentes e os benefícios obtidos com a ‘sua aplicação justificam sua preferência em relação à expressão (2.9), que traria desvantagens nos aspectos práticos da aplicação.

CAPÍTULO 3 - MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1- Introdução

A medição da energia elétrica é empregada, na prática, para possibilitar à entidade fornecedora o faturamento adequado da quantidade de energia elétrica consumida por cada usuário, dentro de uma tarifa estabelecida. Atualmente o medidor é o do tipo de indução devido à sua simplicidade, robustez, exatidão e desempenho ao longo dos anos.

A potência é uma quantidade instantânea, ao passo que a energia considera o tempo de funcionamento, ou seja, quanto tempo a potência foi aplicada. Energia equivale à potência média multiplicada pelo tempo. Assim, quando se deseja medir a energia, é necessário ter um medidor que meça a quantidade de potência durante todo o período de tempo. A unidade básica de medida da energia elétrica é o watt-hora e o instrumento usado para medir a energia elétrica é chamado de medidor de quilowatt-hora. Os instrumentos utilizados para medir a energia elétrica (medidores de quilowatt-hora - kWh) são integradores, ou seja, somam a potência consumida ao longo do tempo [11].

A concessionária, entidade fornecedora de energia elétrica, tem grande interesse no perfeito e correto desempenho deste medidor, pois nele é que repousam as bases econômicas da empresa. Os litígios entre consumidores e fornecedores podem ser bastante reduzidos se os cuidados necessários forem dispensados à correta medição da energia elétrica consumida.

As entidades governamentais de quase todos os países, no Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e o Instituto Nacional de Pesos e Medidas – INPM, também se preocupam com o assunto e editam suas normas regulamentando as condições que devem satisfazer os medidores para poderem ser comercializados.

3.2- Classificação dos Medidores de Energia

Os medidores de energia podem ser classificados conforme mostrado a seguir [13]:



3.2.1- Quanto ao tipo de energia a ser medida

Dividem-se em:

a) medidor de energia ativa (kWh): medidor que se destina a medir energia ativa de uma instalação. A energia ativa é aquela que realmente realiza trabalho. Estes são os medidores mais utilizados em medição de energia;

b) medidor de energia reativa (kVarh): medidor que se destina a medir energia reativa de uma instalação. A energia reativa é uma consequência da armazenagem de energia na forma de campo magnético.

3.2.2- Quanto ao número de elementos/fios

Classificam-se em:

a) medidores monofásicos: são medidores que possuem apenas um elemento motor (conjunto formado pela bobina de potencial e seu núcleo, por uma ou mais bobinas de corrente e seu núcleo, destinado a produzir um conjugado motor sobre o elemento móvel). Estes medidores são utilizados nas unidades consumidoras de baixo consumo, tais como residências. Subdividem-se ainda em:

- medidores monofásicos a dois fios: medidores que possuem um elemento de potencial e um elemento de corrente;
- medidores monofásicos a três fios: medidores que possuem um elemento de potencial e dois elementos de corrente;

b) medidores polifásicos: são medidores que possuem dois ou três elementos motores. Estes medidores são utilizados nas unidades consumidoras de médio e grande consumo, tais como lojas, indústrias, etc. Subdividem-se em:

- medidores polifásicos de dois elementos e três fios: medidores que possuem dois elementos de potencial e dois elementos de corrente;
 - medidores polifásicos de dois elementos e quatro fios: medidores que possuem dois elementos de potencial e três elementos de corrente;
 - medidores polifásicos de três elementos e quatro fios: medidores que possuem três elementos de potencial e três elementos de corrente.
-



3.2.3- Quanto ao tipo de ligação à carga

Podem ser classificados em:

a) medidores diretos: medidores para serem ligados diretamente à rede e à carga, sem o uso de transformadores de potencial e de transformadores de corrente. A energia consumida pela instalação passa integralmente através do medidor. Utilizados geralmente em residências e empresas de pequeno porte;

b) medidores indiretos: medidores para serem ligados através de transformadores de corrente e/ou transformadores de potencial. Neste caso, apenas uma parcela conhecida da energia consumida passa através do medidor. A energia total é obtida multiplicando-se a energia registrada no medidor por um fator que depende das relações de transformação dos transformadores da medição (de potencial e de corrente).

3.2.4- Medidores Especiais

Inclui-se nesta categoria, os medidores de dupla tarifa, medidores classe 1, que são medidores de energia ativa, cujos erros não excedam 1% para todos os valores de corrente entre 10% da corrente nominal e a corrente máxima, com fator de potência unitário, medidores painel (medidores para painéis de controle de energia), medidor de V2H (medidor de tensão elétrica), medidores com acessórios (medidor com sensor, medidor com emissor de pulsos), etc.

3.3- REP – Registrador Eletrônico Programável

O REP, registrador eletrônico programável, também é conhecido por RDMT, Registrador Digital de Média Tensão, é o equipamento de registro de dados integrados no tempo, com capacidade de discriminação de dados conforme hora do dia, época do ano e outras características necessárias para utilização em tarifação horo-sazonal (THS). Dotado de 2 ou 3 canais com ou sem memória de massa, recebe de medidores emissores de pulsos ou medidores com sensor as informações de kWh e kVArh a serem registradas. É também dotado de saída serial (REP) ou paralela (RDMT) que permite a cessão de informações aos



consumidores.

3.4- Medidor Watt-hora Tipo Indução (MWHI)

Os medidores utilizados em corrente alternada monofásica e polifásica são instrumentos que baseiam o seu funcionamento no princípio da indução eletromagnética e, nesse particular, assemelham-se aos motores elétricos de indução [13].

Os primeiros medidores de indução eram razoavelmente precisos para carga com fator de potência unitário, mas eram considerados ruins para cargas com baixos fatores de potência, pois não havia exata quadratura entre as ondas de corrente e tensão.

3.4.1- Partes Componentes do Medidor de Energia Tipo Indução

O medidor do tipo indução é empregado em corrente alternada para medir a energia elétrica absorvida por uma carga.

O medidor de quilowatt-hora é basicamente constituído de um motor cujo torque é proporcional à potência que flui através dele, um freio magnético para retardar a velocidade do motor de tal modo que seja proporcional à potência (tornando o efeito do freio proporcional a velocidade do rotor) e um registrador para contar o número de revoluções que o motor faz. Se a velocidade do motor é proporcional à potência, o número de revoluções também será proporcional à energia [14].

A referência [15] apresenta um detalhamento pormenorizado de um medidor de energia elétrica. Cada uma das partes componentes, as quais foram agrupadas em dois grupos (principais e demais), tem as seguintes características/funções:



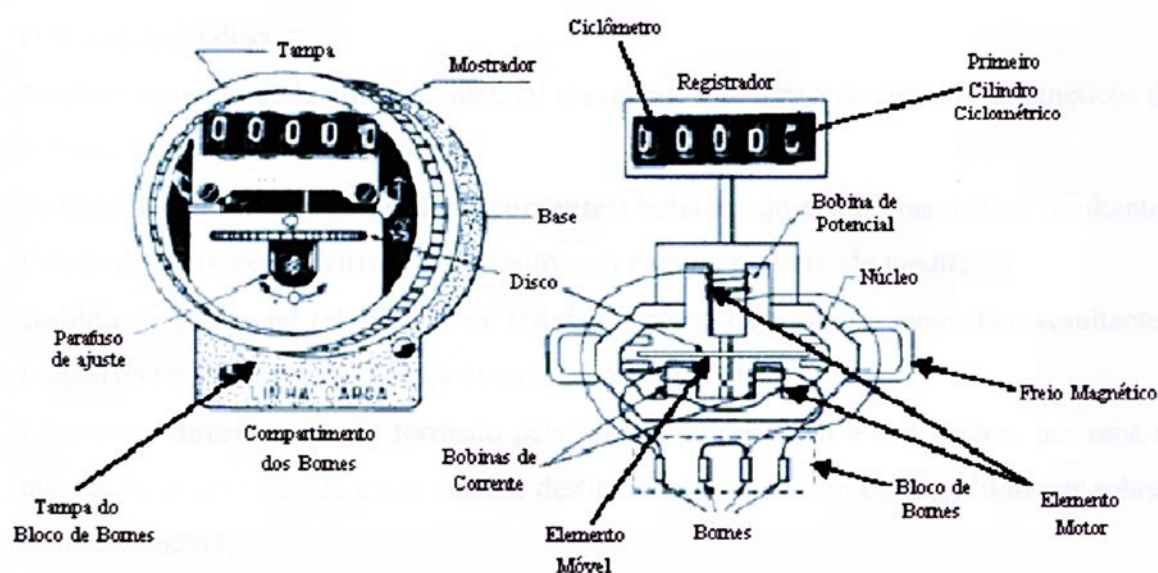


Figura 3. 1 – Principais partes constituintes de um medidor de energia.

Fonte: adaptada da referência [11]

a) Principais partes componentes :

- **Base:** parte do medidor destinada à sua instalação e sobre a qual são fixados a estrutura, a tampa do medidor, o bloco de terminais e a tampa do bloco de terminais. Os medidores monofásicos produzidos podem ter base plástica ou injetada sob pressão em alumínio-silício. É pela base que o medidor é fixado no local a ser instalado;
- **Terminais (bornes):** dispositivos destinados a ligar o medidor ao circuito a ser medido;
- **Bloco de terminais (bornes):** suporte de material isolante, no qual são agrupados os terminais do medidor;
- **Compartimento do bloco de terminais (bornes):** parte onde fica localizado o bloco de terminais;
- **Tampa do bloco de terminais (bornes):** peça destinada a cobrir e proteger o bloco de terminais, o(s) furo(s) inferior(es) de fixação do medidor e o compartimento do bloco de terminais;
- **Mostrador:** placa que contém abertura para leitura dos algarismos do ciclômetro;
- **Ciclômetro:** tipo de registrador dotado de cilindros com algarismos;
- **Primeiro cilindro ciclométrico:** cilindro do ciclômetro que indica a menor quantidade de energia expressa em números inteiros de quilowatts-hora;
- **Registrador:** conjunto formado pelo mostrador, sistema de engrenagem e cilindros ciclométricos. Indica, no caso de medidores de energia ativa, o consumo de quilowatts-

hora (kWh) absorvidos pelo consumidor, o qual é proporcional ao número de rotações efetuadas pelo disco;

- **Núcleo:** conjunto de lâminas de material magnético que forma os circuitos magnéticos das bobinas de potencial e de corrente;
- **Bobina de corrente (eletroímã de corrente):** bobina cujo campo magnético resultante é função da corrente que circula no circuito cuja energia se pretende medir;
- **Bobina de potencial (eletroímã de tensão):** bobina cujo campo magnético resultante é função da tensão do circuito, cuja energia se pretende medir;
- **Elemento motor:** conjunto formado pela bobina de potencial e seu núcleo, por uma ou mais bobinas de corrente e seu núcleo, destinado a produzir um conjugado motor sobre o elemento móvel;
- **Dispositivos de calibração (parafuso de ajuste):** dispositivos por meio dos quais se calibra o medidor para que indique, dentro dos erros admissíveis, a energia a ser medida;
- **Elemento frenador (freio magnético):** conjunto compreendendo um ou mais ímãs, destinado a produzir um conjunto frenador sobre o elemento móvel;
- **Tampa do medidor:** peça sobreposta à base para cobrir e proteger a estrutura e todas as peças nela montadas. As tampas mais comuns são de vidro e policarbonato;
- **Elemento móvel:** conjunto formado pelo disco, eixo e partes solidárias que gira com velocidade proporcional à potência do circuito, cuja energia se pretende medir. É constituído de uma chapa de alumínio de alta condutibilidade e leveza. O número de rotações dado pelo disco é proporcional ao consumo. À medida que a carga aumenta ou diminui, ocorre o mesmo com a velocidade do disco, porém o consumo registrado mantém os erros de calibração.

b) Demais partes componentes:

- **Catraca:** dispositivo que impede o movimento do elemento móvel em sentido contrário ao normal. Para medidores de energia ativa (kWh), não é necessário utilizá-la; já nos casos de medidores de energia reativa (kVarh), o seu uso é indispensável;
- **Dispositivos de compensação:** dispositivos destinados à compensação automática dos erros introduzidos por variações de temperatura, sobrecarga, ou outras causas;



3.5- Princípio de Funcionamento do MWHI

O funcionamento do medidor watt-hora tipo indução se baseia no princípio de Ferraris, que consiste basicamente em um conjugado produzido no disco do medidor, originário da interação eletromagnética dos fluxos produzidos pelas bobinas de tensão e corrente, com as correntes de Foucault induzidas na superfície do disco [16].

Assim, com respeito a produção do conjugado no disco, Ferraris anunciou, em 1884, o seguinte princípio:

“Para produzir conjugado em uma armadura livre para girar, a mesma deve ser acionada por dois fluxos de corrente alternada, os quais:

- a) Não se encontram em fase no tempo um com o outro;
- b) São aplicados na armadura em dois diferentes locais ao longo do movimento proposto” [9].

Este princípio é ilustrado na figura 3.2. Os dois campos magnéticos mostrados diferem em fase e penetram no disco em duas posições diferentes e a força que surge, agindo no disco, é produzida pela corrente de Foucault de um campo atravessando o campo oposto. Este é o princípio de operação em que se baseiam motores de indução e medidores tipo indução.

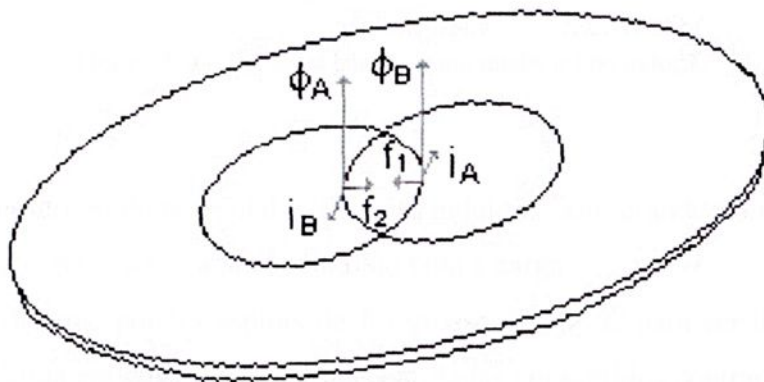


Figura 3. 2 – Campos magnéticos aplicados em diferentes locais em um disco.

Para a produção do conjugado no disco, empregando-se este princípio, são necessários fluxos nas bobinas de corrente e tensão, um circuito de alta reatância e três pólos para obedecer as duas condições do princípio de Ferraris. As três fontes de força magneto-motrizes produzem dois campos magnéticos alternados ϕ_A e ϕ_B , no entreferro entre os três pólos. Assim, o disco colocado no entreferro estará sob influência destes dois campos magnéticos variáveis no tempo.

3.5.1- Circuitos Elétrico e Magnético do Medidor Watt-hora Tipo indução

Na figura 3.3, os circuitos elétrico e magnético do medidor watt-hora tipo indução monofásico e os principais componentes de um medidor tipo indução de energia ativa são apresentados[17].

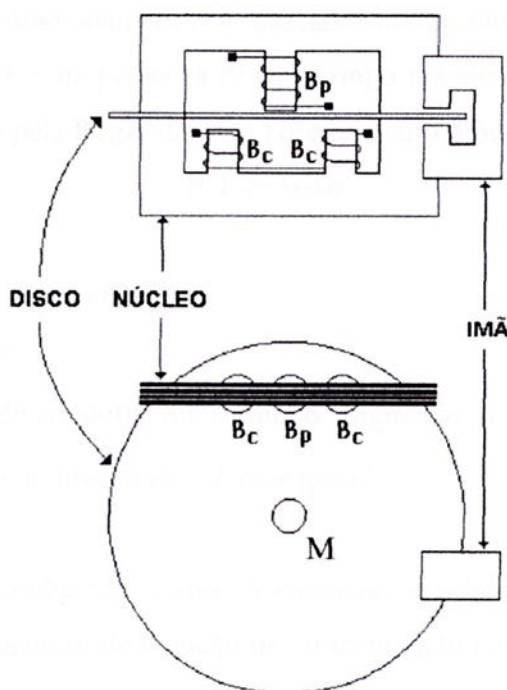


Figura 3. 3 – Estrutura básica de um medidor tipo indução.

Onde:

- **Bp:** Bobina de tensão ou de potencial, altamente indutiva, com grande número de espiras de fio fino de cobre, para ser ligada em paralelo com a carga.
- **Bc:** Bobina de corrente, poucas espiras de fio grosso de cobre, para ser ligada em série com carga. É dividida em duas meias bobinas enroladas em sentidos contrários.
- **NÚCLEO:** Lâminas de material ferromagnético, justapostas, mas isoladas umas das outras para reduzir as perdas por corrente de Foucault.
- **DISCO:** Conjunto móvel ou rotor. É constituído de disco de alumínio de alta condutibilidade, com grau de liberdade de girar em torno do seu eixo de suspensão “M” ao qual está preso um parafuso-sem-fim que aciona um sistema mecânico de engrenagens que registra, em um mostrador, a energia elétrica consumida.
- **IMÃ:** É um ímã permanente para produzir conjugado de amortecimento no disco.

O princípio de funcionamento do medidor de energia esta baseado no fato de que os campos gerados pelas bobinas de corrente e de potencial induzem correntes em um disco, provocando a sua rotação. Solidário com o eixo do disco, existe um eixo em conexão com uma rosca sem-fim, que provoca a rotação dos registradores, os quais fornecem a leitura. Cada fabricante tem características próprias, sendo o número de rotações do disco para indicar 1 Wh variável [11].

Seu princípio de funcionamento é baseado na premissa de que um “condutor percorrido por uma corrente i , na presença de um campo magnético B , fica submetido a uma força F cujo sentido é dado pela Regra da Mão Direita e cujo módulo é dado por:

$$F = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \alpha \quad (3.1)$$

sendo:

B – indução magnética produzida

i – corrente induzida

L - o comprimento do condutor sob o campo magnético $\vec{B}$

α - ângulo entre $\vec{B}$ e a direção de iL no espaço”

Este fenômeno é conhecido como “*Fenômeno da Interação Eletromagnética*” e graças à esse fenômeno o medidor de indução tem o conjugado motor originado no disco.

Analisemos o seu funcionamento passo a passo:

- O fluxo alternado da bobina de potencial φ_v ao atravessar o disco de alumínio, induz nele correntes de Foucault i_v (figura 3.4a). A interação dessas correntes com o fluxo φ_i da bobina de corrente origina uma força e, conseqüentemente, há um conjugado em relação à M , fazendo girar o disco.
- Simultaneamente, o fluxo alternado φ_i da bobina de corrente induz correntes de Foucault i_i no disco (figura 3.4b). A interação entre essas correntes e o fluxo φ_v dá origem a uma força e, conseqüentemente, há um conjugado em relação a M , fazendo girar o disco. Dentro deste princípio estão as ações mecânicas gerados pelos fluxos e suas correspondentes correntes (φ_v e i_v , φ_i e i_i) resultando em conjugados resistentes, agindo em sentidos opostos aos conjugados motores.

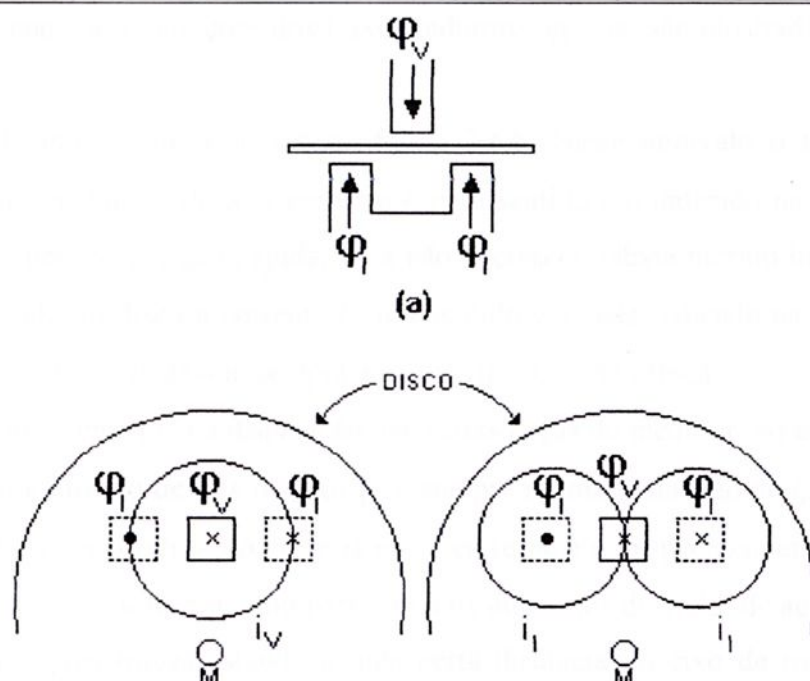


Figura 3. 4 – Correntes de Foucault induzidas no disco pelos fluxos alternados.
 (a) fluxos produzidos pelas bobinas de corrente e potencial.
 (b) correntes induzidas no disco rotativo.

Ambos os conjugados, originados respectivamente pelas duas interações acima referidas, têm sempre o mesmo sentido, provocando assim o movimento de rotação no disco.

Para um esclarecimento mais detalhado sobre o sentido das forças e conjugados, considere-se uma carga Z , de fator de potência unitário, conforme a figura 3.5.

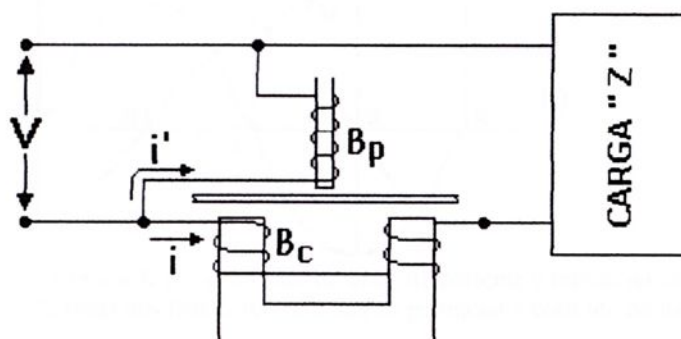


Figura 3. 5 – Carga Z de fator de potência unitário.

A figura 3.6.a mostra as curvas de tensão e corrente na carga Z em fase visto que o fator de potência é unitário. A figura 3.6.b mostra a curva do fluxo ϕ_i , que está em fase com a corrente i na bobina de corrente que o originou; e o fluxo ϕ_{Vi} , que está em fase com a corrente que percorre a bobina de potencial que o origina. Como a bobina de potencial é altamente indutiva, a corrente que circula por ela está defasada aproximadamente de 90° em relação à tensão V .

Então, de acordo com a *Lei de Lenz*, os sentidos das correntes i_i e i_v induzidas no disco

como consequência das variações dos fluxos indutores φ_i e φ_v são mostradas nas figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10.

Considerando o intervalo a-b na figura 3.6.b. Neste intervalo o fluxo φ_v decresce fisicamente, originando no disco a corrente i_v cujo sentido é o indicado na figura 3.7, pois o seu campo magnético vai assim, ajudar φ_v a não decrescer. Nesse mesmo intervalo o fluxo φ_i cresce, originando no disco a corrente i_i cujo sentido é aquele indicado na figura 3.7, pois o seu campo magnético vai assim, se opor a φ_i para que ele não cresça.

Levando-se em conta a disposição das várias peças do medidor, no espaço o fluxo φ_i é sempre normal à direção de i_v , e o fluxo φ_v é sempre normal à direção de i_i . Assim, as forças F_1 e F_2 originadas pela interação entre φ_i e i_v e entre φ_v e i_i , respectivamente, estão no plano do disco e sempre no mesmo sentido para todos os intervalos do ciclo, de acordo com a regra-da-mão-direita. Estas forças estando a uma certa distância do eixo de rotação, criarão em relação a ele um conjugado motor fazendo o disco girar. No presente caso, o disco girará no sentido anti-horário.

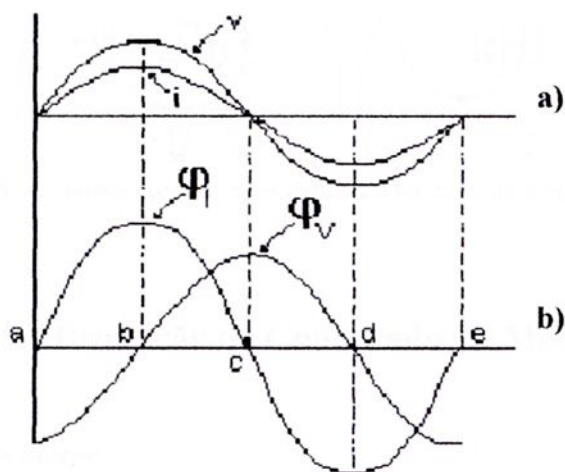


Figura 3. 6 – a) Formas de onda de corrente e tensão na carga Z.
b) Formas de onda dos fluxos nas bobinas de potencial e corrente do medidor de indução.

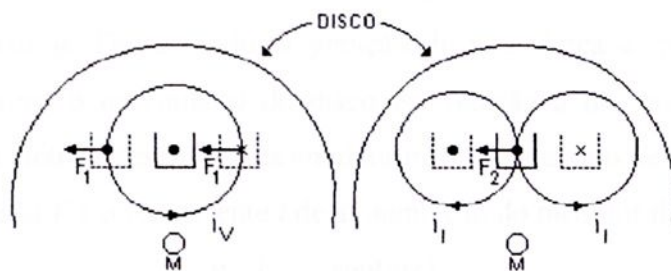


Figura 3. 7 – Sentidos das correntes induzidas no disco do medidor de indução no trecho a – b.

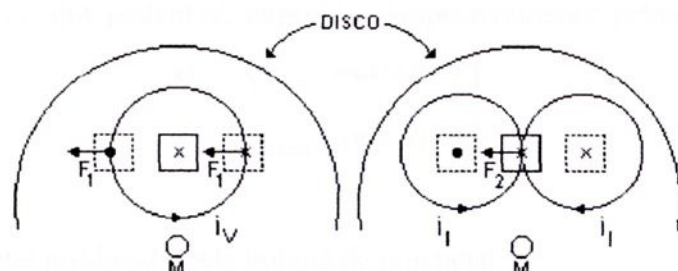


Figura 3. 8 – Sentidos das correntes induzidas no disco do medidor de indução no trecho b – c.

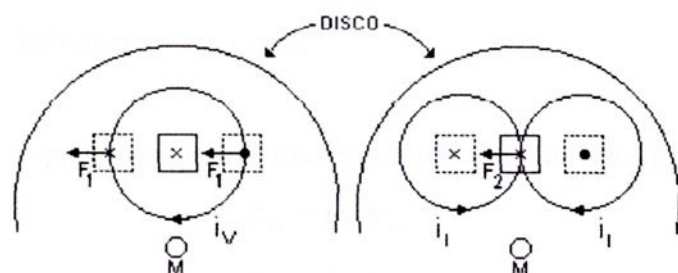


Figura 3. 9 – Sentidos das correntes induzidas no disco do medidor de indução no trecho c – d.

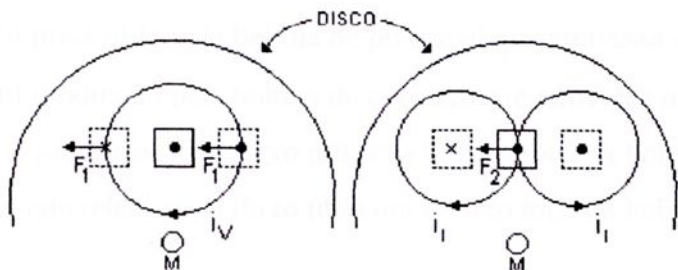


Figura 3. 10 – Sentidos das correntes induzidas no disco do medidor de indução no trecho d – e.

3.5.2- Equações de Produção de Conjugado do Medidor

3.5.2.1 Conjugado motor

Pelo exposto anteriormente, o conjugado motor do medidor, que produz o movimento do disco, e conseqüentemente a medição da energia, é obtido pela interação entre uma corrente i e um fluxo ϕ . Deste modo, a geração de uma força e, por conseqüência, um conjugado que provoca o movimento do disco em relação a um eixo central, possibilita quantificar a energia elétrica desenvolvida em determinado intervalo de tempo[18].

Seja uma tensão V e uma corrente i de alimentação do medidor dadas por:

$$v = V_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

$$i = I_{\max} \cdot \sin(\omega t - \theta) \quad (3.3)$$

na equação (3.3), θ é o ângulo de fase entre a tensão e a corrente.

