

JADER VINÍCIUS NASCIMENTO PINTO

**Análise de medidores eletrônicos de energia elétrica na
presença de distorções harmônicas**

Guaratinguetá - SP
2018

Jader Vinícius Nascimento Pinto

**Análise de medidores eletrônicos de energia elétrica na
presença de distorções harmônicas**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel J. B. S. Sampaio

P659a Pinto, Jader Vinicius Nascimento
Análise de medidores eletrônicos de energia elétrica na presença de distorções harmônicas / Jader Vinicius Nascimento Pinto – Guaratinguetá, 2018.
59 f : il.
Bibliografia: f. 53

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio

1. Medidores elétricos. 2. Distorção elétrica. 3. Energia elétrica – consumo. I. Título.

CDU 621.317.7

JADER VINÍCIUS NASCIMENTO PINTO

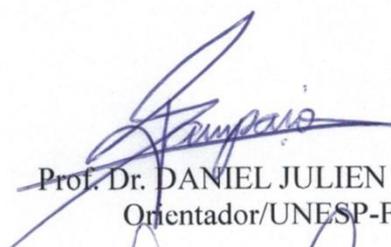
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

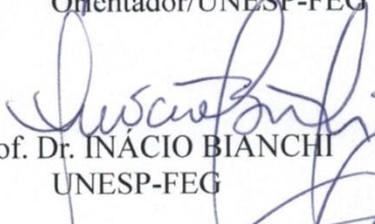


Profa. Dra. PALOMA MARIA SILVA ROCHA RIZOL
Coordenadora

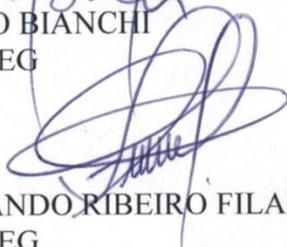
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. DANIEL JULIEN B. DA SILVA SAMPAIO
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. INÁCIO BIANCHI
UNESP-FEG



Prof. Dr. FERNANDO RIBEIRO FILADELFO
UNESP-FEG

Dezembro de 2018

DADOS CURRICULARES

NOME COMPLETO DO AUTOR

NASCIMENTO 21.04.1995 – Aparecida de Goiânia / GO

FILIAÇÃO Ricardo José Pinto
Agda Maria do Nascimento

2010/2012 Ensino Médio
ETEC Prof. Horácio Augusto da Silveira
São Paulo - SP

2011/2012 Técnico em Eletrônica
ETEC Prof. Horácio Augusto da Silveira
São Paulo - SP

dedico este trabalho
de modo especial, a Deus e à minha família

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e à intercessão de Nossa Senhora e São José, que permitiram que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, não somente nestes anos como universitário, mas em todos os momentos.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Daniel Julien B. S. Sampaio* pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos

aos meus pais *Ricardo e Agda*, minha filha e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

Por vezes, sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar, mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.

Santa Teresa de Calcutá

RESUMO

Devido ao avanço da eletrônica de potência, aumentou-se o uso de equipamentos eletrônicos e não lineares. Equipamentos estes que geram distorções na corrente que afetam a tensão. Este trabalho apresenta uma análise experimental de medidores eletrônicos de energia elétrica na presença de distorções harmônicas, avaliando o comportamento dos mesmos. Para isso, utilizou-se como referência a energia elétrica medida por um analisador de energia da marca Fluke modelo 435. Foram então realizadas diversas medições, dando-se prioridade para configurações com cargas não lineares, não contempladas pelas normas de ensaios de medidores de energia elétrica vigentes no Brasil. Calculou-se então o erro das medições com base na medição de referência. Foram encontrados erros superiores a 100% em ensaios envolvendo distorção harmônica de tensão da ordem de 30%.

PALAVRAS-CHAVE: Harmônicos. Medidores eletrônicos de energia elétrica. Qualidade de energia elétrica. Medidores de energia elétrica.

ABSTRACT

Due to the advance of power electronics, the use of electronic and non-linear equipment was increased. These equipments generate distortions in the current that affect the voltage. This work presents an experimental analysis of electronic energy meters in the presence of harmonic distortions, evaluating their behavior. The electric energy measured by a Fluke model 435 energy analyzer was used as reference. Several measurements were then taken, giving priority to configurations with non-linear loads, not contemplated by the standards of tests of energy meters in force in Brazil. Then the errors of the measurements were calculated according to the reference measurement. Errors higher than 100% were found in tests involving voltage harmonic distortion up to 30%.

KEYWORDS: Harmonic distortions. Electronic power meters. Quality of electric energy. Energy meters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Forma de onda com distorção harmônica	18
Figura 2 – Componentes da onda distorcida da Figura 1	18
Figura 3 – Triângulo de Potências	22
Figura 4 – Tetraedro de Potências	23
Figura 5 – Correção do fator de potência	24
Figura 6 – Comportamento de uma carga linear	25
Figura 7 – Comportamento da corrente elétrica de uma carga não-linear.....	26
Figura 8 – Diagrama de blocos de um medidor eletrônico de energia elétrica	27
Figura 9 – Medidor eletrônico trifásico de energia elétrica	30
Figura 10 – Diagrama de conexões de um medidor trifásico	30
Figura 11 – Medidor eletrônico trifásico bidirecional.....	31
Figura 12 – Medidor eletrônico bifásico monodirecional	31
Figura 13 – Fonte de tensão programável AMX-345	32
Figura 14 – Diagrama unifilar simplificado do arranjo laboratorial	33
Figura 15 – Subestação 220V/13.800V/220V	34
Figura 16– Banco de cargas de iluminação	34
Figura 17 – Onda IEC 77A classe 2 gerada através da fonte AMX-345.....	35
Figura 18 – Espectro de frequência do sinal IEC 77A classe 2.....	36
Figura 19 – Analisador de qualidade de energia elétrica Fluke 435.....	36
Figura 20 – Erro do medidor trifásico em função da DHTV com Lâmpadas Incandescentes	40
Figura 21 – Erro do medidor trifásico em função da DHTV com Lâmpadas Fluorescentes ..	40
Figura 22 – Erro do medidor trifásico em função da DHTV com Lâmpadas LED.....	40
Figura 23 – Erro do medidor trifásico em função da DHTV com Lâmpadas Vapor de Mercúrio	41
Figura 24 – Erro do medidor trifásico em função da DHTI com Lâmpadas Incandescentes..	42
Figura 25 – Erro do medidor trifásico em função da DHTI com Lâmpadas Fluorescentes....	42
Figura 26 – Erro do medidor trifásico em função da DHTI com Lâmpadas LED	43
Figura 27 – Erro do medidor trifásico em função da DHTI com Lâmpadas Vapor de Mercúrio	43
Figura 28 – Erro do medidor bifásico em função da DHTV com Lâmpadas Incandescentes.	44
Figura 29 – Erro do medidor bifásico em função da DHTV com Lâmpadas Fluorescentes...	45
Figura 30 – Erro do medidor bifásico em função da DHTV com Lâmpadas LED.....	45

Figura 31 – Erro do medidor bifásico em função da DHTV com Lâmpadas Vapor de Mercúrio	45
Figura 32 – Erro do medidor bifásico em função da DHTI com Lâmpadas	46
Figura 33 – Erro do medidor bifásico em função da DHTI com Lâmpadas Fluorescentes	46
Figura 34 – Erro do medidor bifásico em função da DHTI com Lâmpadas LED	47
Figura 35 – Erro do medidor bifásico em função da DHTI com Lâmpadas Vapor de Mercúrio	47
Figura 36 – Erro dos medidores bifásico e trifásico em função do fator de potência com lâmpadas incandescentes	48
Figura 37 – Erro dos medidores bifásico e trifásico em função do fator de potência com lâmpadas fluorescentes	49
Figura 38 – Erro do medidor trifásico em função do fator de potência com lâmpadas LED	49
Figura 39 – Erro do medidor bifásico em função do fator de potência com lâmpadas LED	50
Figura 40 – Erro dos medidores bifásico e trifásico em função do fator de potência com lâmpadas vapor de mercúrio	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis máximos permitidos de distorção harmônicas e componentes para tensões em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica	20
Tabela 2 – Principais fenômenos relacionados com a qualidade de energia elétrica	21
Tabela 3 – Classe de exatidão dos medidores de energia	29
Tabela 4 – Caracterização da onda IEC 77A classe 2.....	35
Tabela 5 – Tabela dos resultados medidos com lâmpadas incandescentes.....	38
Tabela 6 – Tabela dos resultados medidos com lâmpadas fluorescentes	38
Tabela 7 – Tabela dos resultados medidos com lâmpadas LED	39
Tabela 8 – Tabela dos resultados medidos com lâmpadas vapor de mercúrio	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DHTV	Distorção Harmônica Total de Tensão
DHTI	Distorção Harmônica Total de Corrente
DIHI	Distorção Harmônica Individual de Corrente
DIHV	Distorção Harmônica Individual de Tensão
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LED	Light-Emitting Diode
PRODIST	Procedimento de Distribuição
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
NBR	Norma Brasileira Registrada

LISTA DE SÍMBOLOS

$p(t)$	potência instantânea	[W]
$v(t)$	tensão instantânea	[V]
$i(t)$	corrente instantânea	[A]
V_m	tensão de pico	[V]
I_m	corrente de pico	[A]
ω	velocidade angular	[rad/s]
α	ângulo de deslocamento da tensão	[rad]
β	ângulo de deslocamento da corrente	[rad]
$e(t)$	energia instantânea	[Wh]
P	potência elétrica ativa	[W]
Q	potência elétrica reativa	[VAr]
S	potência aparente total	[VA]
I_1	corrente fundamental	[A]
I_n	componente harmônica de corrente da n-ésima ordem	[A]
V_1	tensão fundamental	[V]
V_n	componentes harmônicas de tensão de n-ésima ordem	[V]
FP	fator de potência	
FP _D	fator de potência de deslocamento	
FP _H	fator de potência de distorção devido aos harmônicos	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	ASPECTOS CONCEITUAIS	17
2.1	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	19
2.1.1	Fator de Potência	22
2.1.2	Correção do Fator de Potência	24
2.2	CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES	25
2.2.1	Carga Linear	25
2.2.2	Carga não linear	26
2.3	MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA	27
2.3.1	Medidor eletrônico	27
2.3.2	Descrição geral	29
3	METODOLOGIA	32
3.1	ARRANJO LABORATORIAL	32
3.2	TESTES	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	MEDIDOR TRIFÁSICO	39
4.1.1	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV)	39
4.1.2	Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI)	42
4.2	MEDIDOR BIFÁSICO	44
4.2.1	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV)	44
4.2.2	Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI)	46
4.3	ANÁLISE EM RELAÇÃO AO FATOR DE POTÊNCIA	48
5	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A	55

1 INTRODUÇÃO

Com o advento das novas tecnologias, das redes inteligentes de distribuição (*smart grid*) e do crescimento dos usuários que utilizam sistemas de microgeração de energia elétrica (principalmente fotovoltaica) conectados à rede das concessionárias de energia elétrica, os medidores de energia, utilizado pelas concessionárias para tarifação dos usuários tiveram que evoluir, incorporando novas funções.

No entanto, com o avanço da eletrônica de potência, especialmente envolvendo retificadores, fontes chaveadas, controladores etc., a qualidade de energia elétrica fica prejudicada em relação à capacidade de manter o sinal senoidal, já que estas cargas geram componentes harmônicas que influenciam diretamente no funcionamento de equipamentos em geral.

Este trabalho visa então analisar dois medidores de energia elétrica ativa, sendo um deles bidirecional (que foi analisado somente no sentido de consumo de energia pelo consumidor), sob diversas condições de funcionamento, além das condições gerais de ensaio para os medidores, para verificar a fidelidade destes dispositivos quando submetidos às cargas eletrônicas.

A análise dos medidores de energia elétrica é importante, pois este é um equipamento necessário para a tarifação da energia elétrica consumida e, portanto, os erros destes medidores implicam em prejuízos, que pode ser tanto para o consumidor quanto para a concessionária de energia elétrica.

Para a análise destes medidores, foi adotado como referência a energia elétrica medida através de um analisador de rede elétrica da marca Fluke modelo 435, e foram realizadas medições com vários perfis de tensão diferentes, gerados através de uma fonte de tensão programável, para cargas de lâmpadas incandescentes, fluorescentes, LEDs e vapor de mercúrio; foi utilizada também uma subestação alimentada em 220 V, que eleva a tensão para 13.800 V e posteriormente abaixa novamente para 220 V onde a carga foi conectada.

No capítulo 2 são apresentados os aspectos conceituais envolvendo qualidade de energia elétrica, cargas lineares e não lineares, além de um breve resumo sobre o funcionamento e sobre as normas vigentes dos medidores de energia elétrica utilizados neste trabalho.

No capítulo 3, são apresentados o arranjo laboratorial e a forma com que os testes foram realizados.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através dos testes, bem como sua discussão, para ambos os medidores analisados.

Por fim, o capítulo 5 enuncia a conclusão deste trabalho.

2 ASPECTOS CONCEITUAIS

Distorções harmônicas são distorções nas tensões ou correntes senoidais, com uma frequência múltipla da frequência da rede elétrica, também chamada de frequência fundamental, no Brasil, 60 Hz.

Estas distorções harmônicas são geradas por cargas não lineares, apresentando este comportamento na corrente elétrica exigida para seu funcionamento, esta corrente distorcida, ao passar pela resistência dos condutores, transmite estas distorções harmônicas para a tensão, impactando outros equipamentos.

O nível de distorção harmônica na tensão e corrente pode ser quantificado com base no emprego da Série de Fourier.

De acordo com a série de Fourier, qualquer função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões, composta por um valor médio, de um valor senoidal (ou cossenoidal) na frequência fundamental e valores senoidais (ou cossenoidais) com frequência múltipla da frequência fundamental (harmônicas).

