

JULIO CARLOS DAMATO

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS  
DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA E OS SEUS  
EFEITOS NA REDE ELÉTRICA DE  
DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Armando Maldonado Astorga

Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá  
2005

Damato, Julio Carlos

D155c Conservação de energia em sistemas de iluminação pública e os seus efeitos na rede elétrica de distribuição / Julio Carlos Damato.- Guaratinguetá : [s.n.] , 2005

126f.: il.

Bibliografia: f. 124-126

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2005

Orientador: Prof. Dr. Oscar Armando Maldonado Astorga

Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

1. Racionalização de uso de energia 2. Iluminação pública

I. Título

CDU 620.9

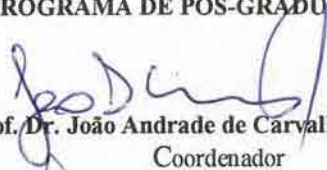
**“CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO  
PÚBLICA E OS SEUS EFEITOS NA REDE ELÉTRICA DE  
DISTRIBUIÇÃO”**

***JULIO CARLOS DAMATO***

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

  
**Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior**  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
**Prof. Dr. OSCAR ARMANDO MALDONADO ASTORGA**  
Orientador / Unesp-Feg

  
**Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA**  
Unesp-Feg

  
**Prof. Dr. JOSÉ POLICARPO GONÇALVES DE ABREU**  
Unifei

## **DADOS CURRICULARES**

### **JULIO CARLOS DAMATO**

NASCIMENTO	06/05/1950 Barra do Piraí - RJ
FILIAÇÃO	Carmelo Damato Neto Dorita David Damato
1971/1976	Curso de Graduação Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
1976/1990	Companhia Siderúrgica Nacional Engenheiro de desenvolvimento
1990/1991	Prefeitura Municipal de Naviraí – MS Diretor de Obras do Município
1991/2001	Empresa Energética de Mato Grosso do Sul Coordenador de Operação do Sistema Elétrico
2000/2001	Curso de Pós-Graduação MBA, nível de Especialização, na FGV
2003/2005	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP

Dedico este trabalho aos meus filhos  
Juliana e Marcos André, sem os quais a  
vida não teria sentido

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus pela chance da vida e pela oportunidade de aqui estar, para que ao lado de pessoas amigas e queridas, dedicadas, pudesse eu conhecer um pouco mais da magia da vida e do conhecimento;

À minha mãe que sempre me incentivou em tudo isto;

Ao meu pai, que muito me incentivou e ajudou, e que tenho certeza, mesmo não estando mais aqui fisicamente, esteve sempre presente;

Ao meu orientador Prof. Dr. Oscar Armando Maldonado Astorga, pela paciência e dedicação que teve em todos os momentos, procurando, nada mais do que atingir o cumprimento de seu objetivo principal: o de transferir conhecimento. Sem o seu esforço esta dissertação não existiria. Agradeço ainda por sua amizade, que fez com que em muitíssimas vezes me acolhesse em sua casa, junto à sua esposa e filhos;

Ao meu co-orientador Prof. Dr. José Luz Silveira também pela dedicação e atenção em muitos momentos. Ajuda sem tamanho;

À todos os Professores do Departamento de Energia e do Departamento de Engenharia Elétrica da FEG, pelas orientações recebidas e pelas dúvidas esclarecidas;

Às secretárias do Departamento de Energia e do Departamento de Engenharia Elétrica, Luísa e Sônia pela atenção e ajuda;

À todos os funcionários dos Departamentos que sempre atenderam à todos os pedidos;

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e pela vontade de ajudar,

À todas as funcionárias da secretaria de pós-graduação pela dedicação e presteza no atendimento;

Ao amigo Paulo Henrique Dias, colega de mestrado, pelo apoio nos momentos de estudo e pelas conversas sobre nossas experiências profissionais e de vida;

Aos amigos do jantar de sexta-feira, na chácara do Ivan, sem os quais os momentos difíceis teriam sido muito mais difíceis;

À querida Maria de Lourdes que tanto tem me ajudado;

À UNESP, nas pessoas de todos os seus funcionários, sem os quais nada disto estaria sendo feito;

À todos aqueles, que devido as minhas limitações de memória e carinho, aqui não são citados.

Que Deus esteja sempre com todos e continue a nos ajudar em nossa caminhada.

Você não pode voltar atrás e  
fazer um novo começo, mas você  
pode começar agora e fazer um novo  
fim.