As correntes nas bobinas de potencial e de corrente originam, por sua vez, os fluxos de

potencial e de corrente, que podem ser expressos, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$\varphi_{vt} = \varphi_{v\max} \cdot \text{sen}(\omega t - \gamma) \quad (3.4)$$

$$\varphi_{ct} = \varphi_{c\max} \cdot \text{sen}(\omega t - \theta) \quad (3.5)$$

onde:

φ_{vt} – fluxo total produzido pela bobina de potencial;

φ_{ct} – fluxo total produzido pela bobina de corrente;

γ - angulo de defasagem entre v e φ_{vt} .

Os fluxos úteis que efetivamente atravessam o disco são dados por:

$$\varphi_{vu} = K_v \cdot \varphi_{vt} \quad (3.6)$$

$$\varphi_{cu} = K_c \cdot \varphi_{ct} \quad (3.7)$$

onde:

φ_{vu} – fluxo útil produzido pela bobina de potencial que atravessa o disco;

φ_{cu} – fluxo útil produzido pela bobina de corrente que atravessa o disco;

K_v – constante que relaciona o fluxo útil com o fluxo total da bobina de potencial;

K_c – constante que relaciona o fluxo útil com o fluxo total da bobina de corrente.

Estes fluxos úteis resultam em tensões induzidas no disco devido aos campos magnéticos alternados e variáveis no tempo das bobinas de corrente e potencial. Estas tensões obtidas pela Lei de Lenz são expressas pelas equações:

$$e_{dv} = -N_v \cdot \frac{d\varphi_{vu}}{dt} = -K_v \cdot N_v \cdot \omega \cdot \varphi_{v\max} \cdot \cos(\omega t - \gamma) \quad (3.8)$$

$$e_{dc} = -N_c \cdot \frac{d\varphi_{cu}}{dt} = -K_c \cdot N_c \cdot \omega \cdot \varphi_{c\max} \cdot \cos(\omega t - \theta) \quad (3.9)$$

onde:

e_{dv} – tensão induzida no disco pela bobina de potencial;

e_{dc} – tensão induzida no disco pela bobina de corrente;

N_v – número de espiras do disco onde incide o fluxo da bobina de potencial;

N_c – número de espiras do disco onde incide o fluxo da bobina de corrente.

Para o caso em questão, o disco é uma peça única, assim, N_v e N_c são iguais a unidade.

Ao se considerar o disco um elemento puramente resistivo, estas tensões, por sua vez, dão origem às correntes de Foucault induzidas no disco, dadas por:

$$i_{dv} = \frac{e_{dv}}{R_{dv}} = -\frac{\omega}{R_{dv}} \cdot K_v \cdot \varphi_{v\max} \cdot \cos(\omega t - \gamma) \quad (3.10)$$

$$i_{dc} = \frac{e_{dc}}{R_{dc}} = -\frac{\omega}{R_{dc}} \cdot K_c \cdot \varphi_{c\max} \cdot \cos(\omega t - \theta) \quad (3.11)$$

sendo:

i_{dv} – corrente de Foucault induzida no disco pelo fluxo útil φ_{vu} ;

i_{dc} – corrente de Foucault induzida no disco pelo fluxo útil φ_{cu} ;

R_{dv} – resistência elétrica oferecida pelo disco à circulação da corrente i_{dv} , considerando o disco puramente resistivo;

R_{dc} – resistência elétrica oferecida pelo disco à circulação da corrente i_{dc} , considerando o disco puramente resistivo.

Conforme foi visto na equação (3.1), $F = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \alpha$, e no caso do medidor, a força $\vec{F}$ estando à distância d do eixo de rotação M , haverá sobre o disco um conjugado motor na forma:

$$C = F \cdot d \quad (3.12)$$

Sendo ainda, $\vec{B}$ normal à direção da corrente, L constante, a indução magnética é:

$$B = \frac{\varphi}{A} \quad (3.13)$$

onde:

φ - Fluxo incidente;

A – área de seção de incidência do fluxo.

Substituindo (3.13) em (3.12), obtém-se:

$$C = K \cdot \varphi \cdot i \quad (3.14)$$

sendo K dado por:

$$K = \frac{Ld}{A} \quad (3.15)$$

Como φ e i são funções periódicas no tempo, segue que o valor a ser considerado, será o valor médio do conjugado motor. Assim, para o medidor, dois conjugados atuando simultaneamente deverão ser considerados:

1) Interação entre o fluxo φ_{vu} e a corrente i_{dc} ;

Este conjugado é obtido de acordo com a equação (3.14), de onde:

$$C_1 = K_1 \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \varphi_{vu} \cdot i_{dc} \cdot dt \quad (3.16)$$

Substituindo (3.6) e (3.11) em (3.16), tem-se:

$$C_1 = K_1 \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T -K_v \cdot K_c \cdot \frac{\omega}{R_{dc}} \cdot \varphi_{v\max} \cdot \sin(\omega t - \gamma) \cdot \varphi_{c\max} \cdot \cos(\omega t - \theta) dt \quad (3.17)$$

Integrando-se a equação acima pelo período T considerado, obtém-se:

$$C_1 = K'_1 \cdot \omega \cdot \varphi_{v\max} \cdot \varphi_{c\max} \cdot \sin(\gamma - \theta) \quad (3.18)$$

onde:

K_1 – constante que depende da posição e das características do pólo da bobina de potencial, conforme equação genérica (3.15);

$$K'_1 = \frac{K_1 \cdot K_v \cdot K_c}{2 \cdot R_{dc}}$$

2) Interação entre o fluxo φ_{cu} e a corrente i_{dv} .

Analogamente ao conjugado anterior, pode-se escrever:

$$C_2 = K_2 \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \varphi_{cu} \cdot i_{dv} \cdot dt \quad (3.19)$$

Substituindo (3.7) e (3.10) em (3.19), tem-se:

$$C_2 = K_2 \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T -K_v \cdot K_c \cdot \frac{\omega}{R_{dv}} \cdot \varphi_{c\max} \cdot \cos(\omega t - \gamma) \cdot \varphi_{c\max} \cdot \sin(\omega t - \theta) dt \quad (3.20)$$

Integrando-se a equação acima pelo período T considerado, obtém-se:

$$C_2 = -K'_2 \cdot \omega \cdot \varphi_{c\max} \cdot \varphi_{v\max} \cdot \sin(\gamma - \theta) \quad (3.21)$$

onde:

K_2 – constante que depende da posição e das características do pólo da bobina de corrente, conforme equação genérica (3.15);

$$K'_2 = \frac{K_2 \cdot K_v \cdot K_c}{2 \cdot R_{dv}}$$

O conjugado motor médio resultante C_m será constituído pela soma dos dois conjugados obtidos nas equações (3.18) e (3.21). Embora C_1 e C_2 tenham sinais contrários, o valor de C_m será calculado considerando C_1 e C_2 com sinais positivos, uma vez que, no

espaço, estes conjugados atuam sempre no mesmo sentido, observado nas figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10. Assim, a expressão do conjugado será:

$$C_m = K' \cdot \omega \cdot \varphi_{v \max} \cdot \varphi_{e \max} \cdot \sin(\gamma - \theta) \quad (3.22)$$

como:

$$\varphi_{e \max} = K_3 \cdot \sqrt{2} \cdot I \quad (3.23)$$

$$\varphi_{v \max} = K_4 \cdot \sqrt{2} \cdot V \quad (3.24)$$

onde:

I – corrente eficaz solicitada pela carga;

V – tensão eficaz aplicada;

K_3 – constante que relaciona o fluxo máximo produzido pela bobina de corrente com a corrente que o produz;

K_4 – constante que relaciona o fluxo máximo produzido pela bobina de potencial com a tensão que o produz;

$$K' = K_1' - K_2'$$

Nota-se que C_m depende da frequência e é proporcional ao produto desta pelos respectivos valores eficazes dos dois fluxos e pelo seno do ângulo de defasagem entre eles. Então, para uma frequência fixa e $\gamma = 90^\circ$, a expressão final do conjugado motor médio é:

$$C_m = K'' V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (3.25)$$

onde:

$$K'' = 2 \cdot \omega \cdot K' \cdot K_3 \cdot K_4$$

o que significa que o conjugado motor é proporcional a potência ativa da carga.

3.5.2.2 Conjugado resistente

Com o propósito de estabelecer uma condição de equilíbrio do medidor, há a necessidade de um conjugado resistente, uma vez que foi obtida a expressão para o conjugado motor médio. Este conjugado é necessário devido ao fato de que somente a aplicação de um conjugado de condução médio no disco, levaria o mesmo a uma velocidade proporcional à frequência da rede (velocidade constante), e não a uma velocidade proporcional à energia que deveria ser medida. Deste modo, estabelece-se um conjugado de amortecimento, por meio de artifícios externos ao sistema, através de um ímã permanente, como aquele da figura 3.3. Este conjugado, tem ainda o propósito de evitar os deslocamentos bruscos da parte móvel, ao partir

da posição de repouso, como também voltar a ela, uma vez cessado o efeito do conjugado de condução, assim como reduzir a velocidade, tornando-a proporcional à energia a ser medida [18].

Portanto, sem o freio, a velocidade de rotação será limitada pela frequência de suprimento, pelo atrito e por determinados conjugados contrários que são mais pronunciados em altas velocidades, sendo estes representados neste trabalho por C_{pb} e C_{bc} .

O conjugado de amortecimento C_r é obtido pelas interações entre os fluxos produzidos e as respectivas correntes que estes discos induzem no disco, com o mesmo girando a uma velocidade angular ω . Assim, o conjugado resistente (C_r) é dado pela soma dos três conjugados que causam resistência ao movimento do disco, ou seja:

$$C_r = C_{ip} + C_{bp} + C_{bc} \quad (3.26)$$

onde:

C_{ip} – Conjugado resistente produzido pelo ímã permanente para o disco girando a uma velocidade ω ;

C_{bp} – Conjugado resistente produzido pela bobina de potencial para o disco girando a uma velocidade ω ;

C_{bc} – Conjugado resistente produzido pela bobina de corrente para o disco girando a uma velocidade ω .

Os conjugados resistentes C_{ip} , C_{bp} e C_{bc} são definidos pelas expressões:

$$\begin{aligned} C_{ip} &= K_r \cdot \varphi_{ip}^2 \cdot \omega \\ C_{bp} &= K_{bp} \cdot \varphi_{vu}^2 \cdot \omega \\ C_{bc} &= K_{bc} \cdot \varphi_{cu}^2 \cdot \omega \end{aligned} \quad (3.27)$$

onde:

K_r – constante geométrica do pólo do ímã permanente;

K_{bp} – constante geométrica do pólo da bobina de potencial;

K_{bc} – constante geométrica do pólo da bobina de potencial.

Na prática C_{bp} e C_{bc} são pouco significativos (da ordem de 4% e 1% do amortecimento total, respectivamente). Com isso, à frequência de 60 Hz, o conjugado resistente (C_r), é devido, em grande parte, ao ímã permanente. Este ímã atua no sentido de produzir um fluxo constante φ_p que intercepta o disco girando a uma determinada velocidade, resultando em correntes adicionais induzidas no disco, que interagindo com o fluxo que as criou, produz o

conjugado de amortecimento.

A seguir, procedeu-se aos desenvolvimentos analíticos do citado torque. Seja o disco de alumínio da figura 3.11a, composto por uma infinidade de condutores radiais justapostos.

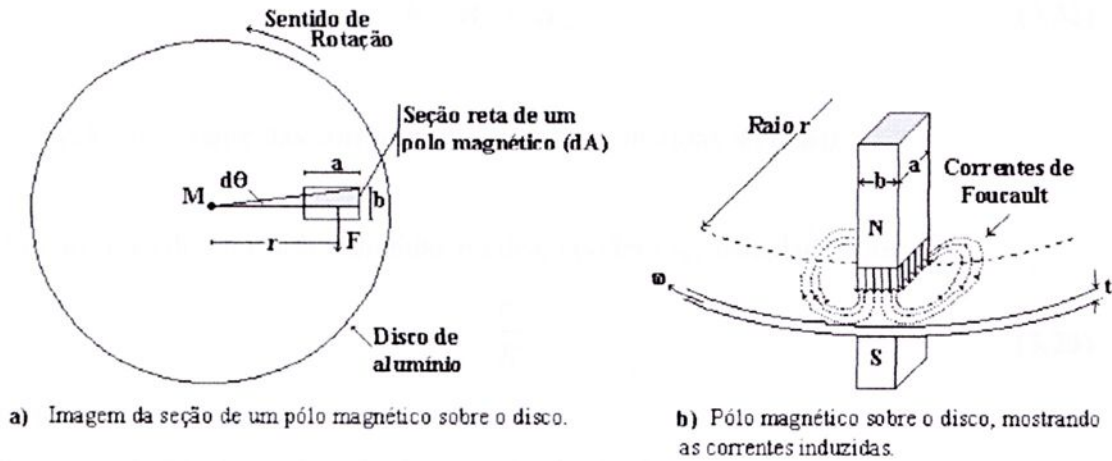


Figura 3.11 – Vista superior e tridimensional do pólo magnético sobre o disco.

Se o deslocamento do disco for de um ângulo $d\theta$, haverá uma variação de fluxo $d\phi$ em relação à área coberta pela seção do pólo do ímã permanente, e deste modo, a tensão induzida no disco pelo ímã permanente será dada pela expressão (3.28).

$$e_{ip} = - \frac{d\phi_{ip}}{dt} \quad (3.28)$$

substituindo (3.13) em (3.28), obtêm-se:

$$e_{ip} = -B_{ip} \cdot \frac{dA_{ip}}{dt} \quad (3.29)$$

onde:

ϕ_p – fluxo do ímã permanente;

B_{ip} – indução magnética no entreferro do ímã permanente (constante);

A_{ip} – seção reta do pólo do ímã permanente.

Da figura 3.11a, tem-se que:

$$dA_{ip} = r_{ip} \cdot d\theta \cdot a_{ip} \quad (3.30)$$

onde:

r_{ip} – distância r da figura 3.11b para o ímã permanente;

a_{ip} – largura a da figura 3.11b para o ímã permanente.

Substituindo (3.30) em (3.29), resulta:

$$e_{ip} = -B_{ip} \cdot r_{ip} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot a_{ip} \quad (3.31)$$

A força que aparece no disco será expressa por:

$$F = B_{ip} \cdot i_{ip} \cdot a_{ip} \quad (3.32)$$

onde:

i_{ip} – valor resultante das correntes de Foucault induzidas no disco.

As correntes de Foucault induzidas no disco podem ser calculadas por:

$$i_{ip} = \frac{e_{ip}}{R_d} \quad (3.33)$$

onde:

R_d – resistência oferecida pelo disco à circulação da corrente i_{ip} .

Substituindo a equação (3.33) em (3.32), obtêm-se:

$$F = B_{ip} \cdot a_{ip} \cdot \frac{e_{ip}}{R_d} = \frac{\varphi_{ip}^2 \cdot b_{ip}^2 \cdot r_{ip}}{R_d \cdot A_{ip}^2} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.34)$$

O conjugado de F em relação a M será:

$$C_r = F \cdot r_{ip} \quad (3.35)$$

Como $d\theta/dt$ é a velocidade angular do disco, que é representada por ω , pode-se obter a expressão final do conjugado resistente, substituindo (3.34) em (3.35). Disto resulta:

$$C_r = \frac{\varphi_{ip}^2 \cdot a_{ip}^2 \cdot r_{ip}^2}{R_d \cdot A_{ip}^2} \cdot \omega \quad (3.36)$$

Através desta equação, verifica-se que o conjugado resistente é diretamente proporcional à velocidade angular do disco.

3.5.3- Velocidade de rotação do disco

No equilíbrio do regime permanente, a velocidade é obtida igualando-se a equação do conjugado motor médio (3.25) com a equação do conjugado resistente (3.36) [16], obtendo-se:

$$K'' V.I. \cos(\theta) = \frac{\varphi_{ip}^2 \cdot a_{ip}^2 \cdot r_{ip}^2}{R_d \cdot A_{ip}^2} \cdot \omega \quad (3.37)$$

Substituindo-se a velocidade angular ω pela variável S , pode-se obter a expressão:

$$S = \frac{K'' V.I. \cos(\theta) \cdot R_d \cdot A_{ip}^2}{\varphi_{ip}^2 \cdot a_{ip}^2 \cdot r_{ip}^2} \quad (3.38)$$

Ou

$$S = K''' V.I. \cos(\theta)$$

$$K''' = \frac{K'' R_d \cdot A_{ip}^2}{\varphi_{ip}^2 \cdot a_{ip}^2 \cdot r_{ip}^2} \quad (3.39)$$

onde:

S – velocidade de rotação do disco do medidor (rd/s).

Analisando a expressão (3.39), verifica-se que a velocidade de rotação do disco do medidor (S) é proporcional a potência ativa da carga, independente do seu fator de potência.

Esta velocidade pode ser ajustada de tal modo que o número de rotações, durante um dado intervalo de tempo, seja proporcional à energia solicitada pela carga durante este intervalo de tempo. Assim, o disco dará um certo número constante de voltas por Wh. O movimento do disco é transmitido, por meio de um sistema mecânico de engrenagem, ao mostrador do instrumento que indicará em Wh a quantidade de energia elétrica absorvida pela carga. Este ajuste pode ser realizado modificando o valor do conjugado resistente. Baseado na expressão (3.36), verifica-se que este pode ser modificado, na prática, por um dos três modos seguintes:

1. Atuando em φ_{ip} , isto é, modificando o número de linhas de fluxo que atravessam o disco por meio de um derivador magnético ajustável manualmente;
2. Atuando em r , isto é, modificando a posição do ímã permanente em relação ao eixo de rotação do disco;
3. Atuando em a e/ou b , isto é, modificando a dimensão do pólo do ímã permanente, que influi no amortecimento.

3.6- Aferição e Calibração

3.6.1- Aferição

De acordo com a referência [15], aferir significa “determinar os erros do medidor”.

Os medidores podem ser aferidos sob quaisquer condições de tensão, corrente, frequência e fator de potência. A fim de padronizar os procedimentos e de obter elementos de referência para análise de resultados de desempenho desses medidores, os órgãos oficiais de metrologia e as normas técnicas estabeleceram que cada medidor deve ser submetido a três aferições, sendo cada aferição realizada sob condições bem definidas por essas entidades.

Os erros de cada medidor são verificados submetendo-o aos três ensaios seguintes:

a) carga nominal: carga que corresponde a uma corrente no medidor igual à corrente nominal (intensidade de corrente para a qual o medidor é projetado e que serve de referência para a realização dos ensaios), com tensão nominal (tensão para a qual o medidor é projetado e que serve de referência para a realização dos ensaios) e frequência nominal (frequência para a qual o medidor é projetado e que serve de referência para a realização dos ensaios) e fator de potência unitário;

b) carga leve: carga que corresponde a uma corrente no medidor igual a 1/10 da corrente nominal, com tensão e frequência nominais e com fator de potência unitário;

c) carga indutiva: carga que corresponde a uma corrente no medidor igual à corrente nominal, com tensão e frequência nominais e com fator de potência igual a 0,5 indutivo [19].

Dois métodos que diferem no princípio estão disponíveis para determinar o correto registro de um medidor de quilowatt-hora. Se a potência é constante e conhecida durante todo o intervalo, seus valores podem ser multiplicados pelo tempo transcorrido para obter a energia, e os valores de energia assim determinados podem ser comparados com o registro do medidor. Alternativamente, o medidor pode ser comparado diretamente com um medidor que é conhecido por medir corretamente. Os medidores são operados com cargas exatamente idênticas durante o intervalo de teste e em iguais períodos de tempo.

A aferição pode ser executada por um dos seguintes métodos: Método do Wattímetro ou Método do Medidor Padrão (Método do Padrão Rotativo). O Método do Wattímetro consiste em fazer passar pelo medidor uma energia durante um tempo suficientemente grande, com potência constante, medida pelo Wattímetro de modo a se obter um determinado número

de rotações do disco do medidor. Durante o ensaio, a tensão e a corrente deverão ser mantidas dentro de $\pm 2\%$. A medida do tempo deverá ser feita com cronômetro comandado manual ou automaticamente, permitindo leituras de 1/10 de segundo.

A potência deverá ser mantida dentro de $\pm 0,2\%$ em torno do valor medido, que será adotado pelo cálculo. O erro relativo percentual do medidor será dado por:

$$e_{\%} = \frac{3600 \cdot k_d \cdot N - W \cdot t}{W \cdot t} \cdot 100 \quad (3.40)$$

onde:

$e_{\%}$: erro relativo percentual do medidor;

K_d : constante do disco em watt-hora por rotação;

N : número inteiro de rotações do disco do medidor;

W : potência indicada pelo Wattímetro, em watts;

t : tempo decorrido em segundos.

O Método do Medidor Padrão (Método do Padrão Rotativo) consiste em passar, simultaneamente, pelo medidor e pelo padrão rotativo, uma dada energia com potência constante, de modo a obter-se um número inteiro de rotações do disco do medidor. O erro relativo percentual do medidor será dado por:

$$e_{\%} = \frac{N_m \cdot k_d - N_p \cdot K_p}{N_p \cdot K_p} \cdot 100 \quad (3.41)$$

onde:

$e_{\%}$: erro relativo percentual do medidor;

N_m : número inteiro de rotações do disco do medidor;

K_d : constante do disco em watt-hora por rotação;

N_p : número de rotações corretas do disco do padrão rotativo;

K_p : constante do padrão rotativo em watt-hora por rotação.

Deve-se escolher um valor de N_m suficientemente grande, de modo a permitir uma leitura no padrão com erro desprezível.

3.6.2- Calibração

As seguintes considerações sobre a calibração devem se consideradas [19]:



a) deve-se começar a calibração pela carga nominal, pois o ajuste do freio magnético afeta o medidor como um todo em todas as cargas;

b) em função do projeto do medidor e do processo adotado na sua fabricação, os ajustes de carga leve e carga indutiva, não devem ter influência um sobre o outro, nem sobre a carga nominal. Verifica-se que nos medidores modernos, estas influências são desprezíveis;

c) é aconselhável fazer uma pré-calibração e depois uma aferição para verificar como ficou o medidor em cada uma das cargas, nominal, indutiva e leve, reajustando os respectivos dispositivos de calibração, se houver necessidade.

A referência [20] estabelece as condições para a calibração dos medidores de energia ativa monofásicos. São elas:

a) “os medidores deverão ser calibrados na posição correta de serviço (ou seja, posição vertical) após terem ficado pelo menos 15 min sob frequência nominal e tensão de ajuste. A temperatura ambiente deve ser de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ”;

b) “se os medidores estiverem armazenados a uma temperatura fora dos limites prescritos anteriormente, eles devem ficar durante 1 hora antes da calibração em um ambiente com a temperatura controlada dentro dos limites”;

c) “a calibração deve ser feita pelo método do medidor padrão ou por outro método de pelo menos igual exatidão, na carga nominal, carga indutiva e carga leve sob tensão de ajuste”.

Com respeito à temperatura ambiente, a referência [21] estabelece que os medidores classe 2 (medidores cujos erros não devem exceder a 2%, para todos os valores de corrente entre 10% da corrente nominal e a corrente máxima, com fator de potência unitário, sendo os mesmos abordados pela NBR 5313 – Aceitação de lotes de medidores de energia ativa), deverão ser calibrados com temperatura ambiente de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Isto deve ser observado, quando tratam-se de lotes fabricados para exportação para países que trabalham com a referida norma.

De acordo com a referência [15], calibração é o “manejo dos dispositivos de calibração do medidor de modo a fazê-lo indicar, dentro dos erros admissíveis, a energia medida”.

Um medidor de quilowatt-hora pode ser calibrado pela sua conexão com um wattímetro padrão, de modo que a mesma corrente e a mesma tensão afetem tanto o medidor de quilowatt-hora como o wattímetro padrão. Mantendo a potência constante por um período de tempo medido, a energia é dada pelo produto de watts pelo tempo em horas, produto este que deveria ser registrado em um mostrador de um medidor de quilowatt-hora. O tempo pode

ser medido com um relógio padrão ou um bom relógio.

O método do medidor padrão (método de comparação) se aplica principalmente aos medidores de indução. Este método consiste em comparar o medidor a ser calibrado com um medidor padrão (medidor especialmente construído e compensado para calibração e aferição, cuja precisão é geralmente 10 vezes maior que a dos medidores a serem calibrados) utilizando um método estroboscópico (método que utiliza o efeito estroboscópico da luz para possibilitar a leitura no disco e o ajuste do medidor).

Os medidores são providos de três dispositivos de ajustes de calibração correspondentes, respectivamente, às cargas nominal, leve e indutiva. Ao submeter-se o medidor à aferição em relação a um padrão, se ele apresentar erro relativo percentual superior ao preestabelecido em qualquer das três cargas referidas, maneja-se o dispositivo de ajuste de calibração correspondente àquela carga, até fazer o medidor atingir a faixa de medição admissível. A cada manejo feito num dispositivo de ajuste de calibração, deve corresponder uma aferição. Estes ajustes (regulagens) podem ser vistos na Fig. 3.12 [22].

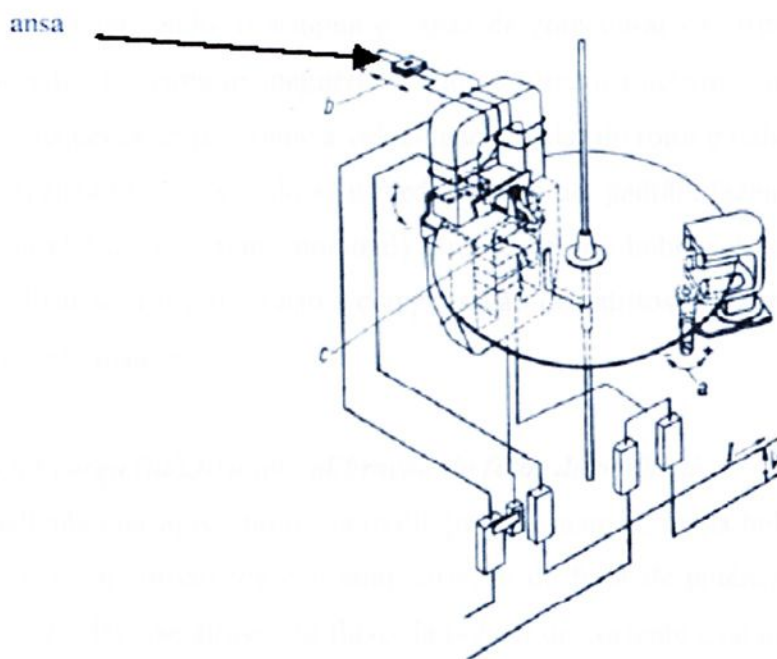


Figura 3. 12 – Dispositivos de regulagem de um medidor monofásico de indução. Onde:
a) regulagem da carga nominal; b) regulagem da carga indutiva; c) regulagem da carga leve.
Fonte: adaptada da referência [22]

3.6.2.1 Calibração na carga nominal ou calibração de plena carga

O ajuste de carga nominal objetiva ajustar a correta velocidade com a corrente e a tensão nominal e fator de potência unitário [23]. O ajuste de carga nominal consiste em fazer

com que a velocidade angular do elemento móvel seja compatível com a constante de disco especificada (que representa o número de Watts-hora correspondentes a uma rotação completa do elemento móvel), nas condições normais de carga (corrente nominal, tensão nominal, frequência nominal e fator de potência unitário).

O ajuste fino é feito por meio de um parafuso alojado no corpo do ímã permanente e que permite deslocá-lo com precisão dentro de pequenas distâncias. Para o ajuste grosso, solta-se o ímã, faz-se o deslocamento necessário e volta-se a fixá-lo. Estes ajustes modificam o conjugado frenante ou de amortecimento produzido pelo ímã permanente sobre o disco.

3.6.2.2 Calibração na carga leve

O ajuste com carga leve proporciona um meio de conseguir que a velocidade do disco seja correta com pouca carga, usualmente de 10%. Uma placa de material condutor é colocada sob a bobina de potencial, podendo ser deslocada. O conjugado motor resultante pode atrasar ou adiantar o movimento do disco, de acordo com a posição que a placa ocupar relativamente à bobina de potencial. Assim sendo, o sistema é capaz de compensar os atritos do sistema mecânico e as assimetrias do circuito magnético, que se tornam relevantes no registro da energia solicitada por pequenas cargas, onde a velocidade angular do rotor é reduzida.

Este ensaio é realizado comparando-se o medidor com um padrão, fazendo-se circular uma corrente reduzida (10% da corrente nominal) através da sua bobina de corrente. Esse ensaio possibilita verificar se ocorreu ou não a compensação dos atritos do sistema mecânico e as assimetrias do circuito magnético.