Um sinal de tensão periódico pode então ser expresso pela Equação 1.

$$V(\omega t) = V_0 + V_{1m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + V_{2m\acute{a}x} \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + V_{3m\acute{a}x} \text{sen}(3\omega t + \varphi_3) + \dots + V_{nm\acute{a}x} \text{sen}(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

Sendo:

$V(\omega t)$ – Sinal de tensão periódico [V]

V_0 – Nível médio de tensão [V]

$V_{nm\acute{a}x}$ – Tensão de pico do componente harmônico de ordem n [V]

ω – Velocidade angular [rad/s]

t – tempo [s]

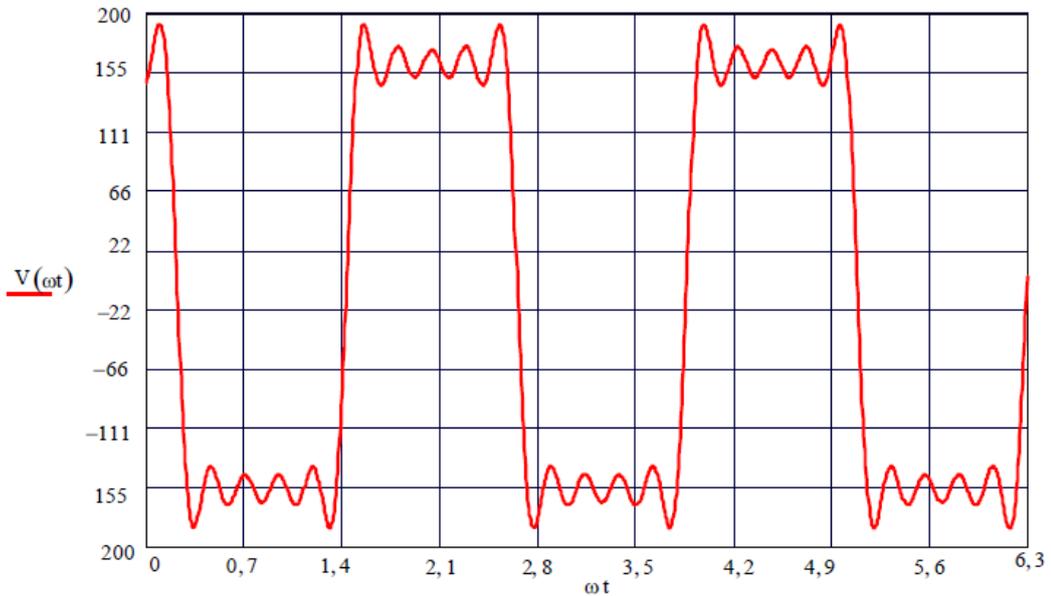
φ_n – Deslocamento angular da tensão de ordem n [rad]

A Figura 1 apresenta uma forma de onda distorcida devido à presença de componentes harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordens, a Figura 2 mostra os sinais da onda fundamental e suas componentes harmônicas, que se somam para dar origem à onda distorcida da Figura 1.

O nível da distorção harmônica é geralmente quantificado pela taxa de Distorção Harmônica (total ou individual, de tensão ou corrente).

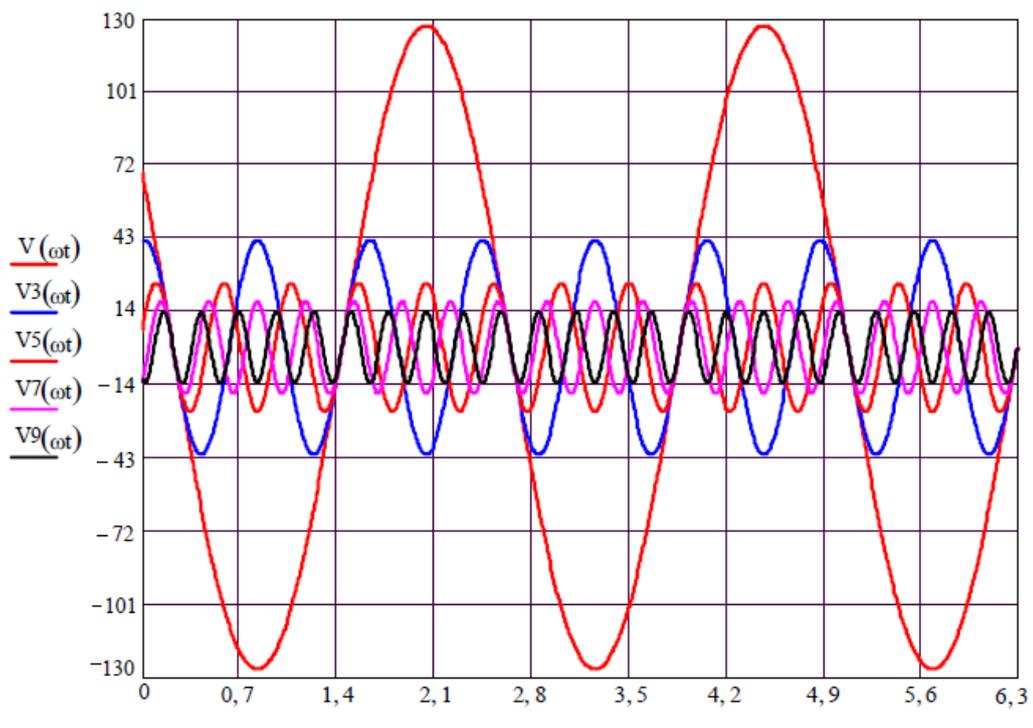
A Equação 2 apresenta o cálculo da Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV) e a Equação 3 mostra o cálculo da Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI).

Figura 1 – Forma de onda com distorção harmônica



Fonte: SEARA DA CIÊNCIA (2018).

Figura 2 – Componentes da onda distorcida da Figura 2.1



Fonte: SEARA DA CIÊNCIA (2018).

$$DHTV = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h,máx} V_h^2}{V_1^2}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

$$DHTI = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h,máx} I_h^2}{I_1^2}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

Sendo:

V_h – Valor eficaz da tensão na ordem h

V_1 – Valor eficaz da tensão na frequência fundamental

I_h – Valor eficaz da corrente na ordem h

I_1 – Valor eficaz da corrente na frequência fundamental

h – Ordem da componente harmônica

As equações 4 e 5 apresentam os cálculos para a Distorção Harmônica Individual de Tensão (DIHV) e Corrente (DIHI), respectivamente:

$$DIHV = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \% \quad (4)$$

$$DIHI = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 \% \quad (5)$$

No sistema elétrico de potência, geralmente consideram-se as distorções harmônicas de até 50ª ordem, desprezando as demais.

A Tabela 1 mostra os valores máximos permitidos de Distorção Harmônica de Tensão Total para sistemas de distribuição primária e transmissão, conforme as normas IEEE 519 e os Procedimentos de Distribuição (Prodíst-ANEEL), módulo 8. Observa-se que são toleradas distorções totais de até 10% nas redes de distribuição secundária.

2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Por muito tempo, a pensamento dominante nos setores de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica era que, para um sistema ser classificado como “bom”, seria aquele que apresentasse poucas falhas, ou seja, o mínimo de interrupções possíveis; variações de tensão e frequência consideráveis eram toleradas, principalmente pelos consumidores residenciais.

Atualmente, a energia elétrica, como produto de consumo, precisa atender certos parâmetros principais de qualidade: estabilidade no nível de tensão, na frequência e fornecimento ininterrupto.

Com o advento da eletrônica e o emprego de equipamentos mais sensíveis à essas variações de tensão e frequência, o conceito de qualidade de energia tem sido discutido mais amplamente, foram dados limites mais adequados para todos os consumidores, em especial aos grandes consumidores industriais, já que uma pequena falha pode comprometer um grande processo industrial, acarretando grandes prejuízos.

Tabela 1 – Níveis máximos permitidos de distorção harmônicas e componentes para tensões em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL (2010).

Com relação à tensão elétrica fornecida, esta deve apresentar forma de onda senoidal, simétrica (isenta de valores médios), com variação de amplitude dentro dos limites aceitáveis (tolerância de $\pm 5\%$)

A frequência da rede elétrica, no Brasil, deve estar na faixa dos $60 \pm 0,5 \text{ Hz}$.

Então, pode-se dizer que o termo “Qualidade de Energia Elétrica” (QEE) se refere com a ausência de qualquer desvio na amplitude, forma de onda ou na frequência da tensão entregue para o cliente; uma definição mais abrangente é que a qualidade do produto

(eletricidade) deve ser uma junção de um sistema de fornecimento adequado (continuidade do serviço) com a satisfação das expectativas do cliente (qualidade do produto).

A Tabela 2 mostra os principais fenômenos que afetam na qualidade de energia, suas causas, efeitos e soluções.

Tabela 2 – Principais fenômenos relacionados com a qualidade de energia elétrica

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

Fonte: Adaptado de Silva (2008).

Neste trabalho, o principal item abordado da Tabela 2 são os harmônicos, que tem a capacidade de atrapalhar o funcionamento de aparelhos elétricos, ocasionando falhas nos aparelhos, superaquecimento nos condutores, falhas no sistema elétrico de distribuição etc.

2.1.1 Fator de Potência

O fator de potência é o parâmetro que indica o quanto da potência total é utilizado para realizar trabalho, portanto, quanto mais próximo do valor unitário, melhor, com a resolução 414 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) passou-se a exigir que as instalações consumidoras devem apresentar fator de potência mínimo de 0,92.

A Equação 6 apresenta a equação geral para o cálculo do fator de potência:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (6)$$

Sendo:

FP - Fator de potência

P – Potência elétrica ativa (W)

S – Potência elétrica aparente (VA)

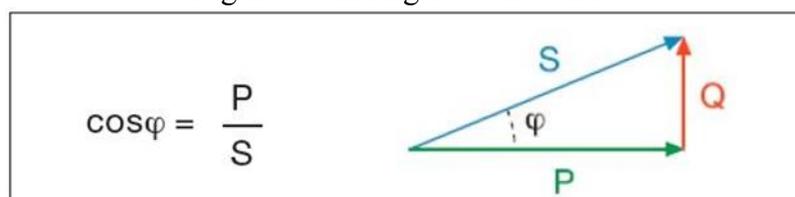
Em um sistema isento de harmônicos, tem-se:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (7)$$

Sendo Q a potência reativa (VAr)

A Figura 3 representa o chamado triângulo de potência, representada pela Equação 7.

Figura 3 – Triângulo de Potências



Fonte: REIS (2015)

Em instalações com a presença de distorções harmônicas, surge uma nova componente na potência aparente, a chamada potência de distorção, o cálculo do fator de potência passa a ser então representado pela Equação 8.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cdot \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{50} I_n^2}} = FP_D \cdot FP_H \quad (8)$$

Sendo:

I_1 - corrente fundamental

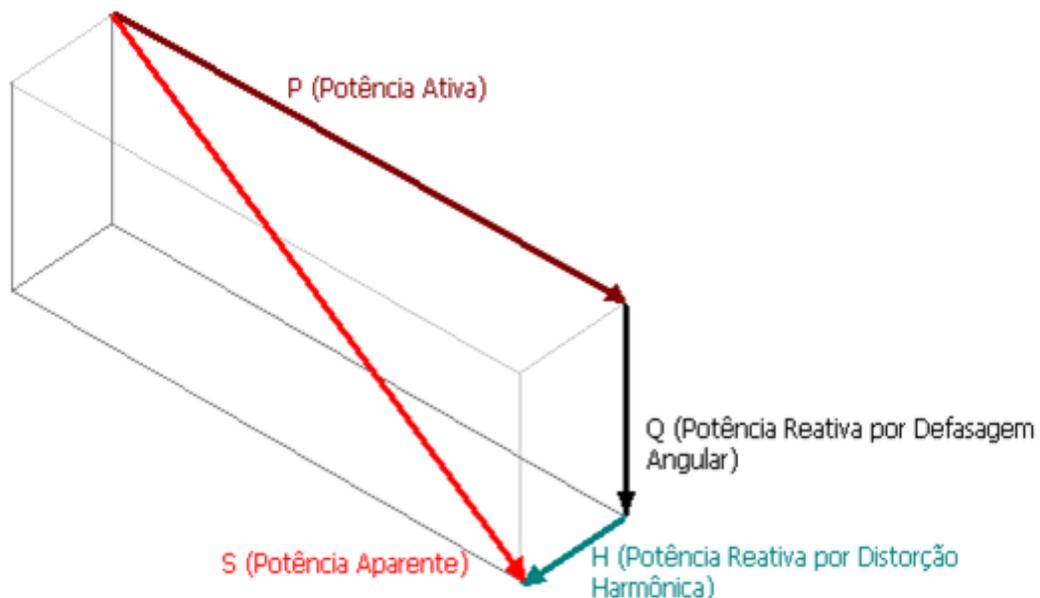
I_n - componentes harmônica de corrente de n-ésima ordem

FP_D – Fator de potência de deslocamento ($FP_D = \cos \varphi$)

FP_H - Fator de potência da distorção harmônica

Com esta componente adicional, o triângulo de potências deixa de existir, dando lugar à uma forma tridimensional, denominada “tetraedro de potências”, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Tetraedro de Potências



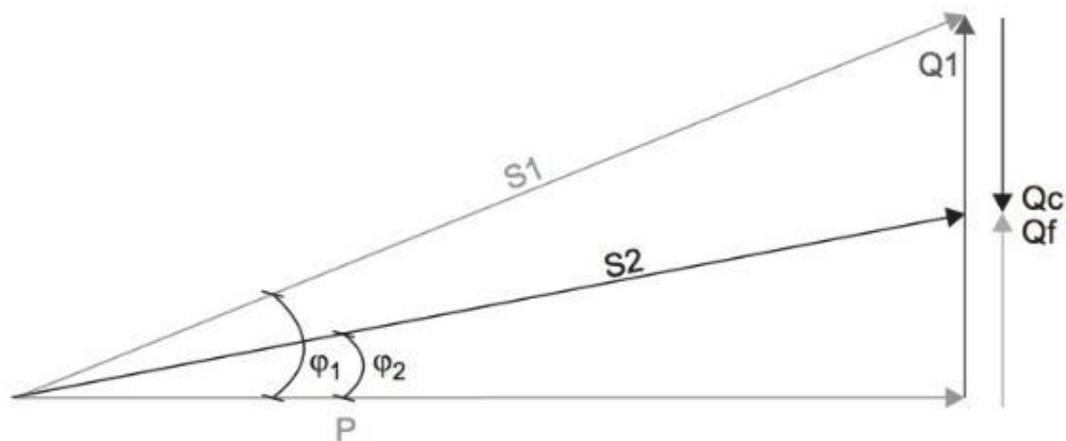
Fonte: SILVEIRA (2017).

2.1.2 Correção do Fator de Potência

A correção do fator de potência é exigida pelas concessionárias de energia elétrica apenas para grandes consumidores, geralmente em tensões de alimentação de 13,8 kV ou superiores (grandes clientes comerciais e industriais) e, caso não haja problemas na instalação com distorções harmônicas, é realizada, na grande maioria das vezes (cargas indutivas) através da conexão de bancos de capacitores (fixos ou automáticos, que variam conforme a demanda) de compensação.

A Figura 5 exemplifica, utilizando o triângulo de potências, a forma mais usual de se corrigir o fator de potência; Para uma mesma potência P [W], uma carga de potência reativa Q_1 [VAr] apresenta uma potência aparente S_1 e fator de potência dado pelo $\cos \phi_1$, ao se instalar um banco de capacitores de compensação de carga, com uma potência reativa de $-Q_c$ [VAr], reduz-se a componente total de potência reativa para Q_f , reduzindo também a potência aparente para S_2 , menor que S_1 , o novo fator de potência será o $\cos \phi_2$, maior que o fator de potência anterior.

Figura 5 – Correção do fator de potência



Fonte: BRAINLY (2018).