Chico Xavier

DAMATO, J. C., **Conservação de Energia em Sistemas de Iluminação Pública e os seus Efeitos na Rede Elétrica de Distribuição**. 2005. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

## **RESUMO**

O trabalho busca trazer uma contribuição na utilização da energia elétrica, através do melhor uso das lâmpadas de descarga à alta pressão, de vapor de mercúrio e de sódio. Dois aspectos são tratados: a influência deste tipo de lâmpada na Qualidade de Energia, uma vez que esta avaliação é difícil, por se tratar de uma carga distribuída por toda a cidade e o aspecto do dimensionamento dos condutores para os circuitos que têm uma alimentação exclusiva através de transformadores dedicados. A parte prática do trabalho está baseada em experimentos e medições feitas em uma subestação experimental montada no Laboratório de Alta Tensão da UNESP, campus de Guaratinguetá. Através de oscilografia, as formas de ondas de corrente e tensão, no lado de baixa tensão e média tensão, foram medidas, analisadas e avaliadas. Com a utilização de *softwares* gráficos foram comparadas as formas de ondas mostradas pelo equipamento com as curvas traçadas a partir de valores calculados. Foram avaliadas as influências dos transformadores de corrente e dos transformadores de potencial sobre as medições dos parâmetros elétricos de uma instalação.

**PALAVRAS CHAVE:** Racionalização do uso de energia, Dimensionamento de condutores, Iluminação Pública, Harmônicos.

DAMATO, J. C., **Energy Conservation in Public Illumination Systems and its Impacts in Electric Network**. 2005. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

## **ABSTRACT**

The work wants to give a contribution in the use of the electric power, through the best use of the high pressure discharge lamps, of mercury and sodium. Two aspects are treated: the lamp type influence in Energy Quality, once this evaluation is difficult, for treating of a load distributed by the whole city, and the aspect of the dimensioning of the feeders for circuits that have an exclusive feeding through transformers. A brief revision of lighting concepts is made and also a study of harmonic currents is presented. It was looked for, in research, to know the state of the art for the subject. The practical part of work is based on experiments and measurements made in a mounted experimental substation in UNESP High Tension Laboratory, campus of Guaratinguetá. Through oscilograph voltage and current waves formats, in low and high voltage sides, they were measured, analyzed and appraised. With utilization of graphics software was made a comparison between the equipment oscilographed curves and curves acquire on calculated values. They were appraised the influences of voltage and current transformers about the measurements of the electric parameters of an installation.

**KEYWORDS:** Energy rationalize use, Energy streamline, conductors dimensioning, Public illumination, harmonics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Temperatura da cor .....	42
Figura 2 – Eficiência das lâmpadas .....	44
Figura 3 – Família de lâmpadas.....	45
Figura 4 – Exemplos de lâmpadas de vapor de sódio .....	47
Figura 5 – Parte do catálogo Sylvania.....	50
Figura 6 – Lâmpadas de vapor de sódio utilizadas .....	50
Figura 7 – Onda distorcida e componentes .....	54
Figura 8 – Circuito simples .....	60
Figura 9 – Tensão e corrente na resistência.....	61
Figura 10 – Carga não-linear .....	62
Figura 11 – Corrente não-linear .....	62
Figura 12 – Tipos de conversores.....	66
Figura 13 – Vida útil de transformador .....	71
Figura 14 – Ondas de tensão e corrente para carga linear.....	78
Figura 15 – DHT para a tensão de alimentação .....	78
Figura 16 – Correntes e tensões em lâmpadas incandescentes .....	81
Figura 17 – Valores de correntes e tensões para lâmpadas incandescentes .....	82
Figura 18 – Tensões e correntes para cargas não-lineares .....	83
Figura 19 – Curvas de tensão e corrente em carga não-linear.....	84
Figura 20 – Harmônicos de corrente, fase A, valores absolutos .....	87
Figura 21 – Correntes harmônicas na fase A, valores percentuais.....	81
Figura 22 – Fotografias da subestação experimental .....	92
Figura 23 – Subestação experimental.....	93
Figura 24 – Tensão aplicada as lâmpadas .....	97
Figura 25 – Corrente e componentes na lâmpada 1 .....	98
Figura 26 – Corrente e sua composição na lâmpada 2.....	100
Figura 27 – Corrente e sua composição na lâmpada 3 .....	101
Figura 28 – Potência medida na lâmpada 3.....	103
Figura 29 – Corrente na lâmpada de 250 W.....	105
Figura 30 – Curva quadrática da lâmpada de 250 W .....	106