3.6.2.3 Calibração na carga indutiva ou calibração do fator de potência

Em 1890, Shallenberger apresentou sua teoria para o ajuste de carga indutiva. A base da teoria é que para se ter o correto registro com variação do fator de potência da carga, o fluxo da bobina de tensão deve-se atrasar do fluxo da bobina de corrente exatamente em 90° , quando a carga do medidor possuir fator de potência unitário. Essa relação de 90° é essencial para manter a força de impulsão no disco proporcional a potência para qualquer valor de fator de potência da carga. Uma das formas, de se obter esta relação de 90° , é fazer o fluxo da bobina de tensão atrasar-se do fluxo da bobina de corrente por mais do que 90° , por meio de uma bobina envolta do núcleo da perna central da bobina de corrente. É então necessário mover-se o fluxo da bobina de corrente em direção ao fluxo da bobina de tensão, até o ângulo ser exatamente de 90° [14].

Segundo a referência [24], nos medidores existe freqüentemente uma pequena bobina



suplementar sobre o mesmo núcleo da bobina de tensão ou em uma das pernas da bobina de corrente. Os terminais deste enrolamento são curto-circuitados mediante uma pequena ansa (em formato de asa) de fio de resistência (Ver Fig. 3.12). Variando-se o comprimento da ansa, aumenta-se ou diminui-se a resistência em série com esta bobina suplementar, permitindo efetuar a regulação de fase.

3.6.3- Erros do processo de aferição/calibração e após colocados em funcionamento

O erro dos medidores de indução também varia com a temperatura, frequência e outros fatores [25]. No processo de aferição/calibração poderão ocorrer os seguintes erros: erros devido ao equipamento (incluindo o medidor padrão), erros do operador do equipamento na execução dos ensaios e erros devido às condições inadequadas de limpeza do laboratório[26].

A exatidão de um medidor por um longo período de tempo é uma consideração importante. Em função do grande número de medidores em serviço, do tempo e gastos que são envolvidos em ajustes periódicos deles, é obviamente muito vantajoso que suas construções sejam capazes de assegurar mudanças desprezíveis comercialmente em suas exatidões por um período de alguns anos em condições normais de uso. Duas possibilidades de problemas são as engrenagens e o freio magnético. Caso ocorra uma fricção excessiva o medidor tenderá a funcionar mais lentamente, particularmente em cargas leves, ou seja, se o freio magnético diminuir em força, o medidor tenderá a funcionar mais rápido em todas as cargas [27].

Os medidores devem ser projetados e construídos tendo-se em vista as seguintes qualidades essenciais: fidelidade, precisão, sensibilidade, alta robustez e longa duração. Isso, para proteção recíproca do comprador e do vendedor de energia elétrica [28].

Na referência [27] de 1959, há um relato que em um teste de 40.000 medidores, após um período de 4 anos de operação, verificou-se que, na carga nominal, 78 % deles tinham erros de 1% ou menos, enquanto 99 % tinham erros de menos de 4%. Na carga leve, 67 % tinham erros menores do que 1 %, enquanto 97% tinham erros menores do que 4 %. Mais medidores funcionavam de forma lenta do que rápida, e a fricção excessiva foi a mais comum fonte de erros. Atualmente estes erros podem estar maiores, pois em 1959 as cargas não lineares não eram comuns na rede elétrica.



A NBR 5313 (ABNT, 1997) [20], também estabelece os erros percentuais admissíveis para cada um dos ajustes. São eles: carga baixa $\pm 2,0$, carga nominal $\pm 1,5$ e carga indutiva $\pm 2,0$.

3.7- Erros do Medidor Watt-Hora Tipo indução

Como qualquer instrumento de medição, o medidor possui algumas imperfeições, necessitando-se de determinados ajustes para obtenção de indicações confiáveis, obtendo-se assim, leitura com erros dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente. Durante anos, este equipamento vem sendo aperfeiçoado e diversos artifícios foram criados para ajustá-lo, sendo as soluções variáveis de fabricante para fabricante, porém, todas direcionadas ao mesmo objetivo.

Como exemplo dos erros inerentes à medição de energia, cita-se aqueles causados pelo atrito e pelo defasamento do fluxo útil em relação a tensão da rede, que são compensados através de ajustes prévios em seus mecanismos apropriados. Existem, também, erros associados a fatores adversos que aparecem após a instalação do medidor, tais como: variações da tensão da rede, frequência, temperatura e carga.

3.7.1- Erros Compensados Através de Ajustes

3.7.1.1 Dispositivos de compensação automática

Além dos dispositivos de calibração, os medidores de energia elétrica, tipo indução, são providos de outros artifícios que compensam automaticamente as variações de certas grandezas que podem alterar o seu desempenho correto (por exemplo; variações da temperatura, sobrecarga ou sobrecorrente e variações da tensão). Estes artifícios são dispositivos fixos, colocados pelos fabricantes e não acessíveis aos calibradores, sendo chamados de dispositivos de compensação automática. Existem, assim, compensações para: sobrecarga ou sobrecorrente, variações da tensão e variações da temperatura. Como nas instalações elétricas atuais as variações de frequência se situam dentro de pequenas faixas (± 1 Hz), e com avanço tecnológico dos materiais empregados na fabricação dos medidores de



energia elétrica tipo indução, não há necessidade de introdução de dispositivos especiais para compensação de variação de frequência [17].

3.7.1.2 Ajuste do ângulo em 90° :

Se a bobina de potência fosse uma bobina ideal, ter-se-ia $\gamma = 90^\circ$ e C_m seria proporcional à potência ativa da carga, como visto anteriormente.

Como essa bobina não é ideal, há na prática alguns artifícios utilizados para que ela se comporte como tal, ou seja para que o fluxo útil ϕ_v que atravessa o disco seja defasado exatamente 90° atrasado em relação a tensão $V_{aplicada}$. Esta operação é chamada de *Ajuste da Carga Indutiva*, *Ajuste da Defasagem*, *Ajuste do Fator de Potência* ou *Ajuste da Quadratura*.

Deste modo, apresenta-se dois dos artifícios mais utilizados pelos fabricantes de medidores, sobretudo em medidores de origem americana:

O primeiro deles pode ser observado com o auxílio da figura 3.13. Essa, mostra uma bobina B , curto-circuitada através da presilha condutora A , composta de uma ou duas espiras, com o mesmo núcleo de B_p e colocada abaixo desta. Os fios F em série com B são condutores puramente resistivos, feitos de bronze especial por alguns fabricantes.

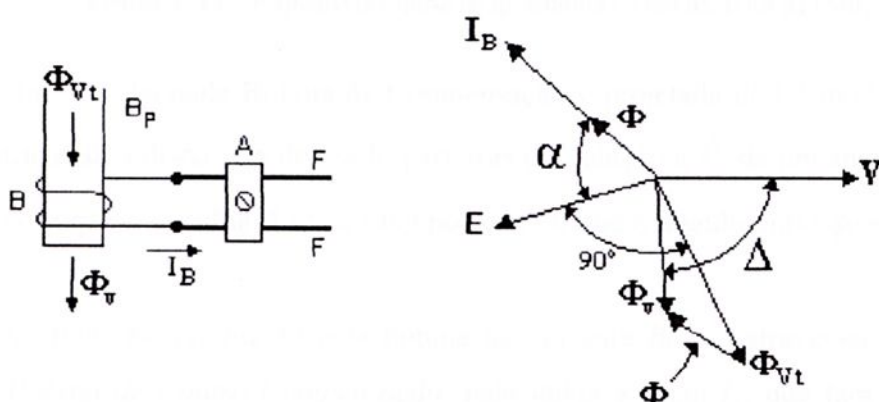


Figura 3. 13 – Esquema do ajuste da defasagem de um medidor de indução.

O fluxo total ϕ_{vt} , produzido por B_p , ao atravessar a bobina “B” nela induz a f.e.m. E que fará circular a corrente I_B em B . A corrente I_B dará origem ao fluxo ϕ que se comporá com ϕ_{vt} dando o resultado ϕ_v . Os valores de α e de I_B , e consequentemente o de ϕ , dependem da impedância de B . Modificando o valor desta impedância pelo deslocamento da presilha A , pode-se ajustar o valor de ϕ e a sua defasagem α de tal modo a conseguir o fluxo útil ϕ_v normal à tensão $\vec{V}$, ou seja $\Delta=90^\circ$.

Este artifício é atualmente pouco utilizado, mas foi empregado até a bem pouco tempo, sendo por isto ainda muito encontrado nos medidores mais antigos.

O segundo artifício é baseado numa corrente I circulando através da bobina de corrente, em fase com a tensão V .

A figura 3.14 mostra uma bobina B_1 , curto-circuitada ao núcleo da bobina de potencial B_p e colocada abaixo desta. Também uma outra bobina B_2 curto-circuitada através de uma bobina condutora A , com o mesmo núcleo da bobina de corrente B_c e colocada acima desta. Os fios F em série com B são condutores puramente resistivos feitos de bronze especial.

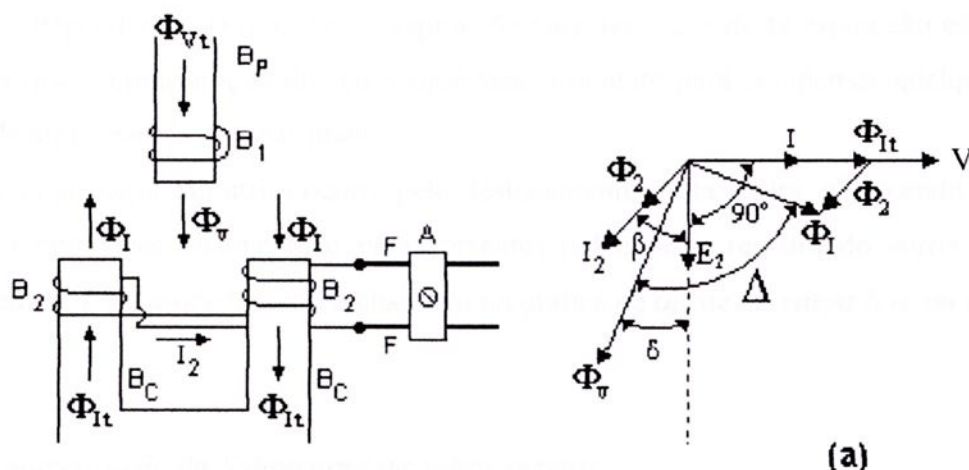


Figura 3. 14 – Esquema do ajuste da quadratura de um medidor de indução.

A bobina B_1 , chamada Bobina de Compensação é projetada de tal modo que o fluxo útil $\vec{\phi}_v$ que atravessa o disco seja defasado para trás em relação à $\vec{V}$ de um ângulo maior que 90° . Isto faz com que a presilha A tome uma posição tal que o ângulo entre ϕ_v e V seja maior que 90° .

O fluxo total ϕ_{It} , produzido pela bobina de corrente B_c , ao atravessar a bobina B_2 , chamada de *Bobina de Contra Compensação*, nela induz a f.e.m E_2 que fará circular uma corrente I_2 a qual dará origem ao fluxo ϕ_2 que se comporá com ϕ_{It} resultando em ϕ_I . Os valores de β e I_2 , e consequentemente o de ϕ_2 , dependem da impedância de B_2 . Modificando o valor dessa impedância através do deslocamento da presilha A , pode-se ajustar o valor de ϕ_2 e de sua defasagem β de tal modo que o fluxo útil $\vec{\phi}_I$ seja normal ao fluxo útil $\vec{\phi}_v$, ou seja $\Delta = 90^\circ$.

Este artifício é mais utilizado nos medidores modernos americanos do que o anterior. Observa-se que ele utiliza o efeito simultâneo dos fluxos ϕ_v e ϕ_I das bobinas de potencial e de corrente, respectivamente[17].

3.7.1.3 Compensação do atrito

O atrito nos pontos de apoio do eixo de suspensão do disco e no sistema mecânico de engrenagens, impede o disco de partir ou de registrar o número exato de rotações para cargas leves. Assim, para a compensação deste efeito, vários artifícios são utilizados pelos fabricantes. Um destes consiste na colocação de uma espira de material condutor, não magnético, curto-circuitada e instalada abaixo do pólo central da bobina de potencial. Isto introduz um pequeno conjugado adicional sobre o disco, acelerando ou freando o seu movimento, dependendo da atuação na espira. As características desta espira são escolhidas, de maneira que a contribuição do seu torque seja suficiente para compensar qualquer valor esperado de atrito gerado no instrumento.

A compensação do atrito ocorre pelo deslocamento desta espira, oferecendo ao disco do medidor condições de operação para correntes reduzidas e registrando corretamente a energia elétrica. Este procedimento é chamado na prática de *ajuste da carga leve ou ajuste do atrito* [17].

3.7.1.4 Compensação da Sobrecarga ou sobrecorrente

O disco do medidor, no seu movimento de rotação, corta as linhas de fluxo do ímã permanente e também as linhas de fluxo das bobinas de potencial e de corrente, ficando assim submetido a três conjugados de amortecimento.

Nos medidores modernos, a velocidade angular ω do disco é baixa e são empregados ímãs permanentes de elevada magnetização, de modo que os conjugados devido às bobinas de corrente e de potencial representam cerca de 1% e 4%, respectivamente.

A bobina de potencial tem cerca de quatro vezes o número de amperes-espiras da bobina de corrente e é submetida na prática, a pequenas variações de tensão. Entretanto, a bobina de corrente pode ser submetida a 400% da corrente nominal, e até a 667% desta corrente nos medidores mais modernos do *tipo suspensão magnética*. À medida que a corrente cresce, o fluxo da bobina de corrente também cresce e seu efeito no amortecimento passa a ser considerável, tendendo a atrasar o medidor. Para prevenir este fato, é empregado um *derivador magnético*, feito de uma liga de aço especialmente tratada, entre os núcleos das duas meias bobinas de corrente.

Em funcionamento normal, muitas linhas de fluxo da bobina de corrente não passam através do disco e ficam circulando através do derivador. A liga de que é feito o derivador tem a propriedade de aumentar a sua relutância própria à proporção que aumenta o fluxo. Crescendo a corrente, cresce o fluxo, cresce a relutância do derivador, e maior número de

linhas de fluxo são obrigadas a passar pelo disco. Este acréscimo de linhas de fluxo faz crescer o conjugado motor em maior proporção que o crescimento do conjugado de amortecimento, e o medidor permanece funcionando dentro da sua classe de exatidão [17].

3.7.1.5 Compensação da Variação de Temperatura

Variações de temperatura influem sobre os erros percentuais nos medidores, embora não seja possível avaliá-los quantitativamente nas várias condições de carga. Em função disso, os laboratórios de calibração e aferição de medidores devem ser mantidos a uma temperatura constante, geralmente ao redor de 25°C [24]. O mesmo autor afirma que vários pesquisadores constataram que um aumento da temperatura de 10°C pode provocar redução de 4 % do torque motor, diminuição de 5% do torque frenante, diminuição do ângulo de defasamento, diminuição das correntes induzidas no disco e, conseqüentemente, do fluxo motor. Essas alterações provocam o aumento na velocidade de giro do medidor.

A resistência específica do disco depende da temperatura. Isto influencia tanto o torque motor quanto o torque frenador. Como a velocidade do disco é obtida do equilíbrio destes dois torques, esta influência da temperatura é cancelada. Os componentes elétricos e magnéticos estão sujeitos às mudanças da temperatura. Pela apropriada combinação de materiais usados, uma compensação adequada é alcançada. No freio magnético, o caminho magnético consiste de dois pedaços de ferro: um provido de um coeficiente negativo de temperatura e outro, de um positivo, compensando-se mutuamente [29].

Um dos artifícios utilizados pelos fabricantes, para a compensação da variação da temperatura, é um derivador feito de uma liga de aço-níquel especial, algumas contendo também manganês e cobre, cuja relutância cresce com a elevação da temperatura e por isso é chamada de *liga térmica* ou *thermalloy*. Nas temperaturas normais, muitas linhas de fluxo do ímã permanente não passam através do disco, e são desviadas através do derivador D; quando a temperatura se eleva, o derivador D aumenta a oposição à circulação das linhas de fluxo, fazendo com que muitas passem através do disco; com isto, há um aumento no conjugado de amortecimento, e em conseqüência o medidor passa a funcionar corretamente [17].

3.7.1.6 Compensação da Variação da Tensão

Na prática a variação da tensão fica dentro de uma pequena faixa estabelecida por norma. Apesar desta pequena variação, há uma alteração do funcionamento correto do medidor, pois o amortecimento varia com o quadrado do fluxo da bobina de tensão. Este fato leva os projetistas dos medidores modernos a tomarem certas precauções em relação ao



perfeito dimensionamento das seções das lâminas de ferro-silício do núcleo para que estas operem em pontos selecionados de suas curvas de magnetização. Com esta sistemática a variação da tensão é compensada automaticamente.

Há, entretanto, medidores que tem dispositivos de compensação da variação da tensão. Seja um circuito magnético que muitas linhas de fluxo da bobina de tensão não passam através do disco, e sim através das lâminas. Estas lâminas são feitas de ligas especiais cuja relutância cresce com o crescimento do fluxo. Assim, quando este cresce, mais linhas de fluxo passam pelo disco, fazendo com que o conjugado motor cresça em maior proporção que o conjugado frenante (ou de amortecimento), e o medidor permanece funcionando dentro de sua classe de exatidão [17].

3.7.2- Influências Externas ao Medidor

A ocorrência de variações na frequência e variações no fator de potência, tensões e/ou correntes desequilibradas, bem como a presença de campos magnéticos, podem afetar o funcionamento correto do medidor.

3.7.2.1 *Influência devido à presença de harmônicas*

Aparelhos de medição e instrumentação em geral são afetados por harmônicas, especialmente se ocorrerem ressonâncias que afetam a grandeza medida.

Os medidores tipo indução de energia ativa são equipamentos projetados para trabalhar em ambientes puramente senoidais, ou seja, para uma dada frequência de projeto e mínimas distorções nas formas de onda das tensões e das correntes, o medidor deverá operar satisfatoriamente e os erros de medição deverão estar dentro da classe de exatidão do mesmo, previstos em normas técnicas de aprovação de modelos.

No entanto, com a crescente penetração de cargas e equipamentos geradores de harmônicos dentro dos setores residencial, comercial e industrial, uma grande quantidade de harmônicos de corrente são injetados no sistema. Harmônicos de tensão também podem ser encontrados, como por exemplo, os criados pela saturação de circuitos magnéticos e conexão de transformadores. Sendo assim, pode-se esperar que o desempenho destes medidores seja alterado quando operando dentro de sistemas poluídos com componentes harmônicas.

Dispositivos com discos de indução, como os medidores de energia, são sensíveis a

componentes harmônicas, podendo apresentar erros positivos ou negativos, dependendo do tipo de medidor e da harmônica presente. Em geral a distorção deve ser elevada ($>20\%$) para produzir erro significativo. Tendo em vista essas condições, surgem os erros nas medições de energia realizadas por medidores watt-hora tipo indução, os quais, ainda hoje, são os mais utilizados devido à sua robustez, desempenho, simplicidade e preço competitivo.

Os dois principais componentes no erro de medição em um ambiente não senoidal são: erros dependentes da frequência e erros devidos à não linearidade. O primeiro é devido à limitada faixa de frequência de operação nos circuitos conversores de entrada e do próprio instrumento em si. O segundo é originado das características não lineares do material do medidor e é dependente da forma de onda das grandezas medidas.

Dentre as cargas geradoras de harmônicos, na indústria, pode-se citar os fornos à arco, conversores estáticos, retificadores e equipamentos baseados em eletrônica de potência. Nos setores residencial e comercial, pode-se citar os equipamentos eletrônicos, fornos microondas, microcomputadores, reguladores de tensão e lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, dentre outros [6].

3.7.2.2 *Influência devido tensões e/ou correntes desequilibradas ou desbalanceadas*

Desequilíbrio no sistema de potência é um fenômeno comum no sistema de distribuição, e as definições de potência e fator de potência sob situações com harmônicas e desequilíbrios são discutidos aqui. O desequilíbrio em sistemas de potência, pode ser atribuído à presença de uma, duas, e três fases de carga, ele é importante para a compreensão de que o desequilíbrio pode ser criado como resultado de diferentes condições de operação igualadas dentro de cargas trifásicas.

O desequilíbrio em sistemas de potência é a causa de vários problemas de qualidade de energia relatados. Primeiro, as três fases do transformador que é comumente conectado Δ/Y para o único propósito de evitar a penetração de componentes de sequência zero no lado das concessionárias, com o desequilíbrio os componentes da terceira harmônica talvez tenham fluxo livremente no lado da concessionária, em vez de ser efetivamente filtrado para fora pelo transformador. Segundo, equipamentos de eletrônica de potência sensíveis, cujos circuitos eletrônicos dependem do cruzamento do zero na tensão de suprimento, assumindo a três fases balanceadas, talvez opere mal como um resultado de sistema de potência desequilibrado. Terceiro, a análise do fluxo de potência harmônica automático torna-se um tanto complexa uma vez que a idéia de componentes simétricas não transmite a igual significado físico que é transmitido no caso de sistema de potência desequilibrado na presença de distorção

harmônica.

Desde que o desequilíbrio e as harmônicas são as duas maiores distorções no sistema de potência trifásico, a pesquisa corrente de avaliação de desequilíbrio é focalizada na distorção desequilibrada da componente da frequência fundamental. Um componente de potência desequilibrado é definido na potência aparente total em termos das componentes simétricas. A potência aparente é primeiro decomposta em componente fundamental e componente harmônica, e após é decomposta em componentes positiva e desequilibrada. Este método avalia a distorção harmônica através da proporção de potência desequilibrada acima da potência de sequência positiva. O grau de desequilíbrio é avaliado através da proporção de componentes da sequência negativa acima das componentes de sequência positiva. Todos estes métodos separam o desequilíbrio das harmônicas, sem que exista desequilíbrio nas componentes harmônicas.

Para medir o desequilíbrio em sistemas de potência que contenham formas de ondas não senoidais, um método é desenvolvido na referência [8]. Três matrizes de transformação são formadas, e são aplicadas para os fasores de tensão e corrente (abc) em cada componente harmônica, respectivamente. Então, os fasores que são denominados de componente equilibrada, a primeira componente desequilibrada, e a segunda componente desequilibrada são obtidos.

A média dos valores eficazes das tensões e correntes trifásicas é então decomposta em componente fundamental equilibrada, componente fundamental desequilibrada, componente harmônica equilibrada, componente harmônica desequilibrada. A mesma decomposição é obtida da potência aparente e da potência ativa. O total de distorção harmônica é também definida, o que é usual para avaliar o sistema desequilibrado. A vantagem deste método é que ele torna claro a interação entre o desequilíbrio e a distorção harmônica pela consideração da harmônica desequilibrada.

CAPÍTULO 4 - Procedimentos Experimentais

4.1- Considerações Gerais

O presente capítulo apresenta a metodologia aplicada nos ensaios experimentais dos medidores de watt-hora tipo indução. Para todos os medidores foram adotados os mesmos procedimentos.

4.2- Metodologia

4.2.1- – Medidas de Referência

Para observar os efeitos dos fenômenos elétricos sobre os medidores estudados, primeiramente foram realizadas medidas com as condições para os quais os mesmos foram projetados e com a temperatura ambiente controlada. Foram realizadas medidas para as cargas R (resistiva), RL (resistiva /indutiva), RC (resistiva /capacitiva) e também retificadores monofásicos de meia-onda e onda completa e retificadores trifásicos de seis pulsos, que são cargas comumente encontradas ligadas à rede elétrica nos dias atuais.

As medidas são comparadas com as realizadas pelo sistema de aquisição de dados.

Os procedimentos realizados para a comparação e a observação dos possíveis erros medidor estão apresentados a seguir:

Para cada carga ensaiada: Inicialmente aplica-se uma tensão puramente senoidal e verificam-se as leituras das potências consumidas do medidor, através do sensor óptico, que emite um pulso a cada volta completa do disco do medidor e a aquisição multiplica o número de voltas registradas pelo valor do kd específico do medidor, resultando na medida de Consumo do Medidor (Wh); e a outra leitura da potência consumida é obtida através do sistema de aquisição de dados e do programa DasyLab 4.0, onde são obtidos os valores das

tensões e correntes instantâneas e através das equações 4.1 a 4.6 é calculada a potência consumida pela carga ensaiada. Os erros entre as duas potências consumidas pela carga são então calculados.

A seguir, para cada carga ensaiada, aplica-se tensões que representam distúrbios na rede elétrica de fornecimento, e os mesmos procedimentos do ensaio com a forma de onda da tensão senoidal são realizados. Os requisitos estabelecidos para a tensão de alimentação são obtidos com o uso de uma fonte de alimentação trifásica totalmente controlada via Software, da marca Califórnia Instruments, modelo 6000L.

As medições são realizadas em ambiente com a temperatura controlada, e após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica;

Cada ensaio tem duração fixa programada de uma hora, para o medidor monofásico e de meia hora para o medidor trifásico.

4.3- Calibração dos Medidores

Os Medidores analisados no presente estudo pertencem a uma concessionária de energia elétrica, sendo que os mesmos foram fornecidos já devidamente calibrados.

4.4- Procedimentos para Obtenção das Medidas

Um sensor de número de voltas foi introduzido no medidor, e cada volta é multiplicada pelo k_d específico do medidor, resultando na leitura de Watt-hora, sendo este procedimento realizado pela rotina do sistema de aquisição de dados. Foram feitas várias marcações no disco do medidor visando assim conseguir um número maior de pontos lidos pelo sensor, em menor tempo. Desta forma, o k_d do medidor também foi fracionado pelo mesmo número de marcações do disco, garantindo assim uma melhor exatidão das medidas.

As leituras são realizadas através de um sistema de aquisição de dados Wavebook 16 da Iotech. As rotinas de processamento de sinais foram desenvolvidas em ambiente DasyLab®



versão 4.0.

4.4.1- Medidor de Watt-hora Monofásico

O arranjo experimental utilizado nos ensaios do medidor monofásico é ilustrado na figura 4.1.

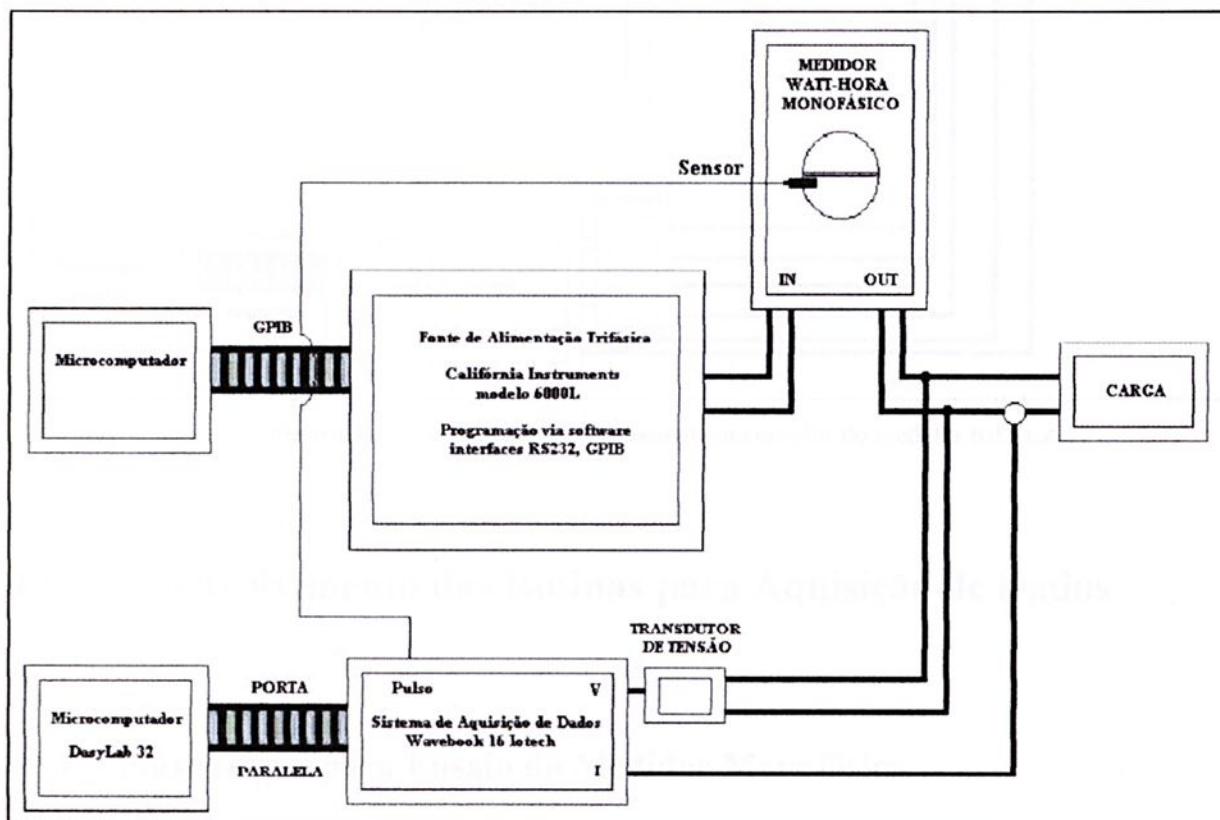


Figura 4.1 – Montagem experimental para ensaios do medidor monofásico.