Onde:

P – Potência ativa instalada;

ϕ_1 – Ângulo de defasagem antes da correção do FP

ϕ_2 – Ângulo de deslocamento de fase a ser obtido

Q_c – Capacidade do banco de capacitores

Em uma instalação sujeita à grandes distorções harmônicas, o emprego direto de capacitores de compensação é inviável, pois a reatância capacitiva é dependente do inverso da frequência (Equação 9) e, portanto, para frequências maiores, a reatância capacitiva diminui, podendo danificar (estufar ou estourar) os capacitores de compensação.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (9)$$

Sendo:

f – Frequência

C – Capacitância

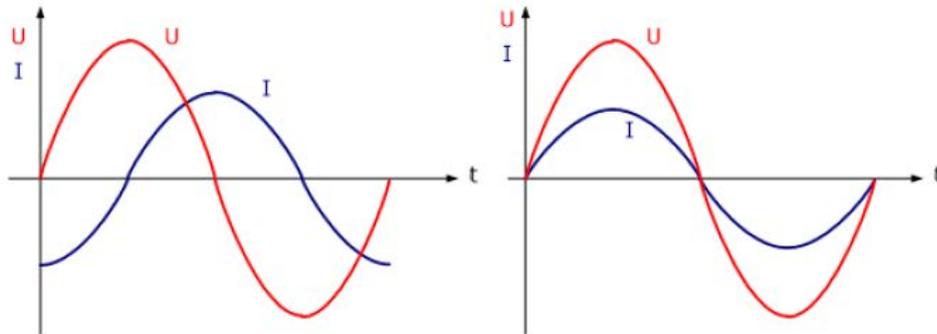
Portanto, em uma instalação com problemas de harmônicos, é necessário primeiro sanar este problema, com o emprego de filtros, ativos ou passivos (geralmente constituídos por arranjos de indutores e capacitores), a fim de atenuar a influência das distorções harmônicas.

2.2 CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES

2.2.1 Carga Linear

Para ser considerada uma carga linear, a corrente elétrica necessária para o seu funcionamento deve apresentar o mesmo formato de onda senoidal de sua alimentação, independentemente do deslocamento entre a tensão e corrente, alguns exemplos são chuveiros e lâmpadas incandescentes (cargas resistivas), motores e transformadores em carga nominal, aquecedores etc. A Figura 6 mostra o comportamento das ondas de tensão (U) e corrente (I), em função do tempo (t) em duas cargas lineares, sendo a primeira uma carga indutiva (corrente atrasada em relação à tensão) e na segunda uma carga resistiva (tensão e corrente em fase).

Figura 6 – Comportamento de uma carga linear



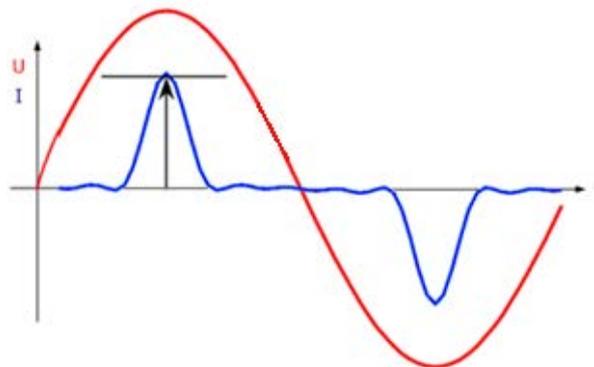
Fonte: FLANDOLI (2017).

2.2.2 Carga Não Linear

Uma carga não-linear é uma carga em que a corrente que circula por ela não tem a mesma forma de onda senoidal da tensão de alimentação, ou seja, trata-se de uma carga geradora de harmônicos de corrente, visto que a onda de corrente pode ser decomposta em harmônicos de diversas ordens, através da análise de Fourier. Os exemplos mais comuns são equipamentos eletrônicos que, em geral, necessitam de uma tensão contínua para seu funcionamento, utilizam então fontes de alimentação eletrônicas, tais como computadores, televisores, lâmpadas fluorescentes, lâmpadas LED, motores com funcionamento por inversor de frequência, etc.

A Figura 7 mostra como exemplo um dos vários comportamentos possíveis da corrente elétrica (I) de uma carga não linear, com uma tensão senoidal (U) sendo aplicada.

Figura 7 – Comportamento da corrente elétrica de uma carga não-linear



Fonte: adaptado de FLANDOLI (2017).

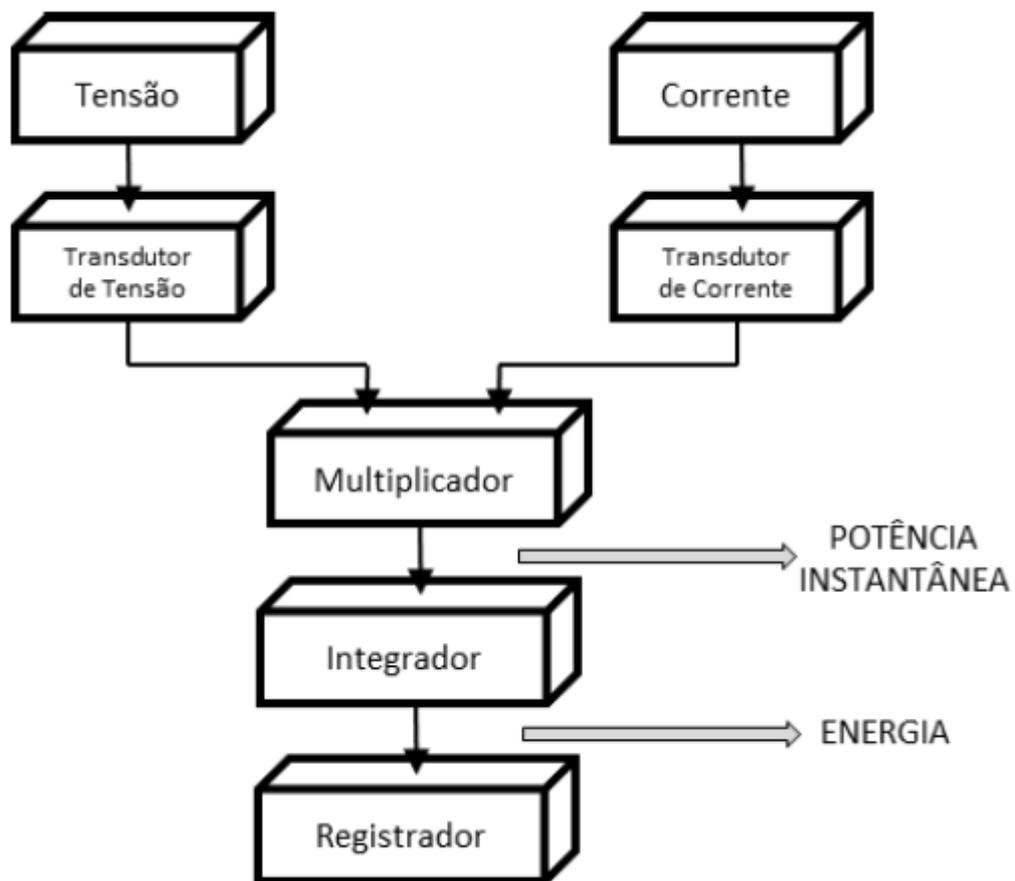
2.3 MEDIDOR ELETRÔNICO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.3.1 Medidor eletrônico

É um dispositivo formado basicamente por circuitos integrados dedicados à medição da energia elétrica consumida, são regulamentados pela NBR 14519, pela portaria INMETRO nº 431/2007, e pelo módulo 5 do PRODIST-ANEEL (Procedimentos de distribuição, da Agência Nacional de Energia Elétrica)

A Figura 8 mostrada na forma de diagrama de blocos, apresenta o funcionamento básico de um medidor do tipo eletrônico.

Figura 8 – Diagrama de blocos de um medidor eletrônico de energia elétrica



Fonte: O SETOR ELÉTRICO (2011).

Os transdutores de tensão e corrente são sensores capazes de converter as grandezas elétricas medidas de forma instantânea em um sinal que será posteriormente processado. A

potência instantânea $p(t)$ (Equação 10) será a tensão instantânea $v(t)$ multiplicada pela corrente instantânea $i(t)$.

$$p(t) = v(t).i(t) \quad (10)$$

Expandindo a Equação 10, temos que a tensão e corrente instantâneas são dadas pelas Equações 11 e 12, respectivamente:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \alpha) \quad (11)$$

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega t + \beta) \quad (12)$$

Sendo:

V_m – Valor de pico da tensão [V]

I_m – Valor de pico da corrente [A]

ω – Velocidade angular [rad/s]

α – Ângulo de deslocamento da tensão [rad]

β – Ângulo de deslocamento da corrente [rad]

A potência instantânea $p(t)$ [W] é representada pela Equação 13:

$$p(t) = V_m I_m \text{sen}(\omega t + \alpha). \text{sen}(\omega t + \beta) \quad (13)$$

A energia consumida é calculada através da integração da potência no tempo, conforme a Equação 14:

$$e(t) = \int_0^t p(t) dt = \int_0^t v(t).i(t) dt \quad (14)$$

O medidor eletrônico de energia elétrica ativa começou a ser empregado na década de 90 no Brasil, como evolução do medidor analógico, trazendo melhorias nas medições para as concessionárias, facilidade de instalação, operação, e leituras podendo incorporar novas funcionalidades, como a medição de energia elétrica reativa, medição bidirecional (microgeração fotovoltaica), tarifação horossazonal, comunicação etc.

Os medidores eletrônicos de energia elétrica em uso possuem as classes de exatidão mostradas na Tabela 3, regulamentados através do Regulamento Técnico Metrológico (RTM) de acordo com a Portaria INMETRO nº 431/2007

Tabela 3 – Classe de exatidão dos medidores de energia

Classe de exatidão dos medidores de energia	
A	2,00%
B	1,00%
C	0,50%
D	0,20%

Fonte: INMETRO (2007).

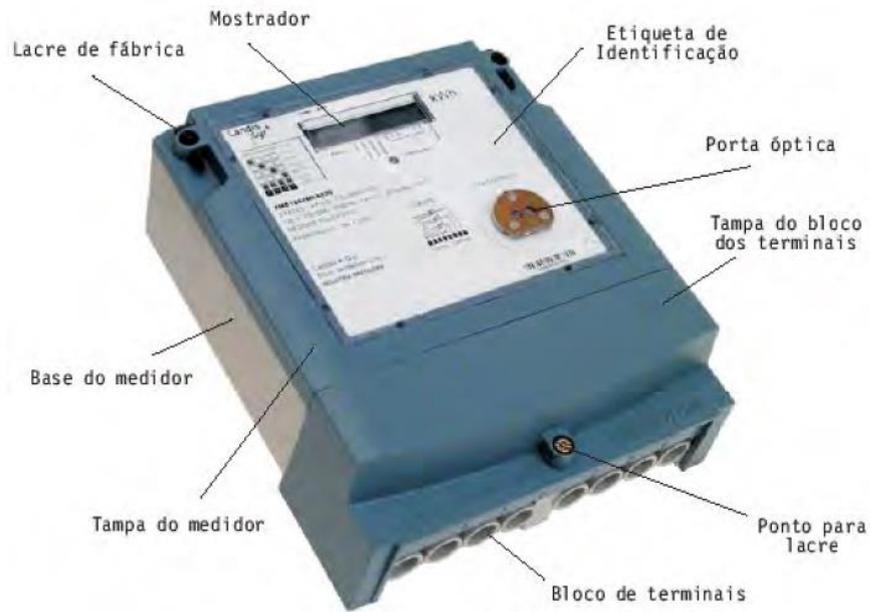
Os medidores mais utilizados no Brasil, no âmbito residencial, são das classes A e B, apresentando exatidão de 1% a 2%; os medidores analisados neste trabalho são classe B, com nível de exatidão de 1%.

De acordo ainda com Portaria INMETRO nº 431/2007, os únicos ensaios previstos com distorções harmônicas são denominados “ensaios adicionais”, que envolvem 10% de distorção harmônica individual de tensão e 40% de distorção harmônica individual de corrente, somente para o 5º harmônico. Os principais ensaios dos medidores se resumem ao ensaio com fator de potência unitário (resistivo), fator de potência 0,8 (capacitivo) e fator de potência 0,5 (indutivo). Não estão contemplados nesta norma ensaios com cargas eletrônicas e não-lineares que geram distorções diferentes do 5º harmônico.

2.3.2 Descrição Geral

Estes medidores seguem, em geral, com poucas alterações, o modelo da Figura 9.

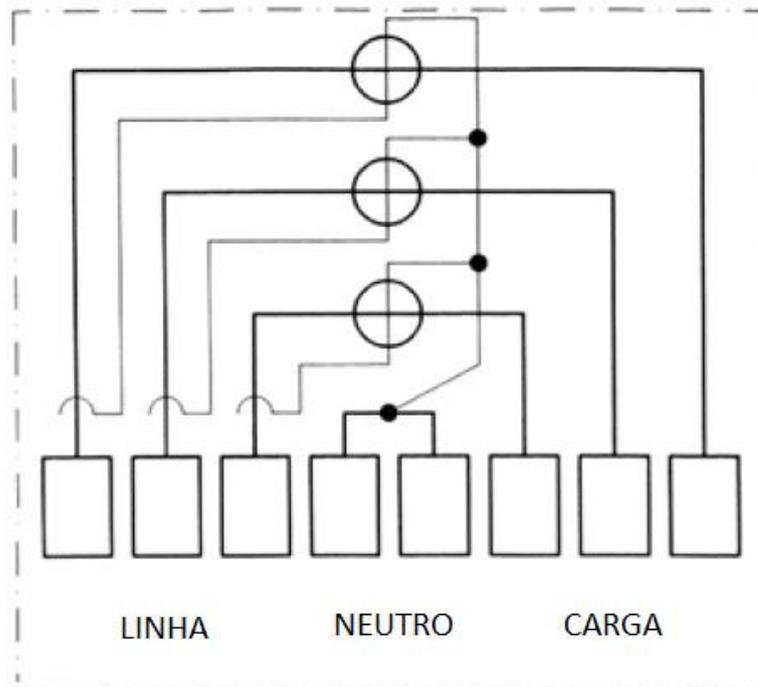
Figura 9 – Medidor eletrônico trifásico de energia elétrica



Fonte: Silva (2008).

A Figura 2.10 apresenta o diagrama de conexões de um medidor eletrônico trifásico.

Figura 2.10 – Diagrama de conexões de um medidor trifásico



Fonte: Produção do próprio autor

As Figuras 11 e 12 mostram os medidores eletrônicos trifásico bidirecional e bifásico monodirecional utilizados nos experimentos em laboratório.

Figura 11 – Medidor eletrônico trifásico bidirecional



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 12 – Medidor eletrônico bifásico monodirecional



Fonte: Produção do próprio autor

3 METODOLOGIA

3.1 ARRANJO LABORATORIAL

Para a realização das experiências, a alimentação foi provida através de uma fonte de tensão programável (Figura 13), modelo responsável por gerar perfis de tensão trifásica com harmônicos programados de até 50ª ordem; a saída da fonte foi ligada a um quadro elétrico capaz de realizar a comutação entre vários bancos de cargas diferentes (lâmpadas de vapor de sódio, vapor de mercúrio, fluorescentes tubulares, LED e incandescentes), bem como acoplar ou desacoplar uma subestação, utilizada para simular efeitos de uma linha de transmissão, que será explicada posteriormente.