Figura 31 – Forma de onda de corr máquina de solda elétrica a vazio .....	109
Figura 32 – Forma de onda corr máquina de solda elétrica , com carga.....	109
Figura 33 – Onda de corrente p/ máq. solda à vazio, lâmp. e resistências .....	110
Figura 34 – Forma de onda de corrente, no lado de média tensão, fase A.....	111
Figura 35 – Forma de onda de corrente, no lado de média tensão, fase B.....	111
Figura 36 – Forma de onda de corrente, lado de média tensão, fase C.....	111
Figura 37 – Valores percentuais dos harmônicos cargas não-lineares.....	113
Figura 38 – Tensão e corrente na BT para carga não-linear .....	116
Figura 39 – Corrente na BT para três lâmpadas VSAP.....	117
Figura 40 – Corrente para 3 lâmpadas + 2 MS.....	117
Figura 41 – Corrente no TC, fase A, 3 lâmpadas + 2 MS .....	118
Figura 42 – Corrente no TC, fase B, 3 lâmpadas + 2 MS .....	118
Figura 43 – Corrente no TC, fase C, 3 lâmpadas + 2 MS .....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial Hidrelétrico do Brasil .....	28
Tabela 2 – Capacidade Nominal Instalada .....	28
Tabela 3 – Perfil do Consumo de Energia Elétrica no Brasil.....	29
Tabela 4 – Resultados das ações do PROCEL no período de 1994/2003.....	31
Tabela 5 – Alternativas de Substituição de Lâmpadas.....	35
Tabela 6 – Resultados do ReLuz .....	36
Tabela 7 – Alguns tipos de lâmpadas e seus IRC.....	43
Tabela 8 – Características gerais de lâmpadas e perdas nos reatores.....	51
Tabela 9 – Medição das correntes .....	57
Tabela 10 – Valores de $DHT_V$ adotados pelo IEEE .....	76
Tabela 11 – Distorção de corrente harmônica total.....	76
Tabela 12 – Composição de harmônicos da tensão aplicada às resistências .....	79
Tabela 13 – Valores de tensão e corrente retirados das curvas .....	85
Tabela 14 – Lâmpadas utilizadas .....	93
Tabela 15 – Características do TP.....	94
Tabela 16 – Características do TC.....	95
Tabela 17 – Composição de harmônicos da tensão aplicada as lâmpadas.....	98
Tabela 18 – Composição de harmônicos ímpares da corrente na lâmpada.....	99
Tabela 19 – Composição de harmônicos pares da corrente na lâmpada 1 .....	99
Tabela 20 – Composição de harmônicos da corrente na lâmpada 2 .....	101
Tabela 21 – Composição de harmônicos da corrente na lâmpada 3 .....	102
Tabela 22 – Resultados das 2 medições .....	103
Tabela 23 – Valores críticos da curva da lâmpada de 250 W .....	106
Tabela 24 – Valores percentuais dos harmônicos para cargas não-lineares.....	112
Tabela 25 – Corrente na BT .....	114
Tabela 26 – Corrente nos secundários dos TC conectados à AT .....	115
Tabela 27 – Correntes na média tensão.....	119

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS UTILIZADAS**

DHT	Distorção Harmônica Total (Total Harmonic Distortion)
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial
PROCEL	Programa para Conservação de Energia
ReLuz	Programa Nacional de Iluminação Eficiente
HID	High Intensity Discharge
HPS	High Pressure Sodium
CIE	Comission Internacional de l'Éclairage
PVC	Cloreto de polivinila
EPR	Borracha etileno-propileno

## SIMBOLOGIA UTILIZADA

$\ell$	Comprimento do circuito [km]
A	Seção reta [mm <sup>2</sup> ]
$\cos \varphi_1$	Cosseno do ângulo de defasagem da onda fundamental
d	Diâmetro nominal dos fios do condutor [mm]
DHI <sub>I</sub>	Distorção Harmônica Individual de Corrente [%]
DHI <sub>V</sub>	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]
DHT	Distorção Harmônica Total [%]
DHT <sub>F</sub>	Distorção Harmônica Total em relação à onda fundamental [%]
DHT <sub>I</sub>	Distorção Harmônica Total de corrente [%]
DHT <sub>R</sub>	Distorção Harmônica Total em relação ao sinal total [%]
DHT <sub>V</sub>	Distorção Harmônica Total de tensão [%]
e	Tensão instantânea de uma onda de tensão qualquer [V]
E <sub>max</sub>	Valor de pico de tensão de uma forma de onda [V]
F	Fase que pode ser R, S ou T
fc	Fator de crista
FP	Fator de potência
h	Ordem do harmônico
h <sub>1</sub>	Valor RMS da onda fundamental
h <sub>2</sub>	Valor RMS do harmônico de ordem 2
h <sub>3</sub>	Valor RMS do harmônico de ordem 3
h <sub>n</sub>	Valor RMS do harmônico de ordem n
I	Valor médio quadrático (RMS) de uma onda de corrente [A]
i	Número do trecho de cabo
I <sub>1</sub>	Corrente eficaz da onda fundamental [A]
I <sub>Eff</sub>	Corrente eficaz harmônica total [A]
I <sub>n</sub>	Valor eficaz da corrente fundamental de ordem n [A]
I <sub>pico</sub>	Corrente de pico [A]
I <sub>Z</sub>	Capacidade de condução de corrente [A]