4.4.2- Medidor de Watt-hora Trifásico

O arranjo experimental utilizado nos ensaios do medidor trifásico é ilustrado na figura 4.2.

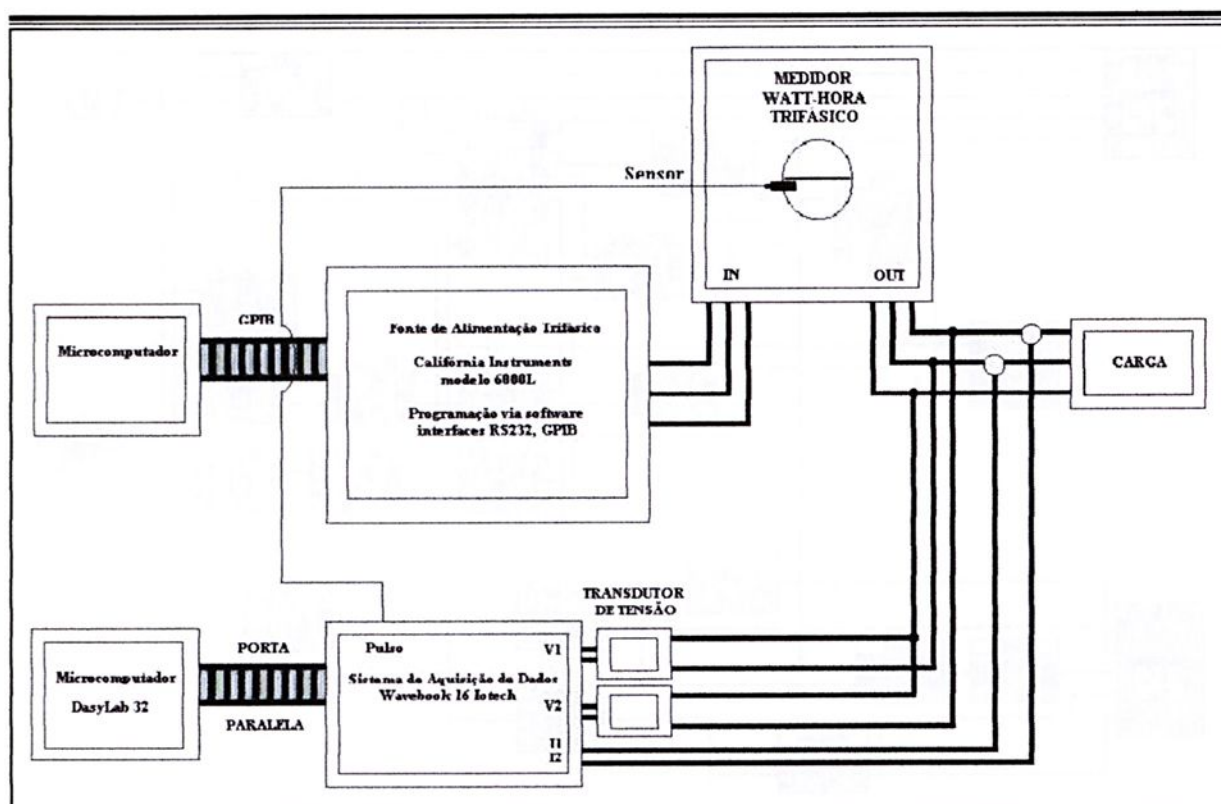


Figura 4.2 – Montagem experimental para ensaios do medidor trifásico.

4.5- Desenvolvimento das Rotinas para Aquisição de Dados

4.5.1- Fluxograma para Ensaio do Medidor Monofásico

O fluxograma das rotinas utilizadas no processamento de sinais foram desenvolvidas em ambiente DasyLab[®] versão 4.0 e são mostradas na figura 4.3.

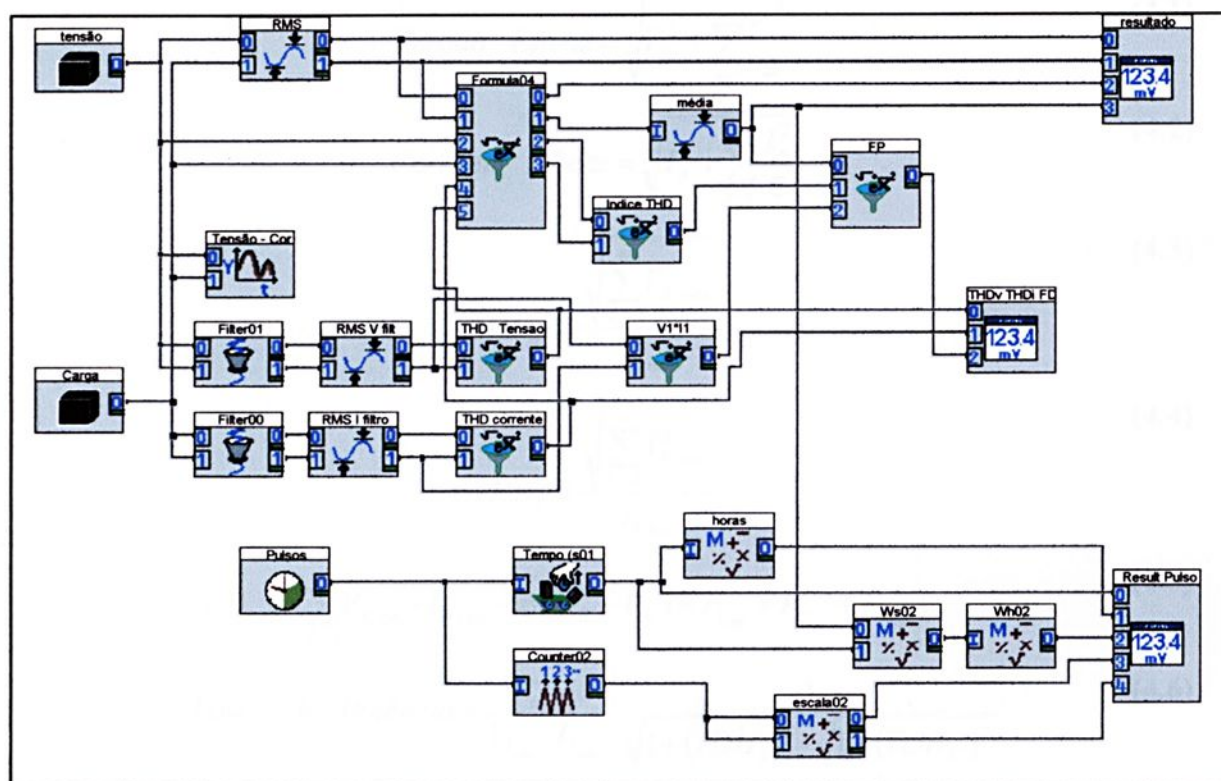


Figura 4.3 – Programa desenvolvido em DasyLab® 4.0 para a aquisição de dados do medidor monofásico

4.5.1.1 - Quantificação da Potência do Medidor

O número de voltas do disco é registrado pelo sistema de aquisição de dados e em seguida é feita a conversão para kWatt-hora.

4.5.1.2 - Potência através dos valores de Tensão e Corrente Instantâneos

- É feita a aquisição das tensões e correntes instantâneas através do sistema de aquisição de dados e respectivos transdutores.
- Estes valores são então integralizados para a obtenção da potência ativa.
- A formulação utilizada na rotina utilizando valores instantâneos e eficazes da tensão de alimentação e da corrente na carga para obtenção das potências são mostradas nas equações a seguir [30]:

$$\text{Tensão Eficaz} = \sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}} \quad (4.1)$$

$$\text{Corrente Eficaz} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}} \quad (4.2)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{K=2}^{\infty} V_{K\,rms}^2}}{V_{1\,rms}} \quad (4.3)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{K=2}^{\infty} I_{K\,rms}^2}}{I_{1\,rms}} \quad (4.4)$$

$$P_{avg} = \sum_{K=1}^{\infty} V_{K\,rms} \cdot I_{K\,rms} \cdot \cos(\delta_K - \theta_K) = P_{1\,avg} + P_{2\,avg} + P_{3\,avg} + \dots \quad (4.5)$$

$$\text{Fator de Potência} = \frac{P_{m\acute{e}dia}}{V_{1\,rms} \cdot I_{1\,rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2} \cdot \sqrt{1 + (THD_V)^2}} \quad (4.6)$$

4.5.2- Fluxograma para Ensaio do Medidor Trifásico

O fluxograma das rotinas utilizadas no processamento de sinais foram desenvolvidas em ambiente DasyLab[®] versão 4.0 e são mostradas na figura 4.4.

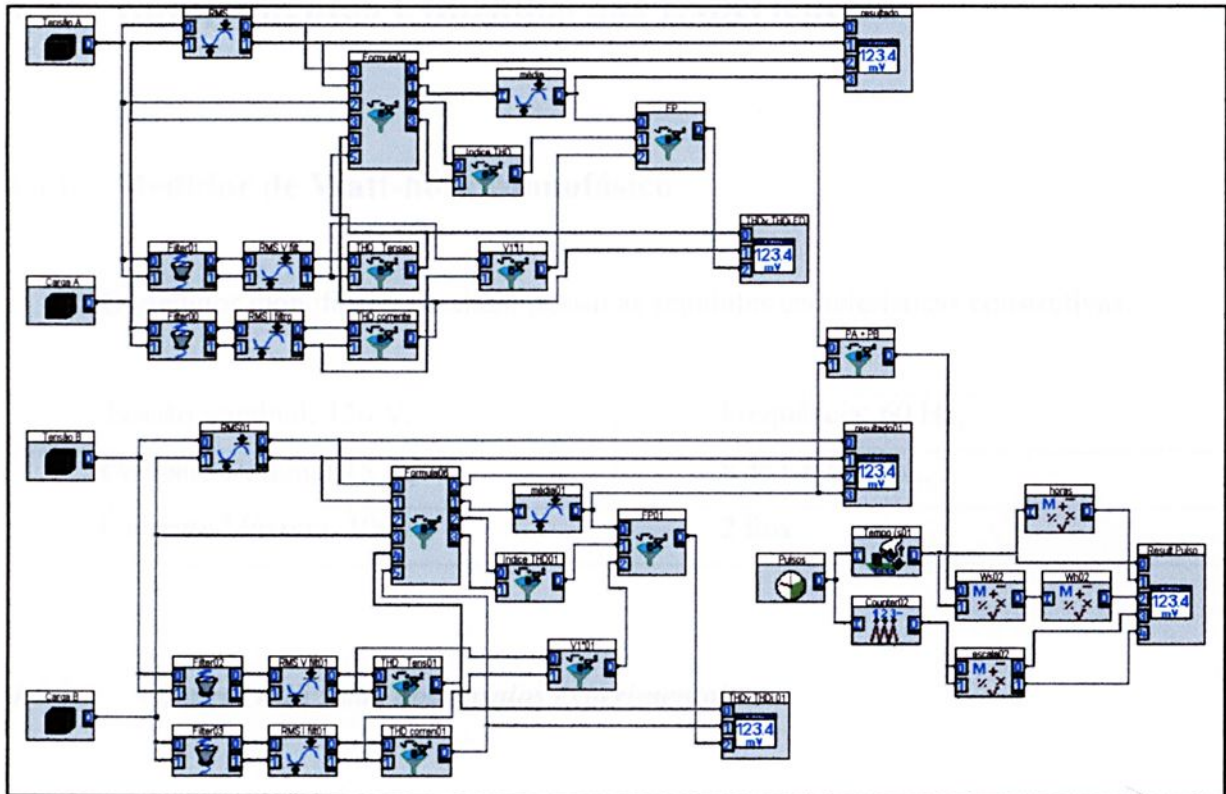


Figura 4.4 – Programa desenvolvido em DasyLab® 4.0 para a aquisição de dados do medidor trifásico.

4.5.2.1 - Quantificação da Potência do Medidor

O número de voltas do disco é registrado pelo sistema de aquisição de dados e em seguida é feita a conversão para kWatt-hora.

4.5.2.2 - Medida dos watt-hora pelo Sistema de Aquisição de dados

Assim como no medidor monofásico, é feita a aquisição das tensões e correntes instantâneas através do sistema de aquisição de dados e respectivos transdutores e estes valores são então integralizados para a obtenção da potência ativa. A formulação utilizada na rotina para a obtenção dos valores eficazes tanto da tensão quanto das correntes para obtenção das potências são as mesmas utilizadas para o medidor monofásico.

4.6- Equipamentos Utilizados nas Experiências

4.6.1- Medidor de Watt-hora Monofásico

O medidor monofásico ensaiado possui as seguintes características construtivas:

Tensão nominal: 120 V;	Frequência: 60 Hz;
Corrente Nominal: 15 A;	Kd=1.8 Wh/rot.;
Corrente Máxima: 100 A;	2 fios

4.6.1.1 – Cargas utilizadas nos ensaios experimentais

Para realização dos ensaios, foram utilizadas as seguintes cargas:

- Carga Resistiva: 50 ohms;
- Capacitor – 45,5 μ F;
- Indutor – 102,2 mH;
- Retificador Monofásico de Meia Onda;
- Retificador Monofásico de Onda Completa.

4.6.2- Medidor de Watt-hora Trifásico

O medidor trifásico ensaiado possui as seguintes características construtivas:

Tensão nominal: 120 V;	Kd=7.2 Wh/rot.;
Corrente Nominal: 15 A;	2 elementos;
Corrente Máxima: 120 A;	3 fases;
Frequência: 60 Hz;	3 fios

4.6.2.1 – Cargas utilizadas nos ensaios experimentais

Para realização dos ensaios, foram utilizadas as seguintes cargas:

- Carga Resistiva Trifásica: 70 ohms/fase;
- Indutor: 102,2 mH;
- Retificador Trifásico de Seis Pulsos.

4.7- – Equipamentos de Medição e Calibração

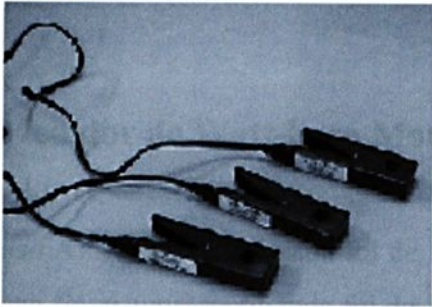
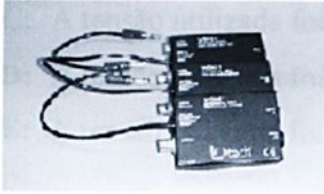
	Sistema de Aquisição de Dados Wavebook 16 Iotech Conversão A/D 1.0 MHz em 16 bits 8 canais simultâneos (S&H) Software para Processamentos de Sinais DasyLab 32 - versão 4.01 - Iotech
	Ponteiras de corrente MN115 AC Current Probe – AEMC Instruments Classe 3,5% - 40 Hz a 3 KHz Probe AC/10 1mA a 10A - sensibilidade 100mV/A
	Transdutores de Tensão Classe 0.2% - 500Khz WBK61 - Iotech - 200:1

Figura 4.5 – Equipamentos utilizados na medição.

Outros equipamentos utilizados:

- Fonte de Alimentação Trifásica / Simulador de Distúrbios

Califórnia Instruments / modelo 6000L

Programação via software – interfaces RS232, GPIB

Distúrbios: sags, sweels, surges, notching, interruptions

- Fluke

Power Harmonics Analyzer / modelo 41B

- Watt-Hora Digital Power Meter WT130

YOKOGAWA

O analisador de harmônicas Fluke 41B, foi utilizado para calibrar as rotinas de aquisição de dados do medidor monofásico e um medidor Watt-hora Digital Power Meter WT130, YOKOGAWA, para a calibração das rotinas de aquisição de dados do medidor trifásico de dois elementos.

4.8- Composição do Conteúdo Harmônica da Tensão Imposta

4.8.1 Medidor de Watt-hora Monofásico

Caso A: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD nulo (0%);

Caso B: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD = (3%);

Caso C: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD = (5%);

Caso D: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD = (10%);

Caso E: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD = (15%);

A tabela 4.1 ilustra os valores das ordens harmônicas que compõem os THDs dos casos citados acima.

Tabela 4. 1 – Componentes percentuais da tensão para cada THD ensaiada.

% THD	Tensão (%)									
	Fund.	Ang.	3 Harm	Ang.	5 Harm	Ang.	7 Harm	Ang.	11 Harm	Ang.
0	100	0	0	90	0	0	0	0	0	0
3	100	0	2,4	90	1,3	0	1	0	0,7	0
5	100	0	3,5	90	2,4	0	2,1	0	1,8	0
10	100	0	6,05	90	4,95	0	4,65	0	4,35	0
15	100	0	8,65	90	7,55	0	7,25	0	6,95	0

A figura 4.6 ilustra o espectro harmônico para os diferentes THDs utilizados nos casos acima.

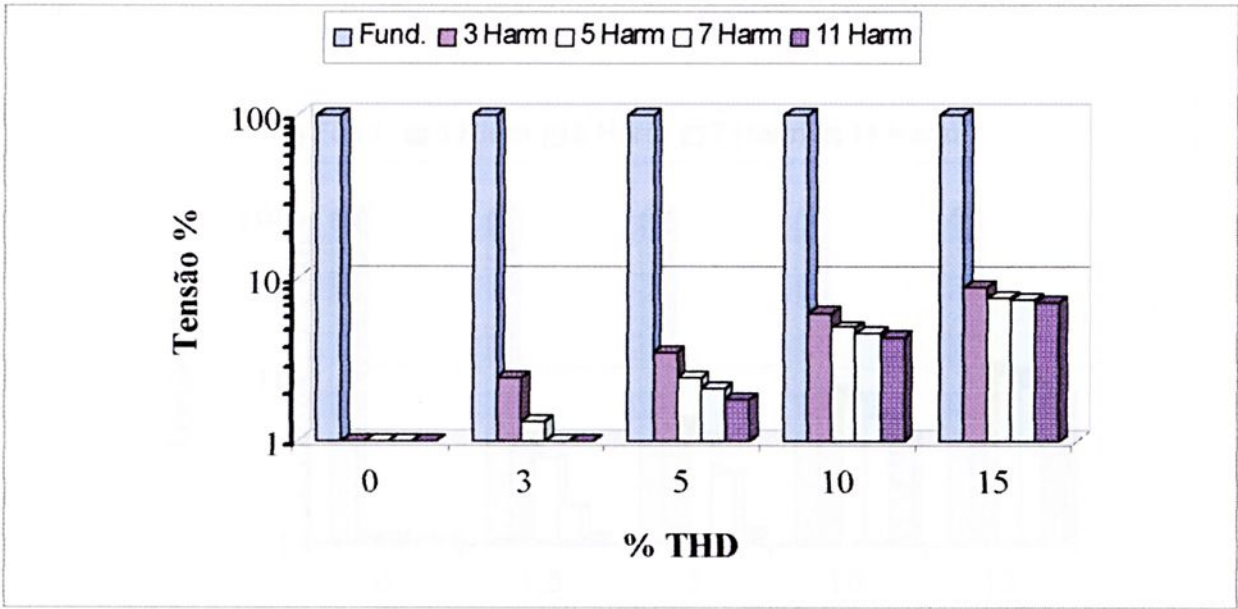


Figura 4.6 – Composição harmônica da tensão para 3%, 5%, 10% e 15% de THD.

4.8.2 Medidor de Watt-hora Trifásico

- Caso A: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD nulo (0%);
- Caso B: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD = (3.5%);
- Caso C: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD = (5%);
- Caso D: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD = (10%);
- Caso E: A tensão utilizada foi de 100% da nominal, com THD = (15%);

A tabela 4.2 ilustra os valores das ordens harmônicas que compõem os THDs dos

casos citados acima.

Tabela 4. 2 – Componentes percentuais da tensão para cada THD ensaiada.

% THD	Tensão (%)									
	Fund.	Ang.	3 Harm	Ang.	5 Harm	Ang.	7 Harm	Ang.	11 Harm	Ang.
0	100	0	0	90	0	0	0	0	0	0
3,5	100	0	4,2	90	3,2	0	1,55	0	0,1	0
5	100	0	5,2	90	4,2	0	2,55	0	1,1	0
10	100	0	8,3	90	7,3	0	5,65	0	4,2	0
15	100	0	11,35	90	10,35	0	8,7	0	7,25	0

A figura 4.7 ilustra o espectro harmônico para os diferentes THDs utilizados nos casos acima.

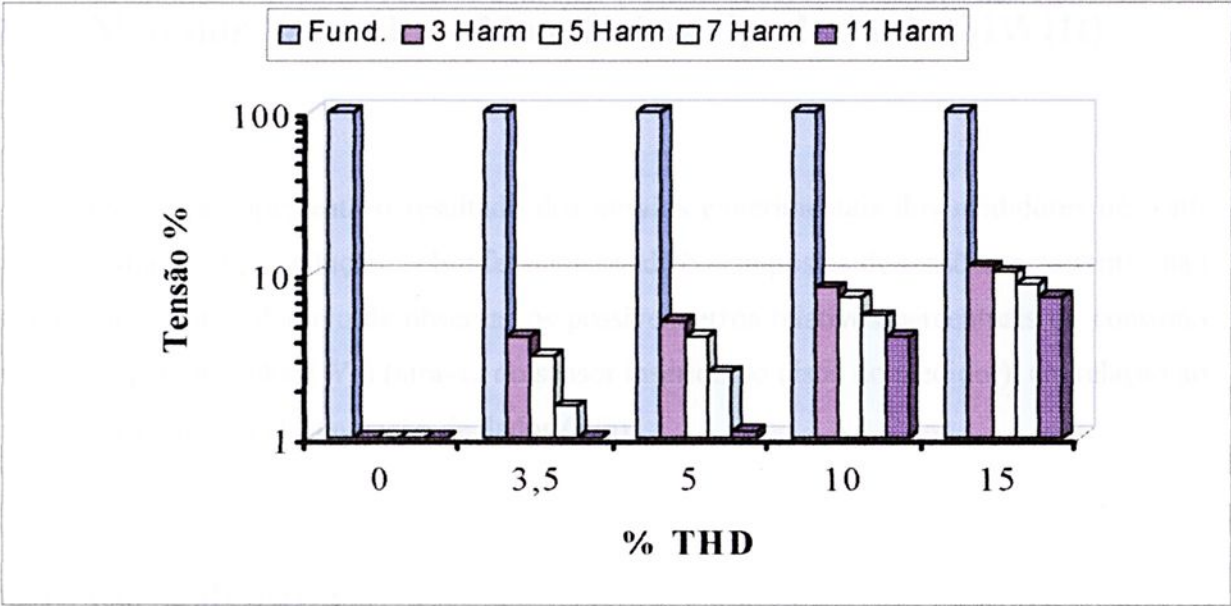


Figura 4.7 – Composição harmônica da tensão para 3.5%, 5%, 10% e 15% de THD.

CAPÍTULO 5 - Resultados Experimentais

5.1- Considerações Gerais

O presente capítulo apresenta os resultados dos ensaios experimentais dos medidores de watt-hora monofásico e trifásico (dois elementos), sob diferentes condições impostas de tensões e correntes não idealizadas.

5.2- Medidor Watt-Hora Monofásico Tipo Indução(MWHI)

Esta seção apresenta o resultado dos ensaios experimentais dos medidores de watt-hora monofásico tipo indução, sob diferentes condições impostas de tensões e correntes não idealizadas, com o objetivo de observar os possíveis erros relativos percentuais do consumo registrado pelo medidor (Wh) (através do sensor inserido no disco do medidor), em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados (Wh).

5.2.1- Carga Resistiva

5.2.1.1 Tensões e Correntes Senoidais

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal igual a $V_{\text{eficaz}} = 120$ volts (100%) da fundamental à carga resistiva $R = 50 \Omega$. As formas de onda da tensão e corrente são mostradas na figura 5.1.

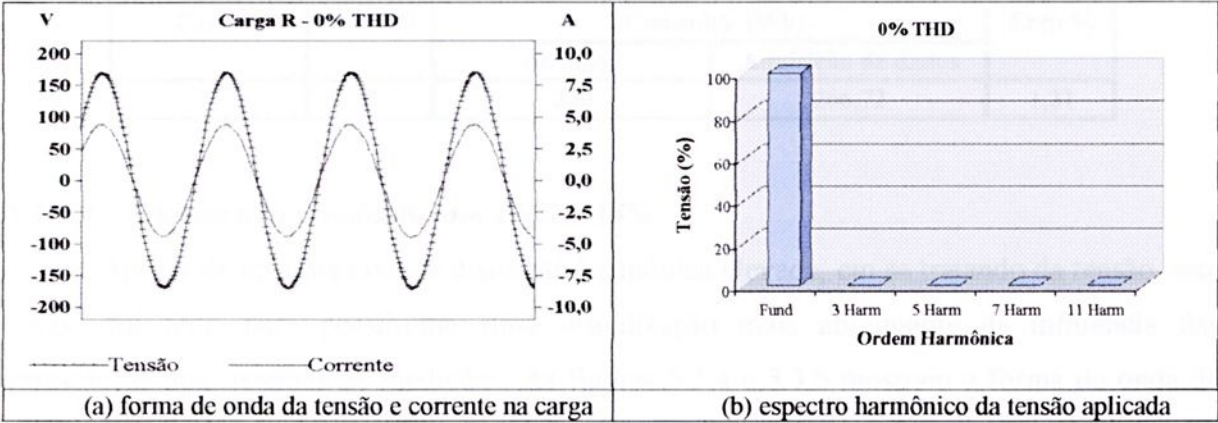


Figura 5.1 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=0%

Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a 1 (uma) hora. O resultado é mostrado abaixo.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
R	0	293,31	290,25	1,04

5.2.1.2 Tensões não senoidais com THD = 5%

As figuras 5.2.a e 5.2.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 5%.

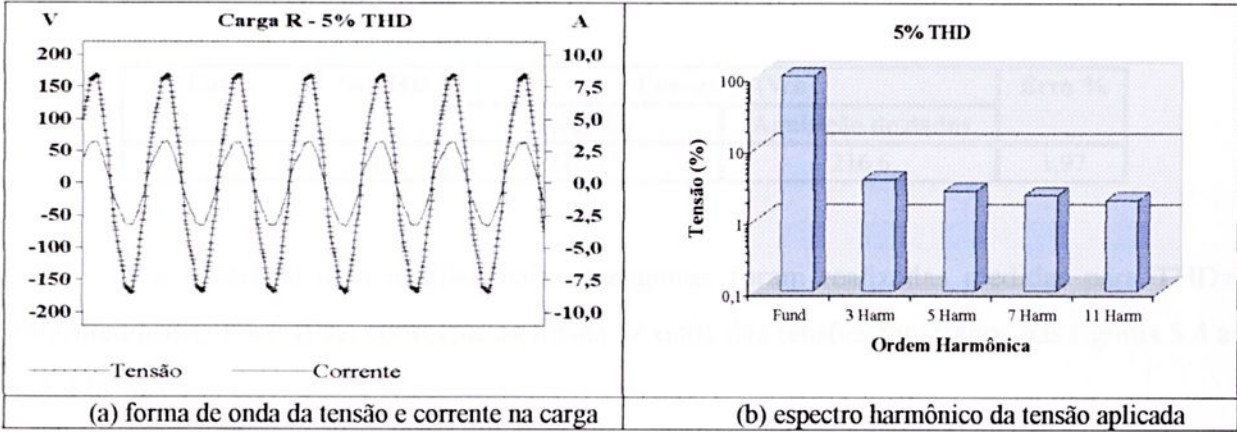


Figura 5.2 Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=5%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado a seguir:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
R	5	270	266,72	1,21

5.2.1.3 Tensões não senoidais com THD = 15%

Apesar de ser uma taxa de distorção harmônica elevada, em se tratando da tensão, este ensaio foi feito para possibilitar uma visualização mais abrangente da influência das harmônicas nos sistemas de medições. As figuras 5.3.a e 5.3.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 15%.