Figura 13 – Fonte de tensão programável AMX-345

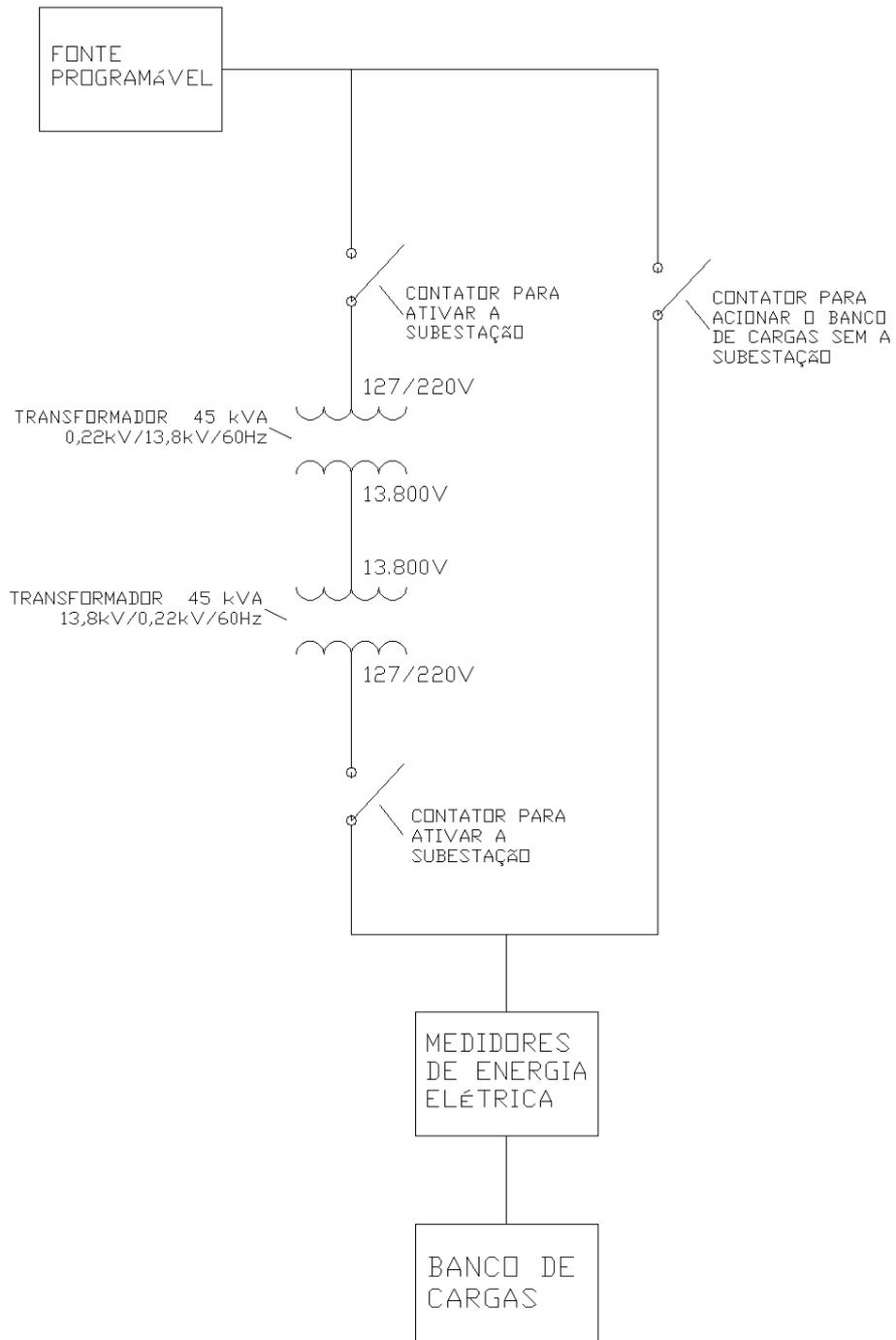


Fonte: Produção do próprio autor

O diagrama unifilar laboratorial simplificado é mostrado na Figura 14. A subestação 0,22/13,8/0,22kV (mostrada na Figura 15), é utilizada para simular efeitos de uma linha de transmissão, foi empregada em todos os testes (exceto o teste de referência com onda senoidal

pura), com o mesmo tipo de carga escolhida entre as opções disponíveis no banco de cargas (Figura 16)

Figura 14 – Diagrama unifilar simplificado do arranjo laboratorial



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 15 – Subestação 220V/13.800V/220V



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 16 – Banco de cargas de iluminação



Fonte: Produção do próprio autor

3.2 TESTES

Os testes foram realizados utilizando três sinais diferentes: onda senoidal (utilizado como referência), onda IEC 77A classe 2 (DHTV 14,4%) e onda quadrada (DHTV 38,6%). A onda IEC 77A classe 2 foi escolhida por ser uma onda padronizada para testes envolvendo distorções harmônicas de tensão e é apresentada na Tabela 4 e na Figura 17, a Figura 18 apresenta os níveis de distorção harmônica individual e total medidos; a onda quadrada foi escolhida para avaliar o comportamento dos medidores de energia elétrica operando em condições extremas de distorção harmônica.

Tabela 4 – Caracterização da onda IEC 77A classe 2

Ordem harmônica	Nível do harmônico (%)	Deslocamento angular (°)
1	100	0
3	6	0
5	8	0
7	7	0
11	7	0
13	6	0
DHTV = 14,4%		

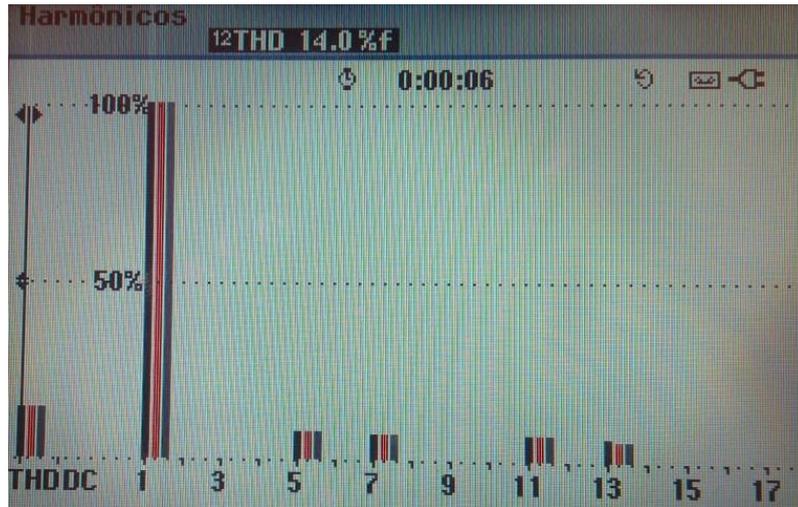
Fonte: PACIFIC POWER (2012).

Figura 17 – Onda IEC 77A classe 2 gerada através da fonte AMX-345



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 18 – Espectro de frequência do sinal IEC 77A classe 2



Fonte: Produção do próprio autor

As medições utilizaram como parâmetro de referência um analisador de qualidade de energia elétrica, marca Fluke modelo 435 (Figura 19), que foi conectado em paralelo junto com os medidores de energia elétrica. O erro foi calculado pela equação 15.

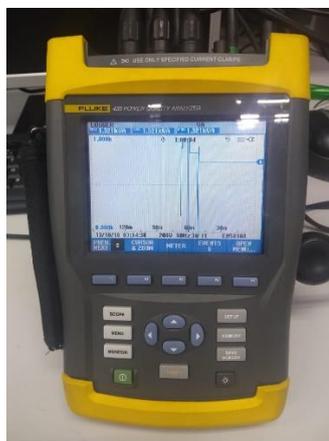
$$\varepsilon (\%) = \frac{E_1 - E_{REF}}{E_{REF}} \cdot 100 \quad (15)$$

Sendo:

E_1 – Energia elétrica medida através do medidor analisado

E_{REF} – Energia elétrica medida através do analisador de energia elétrica.

Figura 19 – Analisador de qualidade de energia elétrica Fluke 435



Fonte: Produção do próprio autor

Como foram analisados dois medidores de energia elétrica, sendo um medidor bifásico e outro medidor trifásico, as cargas utilizadas foram sempre equilibradas, a fim de se estabelecer uma relação de comparação entre os medidores. O analisador de rede que foi utilizado tem a capacidade de apenas armazenar os dados totais de energia do sistema trifásico, portanto, utilizando um sistema trifásico simétrico equilibrado, os resultados do medidor bifásico foram interpolados para se considerar a energia total consumida.

As medições foram realizadas da mesma forma que as concessionárias de energia elétrica realizam: foram anotados os valores iniciais registrados pelos medidores, e após um certo período (que variou entre 8 horas a 7 dias, de acordo com potência da carga a ser analisada), foram coletados os valores finais; com isso, bastou subtrair o valor final do valor inicial de cada medidor para se obter a energia registrada naquela medição.

Em algumas situações (principalmente envolvendo o uso da subestação, em função da corrente de magnetização dos transformadores), houve a necessidade de se realizar ajustes a fim de reduzir a carga total sistema, utilizando o chaveamento do painel de comutação de cargas, mas sempre utilizando somente o mesmo tipo de carga (lâmpadas incandescentes, fluorescentes, LED, vapor de mercúrio), já que a fonte utilizada, apesar de teoricamente suportar cargas de até 5 kVA, experimentalmente mostrou possuir limite de corrente de trabalho de cerca de 5 A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos experimentos, os resultados foram analisados para determinar o erro dos medidores, tomando como referência os dados apresentados pelo analisador de rede Fluke 435, como mostrado anteriormente.

Os valores percentuais dos erros obtidos com as cargas lâmpadas incandescentes (carga resistiva), fluorescentes, LED e vapor de mercúrio, são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 5, 6, 7 e 8. Os dados das medições realizadas estão nas tabelas do Apêndice A.

A partir destas tabelas, foram gerados gráficos dos erros dos medidores, em função da Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV), da Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI) e do Fator de Potência (FP), este último sendo composto tanto pela distorção harmônica de corrente e pelo deslocamento angular da carga ($\cos \varphi$), como visto anteriormente na Equação 8.

Tabela 5– Tabela dos resultados medidos com lâmpadas incandescentes

Sinal de tensão	Erro para carga: Lâmpadas Incandescentes		Distorção Harmônica		FP
	Medidor trifásico	Medidor bifásico	DHTV	DHTI	
Senoidal	0,98%	1,69%	0,05%	0,51%	-0,9844
IEC CLASS 2	3,46%	-2,02%	14,06%	14,22%	-0,9839
IEC CLASS 2 (SUBESTAÇÃO)	6,77%	6,37%	13,97%	14,26%	-0,9779
QUADRADA	7,50%	-1,88%	29,59%	30,18%	-0,9841
QUADRADA (SUBESTAÇÃO)	2,85%	2,85%	30,28%	31,03%	-0,9828

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 6 – Tabela dos resultados medidos com lâmpadas fluorescentes

Sinal de tensão	Erro para carga: Lâmpadas Fluorescentes		Distorção Harmônica		FP
	Medidor trifásico	Medidor bifásico	DHTV	DHTI	
Senoidal	7,28%	-1,28%	0,08%	12,73%	-0,9554
IEC CLASS 2	-0,54%	-4,31%	13,88%	35,26%	0,9400
IEC CLASS 2 (SUBESTAÇÃO)	2,70%	1,35%	13,80%	39,48%	0,9409
QUADRADA	-23,40%	-8,81%	29,56%	55,68%	0,8921
QUADRADA (SUBESTAÇÃO)	-1,82%	-8,00%	30,06%	81,00%	0,8131

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 7 – Tabela dos resultados medidos com lâmpadas LED

Sinal de tensão	Erro para carga: Lâmpadas LED		Distorção Harmônica		FP
	Medidor trifásico	Medidor bifásico	DHTV	DHTI	
Senoidal	14,78%	-5,79%	0,09%	9,78%	-0,8638
IEC CLASS 2	14,33%	-7,27%	14,49%	35,70%	-0,8402
IEC CLASS 2 (SUBESTAÇÃO)	9,79%	-1,30%	14,47%	28,71%	-0,8916
QUADRADA	537,52%	-42,48%	29,76%	89,60%	-0,6004
QUADRADA (SUBESTAÇÃO)	1,52%	-7,48%	31,85%	65,69%	-0,7892

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 8 – Tabela dos resultados medidos com lâmpadas vapor de mercúrio

Sinal de tensão	Erro para carga: Lâmpadas Vapor de Mercúrio		Distorção Harmônica		FP
	Medidor trifásico	Medidor bifásico	DHTV	DHTI	
Senoidal	-8,61%	-11,56%	0,08%	2,93%	0,7832
IEC CLASS 2	-11,28%	-12,45%	14,45%	60,38%	0,6921
IEC CLASS 2 (SUBESTAÇÃO)	-9,51%	-26,12%	14,61%	69,20%	0,6258
QUADRADA	-22,64%	-40,79%	33,54%	289,81%	0,2245
QUADRADA (SUBESTAÇÃO)	-21,01%	-25,48%	33,51%	285,10%	0,2282

Fonte: Produção do próprio autor

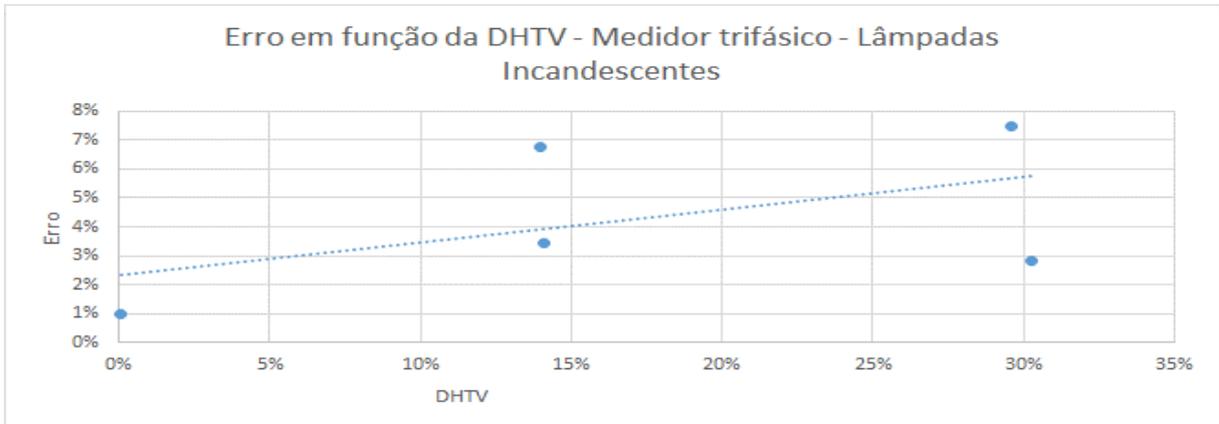
4.1 MEDIDOR TRIFÁSICO

4.1.1 Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV)

As Figuras 20 a 23 expõem os dados as tabelas 5 a 8, respectivamente, para as cargas de lâmpadas incandescentes, fluorescentes, LEDs e vapor de mercúrio, nesta ordem, mostrando erro calculado para as condições analisadas, em função da Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV) medida para o medidor trifásico bidirecional.