$j$	Número de cabos disponíveis na tabela
$k$	Último cabo disponível na tabela
$K$	Fator $K$ , para um transformador
$k_1$	Fator dependente do diâmetro dos fios do condutor e do metal
$k_2$	Fator que depende do encordoamento dos condutores
$k_3$	Fator que depende da reunião dos condutores
$n$	Número inteiro qualquer (1, 2, 3, ...)
$N$	Último trecho de cabo ou número de superpostes
$n_f$	Número de fios do condutor
$p$	Número de pulsos do conversor
$P$	Potência ativa [W]
$P_1$	Potência ativa da onda fundamental [W]
$R$	Resistência ôhmica [ $\Omega$ ]
$r$	Resistência [ $\Omega/\text{km}$ ]
$S$	Potência aparente [VA]
$\text{sen}$	Seno do ângulo
$t$	Tempo [s]
$U$	Tensão no ponto [V]
$U_1$	Tensão eficaz da onda fundamental [V]
$U_n$	Valor eficaz da tensão fundamental de ordem $n$ [V]
$x$	Reatância indutiva [ $\Omega/\text{km}$ ]
$y$	Variável binária. Indica presença ou não da bitola de cabo no trecho
$Z_{AP}$	Impedância aparente [ $\Omega$ ]
$\theta$	Ângulo de fase de uma tensão senoidal [ $^\circ$ ]
$\rho$	Resistividade [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ]
$\rho_{20}$	Resistividade padrão à $20^\circ\text{C}$ , valendo $0,01724 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ p/ o cobre
$\omega$	Velocidade angular [rad/s]

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS UTILIZADAS .....	14
SIMBOLOGIA UTILIZADA .....	15
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	20
1.2 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	24
1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	26
<b>2 A ILUMINAÇÃO PÚBLICA E A MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL.....</b>	<b>27</b>
2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO: A MATRIZ ENERGÉTICA .....	27
2.2 PERFIL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	28
2.3 O PROCEL.....	29
2.4 ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL.....	30
2.5 O PROGRAMA RELUZ .....	31
2.6 A REGULAMENTAÇÃO DOS SERVIÇOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA .....	35
2.7 A NORMALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA.....	36
2.8 IMPLANTAÇÃO DE UMA REDE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA .....	37
2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
<b>3 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO E LÂMPADAS EFICIENTES .....</b>	<b>39</b>
3.1 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO .....	39
3.2 A LÂMPADA A VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO .....	41
<b>3.2.1 Princípios de operação das lâmpadas.....</b>	<b>45</b>
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
<b>4 QUALIDADE DE ENERGIA E HARMÔNICOS .....</b>	<b>53</b>
4.1 A QUALIDADE DE ENERGIA .....	58

4.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS HARMÔNICOS.....	63
4.2.1	Ordem dos harmônicos.....	63
4.2.2	Distorção Harmônica Total.....	67
4.2.3	Considerações sobre o valor da DHTV medido e fenômenos observados em uma instalação .....	68
4.2.4	Considerações sobre o valor da DHTI medida e fenômenos observados em uma instalação .....	69
4.2.5	As perturbações causadas pelos harmônicos.....	71
4.2.6	As conseqüências dos harmônicos .....	72
4.2.7	Relação entre o fator de potência e DHT .....	73
4.2.8	A influência da DHTI no dimensionamento do transformador .....	74
4.2.9	Os valores de DHTV e DHTI segundo a norma.....	75
4.2.10	A Distorção Harmônica Individual.....	76
4.3	EXEMPLO DE UM CIRCUITO COM CARGA LINEAR .....	77
4.3.1	Análise dos resultados para o estudo de caso .....	78
4.4	OUTRO EXEMPLO PRÁTICO PARA CARGAS LINEARES.....	80
4.5	EXEMPLO DE UM CIRCUITO COM CARGA NÃO-LINEAR .....	82
4.5.1	Descrição dos parâmetros retirados das curvas.....	83
4.5.2	Valores retirados das curvas.....	85
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
5	<b>ENSAIOS UTILIZANDO A SUBESTAÇÃO EXPERIMENTAL... 90</b>	
5.1	INTRODUÇÃO .....	90
5.1.1	Montagem experimental.....	91
5.2	MEDIÇÕES FEITAS NAS LÂMPADAS EM BAIXA TENSÃO .....	96
5.2.1	Metodologia utilizada.....	96
5.2.2	Medições feitas na lâmpada 1 .....	97
5.2.3	Medições feitas na lâmpada 2 .....	100
5.2.4	Medições feitas na lâmpada 3 .....	100
5.2.5	Potência na lâmpada 3.....	102
5.2.6	Influência do DHTV na corrente das lâmpadas.....	103
5.2.7	Avaliação teórica das correntes harmônicas .....	104

5.3	LÂMPADAS DE DESCARGA E SEUS EFEITOS NOS TRANSFORMADORES DE MEDIÇÃO .....	107
<b>5.3.1</b>	<b>Metodologia utilizada.....</b>	<b>107</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Realização de ensaios experimentais: medições na baixa tensão.....</b>	<b>108</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Realização de ensaios experimentais: medições na média tensão .....</b>	<b>110</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Análise dos resultados.....</b>	<b>112</b>
5.4	Medições para três lâmpadas, duas máquinas de solda e grupo de resistores, em média tensão .....	116
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	119
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>121</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	123
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>124</b>

# CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

É difícil definir energia, mas todos compreendem seu significado.