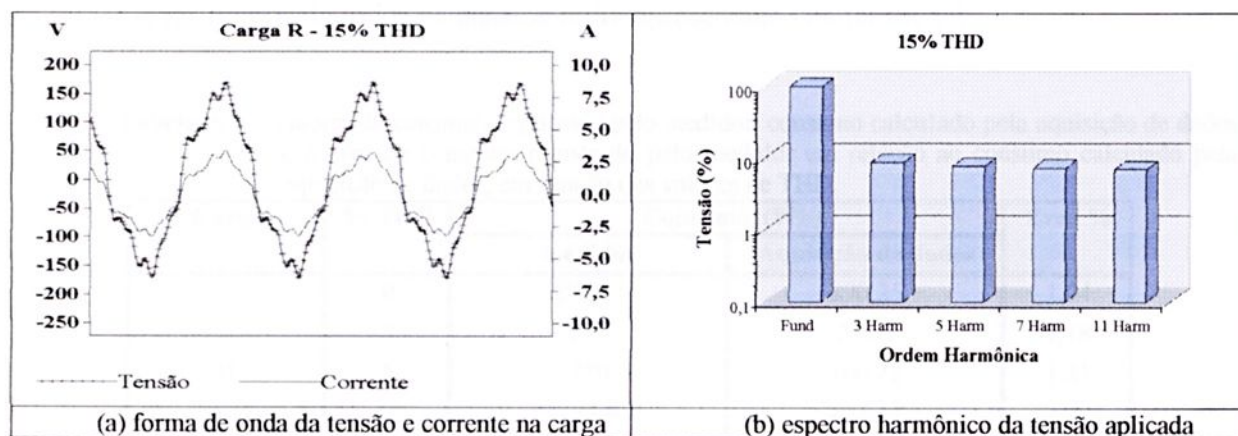


Figura 5.3 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=15%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
R	15	220,95	216,6	1,97

Para efeito de uma análise mais abrangente, foram realizadas medidas para THDs intermediárias, 3% e 10%, conforme as forma de onda das tensões mostrados nas figuras 5.4.a e 5.4.b.

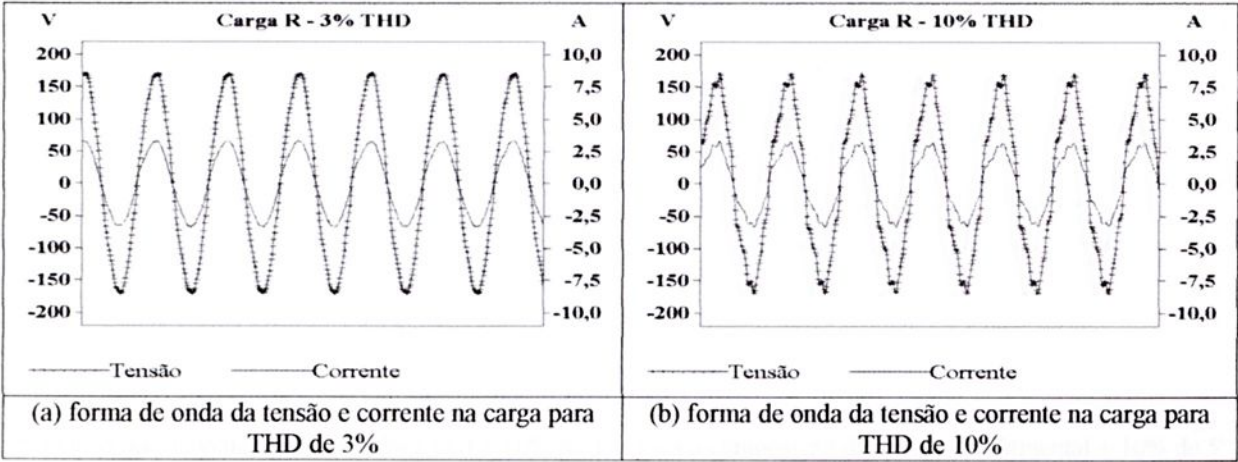


Figura 5.4 Formas de onda da tensão e da corrente para THD= 3% e 10%

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5. 1 - Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado pelo medidor em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função dos valores de THD.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
R	0	293,31	290,25	1,04
	3	279	275,7	1,18
	5	270	266,72	1,21
	10	244,8	242,35	1,00
	15	220,95	216,6	1,97

Em uma análise dos resultados obtidos, observa-se que o erro do consumo de energia, registrado pelo do medidor em relação ao obtido pela aquisição de dados foi relativamente pequeno.

A taxa de distorção harmônica total (THD) pode não retratar diretamente qual ou quais ordens harmônicas e respectivas amplitudes podem estar influenciando de maneira mais significativa nos erros do medidor. Para visualizar o efeito de harmônicas individuais foram realizados ensaios compondo somente a fundamental e a ordem harmônica desejada. As figuras abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente para os ensaios de 100% da tensão fundamental, adicionados de 10% de cada uma das seguintes ordens harmônicas, separadamente.

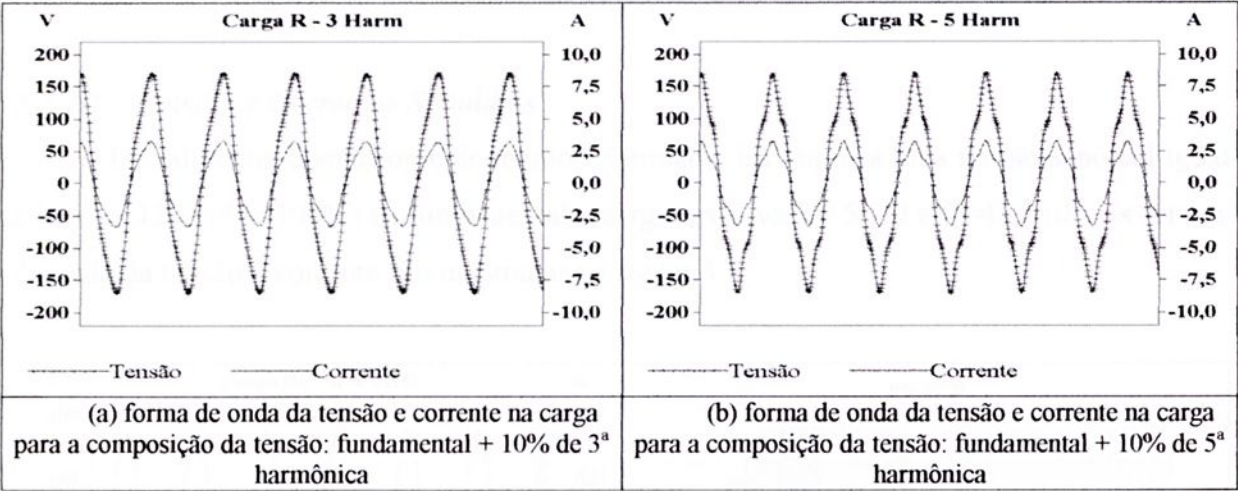


Figura 5.5 – Formas de onda da tensão composta pela fundamental e ordem harmônica individual

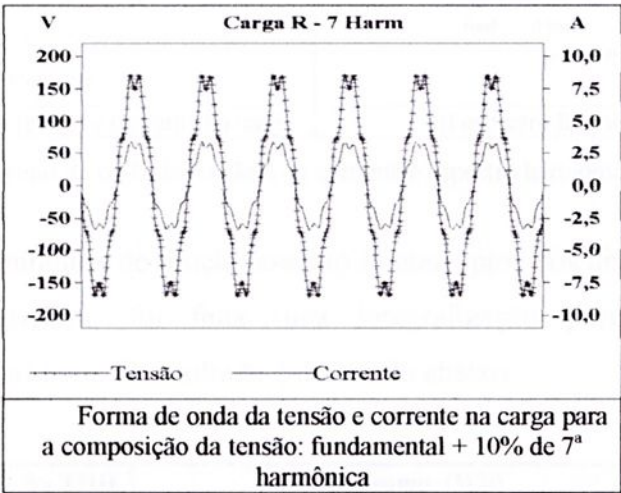


Figura 5.6 – Forma de onda da tensão com a composição: fundamental + 10% de 7ª harmônica.

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.2, que relaciona os valores de potência consumida obtidos com as harmônicas individuais e respectivos erros do consumo registrado pelo medidor em relação ao calculado pela aquisição de dados.

Tabela 5. 2 Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da ordem harmônica presente na tensão de alimentação.

Carga	Ordem Harmônica	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
R	Fund.	293,31	290,25	1,04
	3	229,05	225,22	1,67
	5	233,55	230,84	1,16
	7	271,8	269,03	1,02

5.2.2- Carga RC

5.2.2.1 Tensões e Correntes Senoidais

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal igual a $V_{eficaz} = 120$ volts (100%) da fundamental à carga resistiva $R = 50 \, \Omega$ e $C = 45,5 \, \mu F$. As formas de onda da tensão e corrente são mostradas na figura 5.7.

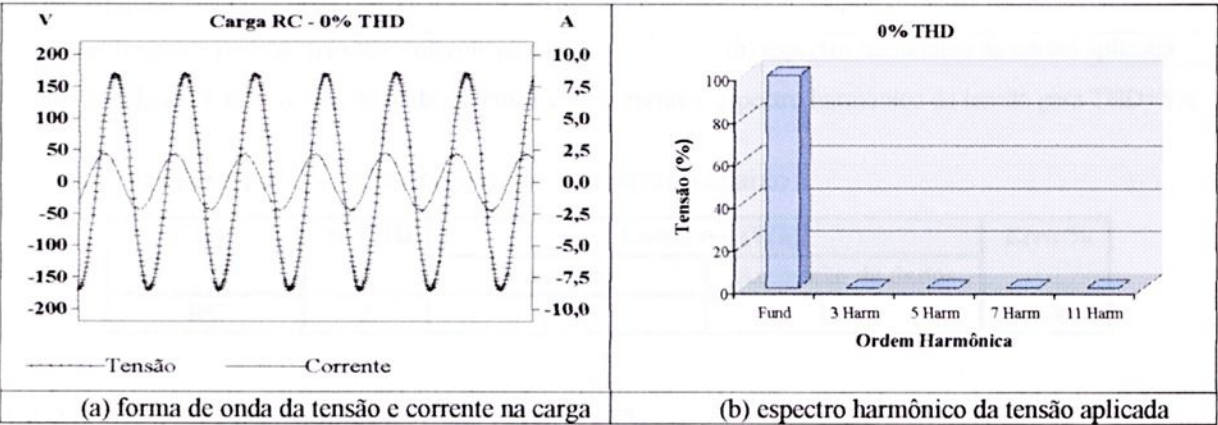


Figura 5.7 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=0%

Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a 1 (uma) hora. O resultado é mostrado abaixo.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RC	0	125,55	130	-3,54

5.2.2.2 Tensões não senoidais com THD = 5%

As figuras 5.8.a e 5.8.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 5%.

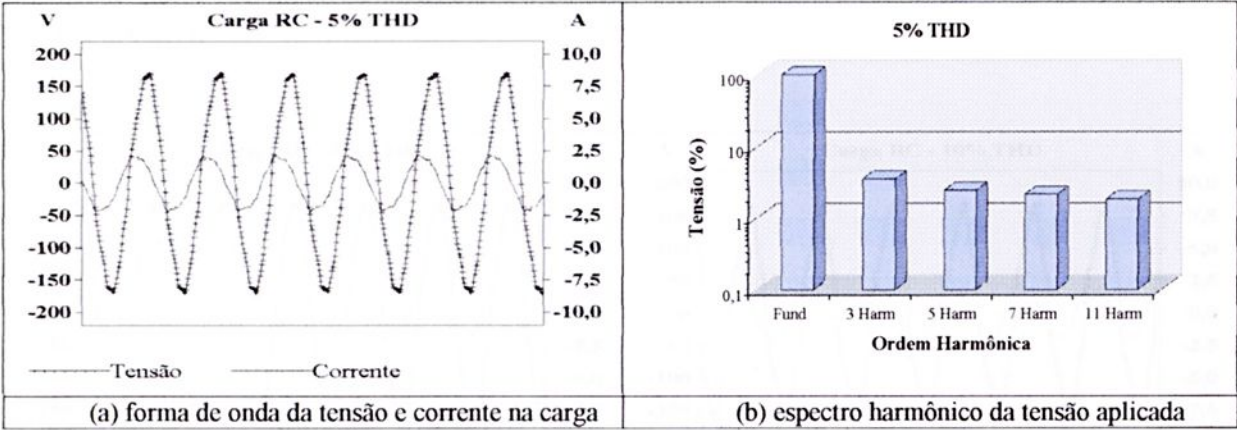


Figura 5.8 Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=5%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RC	5	120,6	125,9	-4,39

5.2.2.3 Tensões não senoidais com THD = 15%

As figuras 5.9.a e 5.9b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 15%.

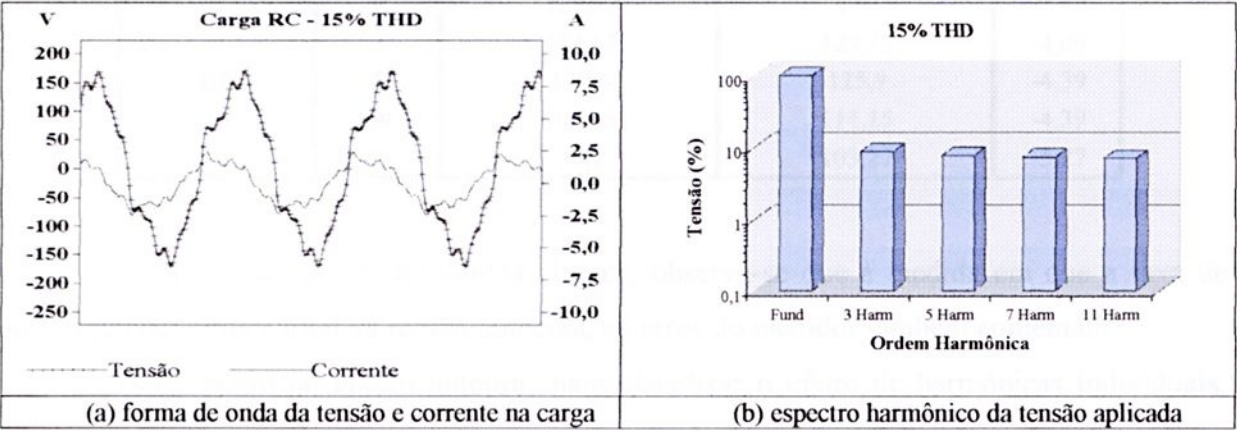


Figura 5.9 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=15%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RC	15	98,1	103,27	-5,27

Para efeito de uma análise mais abrangente, foram realizadas medidas para THDs

intermediárias, 3% e 10%, conforme as forma de onda das tensões mostrados nas figuras 5.10.a e 5.10.b.

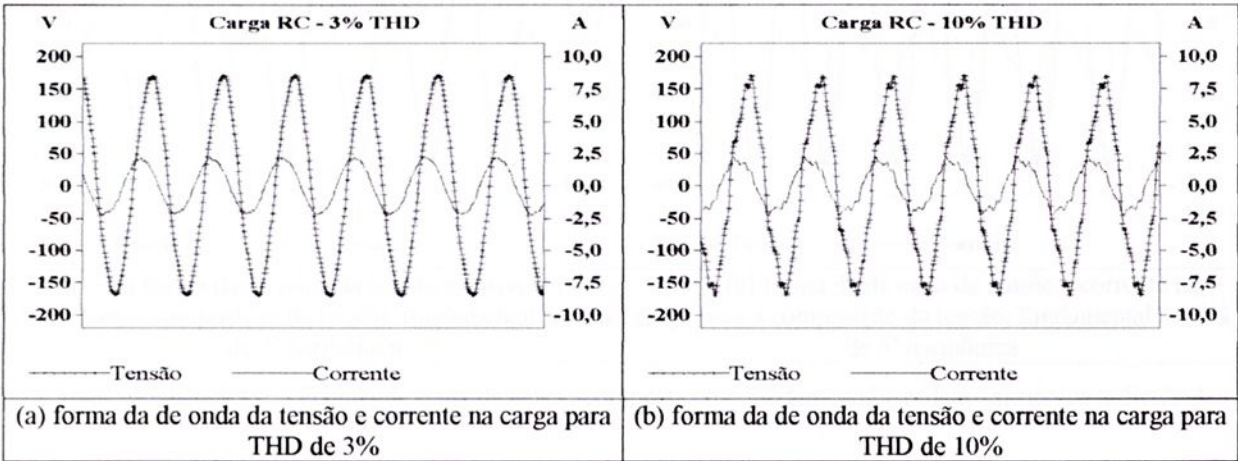


Figura 5.10 – Formas de onda da tensão e da corrente para THD= 3% e 10%

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5. 3 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado pelo medidor em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função dos valores de THD.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RC	0	125,55	130	-3,54
	3	124,65	129,75	-4,09
	5	120,6	125,9	-4,39
	10	109,35	114,15	-4,39
	15	98,1	103,27	-5,27

Em uma análise dos resultados obtidos, observa-se que à medida em que a taxa de distorção harmônica total da tensão aumenta, os erros do medidor também aumentam.

Assim como no ensaio anterior, para visualizar o efeito de harmônicas individuais, foram realizados ensaios compondo somente a fundamental e a ordem harmônica desejada. As figuras abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente para os ensaios de 100% da tensão fundamental, adicionados de 10% de cada uma das seguintes ordens harmônicas, separadamente.

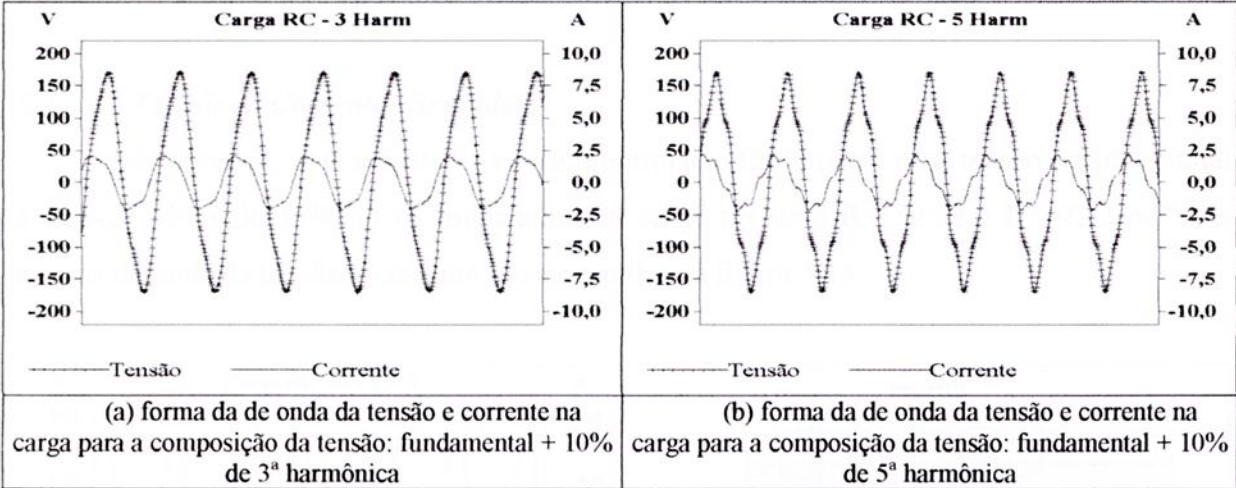


Figura 5.11 – Formas de onda da tensão composta pela fundamental e ordem harmônica individual

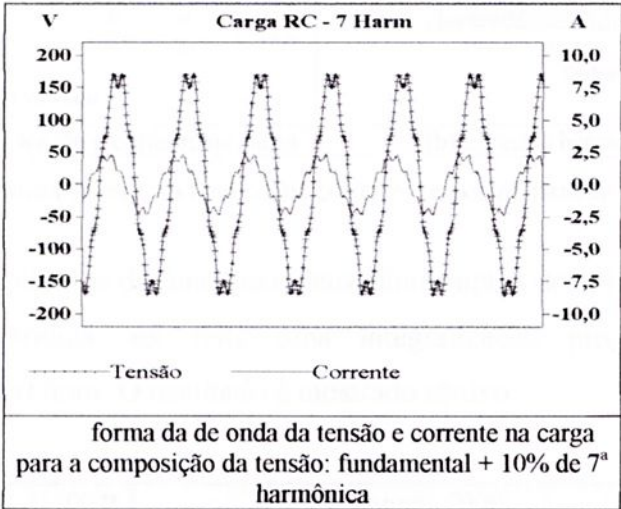


Figura 5.12 – Forma de onda da tensão com a composição: fundamental + 10% de 7ª harmônica.

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.4, que relaciona os valores de potência consumida obtidos com as harmônicas individuais e respectivos erros do consumo registrado pelo medidor em relação ao calculado pela aquisição de dados.

Tabela 5. 4 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da ordem harmônica presente na tensão de alimentação.

Carga	Ordem Harmônica	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RC	Fund.	125,55	130	-3,54
	3	117,9	122,13	-3,59
	5	103,5	110,23	-6,50
	7	120,15	127,47	-6,09

5.2.3- Carga RL

5.2.3.1 Tensões e Correntes Senoidais

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal igual a $V_{eficaz} = 120$ volts (100%) da fundamental à carga resistiva $R = 50 \, \Omega$ e $L = 102,2 \, \text{mH}$. As formas de onda da tensão e corrente são mostradas na figura 5.13.

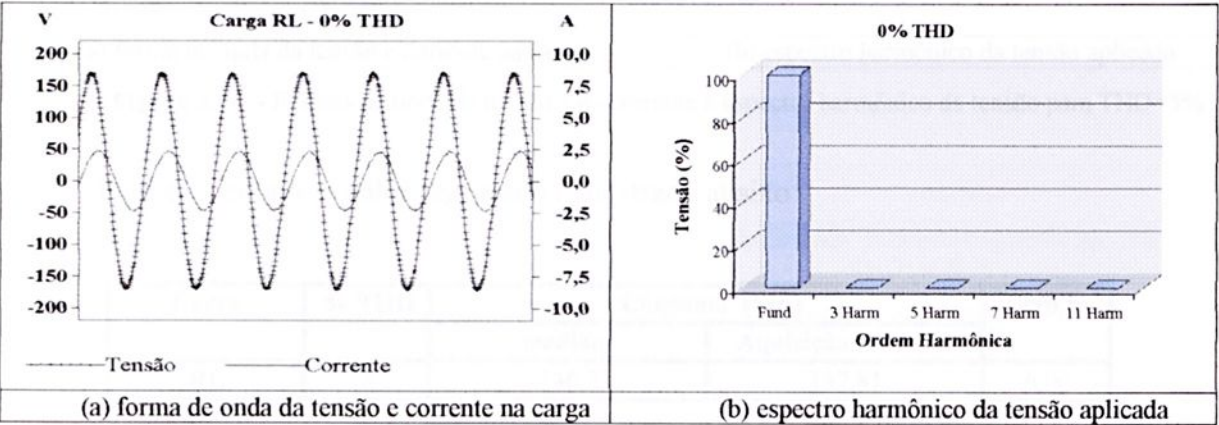


Figura 5.13 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=0%

Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a 1 (uma) hora. O resultado é mostrado abaixo.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RL	0	152,1	143,34	5,76

5.2.3.2 Tensões não senoidais com THD = 5%

As figuras 5.14.a e 5.14.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 5%.

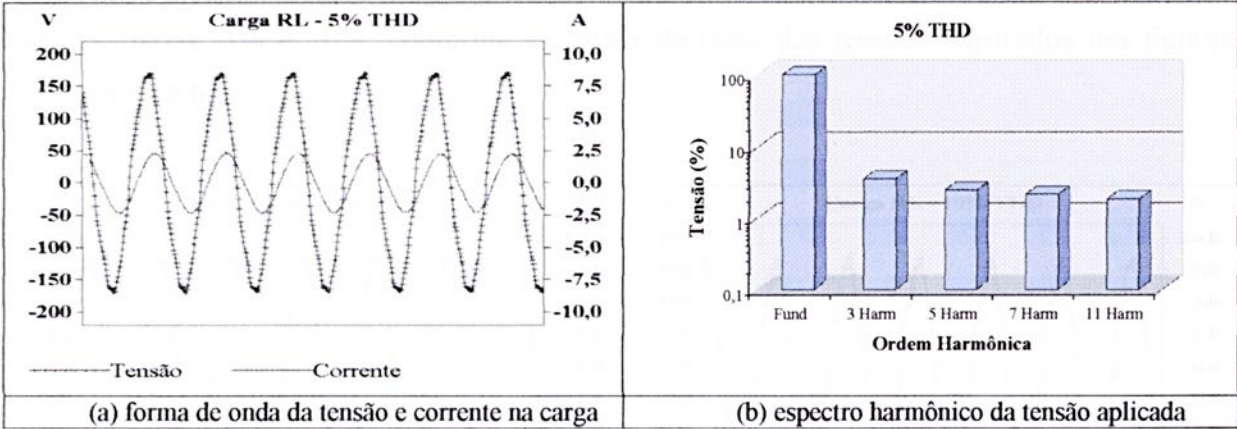


Figura 5.14 - Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=5%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RL	5	146,7	137,81	6,06

5.2.3.3 Tensões não senoidais com THD = 15%

As figuras 5.15.a e 5.15.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 15%.

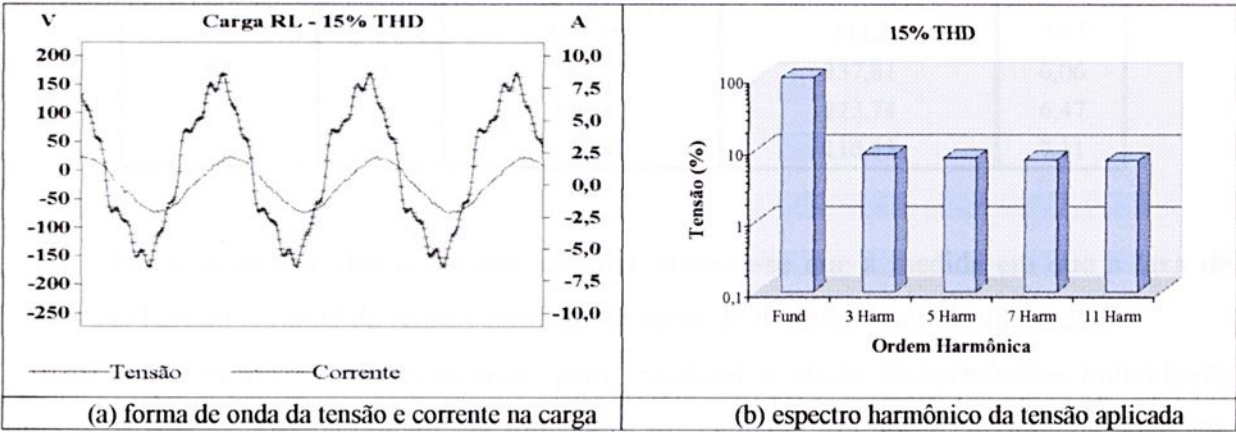


Figura 5.15 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=15%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RL	15	118,8	110,35	7,11

Para efeito de uma análise mais abrangente, foram realizadas medidas para THDs intermediárias, 3% e 10%, conforme as forma de onda das tensões mostrados nas figuras 5.16.a e 5.16.b.

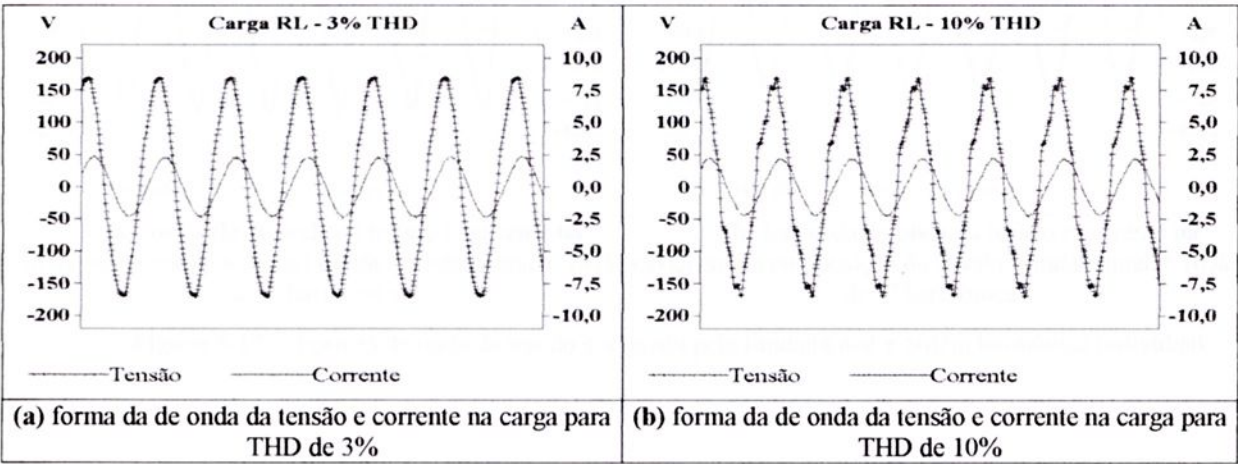


Figura 5.16 – Formas de onda da tensão e da corrente para THD= 3% e 10%

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.5.