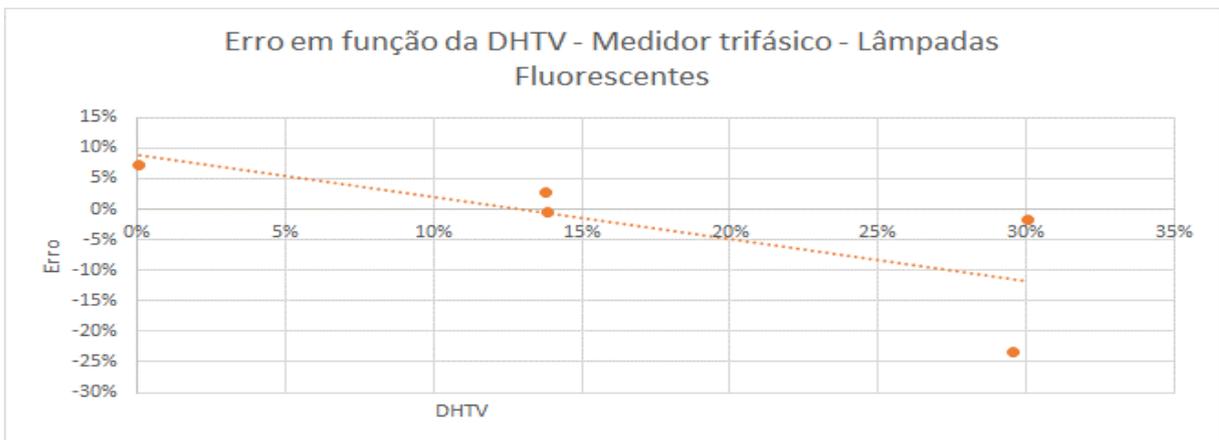
Observa-se, que na medição de referência (com carga resistiva – lâmpadas incandescentes), o erro do medidor foi de 0,98%, se enquadrando na sua classe de exatidão (1%). Com o aumento da DHTV, o erro, positivo (medidor eletrônico medindo mais do que o consumido), aumentou.

Figura 20 – Erro do medidor trifásico em função da DHTV com Lâmpadas Incandescentes



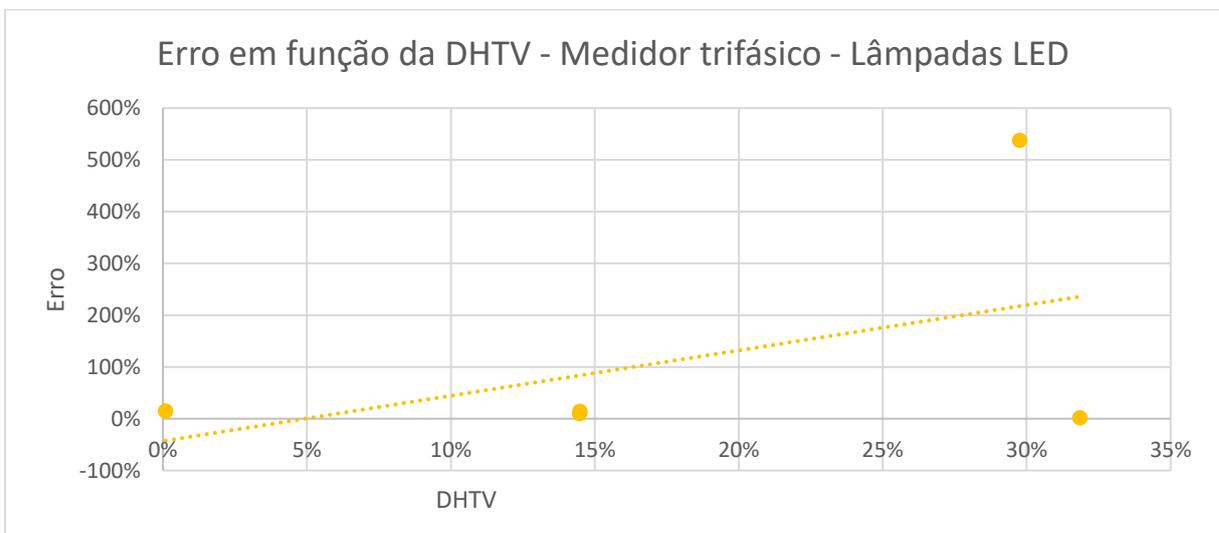
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 21 – Erro do medidor trifásico em função da DHTV com Lâmpadas Fluorescentes



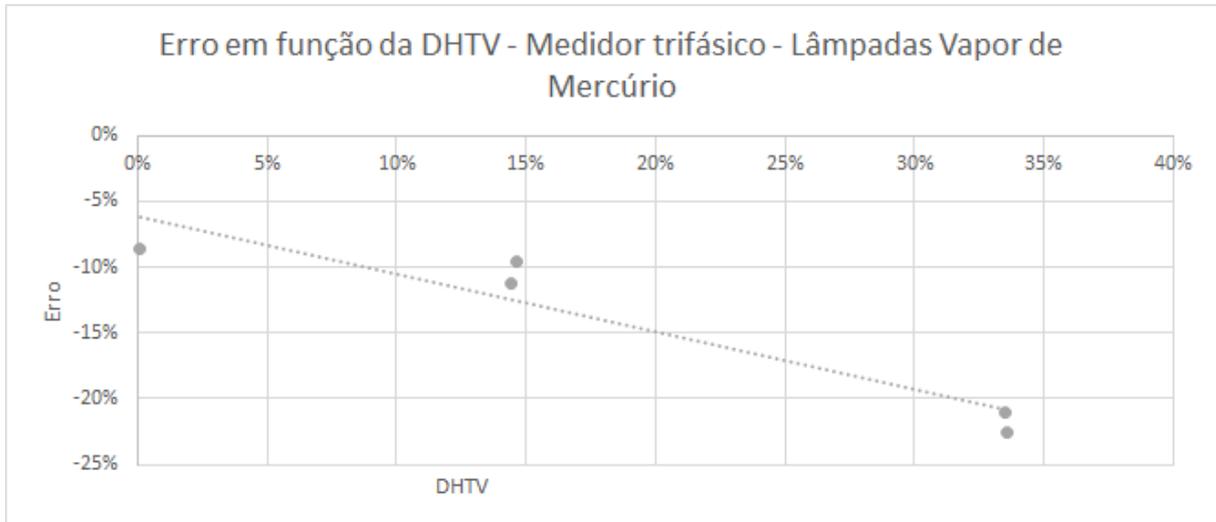
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 22 – Erro do medidor trifásico em função da DHTV com Lâmpadas LED



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 23 – Erro do medidor trifásico em função da DHTV com Lâmpadas Vapor de Mercúrio



Fonte: Produção do próprio autor

Em geral, este medidor apresentou taxa de erro negativo (medidor eletrônico medindo menos do que o consumido), crescente com a DHTV para as cargas eletrônicas (lâmpadas fluorescentes e vapor de mercúrio, que apresentaram fator de potência capacitivo nas medições com harmônicos), trazendo, portanto, prejuízo para a concessionária de energia elétrica.

Quanto a medição foi realizada com o uso da subestação, observou-se pouca diferença nos valores da DHTV, apesar disso, nesses casos (com a inserção dos transformadores), o medidor trifásico apresentou uma taxa de erro consideravelmente menor.

A medição realizada com lâmpadas LED e onda quadrada (condição extrema) obteve, para este medidor, uma taxa de erro de cerca de 600%, no entanto, com o uso da subestação, que atua como filtro passa-baixas, devido à característica indutiva, apesar de ter havido pouca alteração na DHTV, o medidor se comportou de forma bastante precisa, levando-se em consideração a alimentação pela onda quadrada, o erro (positivo) foi de apenas 1,52%.

Apenas no caso das lâmpadas fluorescentes (carga que apresentou comportamento indutivo) a tendência do aumento do erro com a DHTV foi negativa.

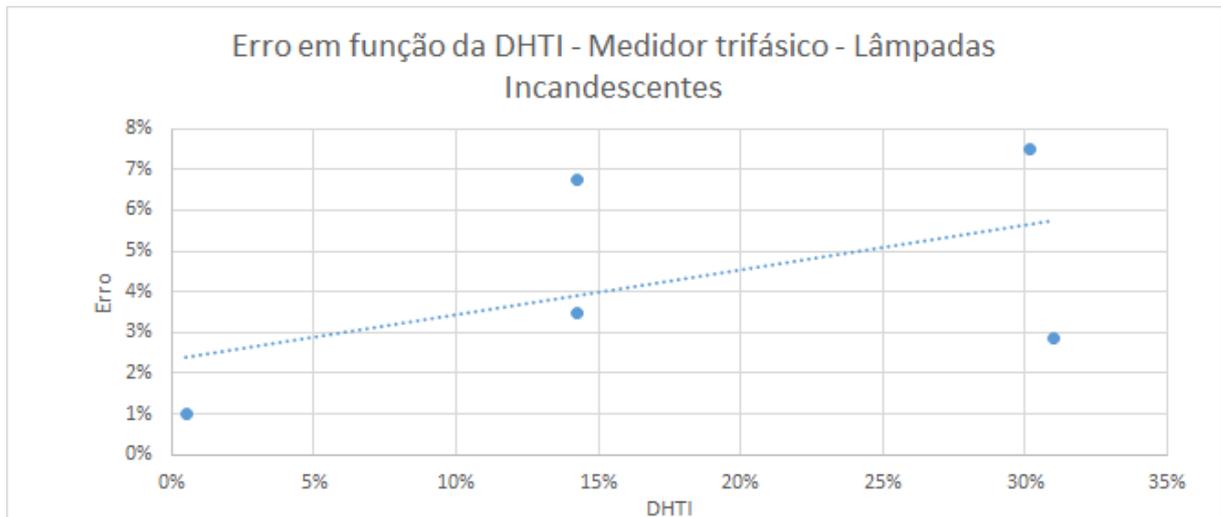
Em uma condição de trabalho mais cotidiana, o medidor apresentou erros quase 15% com lâmpadas LED, mesmo quando a onda de tensão aplicada o sinal senoidal puro, com baixíssima distorção harmônica. Neste caso, o medidor traria prejuízo para o consumidor, que pagaria mais energia do que ele realmente estaria consumindo. Este mesmo erro ocorreu quando ensaiado com lâmpadas fluorescentes, com medições de quase 8% a mais. No entanto, quando foram consideradas as lâmpadas de vapor de mercúrio, nas mesmas condições (sinal

senoidal puro), foi detectado um erro negativo de 8,6%, ou seja, nesta condição, o prejuízo seria da concessionária de energia elétrica.

4.1.2 Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI)

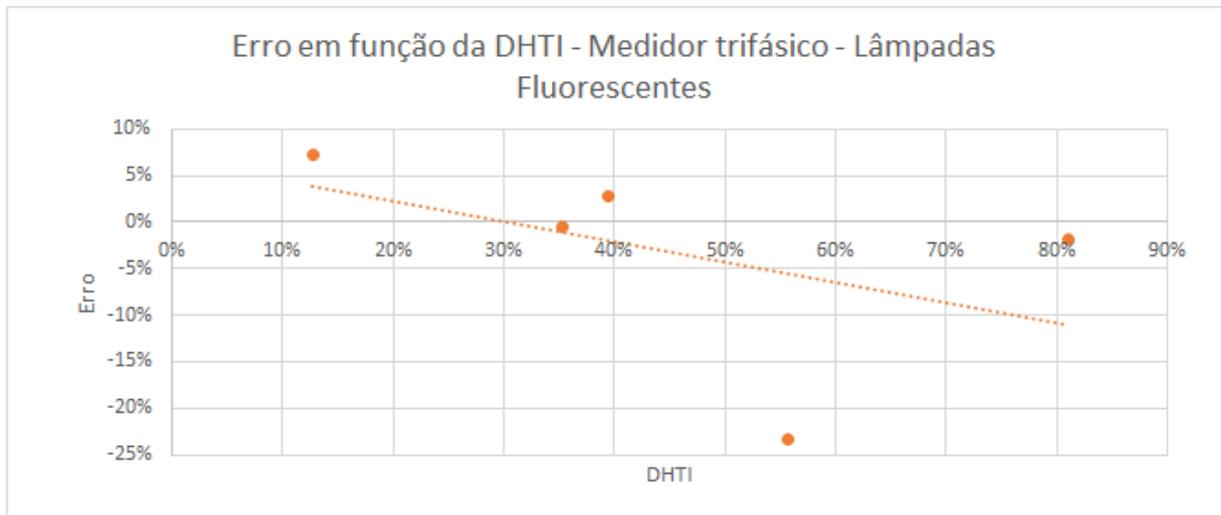
As Figuras 24, 25, 26 e 27 expõem os dados das tabelas 5 a 8, respectivamente, mostrando o erro calculado para as condições analisadas, em função da Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI) medida para o medidor trifásico bidirecional.

Figura 24 – Erro do medidor trifásico em função da DHTI com Lâmpadas Incandescentes



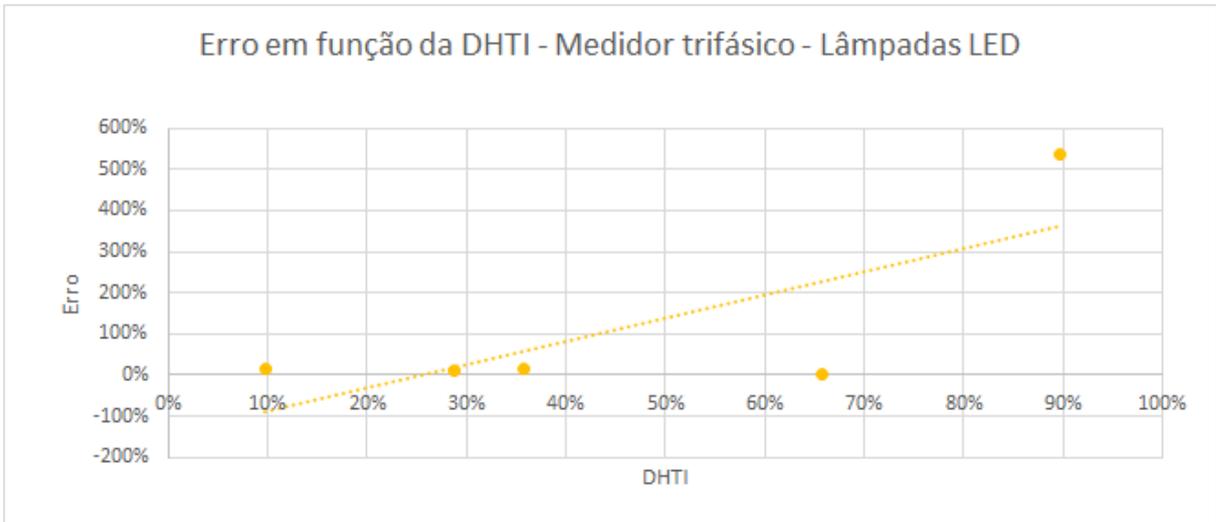
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 25 – Erro do medidor trifásico em função da DHTI com Lâmpadas Fluorescentes



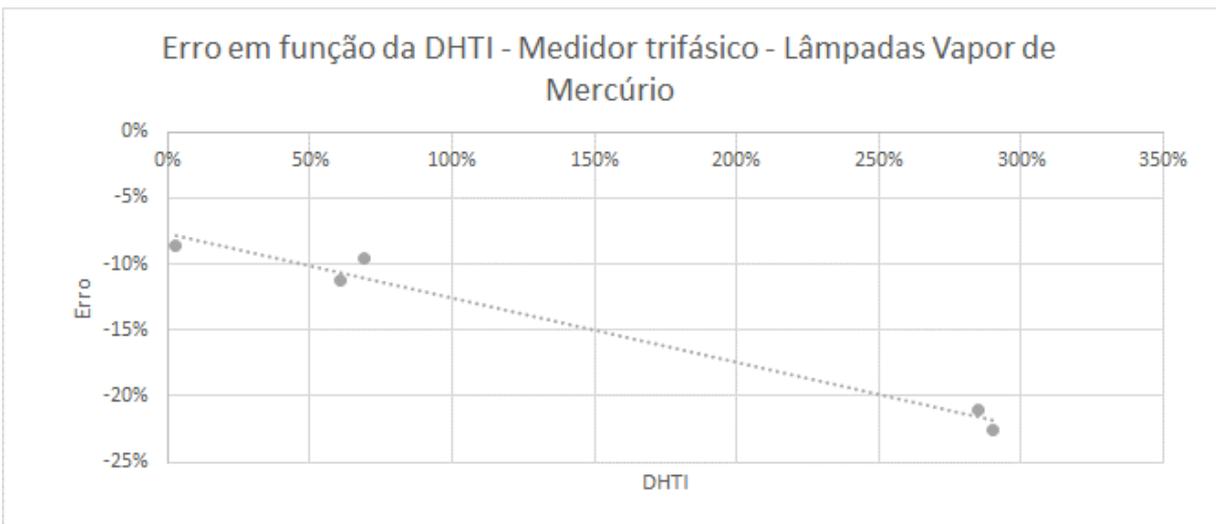
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 26 – Erro do medidor trifásico em função da DHTI com Lâmpadas LED



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 27 – Erro do medidor trifásico em função da DHTI com Lâmpadas Vapor de Mercúrio



Fonte: Produção do próprio autor

Com base nos gráficos, observa-se grande semelhança com os gráficos anteriores, mostrando que a distorção harmônica total de corrente “acompanha” a distorção de tensão quando se observa a sua influência quanto aos erros do medidor trifásico.