Para todos os seres vivos, a presença da energia é indispensável para a execução de todos os processos orgânicos necessários para a existência e sobrevivência. Todas as máquinas funcionam por meio da transformação de energia de um tipo em outro tipo.

As fontes energéticas podem ser: química (combustíveis), elétrica, eólica, térmica, nuclear, entre outras.

O físico norte-americano, Richard Feynman, ganhador do prêmio Nobel de Física em 1965, disse sobre a energia:

É importante observar que hoje nós não sabemos o que é energia. O que sabemos é que existe uma lei governando todos os fenômenos naturais conhecidos até hoje. Não existe nenhuma exceção conhecida a esta lei, que é conhecida pelo nome de lei da conservação da energia. Ela estabelece que há uma certa quantidade, que nós chamamos de energia, cujo valor não se altera, nas várias mudanças que ocorrem na natureza. Ela não é a descrição de um mecanismo ou qualquer coisa concreta, é uma lei abstrata, porque é um princípio matemático. Ela exprime o fato de que, quando calculamos um certo número (o valor da energia), no início de um processo e no fim do processo, os resultados são iguais.

## 1.1 APRESENTAÇÃO

Em países em desenvolvimento, como o Brasil, o consumo de energia elétrica aumenta ano a ano (entre 3 e 5% a.a) (ELETROBRÁS, 2005). Para atender a este aumento de consumo, novas usinas geradoras, sistemas de transmissão e de distribuição devem ser construídos. A construção de novas usinas e sistemas de transmissão e distribuição está associada a grandes investimentos, longos prazos para conclusão das obras e significativos impactos ambientais. Uma usina hidroelétrica leva em média 10 anos para ser projetada e construída.

A busca por uma geração de energia sem a poluição do meio ambiente é objetivo do mundo todo. Desde a crise do petróleo de 1973, a forma de se encarar o problema energético tem mudado. Sabe-se que o combustível fóssil, o mais usado ainda, é limitado. É preciso se buscar novas fontes de energia, de preferência formas limpas, que não agridam a natureza.

Citando COSTA<sup>1</sup> (2000 apud Freitas), que declarou:

Desejo salientar que, diante da crise energética que hoje assola todo o mundo e da crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, tornam-se cada vez mais estreitos os caminhos a percorrer para encontrar soluções capazes de, a curto e médio prazo, conciliar as crescentes exigências sócio-econômicas da humanidade com os problemas que vêm surgindo para satisfazer com oportunidade estas exigências; esta conciliação merece o esforço de todos nós e seguramente será grandemente facilitada pela crescente educação dos povos sobre os problemas energéticos que o mundo e o nosso País enfrentam.

O aumento da geração de energia elétrica é um processo caro e demorado. Afirma COSTA (2000) que em termos gerais, são necessários US\$ 3.000 para se instalar 1 kW, ao passo que com uma revisão dos sistemas existentes, com o uso de novas tecnologias, estes custos caem para US\$ 300 para cada 1 kW conservado. Afirma ainda este autor que o desperdício de energia elétrica nas indústrias brasileiras está em torno de 10%. Atualmente, da energia elétrica que é gerada nas usinas brasileiras, (ELETROBRÁS, 2005), 17% é perdida na transmissão e distribuição.

Estes são valores que podem ser reduzidos.

---

<sup>1</sup> COSTA, G. J. C. da, **Iluminação Econômica: Cálculo e avaliação**. 2ª edição, Porto Alegre: EDIPUCRS, 2000. apud Sylvio Freitas, ex-diretor da ELETROBRÁS.

Para atender ao aumento da demanda de energia, outra alternativa que se apresenta, além do aumento da geração, é a disponibilização de uma maior quantidade de energia, através da redução das perdas.

Em função das dificuldades para a criação de novas usinas, a redução de perdas é uma boa opção a se considerar. Nesta redução de perdas, pode-se considerar dois aspectos: a redução das perdas técnicas, já mencionadas anteriormente, com a otimização dos componentes utilizados, e a racionalização do uso, que é a utilização de forma planejada.

Ao se economizar energia elétrica, é possível utilizar a energia não gasta, direcionando-a a outro consumidor, eliminando assim a necessidade de expansão do sistema. E ainda é preciso lembrar que é natural que as atividades humanas de construção e expansão interfiram no meio ambiente. A construção de novas usinas sejam elas de que tipo forem, sempre interfere no meio ambiente. Este impacto, entretanto, pode ser minimizado.

A conservação de energia é um dos temas principais da pauta de discussão do setor elétrico brasileiro. Segundo informações no sítio da ELETROBRÁS (2005), estudos revelam que a necessidade por energia elétrica do país em 2015 será de algo em torno de 780 TWh/ano.

Para o consumidor, outra ação possível, é a racionalização do consumo de energia. Por racionalização não se está falando em racionamento de energia, ou o corte de atividades consideradas menos nobres, mas o uso sem desperdícios. Isto já foi experimentado por muitos consumidores durante o período de racionamento, no ano de 2001. Naquela época muitos perceberam que é possível racionalizar. E o consumidor ainda terá como vantagem, uma conta de energia elétrica menor.