Tabela 5. 5 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado pelo medidor em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função dos valores de THD.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RL	0	152,1	143,34	5,76
	3	150,75	142,2	5,67
	5	146,7	137,81	6,06
	10	132,3	123,74	6,47
	15	118,8	110,35	7,11

Em uma análise dos resultados obtidos, observa-se que a medida em que a taxa de distorção harmônica total da tensão aumenta, os erros do medidor também aumentam.

Assim como no ensaio anterior, para visualizar o efeito de harmônicas individuais, foram realizados ensaios compondo somente a fundamental e a ordem harmônica desejada. As figuras abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente para os ensaios de 100% da tensão fundamental, adicionados de 10% de cada uma das seguintes ordens harmônicas, separadamente.

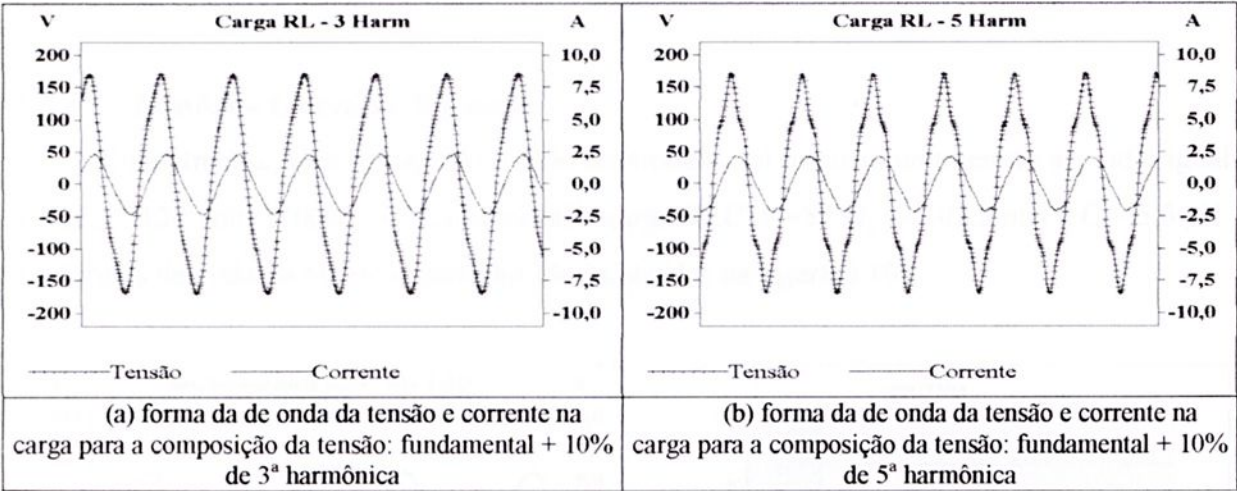


Figura 5.17 – Formas de onda da tensão composta pela fundamental e ordem harmônica individual

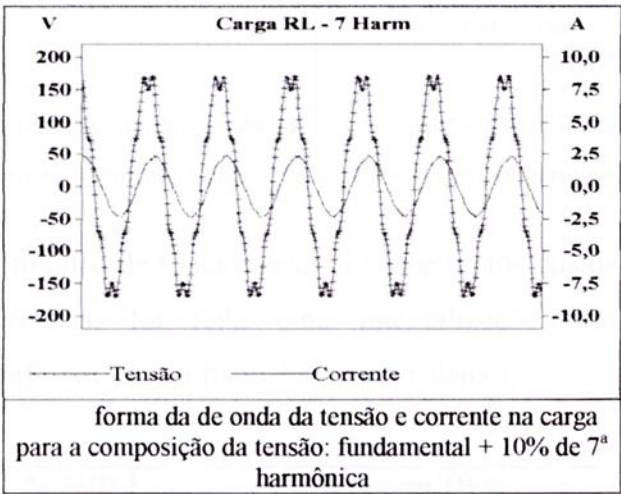


Figura 5.18 – Forma de onda da tensão com a composição: fundamental + 10% de 7ª harmônica.

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.6, que relaciona os valores de potência consumida obtidos com as harmônicas individuais e respectivos erros do consumo registrado pelo medidor em relação ao calculado pela aquisição de dados.

Tabela 5. 6 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da ordem harmônica presente na tensão de alimentação.

Carga	Ordem Harmônica	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RL	Fund.	152,1	143,34	5,76
	3	142,2	132,5	6,82
	5	126,9	117,83	7,15
	7	147,15	137,25	6,73

5.2.4- Retificador Monofásico de Meia Onda

5.2.4.1 Tensões e Correntes Senoidais

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal igual a $V_{eficaz}= 120$ volts (100%) da fundamental à carga RLC, $R=50\ \Omega$, $L=102,2\text{ mH}$ e $C=45,5\ \mu\text{F}$. As formas de onda da tensão e corrente são mostradas na figura 5.19.

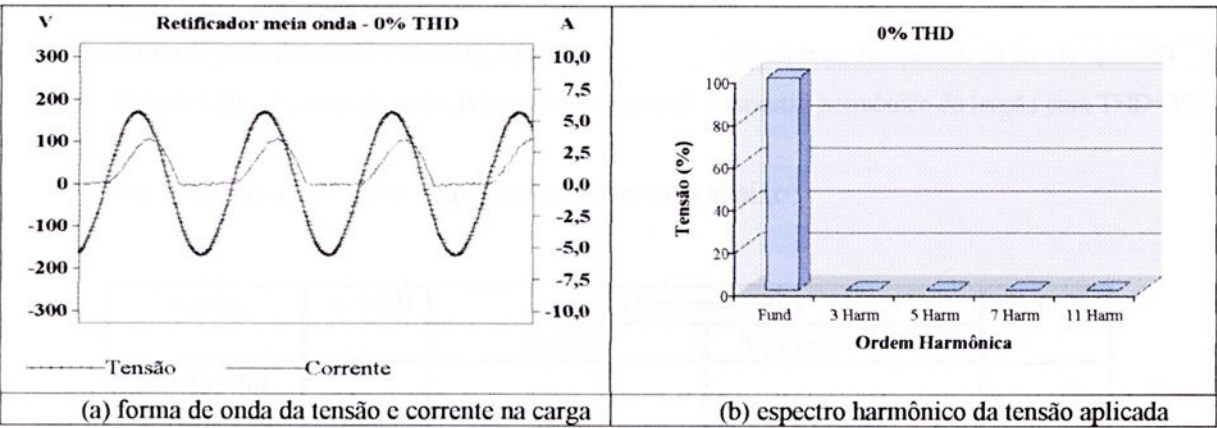


Figura 5.19 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=0%

Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a 1 (uma) hora. O resultado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Meia-Onda	0	126,45	124,55	1,50

5.2.4.2 Tensões não senoidais com THD = 5%

As figuras 5.20.a e 5.20.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 5%.

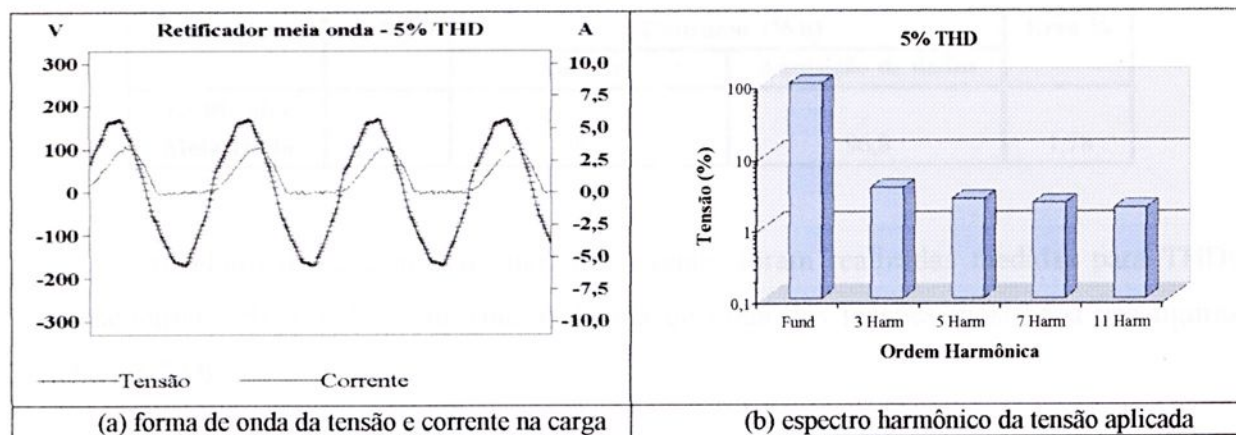


Figura 5.20 - Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=5%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Meia-Onda	5	121,05	118,88	1,79

5.2.4.3 Tensões não senoidais com THD = 15%

As figuras 5.21.a e 5.21.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 15%.

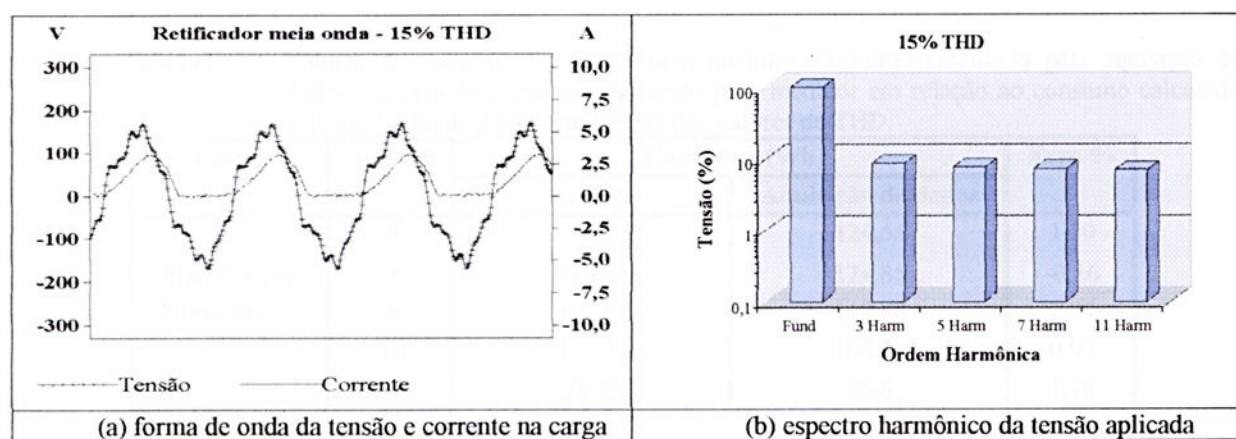


Figura 5.21 - Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=15%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Meia-Onda	15	98,55	96,8	1,78

Para efeito de uma análise mais abrangente, foram realizadas medidas para THDs intermediárias, 3% e 10%, conforme as forma de onda das tensões mostrados nas figuras 5.22.a e 5.22.b.

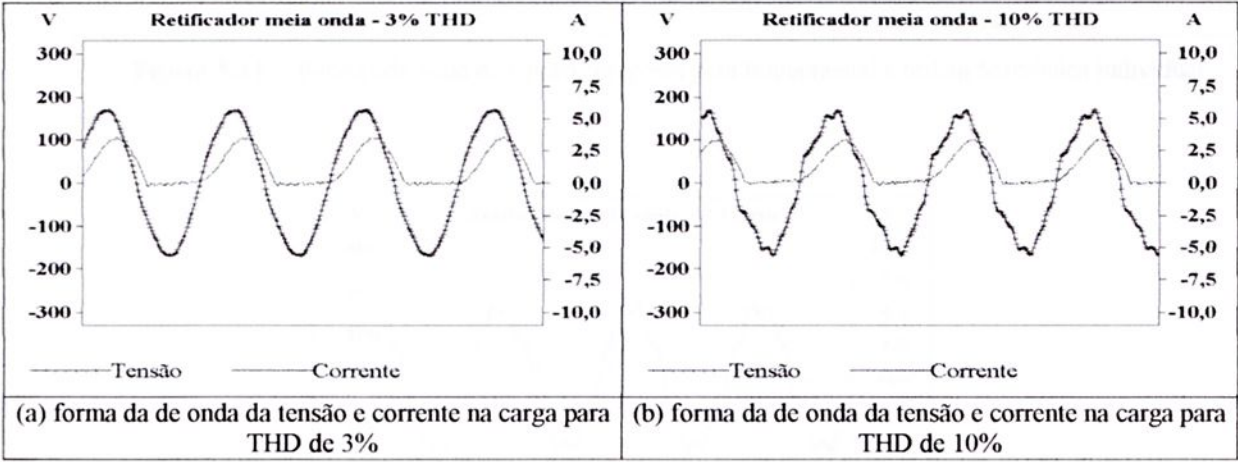


Figura 5.22 – Formas de onda da tensão e da corrente para THD= 3% e 10%

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5. 7 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado pelo medidor em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função dos valores de THD.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Meia-Onda	0	126,45	124,55	1,50
	3	124,65	124,85	-0,16
	5	121,05	118,88	1,79
	10	109,35	108,29	0,97
	15	98,55	96,8	1,78

Assim como no ensaio anterior, para visualizar o efeito de harmônicas individuais, foram realizados ensaios compondo somente a fundamental e a ordem harmônica desejada. As figuras abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente para os ensaios de 100% da tensão fundamental, adicionados de 10% de cada uma das seguintes ordens harmônicas, separadamente.

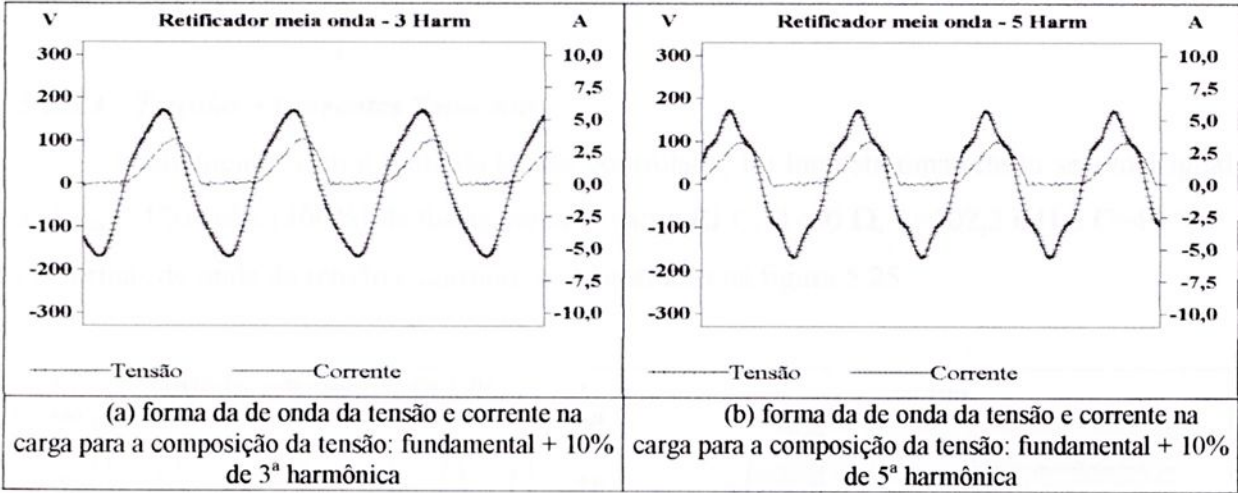


Figura 5.23 – Formas de onda da tensão composta pela fundamental e ordem harmônica individual

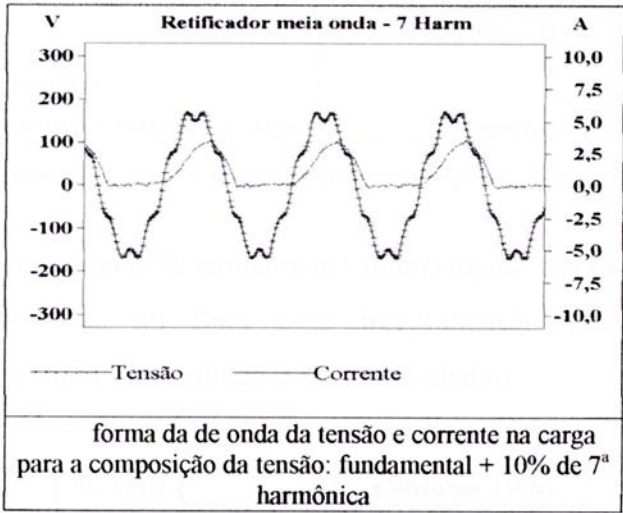


Figura 5.24 – Forma de onda da tensão com a composição: fundamental + 10% de 7ª harmônica.

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.8, que relaciona os valores de potência consumida obtidos com as harmônicas individuais e respectivos desvios de leitura com relação a onda senoidal pura.

Tabela 5. 8 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da ordem harmônica presente na tensão de alimentação.

Carga	Ordem Harmônica	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Meia Onda	Fund.	126,45	124,55	1,50
	3	116,1	114,9	1,03
	5	104,4	104,78	-0,36
	7	121,95	120,38	1,29

5.2.5- Retificador Monofásico de Onda Completa

5.2.5.1 Tensões e Correntes Senoidais

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal igual a $V_{eficaz}= 120$ volts (100%) da fundamental à carga RLC, $R=50\ \Omega$, $L=102,2\text{ mH}$ e $C=45,5\mu\text{F}$. As formas de onda da tensão e corrente são mostradas na figura 5.25.

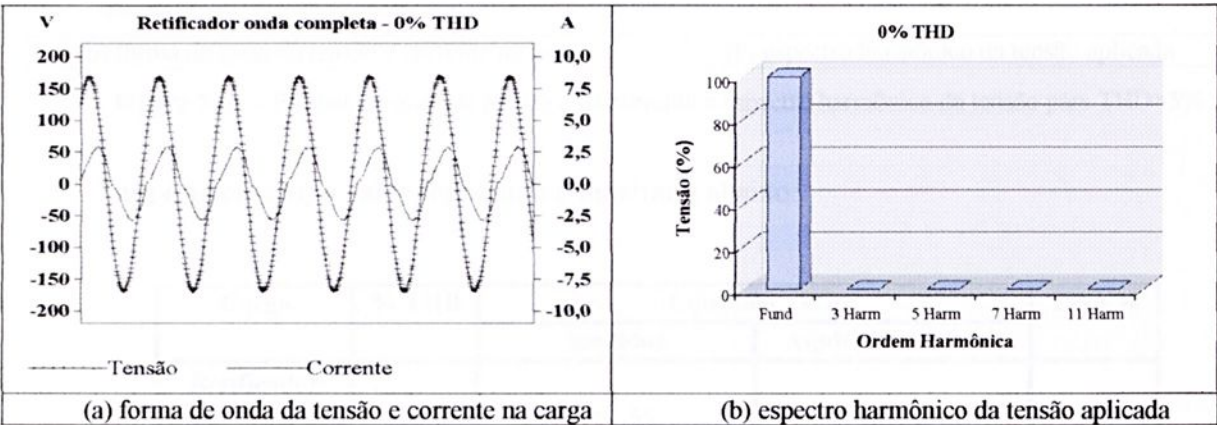


Figura 5.25 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=0%

Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a 1 (uma) hora. O resultado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Onda Completa	0	170,55	166,99	2,09

5.2.5.2 Tensões não senoidais com THD = 5%

As figuras 5.26.a e 5.26.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 5%.

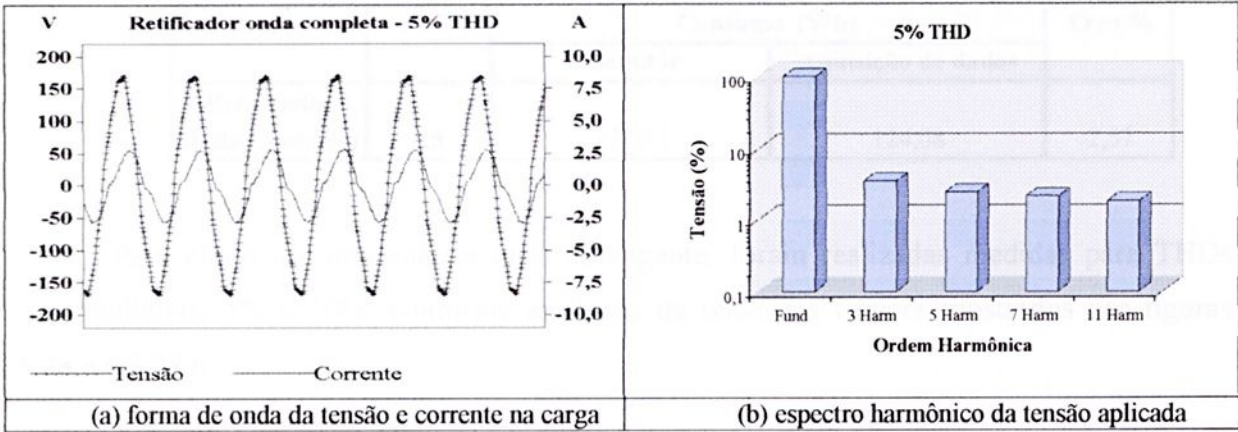


Figura 5.26 - Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=5%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Onda Completa	5	161,55	157,24	2,67

5.2.5.3 Tensões não senoidais com THD = 15%

As figuras 5.27.a e 5.27.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 15%.

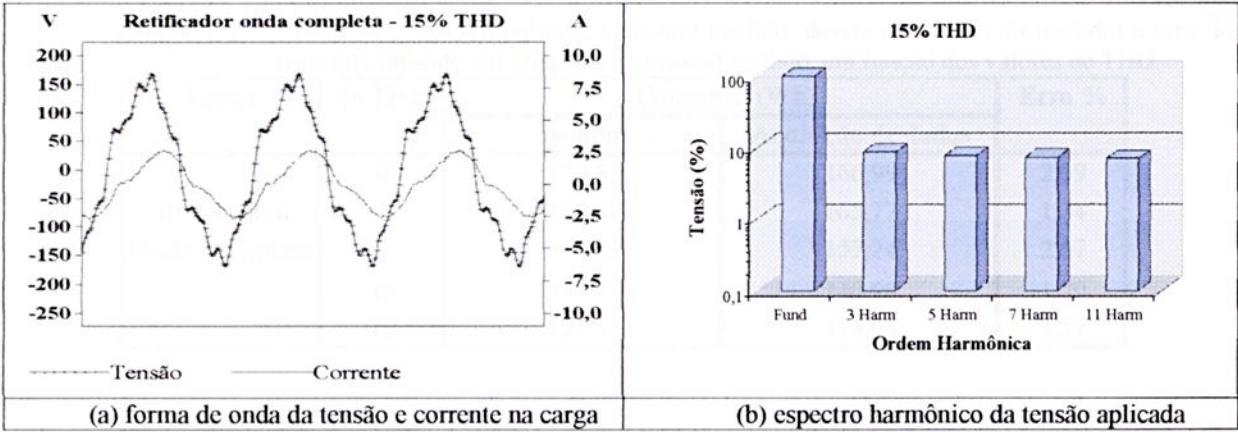


Figura 5.27 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=15%.

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado a seguir:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Onda Completa	15	127,35	124,08	2,57

Para efeito de uma análise mais abrangente, foram realizadas medidas para THDs intermediárias, 3% e 10%, conforme as forma de onda das tensões mostrados nas figuras 5.28.a e 5.28.b.

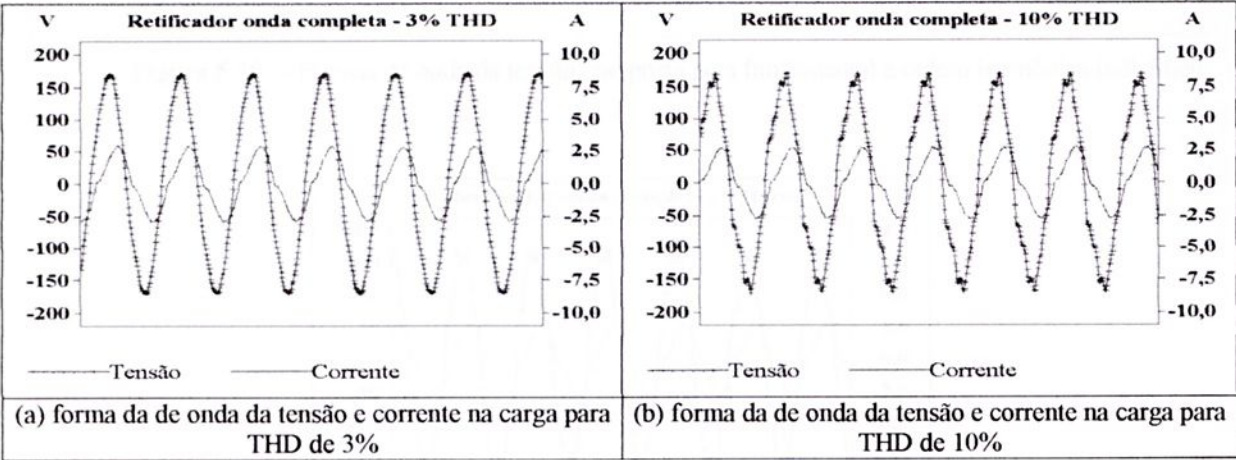


Figura 5.28 – Formas de onda da tensão e da corrente para THD= 3% e 10%

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.9.

Tabela 5. 9 – Valores de consumo pulsado, consumo medido, desvio de leitura do medidor e erro do consumo pulsado em relação ao consumo medido, em função dos valores de THD.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Onda Completa	0	170,55	166,99	2,09
	3	167,85	165,77	1,24
	5	161,55	157,24	2,67
	10	143,55	140,98	1,79
	15	127,35	124,08	2,57

Assim como no ensaio anterior, para visualizar o efeito de harmônicas individuais, foram realizados ensaios compondo somente a fundamental e a ordem harmônica desejada. As figuras abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente para os ensaios de 100% da tensão fundamental, adicionados de 10% de cada uma das seguintes ordens harmônicas, separadamente.

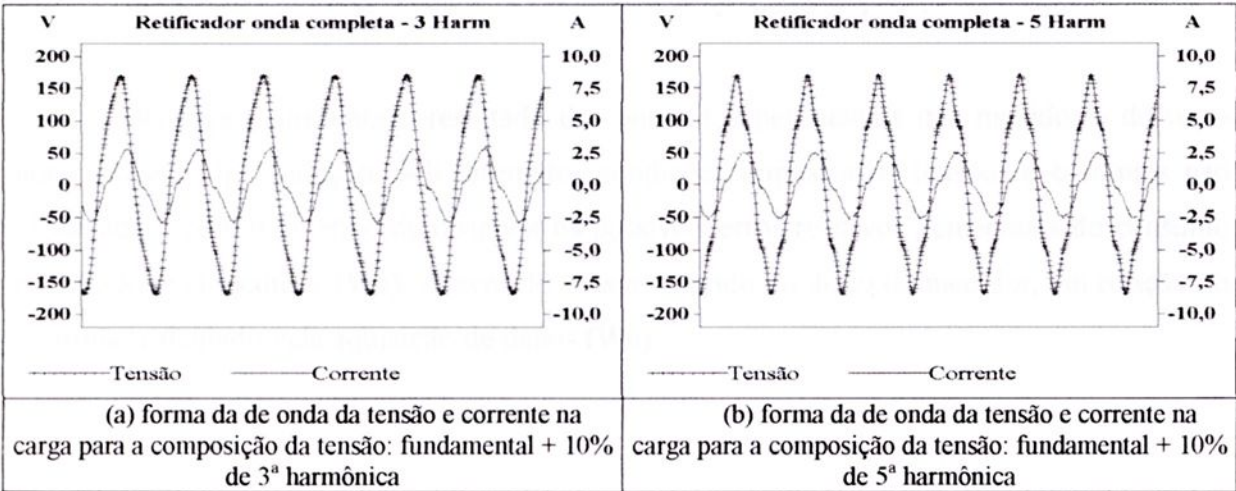


Figura 5.29 – Formas de onda da tensão composta pela fundamental e ordem harmônica individual

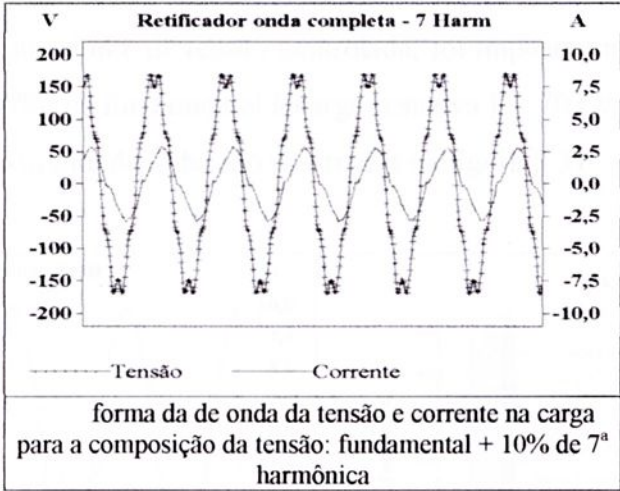


Figura 5.30 – Forma de onda da tensão com a composição: fundamental + 10% de 7ª harmônica.