Observa-se grande distorção na corrente elétrica, especialmente envolvendo as lâmpadas de vapor de mercúrio, que chegaram a apresentar distorção de quase 300%, enquanto as lâmpadas fluorescentes e LEDs chegaram a cerca de 80%. Com a carga resistiva (lâmpadas incandescentes), a DHTI foi praticamente a mesma da DHTI, por se tratar de uma carga linear.

Pode-se observar também que a distorção causada na corrente, mesmo com a alimentação realizada através de uma onda senoidal praticamente isenta de distorções harmônicas, foi o suficiente para que o medidor trifásico, com as cargas de lâmpadas vapor de mercúrio e fluorescentes, já foram o suficiente para causar erros consideráveis na energia medida por este medidor.

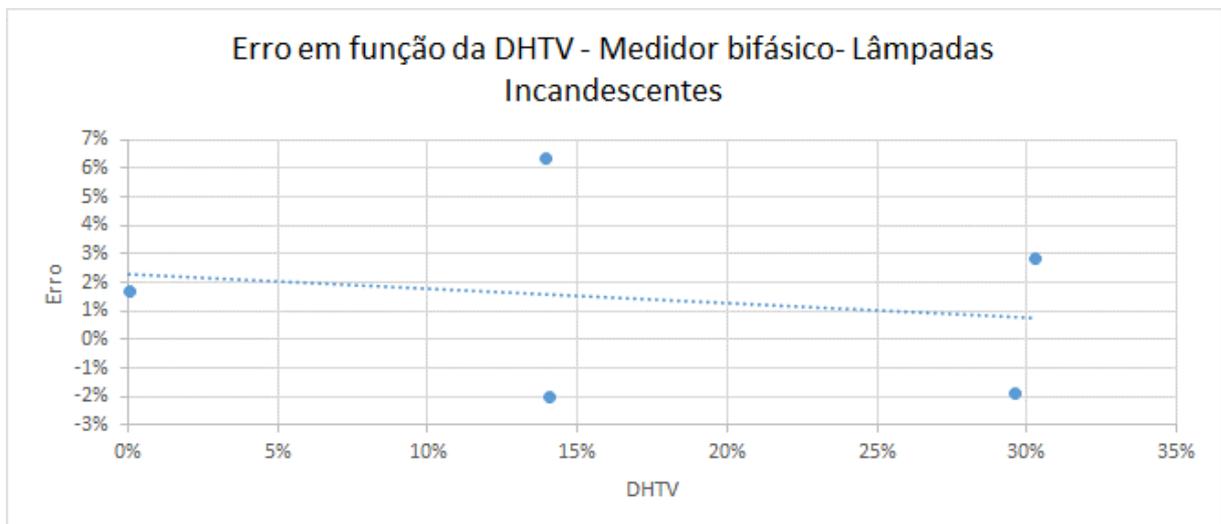
4.2 MEDIDOR BIFÁSICO

4.2.1 Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV)

As Figuras 28, 29, 30 e 21 expõem os dados das tabelas 5 a 8, respectivamente, para as cargas de lâmpadas incandescentes, fluorescentes, LEDs e vapor de mercúrio, nesta ordem, mostrando o erro calculado para as condições analisadas, em função da Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV) medida para o medidor bifásico.

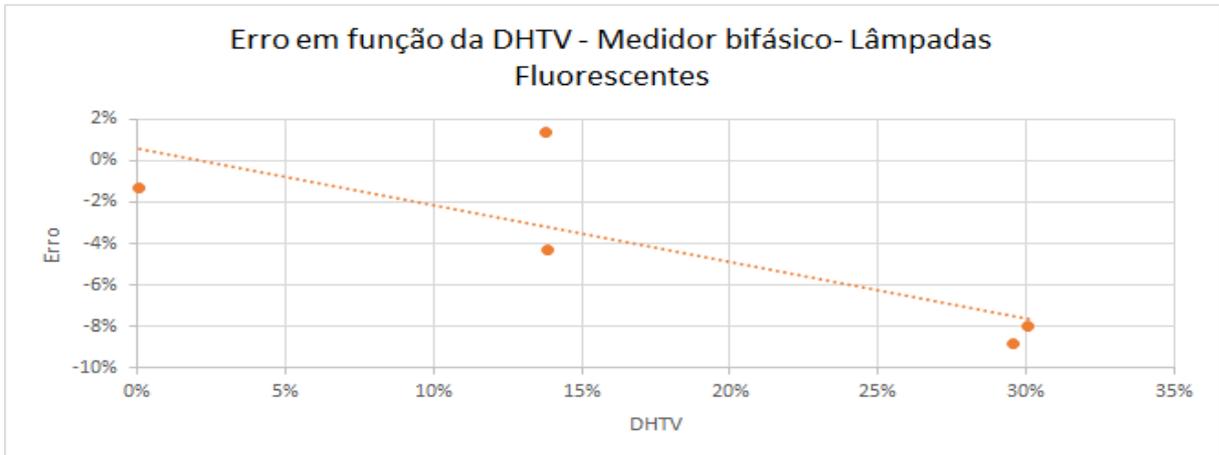
Em geral, o medidor bifásico apresentou tendência de erro negativo para o aumento da DHTV, ou seja, conforme a distorção harmônica de tensão aumenta, a tendência é o aparelho medir menos energia ativa do que aquela que realmente está sendo consumida, trazendo, portanto, prejuízo para a concessionária de energia elétrica. A única condição que este medidor apresentou erro positivo foi nas medições com lâmpadas incandescentes com uso da subestação.

Figura 28 – Erro do medidor bifásico em função da DHTV com Lâmpadas Incandescentes



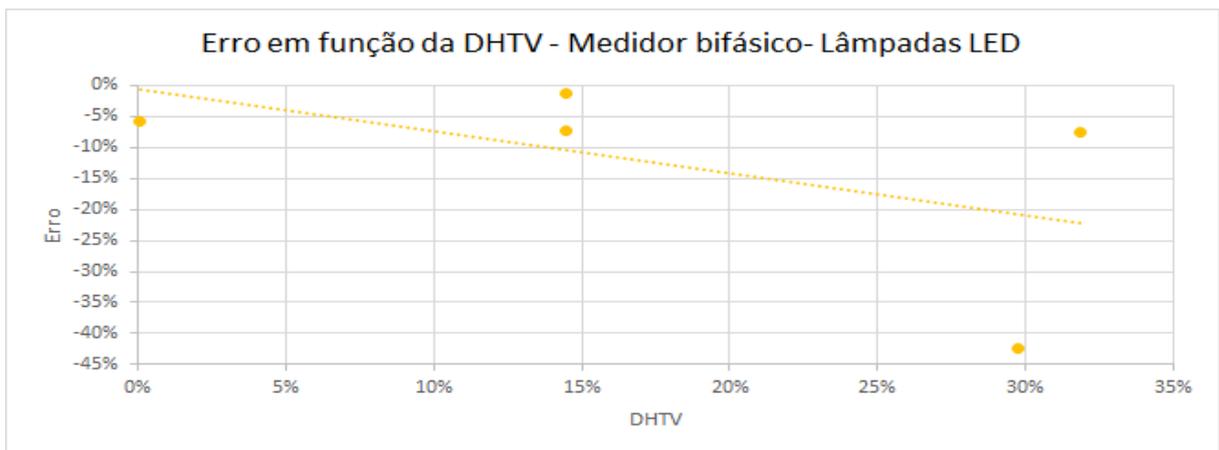
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 29 – Erro do medidor bifásico em função da DHTV com Lâmpadas Fluorescentes



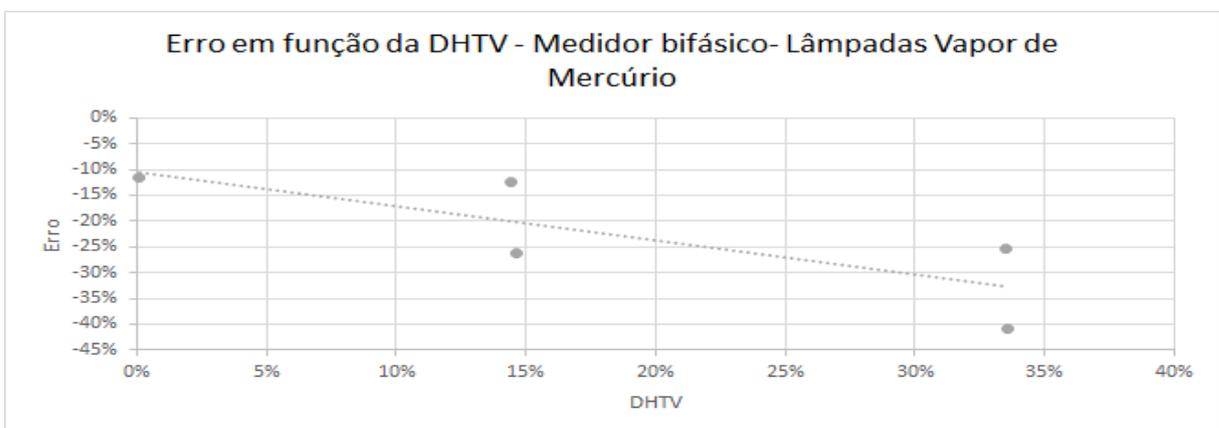
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.30 – Erro do medidor bifásico em função da DHTV com Lâmpadas LED



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 4.31 – Erro do medidor bifásico em função da DHTV com Lâmpadas Vapor de Mercúrio



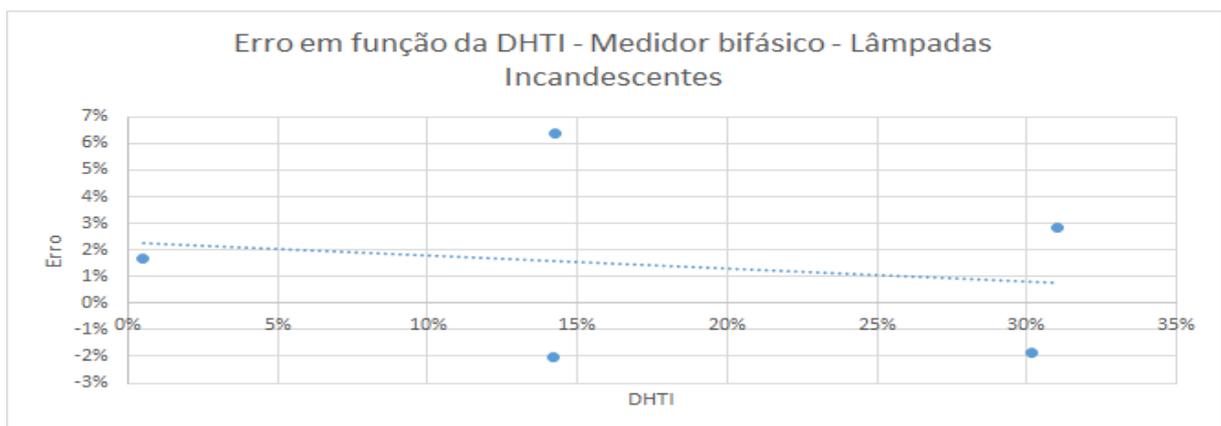
Fonte: Produção do próprio autor

Apesar do comportamento mais linear e sem tantos extremos como do que o do medidor trifásico; mesmo com o sinal senoidal, em nenhuma condição o medidor bifásico apresentou erro menor do que 1%, que é a classe de exatidão do mesmo. Os erros, com sinal de tensão senoidal, chegaram variaram de +1,69% com as lâmpadas incandescentes, até o caso mais extremo de -11,56% com lâmpadas vapor de mercúrio.

4.2.2 Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI)

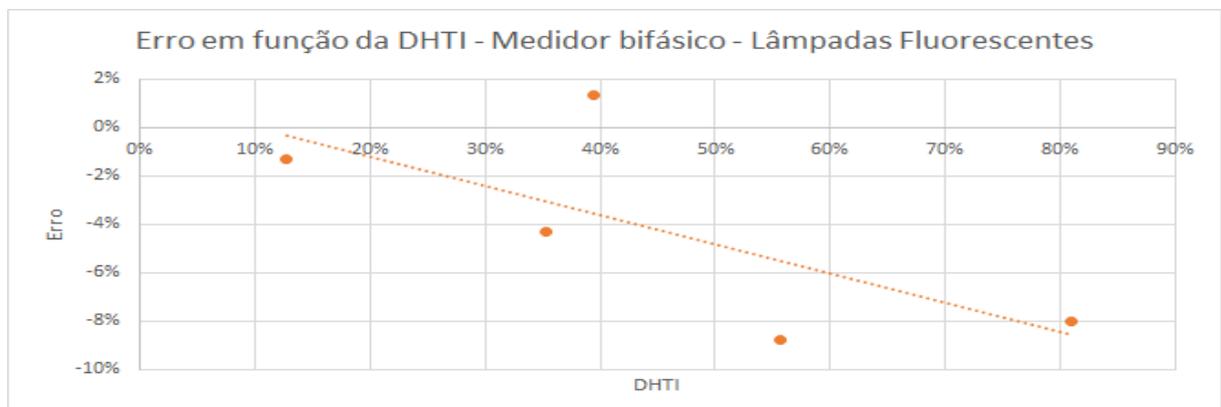
As Figuras 32, 33, 34 e 35 expõem os dados das tabelas 5 a 8, respectivamente, mostrando o erro calculado para as condições analisadas, em função da Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI) medida para o medidor bifásico.