Como melhorias técnicas, visando a redução de consumo do ponto de vista do consumidor, podem ser citadas a utilização de motores elétricos projetados para trabalhar com maior rendimento e menor potência não ativa de deslocamento (que já foi conhecida como potência reativa); a utilização de eletrodomésticos com maior rendimento; o uso de cabos elétricos de melhor qualidade, com resistências ôhmicas mais baixas, reduzindo assim as perdas; a utilização de plugues, tomadas e outros

dispositivos construídos com material adequado e tecnologias modernas. Em todos estes pontos comentados, existirá uma menor dissipação de calor, ou seja, da energia perdida. Assim procedendo, uma menor quantidade de energia em forma de calor será jogada ao meio ambiente, evitando também uma elevação da temperatura deste meio.

Para que a racionalização no consumo de energia elétrica ocorra, é preciso conscientização da comunidade na adoção de medidas que visem uma mudança comportamental, o que não é fácil, pois provoca a alteração de hábitos arraigados.

O governo brasileiro, com o objetivo de combater o desperdício de energia elétrica no país, criou em dezembro de 1985 um programa denominado PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia. O programa é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e promove a conservação de energia, observando aspectos de produção e consumo, visando a melhoria da qualidade de produtos e serviços. O programa busca ainda a criação de novos empregos e a redução dos impactos ambientais. O controle da execução do programa está a cargo da ELETROBRÁS. Este programa, até 2003, em 18 anos de existência, possibilitou a economia de 17 bilhões de kWh. No Capítulo 2 desta dissertação será feita uma avaliação detalhada do programa.

O PROCEL, com metas de longo prazo estabelece planos de redução de desperdício buscando diminuir a demanda e busca também a redução das perdas na transmissão e distribuição de energia elétrica, para pelo menos 10%.

Quando o assunto é economizar energia, muito ainda se pode fazer. No caso da Iluminação Pública pode-se optar por uma melhoria técnica: a troca de lâmpadas pouco eficientes, como por exemplo, as lâmpadas à vapor de mercúrio (e outras ainda menos eficientes), por lâmpadas de descarga à vapor de sódio, bem como o dimensionamento otimizado dos condutores elétricos de sistemas de iluminação com alimentação exclusiva.

Dentro da linha de pensamento da criação do PROCEL, foi definido outro programa com o objetivo de tornar mais eficiente a Iluminação Pública no Brasil. Este programa, através de ações baseadas principalmente no uso de novas tecnologias, está fornecendo incentivos para a substituição de equipamentos antigos por outros mais modernos. É o Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente – ReLuz.

A Iluminação Pública é essencial à qualidade de vida, permitindo a todos desfrutar do espaço público durante o período noturno, e a melhoria da qualidade dos sistemas de Iluminação Pública proporciona uma melhor imagem da cidade. No Brasil, a Iluminação Pública corresponde a aproximadamente 7% da demanda nacional e a 3,3% do consumo total de energia elétrica do país.

A redução do desperdício, deve por isto tudo, ser alvo da preocupação de todos, buscando-se todos os meios possíveis para que se consiga usar a energia de forma racional, segura e inteligente. A energia deve ser encarada, assim como a água, como propriedade de todos os que habitam o planeta.

Este trabalho pretende dar uma contribuição ao esforço de redução das perdas, realizando um trabalho de pesquisa que permita ter uma avaliação dos aspectos benéficos que estão sendo obtidos em relação à conservação de energia, assim como os aspectos negativos que podem resultar da utilização de lâmpadas eficientes que representam cargas que podem prejudicar a Qualidade de Energia do sistema de distribuição de energia elétrica.

Pelo exposto, pode-se observar a importância no tema desenvolvido, e pesquisadores têm buscado melhorar tanto os sistemas de conservação de energia, como a qualidade das lâmpadas e dispositivos auxiliares, buscando o binômio economia – Qualidade de Energia.

## 1.2 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, que serão apresentados conforme descrito à seguir.

No Capítulo 1 foi apresentada uma análise sobre a energia, sua produção e seu uso. Foram apresentados os programas do governo para o uso eficiente da energia e mostrados os objetivos desta dissertação.

No Capítulo 2 será mostrado um estudo da situação brasileira em relação a matriz energética. A situação atual do Brasil será mostrada, considerando aspectos referentes à conservação de energia. Serão apresentados dados sobre o consumo de energia elétrica.

O papel dos programas do governo será apresentado, onde será avaliada a situação da Iluminação Pública no Brasil. Serão mostrados como são feitas as regulamentações, normalizações e os procedimentos de implantação de redes de Iluminação Pública.

No Capítulo 3 serão apresentados e analisados os sistemas de iluminação utilizados. Será feito um estudo sobre a influência das lâmpadas eficientes na Qualidade de Energia Elétrica. Conclusões serão apresentadas sobre o estado da arte na conservação de energia. Serão abordados ainda nesse capítulo, os tipos de lâmpadas de descarga de alta eficiência disponíveis, e os tipos mais usados, assim como os princípios de funcionamento das lâmpadas à vapor de sódio de alta pressão.