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.10, que relaciona os valores de potência consumida obtidos com as harmônicas individuais e respectivos erros do consumo registrado pelo medidor em relação ao calculado pela aquisição de dados.

Tabela 5. 10 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da ordem harmônica presente na tensão de alimentação.

Carga	Ordem Harmônica	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador Onda Completa	Fund.	170,55	166,99	2,09
	3	154,35	150,28	2,64
	5	137,7	134,21	2,53
	7	162,45	159,99	1,51

5.3- Medidor Watt-Hora Trifásico Tipo Indução(MWHI)

Esta seção apresenta o resultado dos ensaios experimentais dos medidores de watt-hora trifásico tipo indução, sob diferentes condições impostas de tensões e correntes não idealizadas., com o objetivo de observar os possíveis erros relativos percentuais do consumo registrado pelo medidor (Wh), através do sensor inserido no disco do medidor, em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados (Wh).

5.3.1- Carga Resistiva

5.3.1.1 Tensões e Correntes Senoidais

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal igual a $V_{eficaz}= 120$ volts (100%) da fundamental à carga resistiva $R= 70 \Omega$ /fase. As formas de onda da tensão de fase e da corrente de linha são mostradas na figura 5.31.

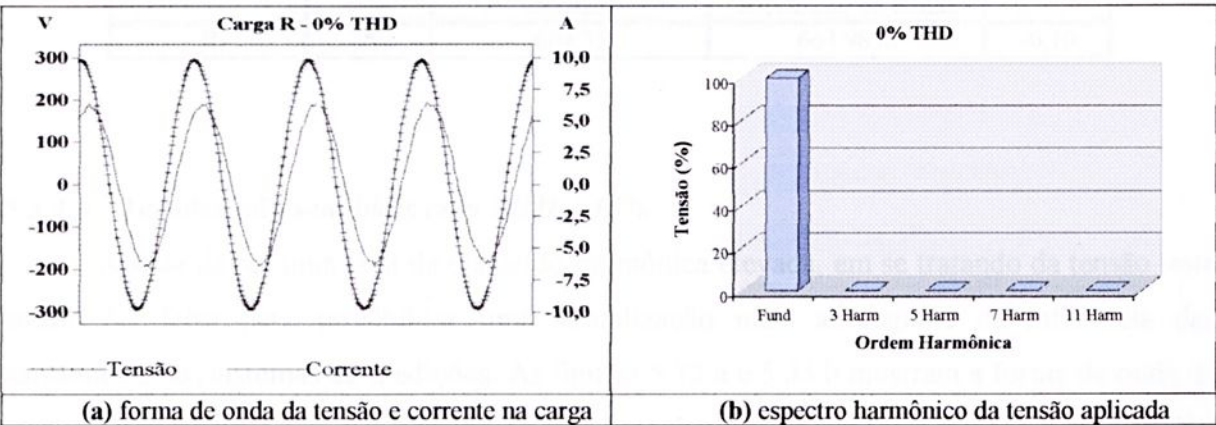


Figura 5.31 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=0%

Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a meia hora. O resultado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
R	0	703,05	706,3338	-0,47

5.3.1.2 Tensões não senoidais com THD = 5%

As figuras 5.32.a e 5.32.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 5%.

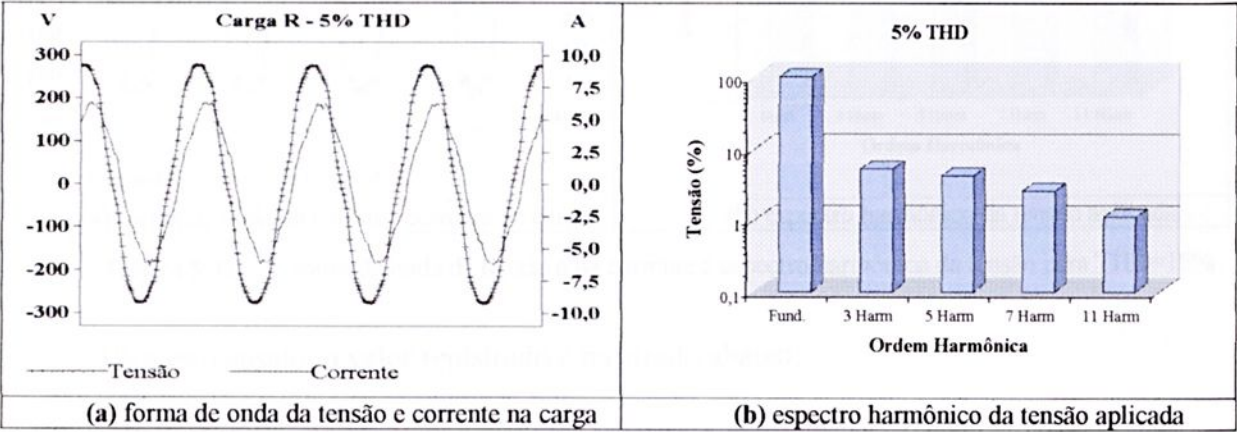


Figura 5.32 - Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=5%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
R	5	664,35	664,9896	-0,10

5.3.1.3 Tensões não senoidais com THD = 15%

Apesar de ser uma taxa de distorção harmônica elevada, em se tratando da tensão, este ensaio foi feito para possibilitar uma visualização mais abrangente da influência das harmônicas nos sistemas de medições. As figuras 5.33.a e 5.33.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 15%.

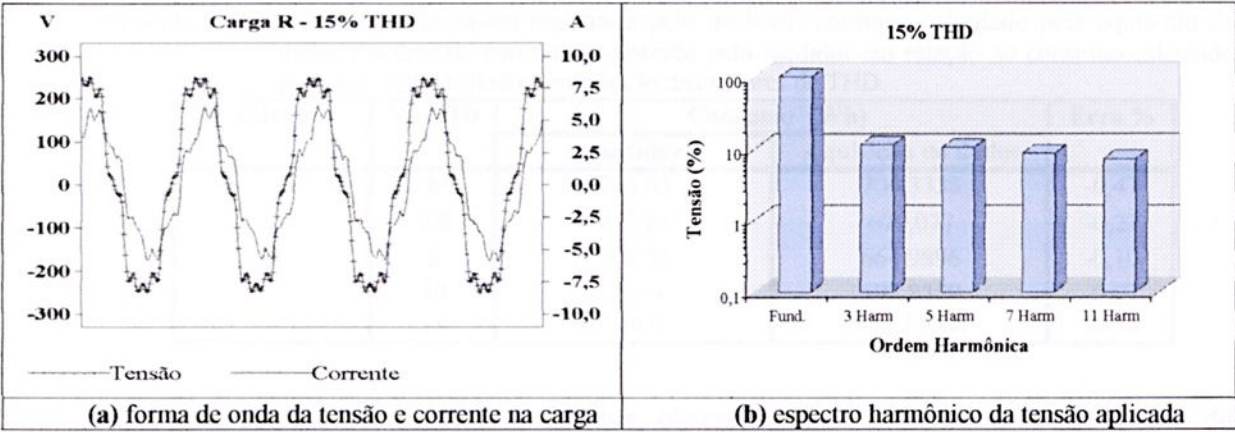


Figura 5.33 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=15%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
R	15	528,9	530,72064	-0,34

Para efeito de uma análise mais abrangente, foram realizadas medidas para THDs intermediárias, 3,5% e 10%, conforme as forma de onda das tensões mostrados nas figuras 5.34.a e 5.34.b.

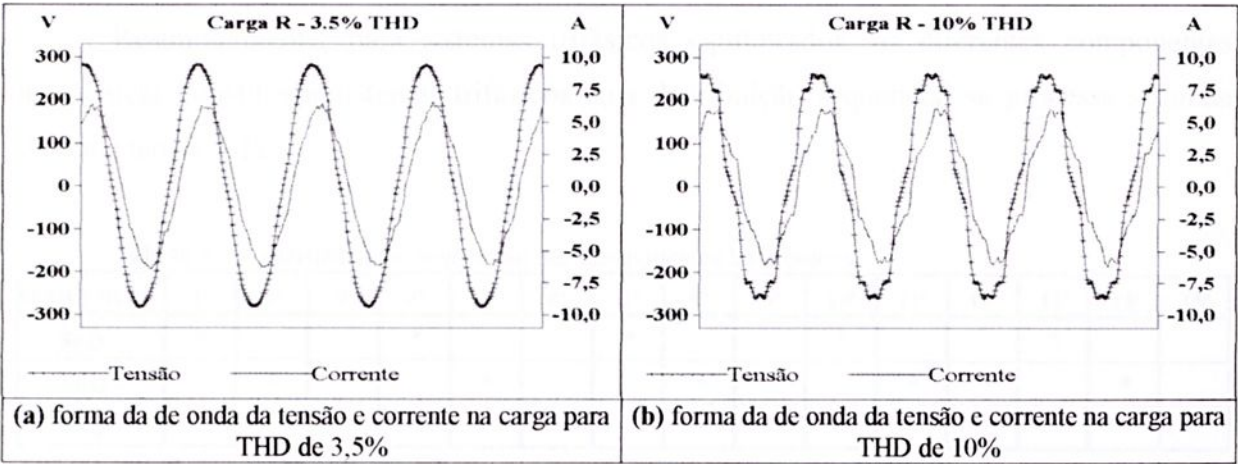


Figura 5.34 – Formas de onda da tensão e da corrente para THD= 3,5% e 10%

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.11.

Tabela 5. 11 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado pelo medidor em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função dos valores de THD.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
R	0	703,05	706,3338	-0,47
	3,5	677,25	679,077	-0,27
	5	664,35	664,9896	-0,10
	10	593,4	593,8359	-0,07
	15	528,9	530,72064	-0,34

Em uma análise dos resultados obtidos, observa-se que a medida em que a taxa de distorção harmônica total da tensão aumenta, os erros nas leituras do medidor variam. O sinal negativo no valor do erro significa que o medidor está registrando um valor potência consumida menor do que o valor obtido pela aquisição de dados.

A taxa de distorção harmônica total pode não retratar diretamente qual ou quais ordens harmônicas e respectivas amplitudes podem estar influenciando de maneira mais significativa nos desvios da leitura. Para visualizar o efeito de harmônicas individuais foram realizados ensaios compondo somente a fundamental e a ordem harmônica desejada. As figuras abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente para os ensaios de 100% da tensão fundamental, adicionados de 10% de cada uma das seguintes ordens harmônicas, separadamente. Foram realizados ensaios com uma ordem harmônica de sequência positiva, uma de sequência negativa e uma de sequência nula.

Resumidamente, para sistemas trifásicos equilibrados, as diferentes componentes harmônicas constituem sistemas trifásicos cuja distribuição sequencial se processa segunda ilustra a tabela 5.12.

Tabela 5. 12 - Distribuição sequencial dos componentes harmônicos.

SEQUÊNCIA	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª
SEQ +	*			*			*			*			*		
SEQ -		*			*			*			*			*	
SEQ 0			*			*			*			*			*

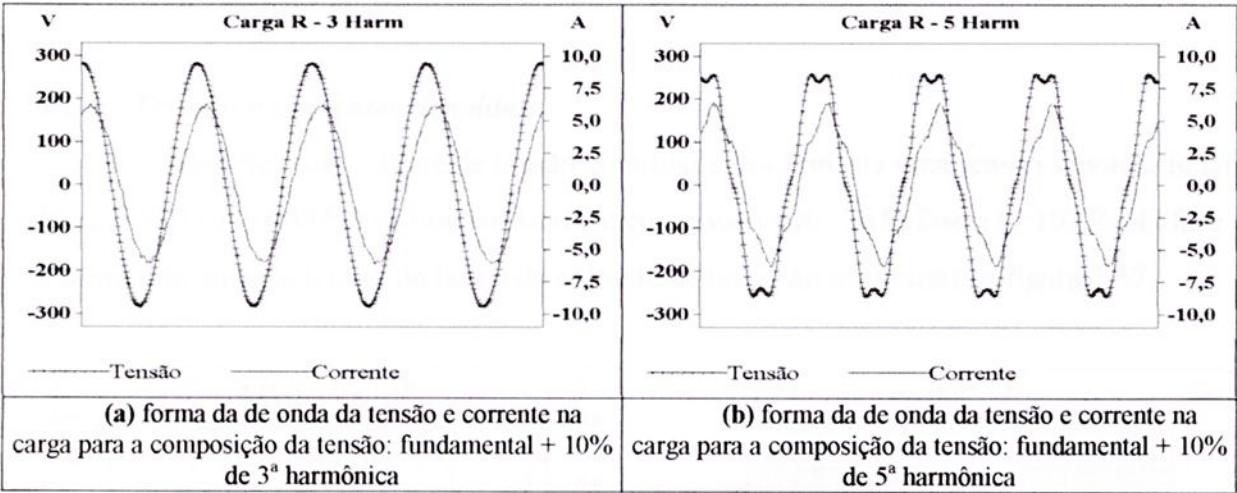


Figura 5.35 – Formas de onda da tensão composta pela fundamental e ordem harmônica individual

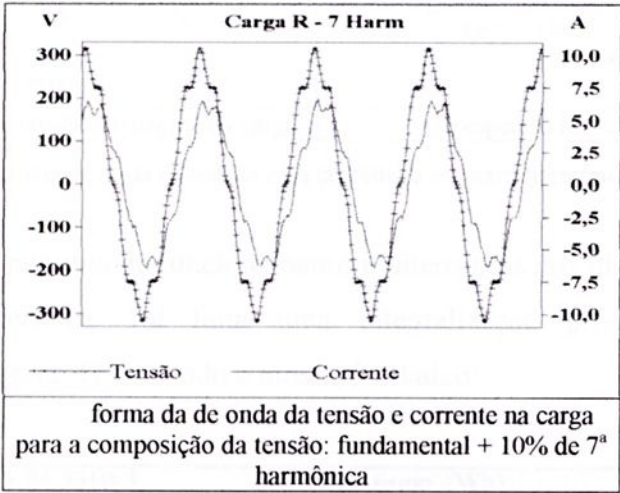


Figura 5.36 – Forma de onda da tensão com a composição: fundamental + 10% de 7ª harmônica.

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.13, que relaciona os valores de potência consumida obtidos com as harmônicas individuais e respectivos erros do medidor em relação ao valor de potência consumida obtido através da aquisição de dados.

Tabela 5. 13 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da ordem harmônica presente na tensão de alimentação.

Carga	Ordem Harmônica	Seq. de Fase	Consumo (Wh)		Erro %
			medidor	Aquisição de dados	
R	Fund.	(+)	703,05	706,33	-0,47
	3	(0)	657,90	657,62	0,04
	5	(-)	586,95	586,69	0,04
	7	(+)	683,70	690,49	-0,99

5.3.2- Carga RL

5.3.2.1 Tensões e Correntes Senoidais

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal igual a $V_{eficaz} = 120$ volts (100%) da fundamental à carga resistiva $R = 70 \Omega$ /fase e $L = 102,2$ mH/fase. As formas de onda da tensão de fase e da corrente de linha são mostradas na figura 5.37.

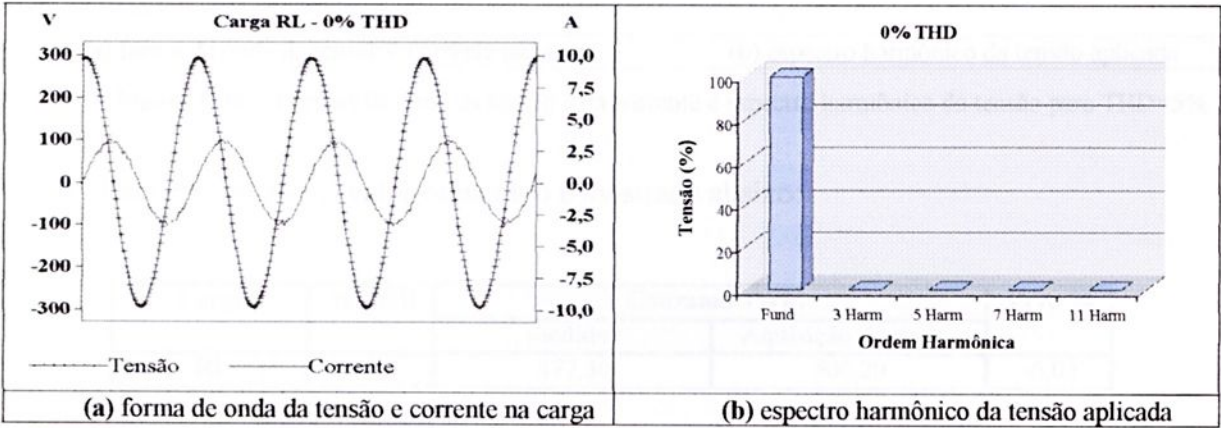


Figura 5.37 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=0%

Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a meia hora. O resultado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RL	0	509,55	545,31	-7,02

5.3.2.2 Tensões não senoidais com THD = 5%

As figuras 5.38.a e 5.38.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 5%.

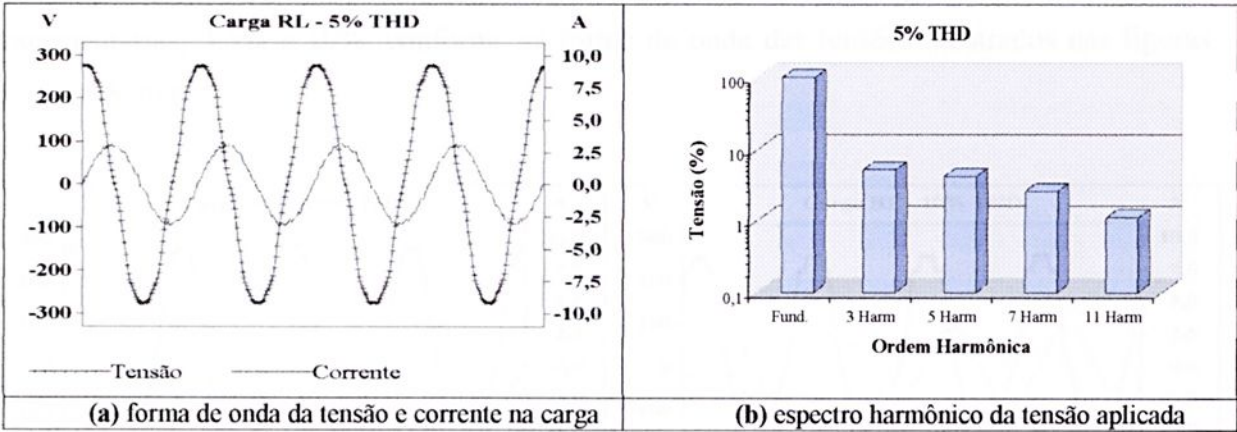


Figura 5.38 - Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=5%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RL	5	477,30	506,20	-6,05

5.3.2.3 Tensões não senoidais com THD = 15%

As figuras 5.39.a e 5.39.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 15%.

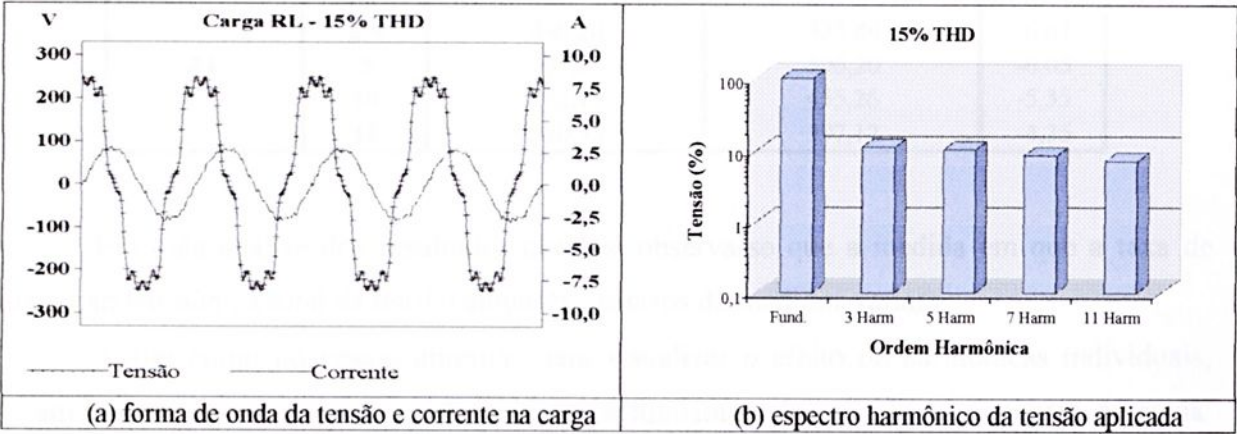


Figura 5.39 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=15%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RL	15	380,55	397,12	-4,35

Para efeito de uma análise mais abrangente, foram realizadas medidas para THDs intermediárias, 3,5% e 10%, conforme as forma de onda das tensões mostrados nas figuras 5.40.a e 5.40.b.

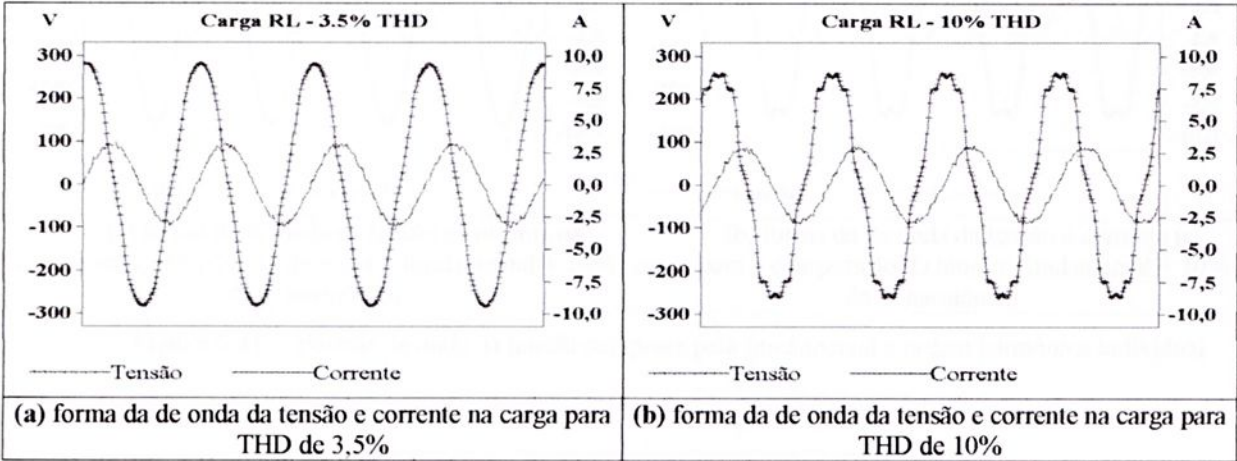


Figura 5.40 – Formas de onda da tensão e da corrente para THD= 3,5% e 10%

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.14.

Tabela 5. 14 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado pelo medidor em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função dos valores de THD.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
RL	0	509,55	545,31	-7,02
	3,5	490,20	522,89	-6,67
	5	477,30	506,20	-6,05
	10	432,15	455,26	-5,35
	15	380,55	397,12	-4,35

Em uma análise dos resultados obtidos, observa-se que a medida em que a taxa de distorção harmônica total da tensão aumenta, os erros do medidor variam.

Assim como no ensaio anterior, para visualizar o efeito de harmônicas individuais, foram realizados ensaios compondo somente a fundamental e a ordem harmônica desejada. As figuras abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente para os ensaios de 100% da tensão fundamental, adicionados de 10% de cada uma das seguintes ordens harmônicas, separadamente. Foram realizados ensaios com uma ordem harmônica de sequência positiva, uma de sequência negativa e uma de sequência nula.

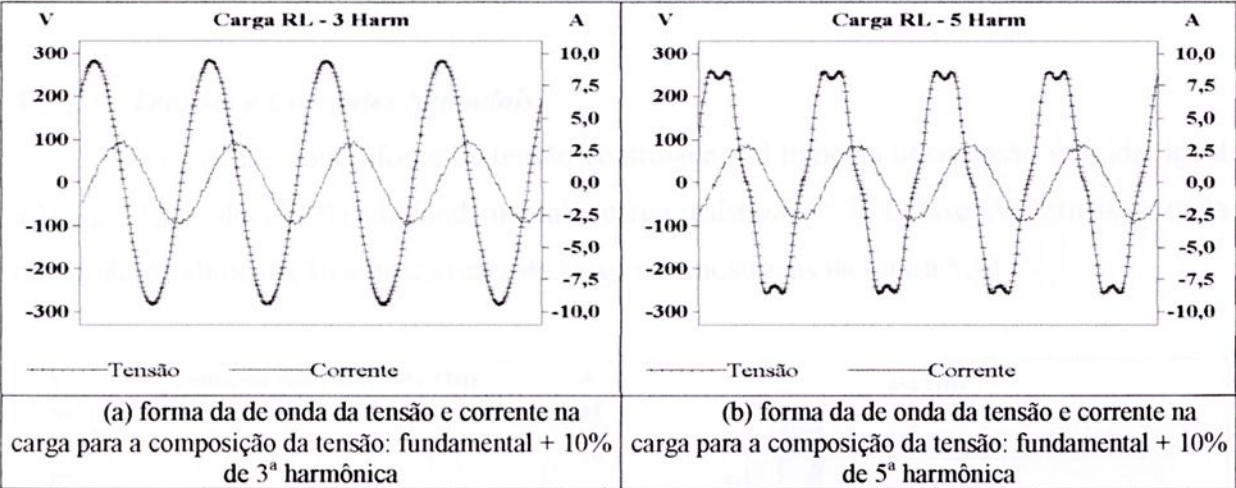


Figura 5.41 – Formas de onda da tensão composta pela fundamental e ordem harmônica individual

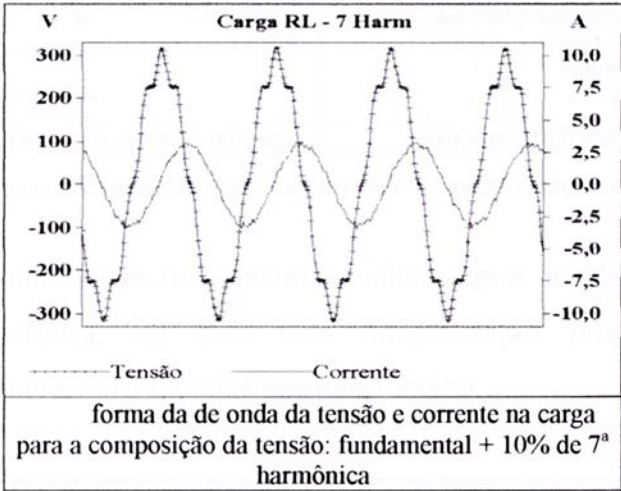


Figura 5.42 – Forma de onda da tensão com a composição: fundamental + 10% de 7ª harmônica.

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.15, que relaciona os valores de potência consumida obtidos com as harmônicas individuais e respectivos erros de registro da potência consumida no medidor em com relação à potência consumida obtida pela aquisição de dados.

Tabela 5. 15 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da ordem harmônica presente na tensão de alimentação.

Carga	Ordem Harmônica	Seq. de Fase	Consumo (Wh)		Erro %
			medidor	Aquisição de dados	
RL	Fund.	(+)	509,55	545,31	-7,02
	3	(0)	477,30	505,72	-5,95
	5	(-)	425,70	446,91	-4,98
	7	(+)	490,20	522,42	-6,57

5.3.3- Retificador Trifásico de Seis Pulsos

5.3.3.1 Tensões e Correntes Senoidais

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal igual a $V_{eficaz} = 120$ volts (100%) da fundamental à carga resistiva $R = 70 \Omega/fase$. As formas de onda da tensão de alimentação e da corrente de carga são mostradas na figura 5.43.