Figura 32 – Erro do medidor bifásico em função da DHTI com Lâmpadas Incandescentes



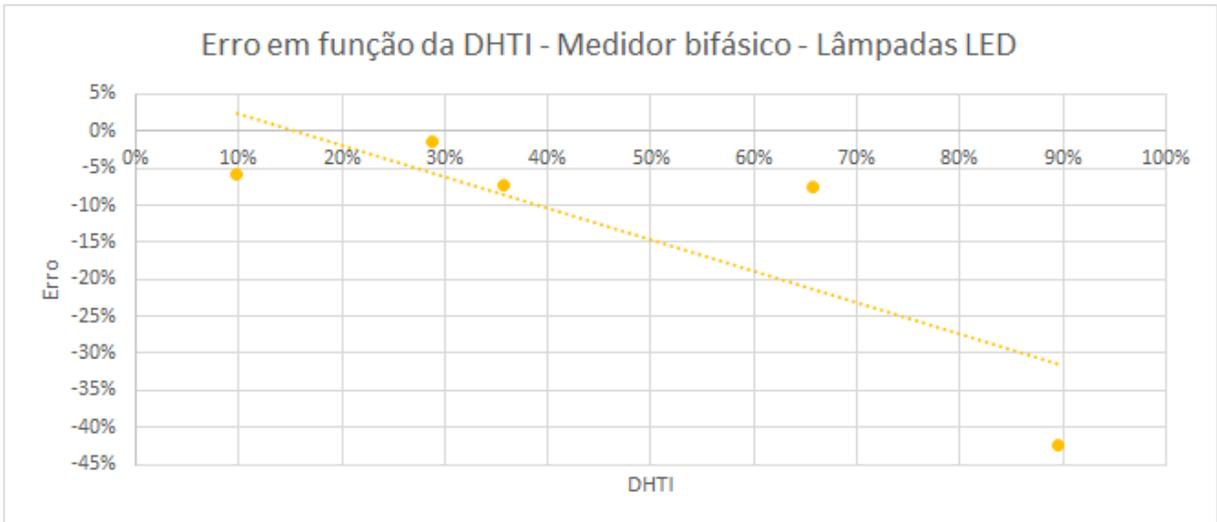
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 33 – Erro do medidor bifásico em função da DHTI com Lâmpadas Fluorescentes



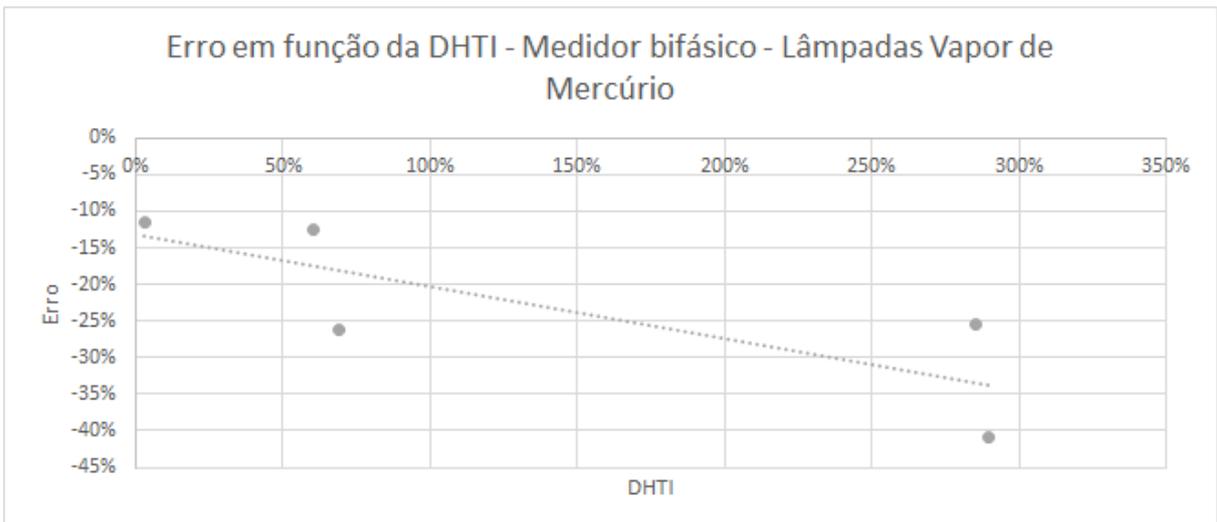
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 34 – Erro do medidor bifásico em função da DHTI com Lâmpadas LED



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 35 – Erro do medidor bifásico em função da DHTI com Lâmpadas Vapor de Mercúrio



Fonte: Produção do próprio autor

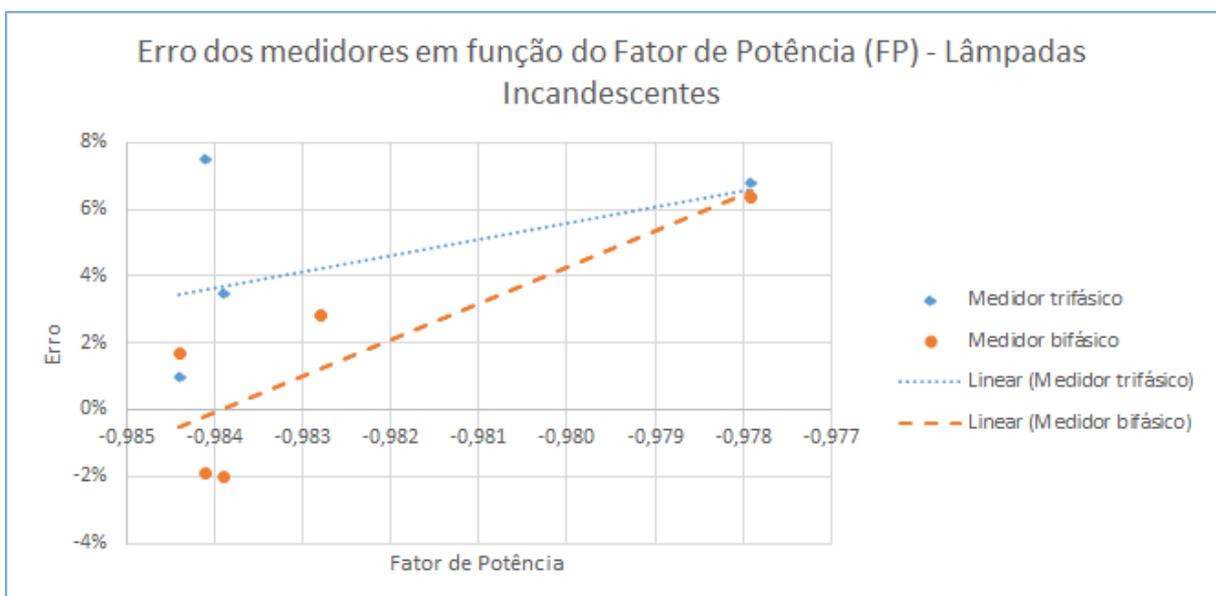
Com base nos gráficos, observa-se grande semelhança com os gráficos anteriores, mostrando que a distorção harmônica total de corrente “acompanha” a distorção de tensão quando se observa a sua influência quanto aos erros do medidor bifásico.

4.3 ANÁLISE EM RELAÇÃO AO FATOR DE POTÊNCIA

Ainda com base nos dados constantes nas Tabelas 5 a 8, os gráficos das Figuras 36 a 40 mostram os erros dos medidores em relação ao Fator de Potência (FP) geral de cada um dos tipos de cargas e suas respectivas experiências. Conforme visto anteriormente na Equação 2.8, o fator de potência em um ambiente sujeito às distorções harmônicas de corrente é uma composição do fator de potência devido ao deslocamento angular (proveniente do tipo de carga, capacitiva, resistiva ou indutiva), e o fator de potência de distorção, consequência dos harmônicos.

A Figura 36 mostra o comportamento de ambos os medidores para uma carga linear e resistiva (lâmpadas incandescentes). A expectativa seria de que o fator de potência para as lâmpadas incandescentes fosse unitário, ao menos quando sujeitas à tensão senoidal (neste caso, o fator de potência medido foi de 0,9844 indutivo), esta diferença pode ser explicada pela indutância dos cabos condutores de eletricidade, desde a fonte até o banco de cargas, chegando a cerca de 40 metros de cabos no seu ponto mais extremo. Observa-se que, conforme mais próximo do valor unitário do fator de potência (negativo, por se tratar de carga com característica indutiva), menor foi o erro dos medidores; conforme o fator de potência decresce (em módulo), o erro dos medidores aumentou. Lembrando que este fator de potência é composto tanto pela característica da carga quanto pela distorção harmônica da corrente.

Figura 36 – Erro dos medidores bifásico e trifásico em função do fator de potência com lâmpadas incandescentes

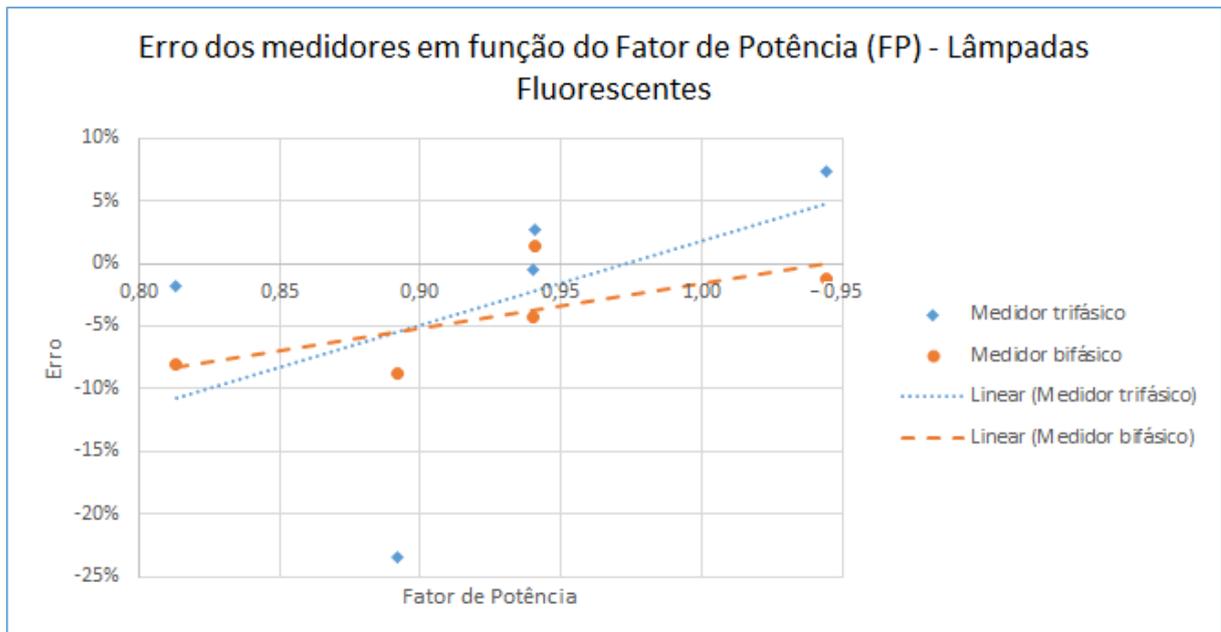


Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 37 mostra o comportamento de ambos os medidores para uma carga eletrônica, lâmpadas fluorescentes, em função do fator de potência. Neste caso, o fator de potência geral variou entre aproximadamente 0,8 (capacitivo) e $-0,95$ (indutivo).

Com o sinal senoidal puro, o fator de potência foi próximo de $-0,95$ (indutivo), neste caso, o medidor trifásico apresentou erro de aproximadamente 7% e o bifásico, de $-1,3\%$. Com o aumento da DHTV, a carga passou a apresentar fator de potência capacitivo (positivo). Ambos os medidores se comportaram de forma parecida ao apresentarem a mesma tendência de erro negativo ao se reduzir o fator de potência (capacitivo), devido ao aumento das distorções harmônicas.

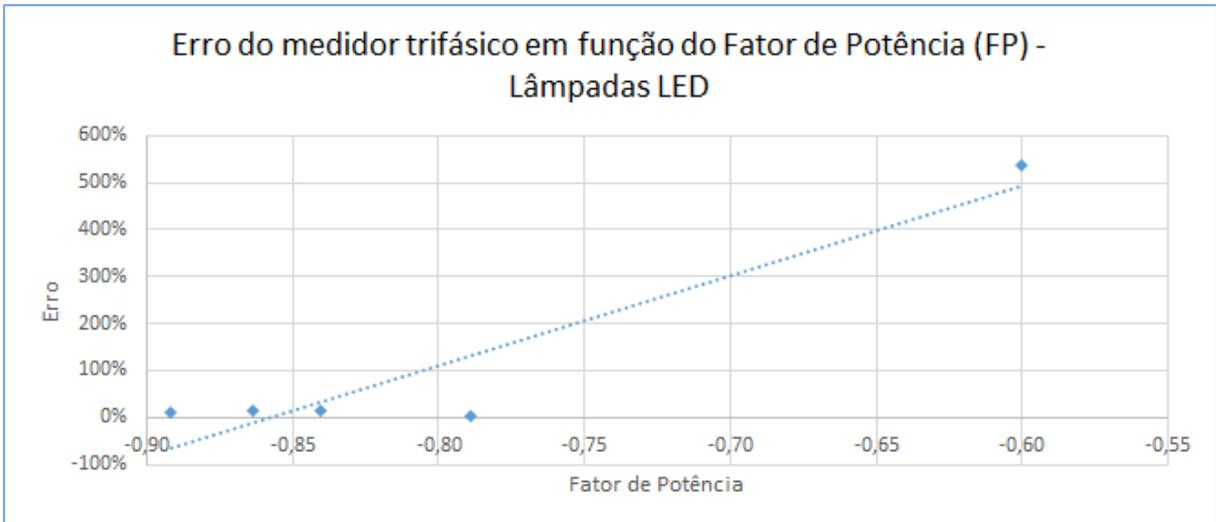
Figura 37 – Erro dos medidores bifásico e trifásico em função do fator de potência com lâmpadas fluorescentes



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 38 mostra o comportamento do medidor trifásico com a carga de lâmpadas LED. Em todas as situações para esta carga, o fator de potência medido foi negativo (indutivo). Conforme a distorção harmônica aumentava, o erro do medidor (positivo), aumentava, chegando a quase 600% no cenário mais extremo.