No Capítulo 4 será apresentado um estudo sobre a Qualidade de Energia Elétrica dos sistemas de distribuição e as perturbações que ocorrem nas redes de distribuição de energia elétrica, devido à má qualidade de equipamentos e dispositivos. Serão analisadas as formas de se medir os parâmetros que provocam as perturbações. É abordada neste capítulo a base teórica para o estudo das ondas periódicas não senoidais e sua representação através do teorema de Fourier. Será mostrado o exemplo prático de um circuito com cargas não-lineares.

No Capítulo 5 é apresentada uma montagem experimental de uma subestação em média tensão. O objetivo da utilização desta subestação é ter uma fonte de energia elétrica com parâmetros de tensão e frequência conhecidos e confiáveis, e a partir desta montagem, mostra-se a influência de cargas não lineares, particularmente das lâmpadas utilizadas nos programas de melhoria da eficiência energética em Iluminação Pública, e ainda apresenta-se um estudo sobre a influência dos dispositivos de medição utilizados em subestações. Também serão avaliadas a influência dos transformadores de medição utilizados em média e alta tensão. O capítulo apresentará as medições feitas nos diversos tipos de lâmpadas de descarga à vapor de sódio.

No Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

No Apêndice A será apresentado um estudo sobre a queda de tensão para o cálculo dos cabos de uma rede de Iluminação Pública com alimentação exclusiva.

### 1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo fez uma apresentação sobre a energia e discutiu a necessidade de racionalização e as suas vantagens em relação a produção de energia. Apresentou dados sobre os custos de produção e sobre os custos de conservação e utilização racional. Foi discutida a participação dos governos federais e municipais nestes processos de conservação. Também apresentou uma descrição sucinta dos capítulos que compõem esta dissertação.

## **CAPÍTULO 2 A ILUMINAÇÃO PÚBLICA E A MATRIZ ENERGÉTICA NO BRASIL**

Este capítulo faz considerações sobre a matriz energética brasileira. São apresentadas tabelas com dados sobre a geração de energia elétrica no país. O perfil do consumo de energia elétrica é apresentado e comentado.

O sistema de Iluminação Pública no Brasil é apresentado, assim como a sua importância dentro do sistema elétrico brasileiro. Destaques são dados às recomendações do PROCEL e do ReLuz. As estatísticas que estes programas apresentam sobre o consumo de energia e alguns dados sobre a Iluminação Pública no Brasil são mostrados e discutidos. São feitos comentários sobre o programa ReLuz, que tem como um de seus objetivos substituir os sistemas de Iluminação Pública por outros mais atuais, utilizando-se de tecnologias e lâmpadas mais eficientes. Alguns dados deste programa são apresentados, assim como algumas de suas regulamentações e os procedimentos para a implantação ou melhoria de uma rede de Iluminação Pública.

### **2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO: A MATRIZ ENERGÉTICA**

A matriz energética brasileira é predominantemente hidráulica. As características geográficas do país determinaram a implantação de um sistema gerador de energia elétrica baseado quase totalmente em usinas hidrelétricas. Cerca de 24% do potencial hidráulico brasileiro conhecido e estimado, é utilizado por usinas hidrelétricas, incluindo-se aí as usinas em construção. É estimado que nas próximas duas décadas, as fontes hidráulicas continuem a desempenhar importante papel no atendimento à crescente demanda de energia elétrica (ELETROBRÁS, 2005). Conforme pode ser visto na Tabela 1 ainda existe um grande potencial hidrelétrico a ser explorado no Brasil. As usinas em operação ou em construção totalizam quase 62 GW de potência, com um potencial disponível conhecido e levantado de quase 100 GW e ainda um valor estimado de outros 100 GW a ser estudado, perfazendo uma potência hidráulica total no país de 260 GW, aproximadamente.

O sítio da ELETROBRÁS (2005) mostra que do potencial instalado, 5,4 GW correspondem às usinas térmicas e 55,9 GW são provenientes de usinas hidráulicas, perfazendo um total de 61,3 GW, conforme mostrado na Tabela 2.

Como números importantes (ELETROBRÁS, 2005), pode-se citar que o sistema elétrico brasileiro conta com 61.519 km em linhas de transmissão com tensão igual ou superior a 230 kV. O consumo nacional de energia elétrica é da ordem de 285 TWh/ano, com 41,4 milhões de consumidores. O faturamento do setor elétrico brasileiro está na casa dos R\$ 22 bilhões/ano.