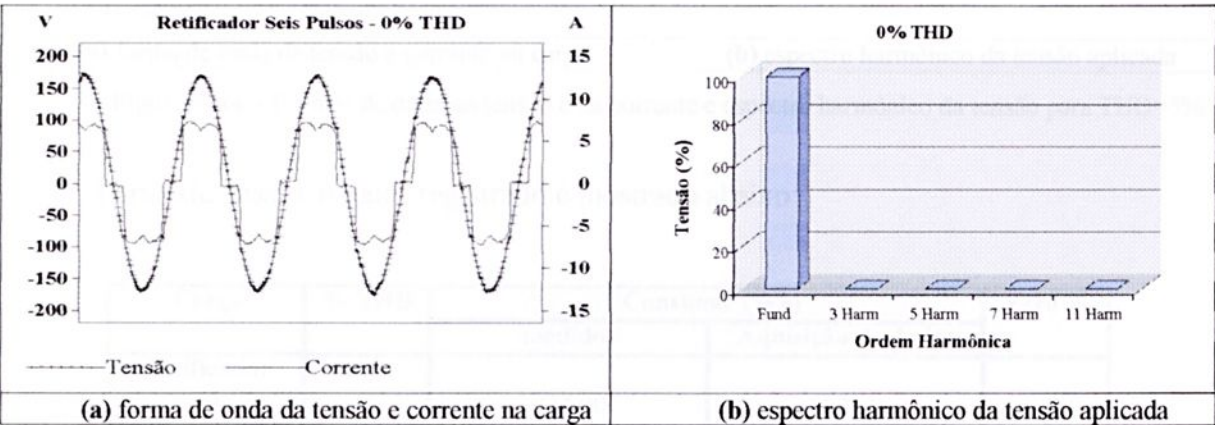


Figura 5.43 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=0%

Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a meia hora. O resultado é mostrado abaixo.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador 6 Pulsos	0	838,50	969,94	-15,68

5.3.3.2 Tensões não senoidais com THD = 5%

As figuras 5.44.a e 5.44.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 5%.

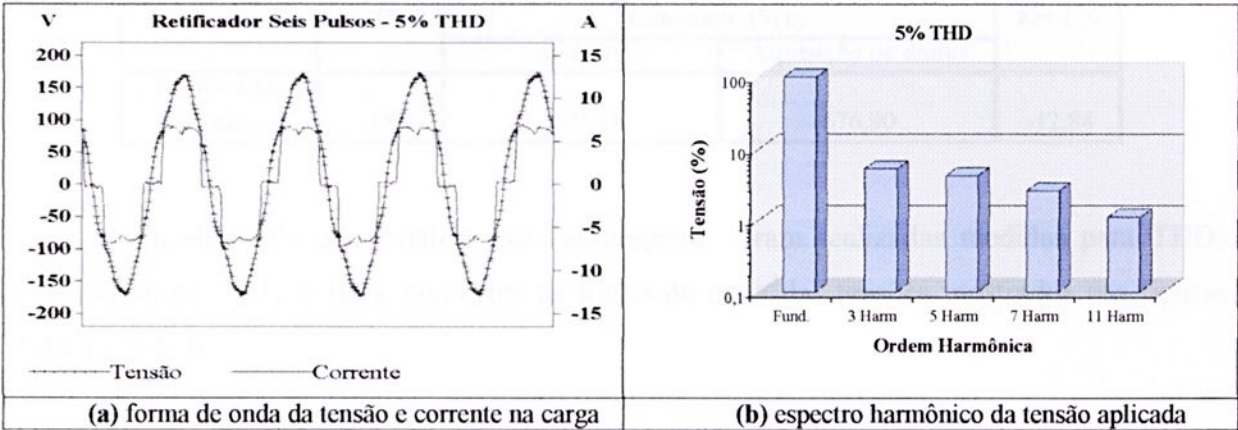


Figura 5.44 - Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=5%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado abaixo:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador 6 Pulsos	5	774,00	887,59	-14,68

5.3.3.3 Tensões não senoidais com THD = 15%

As figuras 5.45.a e 5.45.b mostram a forma de onda da tensão e o respectivo espectro harmônico para uma distorção harmônica total de tensão (THD) de 15%.

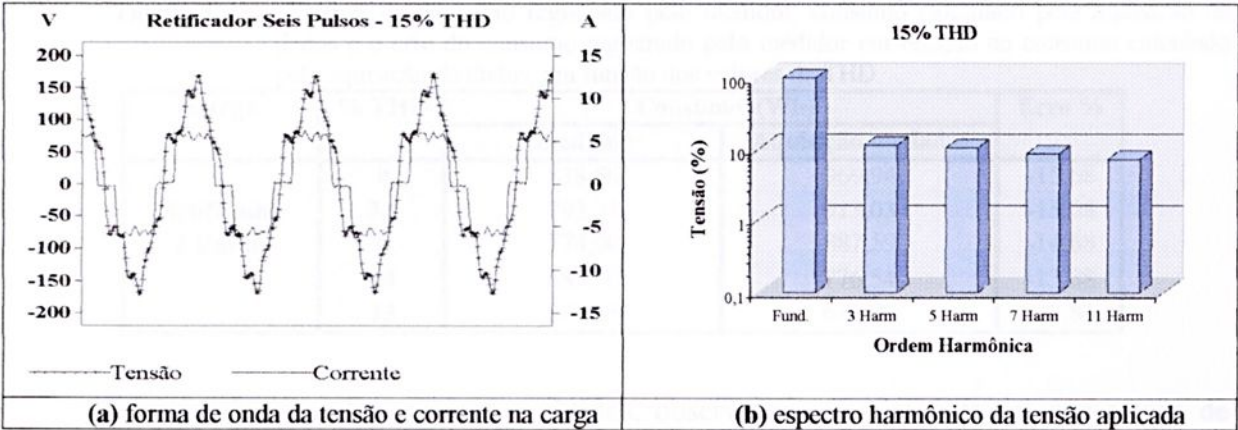


Figura 5.45 – Formas de onda da tensão e da corrente e espectro harmônico da tensão para THD=15%

Para este ensaio, o valor registrado é mostrado a seguir:

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador 6 Pulsos	15	599,85	676,90	-12,84

Para efeito de uma análise mais abrangente, foram realizadas medidas para THDs intermediárias, 3,5% e 10%, conforme as forma de onda das tensões mostrados nas figuras 5.46.a e 5.46.b.

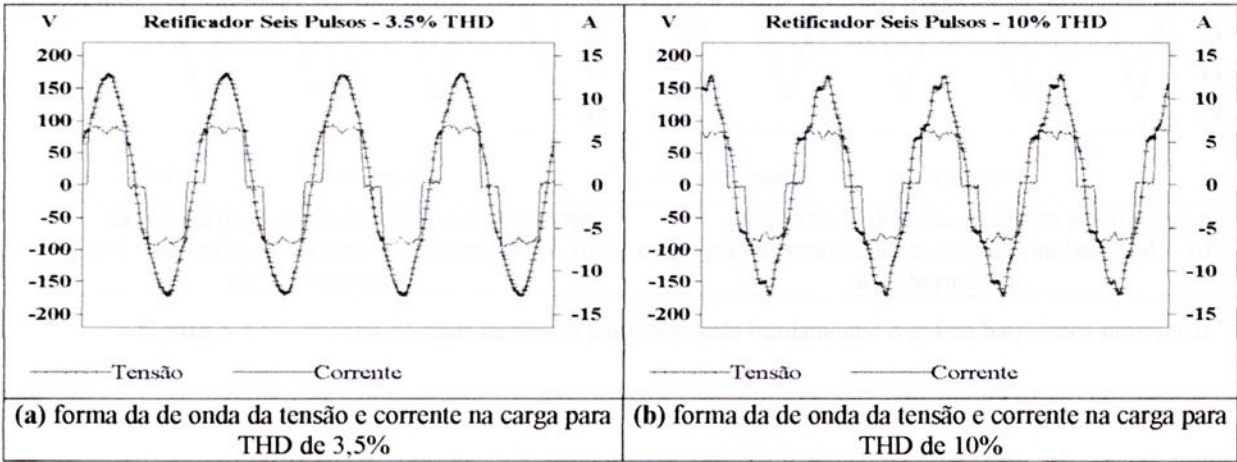


Figura 5.46 – Formas de onda da tensão e da corrente para THD= 3,5% e 10%

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.16.

Tabela 5. 16 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado pelo medidor em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função dos valores de THD.

Carga	% THD	Consumo (Wh)		Erro %
		medidor	Aquisição de dados	
Retificador 6 Pulsos	0	838,50	969,94	-15,68
	3,5	793,35	913,03	-15,08
	5	774,00	887,59	-14,68
	10	683,70	776,54	-13,58
	15	599,85	676,90	-12,84

Em uma análise dos resultados obtidos, observa-se que a medida em que a taxa de distorção harmônica total da tensão aumenta, os erros do medidor variam. Este tipo de carga, apesar de muito comumente ser encontrada ligada à rede elétrica, não possui características de tensão e corrente comum. Na prática estão ligadas na rede cargas mistas.

Assim como no ensaio anterior, para visualizar o efeito de harmônicas individuais, foram realizados ensaios compondo somente a fundamental e a ordem harmônica desejada.

As figuras abaixo mostram as formas de onda de tensão e corrente para os ensaios de 100% da tensão fundamental, adicionados de 10% de cada uma das seguintes ordens harmônicas, separadamente. Foram realizados ensaios com uma ordem harmônica de sequência positiva, uma de sequência negativa e uma de sequência nula.

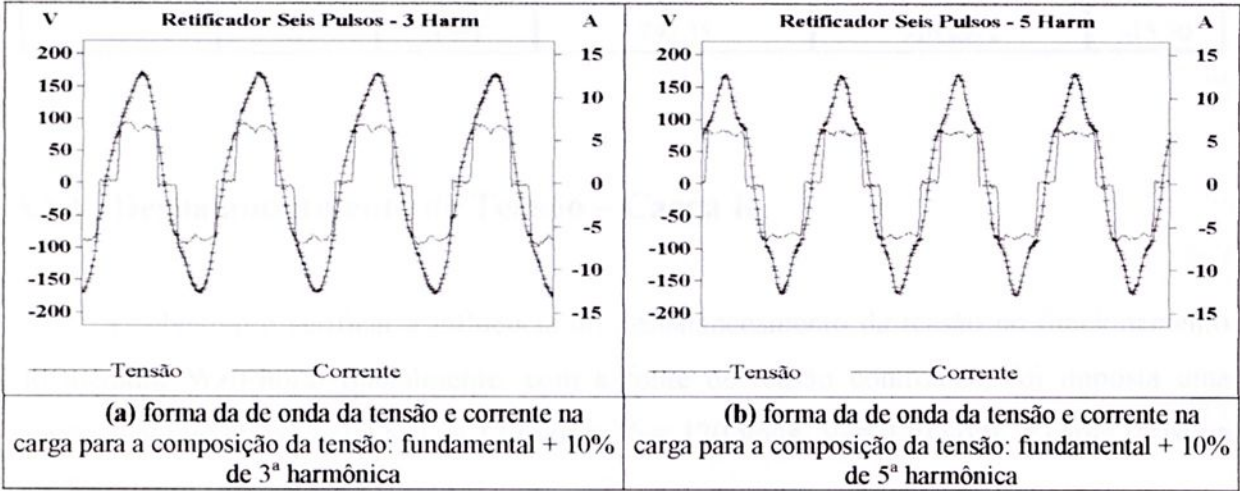


Figura 5.47 – Formas de onda da tensão composta pela fundamental e ordem harmônica individual

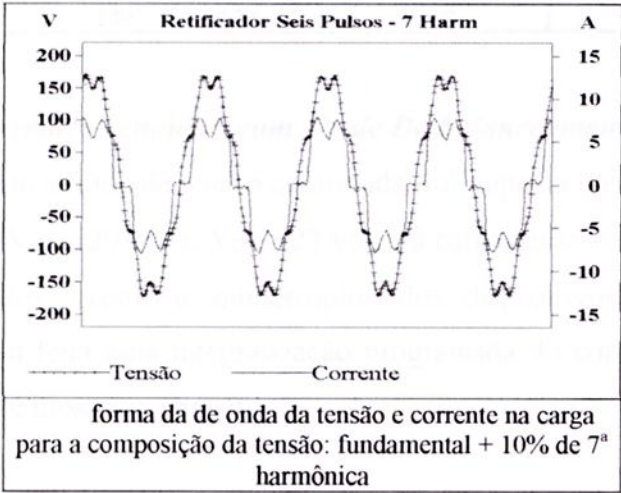


Figura 5.48 – Forma de onda da tensão com a composição: fundamental + 10% de 7ª harmônica.

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.17, que relaciona os valores de potência consumida obtidos com as harmônicas individuais e respectivos erros do medidor em relação ao valor de potência consumida obtido através da aquisição de dados.

Tabela 5. 17 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da ordem harmônica presente na tensão de alimentação.

Carga	Ordem Harmônica	Seq. de Fase	Consumo (Wh)		Erro %
			medidor	Aquisição de dados	
Retificador 6 Pulsos	Fund.	(+)	838,50	969,94	-15,68
	3	(0)	780,45	896,3688	-14,85
	5	(-)	677,25	770,5002	-13,77
	7	(+)	793,35	916,2972	-15,50

5.3.4- Desbalanceamento de Tensão – Carga R

O objetivo é verificar a influência do desbalanceamento da tensão no funcionamento do medidor Watt-hora. Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal eficaz igual a $V_A= 120$ volts, $V_B= 120$ volts, $V_C= 120$ volts, à carga resistiva $R= 70 \Omega$./fase (item 5.3.1.1).

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo (Wh)		Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C	medidor	Aquisição de dados	
0	120	120	120	703,05	706,33	-0,47

5.3.4.1 Tensões e Correntes Senoidais com 5% de Desbalanceamento

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal eficaz igual a $V_A= 117$ volts, $V_B= 120$ volts, $V_C= 123$ volts, à carga resistiva $R= 70 \Omega$./fase. Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a meia hora. O resultado é mostrado abaixo:

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo (Wh)		Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C	medidor	Aquisição de dados	
5	117	120	123	703,05	705,29	-0,32

5.3.4.2 Tensões e Correntes Senoidais com 10% de Desbalanceamento

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal eficaz igual a $V_A= 114$ volts, $V_B= 120$ volts, $V_C= 126$ volts, à carga resistiva $R= 70 \Omega$./fase. Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a

meia hora. O resultado é mostrado abaixo:

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo (Wh)		Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C	medidor	Aquisição de dados	
10	114	120	126	709,50	710,43	-0,13

5.3.4.3 Tensões e Correntes Senoidais com 15% de Desbalanceamento

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal eficaz igual a $V_A=111$ volts, $V_B=120$ volts, $V_C=129$ volts, à carga resistiva $R=70\ \Omega$./fase. Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a meia hora. O resultado é mostrado abaixo:

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo (Wh)		Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C	medidor	Aquisição de dados	
15	111	120	129	709,50	707,99	0,21

Apesar de ser uma taxa elevada de desbalanceamento da tensão, este ensaio foi feito para possibilitar uma visualização mais abrangente da influência desbalanceamento nos sistemas de medições.

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.18.

Tabela 5. 18 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da taxa de desbalanceamento presente na tensão de alimentação.

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo (Wh)		Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C	medidor	Aquisição de dados	
0	120	120	120	703,05	706,33	-0,47
5	117	120	123	703,05	705,29	-0,32
10	114	120	126	709,50	710,43	-0,13
15	111	120	129	709,50	707,99	0,21

5.3.5- Desbalanceamento de Tensão – Carga RL

O objetivo é verificar a influência do desbalanceamento da tensão no funcionamento do medidor watt-hora. Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal eficaz igual a $V_A=120$ volts, $V_B=120$ volts, $V_C=120$ volts, à carga resistiva $R=70$

Ω /fase e $L=102,2$ mH (item 5.3.2.1).

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo (Wh)		Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C	medidor	Aquisição de dados	
0	120	120	120	509,55	545,31	-7,02

5.3.5.1 Tensões e Correntes Senoidais com 5% de Desbalanceamento

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal eficaz igual a $V_A=117$ volts, $V_B=120$ volts, $V_C=123$ volts, à carga resistiva $R=70 \Omega$ /fase e $L=102,2$ mH. Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a meia hora. O resultado é mostrado abaixo:

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo (Wh)		Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C	medidor	Aquisição de dados	
5	117	120	123	509,55	543,72	-6,71

5.3.5.2 Tensões e Correntes Senoidais com 10% de Desbalanceamento

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal eficaz igual a $V_A=114$ volts, $V_B=120$ volts, $V_C=126$ volts, à carga resistiva $R=70 \Omega$ /fase e $L=102,2$ mH. Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a meia hora. O resultado é mostrado abaixo:

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo (Wh)		Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C	medidor	Aquisição de dados	
10	114	120	126	509,55	542,87	-6,54

5.3.5.3 Tensões e Correntes Senoidais com 15% de Desbalanceamento

Inicialmente, com a fonte de tensão controlada, foi imposta uma tensão senoidal eficaz igual a $V_A=111$ volts, $V_B=120$ volts, $V_C=129$ volts, à carga resistiva $R=70 \Omega$ /fase e $L=102,2$ mH. Após 5 (cinco) minutos de funcionamento ininterruptos dos dispositivos, para garantir a sua estabilidade térmica, foi feita uma integralização programada do consumo correspondente a meia hora. O resultado é mostrado abaixo:

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo (Wh)		Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C	medidor	Aquisição de dados	
15	111	120	129	516,00	548,48	-6,29

Apesar de ser uma taxa elevada de desbalanceamento da tensão, este ensaio foi feito para possibilitar uma visualização mais abrangente da influência desbalanceamento nos sistemas de medições.

Os resultados de todos os ensaios estão apresentados na tabela 5.19.

Tabela 5. 19 – Valores de consumo registrado pelo medidor, consumo calculado pela aquisição de dados e o erro do consumo registrado em relação ao consumo calculado pela aquisição de dados, em função da taxa de desbalanceamento presente na tensão de alimentação.

Desbalanceamento Tensão (%)	Tensão (V)			Consumo Pulsado (Wh)	Consumo Medido (Wh)	Erro %
	Fase A	Fase B	Fase C			
0	120	120	120	509,55	545,31	-7,02
5	117	120	123	509,55	543,72	-6,71
10	114	120	126	509,55	542,87	-6,54
15	111	120	129	516,00	548,48	-6,29

CAPÍTULO 6 - Conclusões e Discussões

6.1- Considerações Iniciais

O presente trabalho enfocou questões relacionadas com os efeitos das distorções harmônicas e do desbalanceamento das tensões sobre os medidores de kWatt-hora, os quais funcionam pelo princípio de indução.

Inicialmente, foram feitas considerações sobre a forma de tarifação praticada atualmente, onde pode ser observado que as mesmas não consideram as distorções das formas de onda tanto das tensões quanto das correntes (conteúdo harmônico). Adicionalmente, nestas considerações, foi citada uma sugestão para a tarifação quando da presença destas distorções. Esta citação decorre de um projeto de pesquisa e desenvolvimento realizada por uma concessionária de energia elétrica em conjunto com uma universidade.

Em seguida foi observado o comportamento dos medidores através de sua representação matemática para o caso ideal (tensão senoidal e carga linear), onde pode-se observar quais são as variáveis que podem ser influenciadas quando os mesmos não operam nas condições idealizadas de projeto.

Finalizando, são apresentados os ensaios experimentais em medidores de kWatt-hora que funcionam pelo princípio indutivo monofásico e trifásico de dois elementos.

6.2- Discussões dos Resultados Apresentados

O produto deste estudo permite concluir que o problema exposto exige providências tanto do ponto de vista de se tarifar os clientes responsáveis pelas perturbações, através de procedimentos semelhantes àqueles hoje vigentes que tarifam o excesso de reativos (baixo fator de potência), quanto do ponto de vista de se compensar os erros apresentados pelos medidores convencionais em ambientes elétricos distorcidos.

Em função dos resultados aqui obtidos, podemos extrair uma série de conclusões e observações:

1. Os medidores que funcionam sob o princípio de indução são influenciados pelas distorções nos sistemas elétricos de potência, principalmente as distorções harmônicas nas formas de onda de tensões e correntes.
2. Nos medidores monofásicos, os principais erros foram observados quando da presença de distorções harmônicas na tensão alimentando cargas RL e RC.
3. Quando analisa-se a injeções de tensões compostas da fundamental e de uma única ordem harmônica, observa-se que a carga resistiva apresenta maior sensibilidade quando da presença da terceira harmônica. Para a carga composta de ponte retificadora de onda completa, ponte retificadora de meia-onda e para as carga RC e RL, a maior sensibilidade observada foi à injeção da quinta harmônica (a injeção da quinta harmônica resultou no menor valor de potência consumida, quando comparada com a injeção da sétima harmônica e terceira harmônica. Os maiores erros de registro do medidor, quando analisa-se seu desempenho para a injeção das harmônicas isoladamente, foram nas cargas RL e RC (na presença da quinta harmônica).
4. Nos medidores trifásicos, os principais erros de registro de potência consumida do medidor foram observados em dois casos: quando a tensão estava alimentando o retificador de seis pulsos com carga resistiva, e quando a tensão estava alimentando a carga RL.
5. Quando analisa-se a injeção isoladamente da tensão composta da fundamental mais uma ordem harmônica nas cargas estudadas, verifica-se que as cargas resistiva, RL e retificador de seis pulsos apresentam maior sensibilidade à presença da quinta harmônica. A injeção da quinta harmônica resultou no menor valor de potência consumida, quando comparada com a injeção da sétima harmônica e da terceira harmônica. Fato este, decorrente da componente harmônica de quinta ordem possuir seqüência de fases negativa, o que origina um campo magnético no sentido contrário ao da componente fundamental da tensão (seqüência positiva), alterando o funcionamento do medidor trifásico. Os maiores erros de registro de potência consumida do medidor trifásico observados foram para a carga RL e para

o retificador de seis pulsos com carga resistiva.

6. Na análise do desempenho do medidor trifásico (dois elementos) tipo indução, quando a tensão de alimentação apresenta-se desbalanceada, observa-se que os erros encontrados nestes ensaios não são muito significativos, quando comparados aos erros causados por distorções harmônicas.

6.3- Considerações Finais

Dentre os diversos aspectos relacionados com a qualidade no fornecimento de energia elétrica, os que mais se destacam são: (i) o equilíbrio entre fases nas redes trifásicas, (ii) a forma de onda da tensão de suprimento, que deve ser o mais próxima possível de uma senóide, e (iii) o valor eficaz dessa tensão que deve ser mantido a níveis praticamente constantes.

Entretanto, com o crescimento do número e do porte das cargas especiais implantadas no sistema elétrico brasileiro, associadas às cargas tradicionais, os índices de distorção harmônica das tensões podem ultrapassar os níveis máximos admissíveis ou recomendados.

Conhecer os efeitos das harmônicas das tensões e/ou correntes e regulamenta-las a níveis aceitáveis são necessidades urgentes, de maneira que sejam atenuados os prejuízos às concessionárias e aos consumidores.

Não se pode deixar de registrar aqui que as condições ensaiadas experimentalmente são condições de operações extremas, dificilmente encontradas na prática. Nos casos reais, as cargas praticadas são mistas, e muitas são lineares, não influenciando de maneira significativa as medições. Entretanto, nos estudos realizados nesse trabalho, e em outros citados, ocorrem erros de registro de potência consumida nos sistemas de medição de energia ativa e reativa quando os medidores são submetidos a condições para os quais os mesmos não foram idealizados.



6.4- Trabalhos Futuros

No decorrer do trabalho foram suscitadas algumas idéias que poderiam ser sugeridas como possibilidades de pesquisas complementares a serem desenvolvidas. São elas:

- Modelagem matemática dos medidores Watt-hora tipo indução, monofásico, bifásico e trifásico, em condição não-senoidal, visto que na literatura são muitos os trabalhos que abordam a modelagem para condição ideal de funcionamento;
- Avaliação experimental do desempenho do medidor Watt-hora tipo indução, monofásico, bifásico e trifásico, para diferentes perfis de tensão, com a mesma distorção harmônica total;
- Avaliação experimental de medidores Watt-hora monofásico, bifásico e trifásico de diferentes fabricantes, para a análise de seu desempenho;
- Avaliação experimental do desempenho dos medidores Watt-hora quando a tensão de alimentação apresentar distúrbios, tais como: subtensão, sobretensão e desbalanceamento das cargas presentes na rede elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHOU, C.; LIU, C. **Analysis of the performance of induction watthour meter in the presence of harmonics (a new model approach)**. Elsevier Science – Electric Power Systems Research 32, 1995, pag. 71-79.
- [2] ROBINSON, P. B. A watt-hour meter – The solid state polyphase kind. **IEEE New York**, Fevereiro/março, 1996.
- [3] FILIPSKI, P. S. A TDM Wattmeter with 0.5-MHz Carrier Frequency. **IEEE Transactions of instrumentation and measurement**, Vol. 39, Nº1, Fevereiro, 1990.
- [4] FILIPSKI, P. S.; ARSENEAU, R.; ZELLE, J. J. Watt and Voltampere Transfer Standard. **IEEE Transactions of instrumentation and measurement**, Vol. 42, Nº2, Abril, 1993.
- [5] CALDAS, R. P. et al. Requisitos de Medição de Energia para o Novo Modelo Competitivo Brasileiro. **SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Foz do Iguaçu, PR. GPC/07, Outubro, 1999.
- [6] BORTONI, E. C.; ARAÚJO, W. P.; DONADIO, R. G. Desempenho de Medidores Watt-hora Indutivos em Ambientes Não Senoidais. EFEI, **Energy News**, UNIFEI, Universidade Federal de Itajubá.
- [7] MELO, G. A. **A Eficiência Energética Sob a Ótica da Qualidade de Energia Elétrica**. Ilha Solteira, 2001. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.
- [8] ZHENG, T.; MAKRAM, E. B.; GIRGIS, A. A. Evaluating Power System Unbalance in the Presence of Harmonic Distortion. **IEEE Transactions on**
-

Power Delivery, Vol. 18, N°2, Abril, 2003.

- [9] SHERBURNE, R. R.. Driving Torque Equations for the Watthour Meter Based on the Ferraris Principle. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-90, N°1, Janeiro/fevereiro 1971.
- [10] EMGECOMP TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO EM CONTROLE. Noções Básicas sobre Demanda e Fator de Potência. Artigo publicado por Engcomp Tecnologia em Automação e Controle Ltda. Disponível em: <http://www.engcomp.com.br>. Acesso em: 10 fev 2005.
- [11] CREDER, H.. **Instalações Elétricas**. Local: Rio de Janeiro ,11. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1992.
- [12] 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. **Relatório técnico de P&D da CPFL**, número 277, agosto de 2000.
- [13] KRUG, S. R. **Aplicação do Método de Design Macroergonômico no Projeto de Postos de Trabalho: Estudo de Caso de Posto de Pré-calibração de Medidores de Energia Monofásicos**. Porto Alegre, 2000, 197f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [14] **HANDBOOK FOR ELECTRICITY METERING**. 9. ed. Washington, DC: Edison Electric Institute, 1992.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR8377: Medidor de Energia Ativa**. Rio de Janeiro:ABNT, 1995.
- [16] BARLOW, H. E. M.. Travelling-field Theory of Induction-type Instruments and
-

Motors. **PROC. IEEE**, Vol. 112, nº6, junho, 1965.

- [17] MEDEIROS, S. F.; **Medição de Energia Elétrica**. Local: Rio de Janeiro, Editora Guanabara, 3. ed., 1980.
- [18] SILVA, R. V. R. **Análise do desempenho dos medidores de watt-hora indutivo sob condições não senoidais**. Uberlândia, 1998, 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia.
- [19] MAMEDE FILHO, JOÃO. **Instalações Elétricas Industriais**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1989.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5313**: Aceitação de Lotes de Medidores de Energia Ativa. Rio de Janeiro: dezembro, 1997.
- [21] COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE (CEI). **Compteurs D'énergie Active à Courant Alternatif des Classes 0,5, 1 et 2**. 2. ed., Genève: 1988. (CEI, 521).
- [22] BOSSI, A.; SESTO, E. **Instalações Elétricas**. s. l.: Hemus, 1989. v.1.
- [23] KINNARD, I. F. **Medidas Electricas y sus Aplicaciones**. 2. ed. Barcelona: Ediciones Tecnicas Marcombo, 1967.
- [24] ONESTI, A. Medidores de Watt-hora a Disco de Indução. **Revista Mundo Elétrico**. São Paulo, v. 22, p. 40-47, abr., 1981.
- [25] POPOV, V. **Electrical Measurements**. Moscow: Mir, 1970.
- [26] SILVA, M. T. F. Recalibração e Manutenção de Medidores de Quilowatt-hora. **Revista Mundo Elétrico**. São Paulo, v. 30, n. 353, p. 39-48, mar. 1989.
- [27] HARRIS, F. K. **Electrical Measurements**. New York: John Wiley, 1959.
-



-
- [28] **COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA (CEEE)**. Medidor de Energia Ativa – kWh.
- [29] REISSLAND, M. U. **Electrical Measurements – Fundamentals – Concepts – Applications**. New Delhi: Wiley Eastern , 1989.
- [30] GRADY, W. M.; GILLESKIE, R. J. Harmonics and How They Relate to Power Factor. **Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93)**. San Diego, CA, November 1993.
- [31] **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL)**. **Resolução N°456** de 29 de novembro de 2000. Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. ANEEL - 4ª edição- Brasília – 2002 – 76f.
-



,UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br