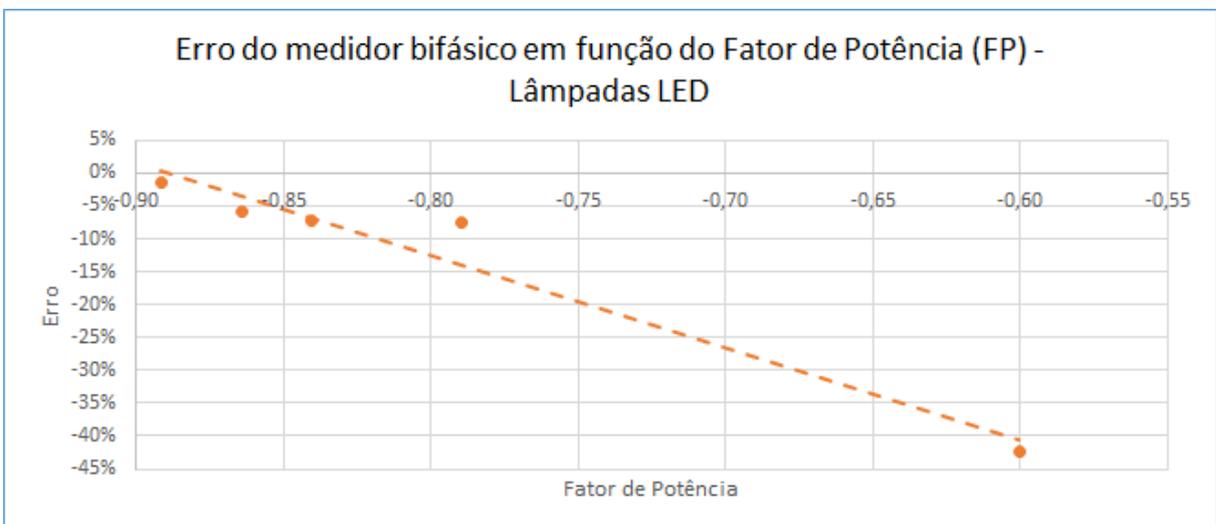
Figura 38 – Erro do medidor trifásico em função do fator de potência com lâmpadas LED



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 39 mostra o comportamento do medidor bifásico com a carga de lâmpadas LED. Ao contrário do medidor trifásico, o bifásico apresentou tendência de erro negativo, chegando a -40%, no cenário mais extremo.

Figura 39– Erro do medidor bifásico em função do fator de potência com lâmpadas LED

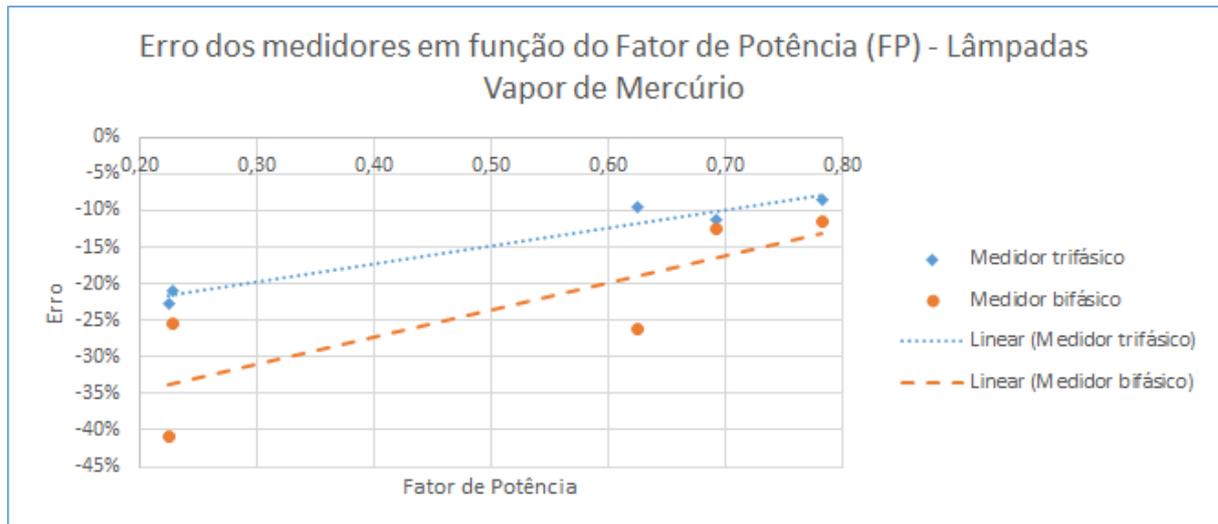


Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 40 mostra o comportamento de ambos os medidores com a carga de lâmpadas vapor de mercúrio. Em todas as situações para esta carga, o fator de potência medido foi positivo (capacitivo) e o erro dos medidores foi negativo. Conforme este fator de potência diminuiu (chegando a quase 0,2), o erro dos medidores aumentou, chegando a até -40% no

caso do medidor bifásico e a -20% no caso do medidor trifásico, para fator de potência de aproximadamente 0,2.

Figura 40 – Erro dos medidores bifásico e trifásico em função do fator de potência com lâmpadas vapor de mercúrio ‘



5 CONCLUSÃO

As normas gerais que tratam dos medidores de energia elétrica não contemplam ensaios sob distorções harmônicas de tensão (DHTV) maiores que 1%, ainda que o PRODIST tolere distorções de até 10% e nem com cargas eletrônicas, citando apenas o tipo de carga e fator de potência que a mesma deve possuir. Portanto, os medidores foram ensaiados em situações que vão além do que as normas dos medidores preveem, em alguns casos, dentro das distorções toleradas pelo PRODIST e em outros, acima destas distorções, em casos mais críticos.

Mesmo com sinais senoidais, os medidores apresentaram erros de medição para cargas eletrônicas, na maioria das vezes erros negativos, gerando prejuízo para a companhia concessionária de energia elétrica.

O medidor que melhor se comportou em todas as condições analisadas foi o medidor bifásico, que apresentou tendência de erro sempre negativa, no entanto, o maior erro detectado foi de -42%, com a carga de lâmpadas LED, mostrando a sua robustez, mesmo em condições extremas. Enquanto isso, o medidor trifásico, na condição extrema com onda quadrada e carga de iluminação LED apresentou erros positivos de quase 600%; apesar desta situação, este medidor, quando consideradas a condição normatizada de ensaio feita em laboratório (FP=1, lâmpadas incandescentes, tensão senoidal), foi o único que se enquadrou dentro da classe de exatidão do medidor. Apesar disso, não se pode dizer que nesta condição, o medidor bifásico não corresponde à classe de exatidão de 1%, pois para este medidor, bifásico, foi utilizado a interpolação linear para chegar ao resultado que este teria medido se fosse um medidor trifásico, apesar de em laboratório se ter trabalhado sempre com cargas simétricas e equilibradas, este erro pode ter sido causado por pequenas diferenças construtivas entre as cargas, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade de energia elétrica. Brasília, 2010. 62 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: módulo 5 – sistemas de medição. Brasília, 2017. 31 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14.519: medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) – especificação. Rio de Janeiro, 1997. 23 p.
- BRAINLY. Correção do Fator de Potência. Disponível em: <<https://brainly.com.br/tarefa/12329644>> Acesso em: 11 nov. 2018.
- FLANDOLI, F. Harmônicas. Disponível em: <<http://www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/6-qualidade-da-energia-eletrica/harmonicas/>>. Acesso em: 10 out. 2018.
- INMETRO. Portaria nº 431: medidores eletrônicos de energia elétrica. Duque de Caxias, 2007. 60 p.
- PACIFIC POWER. Datasheet AMX-345. Disponível em: <https://pacificpower.com/Resources/Documents/345AMX_Datasheet.pdf> Acesso em: 02 set. 2018.
- REIS. Fator de Potência. Disponível em: <<http://baudaeletronica.blogspot.com/2012/05/fator-de-potencia.html>> Acesso em: 10 nov. 2018.
- RODRIGUES, A. M. Influência da distorção harmônica e de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa. 2004. 11 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2009.
- SCHNEIDER ELECTRIC. Eliminação de harmônicas em instalações. Disponível em: <https://www.apc.com/salestools/LARD-8K6K8S/LARD-8K6K8S_R2_PT.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- SCHNEIDER ELECTRIC. Correção do Fator de Potência / Harmônicas. Disponível em: <<https://www.se.com/br/pt/work/services/energy-and-sustainability/eficiencia-energetica/correcao-fator-potencia-harmonicas/>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- SEARA DA CIÊNCIA. Série de Fourier. Disponível em: <<http://www.searadaciencia.ufc.br/tintim/matematica/fourier/fourier5.htm>> Acesso em: 14 nov. 2018.

SILVA, L. C. E. Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa. 2008. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

SILVEIRA. Fator de Potência. Disponível em: < <https://www.citisystems.com.br/fator-de-potencia-legislacao-distribuicao-correcoes/>> Acesso em: 11 nov. 2018.

VELASCO, L. N. Análise experimental de erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletromagnéticos tipo indução, sujeitos a distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados. 2007. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

APÊNDICE A

Lâmpadas fluorescentes tubulares

Fluorescente tubular	Medidor 3F		
	Inicial (kWh)	Final (kWh)	Medição (kWh)
SENOIDAL (REF)	338,67	358,23	19,56
IEC CLASS 2	269,73	300,91	31,18
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	1220,03	1223,07	3,04
SQUARE	1198,34	1203,38	5,04
SQUARE (TRANSFORMADOR)	1203,38	1210,52	7,14

Fluorescente tubular	Medidor 2F		
	Inicial (kWh)	Final (kWh)	Medição (kWh) (interpolado)
SENOIDAL (REF)	206	218	18
IEC CLASS 2	162	182	30
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	549	551	3
SQUARE	534	538	6
SQUARE (TRANSFORMADOR)	538	542,46	6,69

Fluorescente tubular	Fluke			FP
	Medição (kWh)	Medição (kVAR)	Medição (kVA)	
SENOIDAL (REF)	18,233	5,636	19,084	-0,9554
IEC CLASS 2	31,35	-11,238	33,35	0,9400
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	2,96	-0,488	3,146	0,9409
SQUARE	6,58	-3,329	7,376	0,8921
SQUARE (TRANSFORMADOR)	7,272	-5,205	8,943	0,8131

Fluorescente tubular	Medidor 2F	Medidor 3F	Distorção Harmônica	
	Erro		DHTV	DHTI
SENOIDAL (REF)	-1,28%	7,28%	0,08%	12,73%
IEC CLASS 2	-4,31%	-0,54%	13,88%	35,26%
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	1,35%	2,70%	13,80%	39,48%
SQUARE	-8,81%	-23,40%	29,56%	55,68%
SQUARE (TRANSFORMADOR)	-8,00%	-1,82%	30,06%	81,00%

Lâmpadas Vapor de mercúrio

Vapor de Mercúrio	Medidor 3F		
	Inicial (kWh)	Final (kWh)	Medição (kWh)
SENOIDAL (REF)	1193,78	1196,88	3,1
IEC CLASS 2	1262,7	1267,26	4,56
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	1259,25	1261,62	2,37
SQUARE	509,34	513,26	3,92
SQUARE (TRANSFORMADOR)	532,35	534,47	2,12

Vapor de Mercúrio	Medidor 2F		
	Inicial (kWh)	Final (kWh)	Medição (kWh) (interpolado)
SENOIDAL (REF)	531	533	3
IEC CLASS 2	562	565	4,5
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	560	561,29	1,935
SQUARE	306	308	3
SQUARE (TRANSFORMADOR)	321	323	2

Vapor de Mercúrio	Fluke			FP
	Medição (kWh)	Medição (kVAR)	Medição (kVA)	
SENOIDAL (REF)	3,392	-2,676	4,331	0,7832
IEC CLASS 2	5,14	5,25	7,427	0,6921
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	2,619	-2,451	4,185	0,6258
SQUARE	5,067	-21,743	22,57	0,2245
SQUARE (TRANSFORMADOR)	2,684	-11,264	11,76	0,2282

Vapor de Mercúrio	Medidor 2F	Medidor 3F	Distorção Harmônica	
	Erro		DHTV	DHTI
SENOIDAL (REF)	-11,56%	-8,61%	0,08%	2,93%
IEC CLASS 2	-12,45%	-11,28%	14,45%	60,38%
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	-26,12%	-9,51%	14,61%	69,20%
SQUARE	-40,79%	-22,64%	33,54%	289,81%
SQUARE (TRANSFORMADOR)	-25,48%	-21,01%	33,51%	285,10%

Lâmpadas LED

LED	Medidor 3F		
	Inicial (kWh)	Final (kWh)	Medição (kWh)
SENOIDAL (REF)	1223,07	1227,73	4,66
IEC CLASS 2	1072,21	1125,84	53,63
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	1187,19	1193,08	5,89
SQUARE	670,93	986,83	315,9
SQUARE (TRANSFORMADOR)	1228,4	1232,35	3,95

LED	Medidor 2F		
	Inicial (kWh)	Final (kWh)	Medição (kWh) (interpolado)
SENOIDAL (REF)	551	553,55	3,825
IEC CLASS 2	458	487	43,5
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	527	530,53	5,295
SQUARE	393	412	28,5
SQUARE (TRANSFORMADOR)	554	556,4	3,6

LED	Fluke			FP
	Medição (kWh)	Medição (kVAR)	Medição (kVA)	
SENOIDAL (REF)	4,06	2,307	4,7	-0,8638
IEC CLASS 2	46,91	30,36	55,83	-0,8402
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	5,365	2,724	6,017	-0,8916
SQUARE	49,551	65,789	82,529	-0,6004
SQUARE (TRANSFORMADOR)	3,891	3,027	4,93	-0,7892

LED	Medidor 2F	Medidor 3F	Distorção Harmônica	
	Erro		DHTV	DHTI
SENOIDAL (REF)	-5,79%	14,78%	0,09%	9,78%
IEC CLASS 2	-7,27%	14,33%	14,49%	35,70%
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	-1,30%	9,79%	14,47%	28,71%
SQUARE	-42,48%	537,52%	29,76%	89,60%
SQUARE (TRANSFORMADOR)	-7,48%	1,52%	31,85%	65,69%

Lâmpadas Incandescentes

INCANDESCENTE	Medidor 3F		
	Inicial (kWh)	Final (kWh)	Medição (kWh)
SENOIDAL (REF)	1126,1	1152,91	26,81
IEC CLASS 2	1152,91	1168,75	15,84
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	1168,75	1176,79	8,04
SQUARE	1177,79	1182,72	4,93
SQUARE (TRANSFORMADOR)	1182,72	1185,72	3

INCANDESCENTE	Medidor 2F		
	Inicial (kWh)	Final (kWh)	Medição (kWh) (interpolado)
SENOIDAL (REF)	487	505	27
IEC CLASS 2	505	515	15
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	515	520,34	8,01
SQUARE	521	524	4,5
SQUARE (TRANSFORMADOR)	524	526	3

INCANDESCENTE	Fluke			FP
	Medição (kWh)	Medição (kVAR)	Medição (kVA)	
SENOIDAL (REF)	26,55	4,75	26,97	-0,9844
IEC CLASS 2	15,31	2,775	15,56	-0,9839
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	7,53	1,58	7,7	-0,9779
SQUARE	4,586	0,828	4,66	-0,9841
SQUARE (TRANSFORMADOR)	2,917	0,551	2,968	-0,9828

INCANDESCENTE	Medidor 2F	Medidor 3F	Distorção Harmônica	
	Erro		DHTV	DHTI
SENOIDAL (REF)	1,69%	0,98%	0,05%	0,51%
IEC CLASS 2	-2,02%	3,46%	14,06%	14,22%
IEC CLASS 2 (TRANSFORMADOR)	6,37%	6,77%	13,97%	14,26%
SQUARE	-1,88%	7,50%	29,59%	30,18%
SQUARE (TRANSFORMADOR)	2,85%	2,85%	30,28%	31,03%