Tabela 1 - Potencial Hidrelétrico do Brasil

Usinas em operação ou construção	61,3 GW
Potencial disponível inventariado	99,9 GW
Potencial disponível estimado	98,3 GW
Potência total	259,5 GW

Fonte: [www.eletronbras.com.br](http://www.eletronbras.com.br) – Out/2005

Tabela 2 - Capacidade Nominal Instalada

Usinas térmicas	5,4 GW
Usinas hidráulicas	55,9 GW
Capacidade total	61,3 GW

Fonte: [www.eletronbras.com.br](http://www.eletronbras.com.br) – Out/2005

## 2.2 PERFIL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Considerando o consumo de energia elétrica por setores, o setor industrial brasileiro é o maior consumidor da energia produzida, utilizando 44%. O uso residencial vem a seguir, com um consumo de 25% da energia gerada e o uso comercial com 16% da energia gerada. Os restantes 15% distribuem-se entre os setores rural, Iluminação Pública, órgãos do governo e outros (ELETROBRÁS, 2005).

A Tabela 3 mostra o perfil do consumidor de energia elétrica, por classes, residencial, industrial, comercial e outros de 1999 a 2003, em GWh. Pode-se observar que no ano de 2000 o consumo teve um aumento de 4,4% em relação ao ano de 1999 e no ano seguinte, 2001, houve uma redução de 3,9%, ano em que ocorreram racionamentos e a fixação das cotas máximas de consumo, devido aos baixos níveis de água nos reservatórios das hidroelétricas. Isto considerando o total do consumo, pois numa apreciação isolada do setor residencial, pode-se observar que esta redução de consumo em 2001 é ainda menor – uma redução de 11,6%.

Tabela 3 - Perfil do Consumo de Energia Elétrica no Brasil

Classe	Consumo (GWh)				
	1999	2000	2001	2002	2003
Residencial	81.249	83.494	73.770	72.660	76.165
Industrial	123.560	131.195	122.629	127.694	129.877
Comercial	43.562	47.437	44.517	45.251	47.532
Outros	42.739	44.621	42.882	44.327	47.072
Total	291.110	306.747	283.798	289.932	300.646

Fonte: [www.eletrobras.com.br](http://www.eletrobras.com.br) - Out/2005

### 2.3 O PROCEL

A exploração racional dos recursos naturais, a conservação da energia e o combate ao desperdício, entre outras coisas, faz com que o meio ambiente seja agredido o mínimo possível. É importante entender o conceito de conservação de energia: melhorar a maneira de utilizar esta energia, sem que seja necessário eliminar o conforto que esta energia proporciona. É preciso racionalizar o uso e evitar o desperdício para que não sejam necessários cortes, racionamentos e principalmente para evitar altos investimentos.

As metas de longo prazo do PROCEL (ELETROBRÁS, 2005), estão contempladas no Plano 2015. Estudos demonstram que sendo mantido o atual ritmo de

consumo de energia elétrica, haverá uma necessidade de suprimento, em 2015, em torno de 780 TWh/ano. Este plano prevê que havendo uma redução do desperdício, uma redução na demanda da ordem de 130 TWh seja conseguida em 2015, evitando a instalação de 25 GW (cerca de duas usinas de Itaipú). O ganho líquido para o País será de R\$ 34 bilhões.

No seu programa de economia de energia elétrica, uma das metas do PROCEL é a redução das perdas técnicas na transmissão e distribuição das concessionárias para um valor próximo aos 10%. Este valor se situa hoje em torno dos 17%.

O PROCEL ainda estabelece metas de redução de conservação de energia que são consideradas no planejamento do setor elétrico, dimensionando as necessidades de expansão da oferta de energia e da transmissão. Dentre estas metas está o aumento da eficiência energética em aparelhos elétricos, sendo que para os eletrodomésticos o valor pretendido é de 10%, em média (ELETROBRÁS, 2005).

A Tabela 4 aponta os resultados das ações do PROCEL no período de 1994 até 2003. Nesta tabela, pode-se observar que os investimentos do PROCEL de 1994 até 1998 tiveram aumentos significativos, caindo um pouco em 1999, com uma grande redução de investimentos em 2000, e daí para frente sendo mantido quase constante.

O reflexo disto pode ser visto dois anos depois, que é o tempo médio para concepção e execução de um projeto deste tipo. Em 2002 houve uma grande queda, de quase 50%, na *energia economizada/geração adicional* e aí se manteve. Conseqüentemente, o mesmo aconteceu com a *redução de demanda na ponta*, com a *usina equivalente* e com o *investimento evitado*.

## 2.4 ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL

A Iluminação Pública no Brasil corresponde a aproximadamente 7% da demanda nacional e a 3,3% do consumo total de energia elétrica do país. O equivalente a uma demanda de 2,3 GW e a um consumo de 10,2 bilhões de kWh/ano. Existem aproximadamente 14,5 milhões de pontos de Iluminação Pública instalados. Segundo o último levantamento cadastral realizado pelo PROCEL/ELETROBRÁS junto às distribuidoras de energia elétrica, estes

pontos estão assim distribuídos: 47% na Região Sudeste, 20% no Nordeste, 19% no Sul, 9% no Centro-Oeste e 5% na Região Norte (ELETROBRÁS, 2005).

Tabela 4 - Resultados das ações do PROCEL no período de 1994/2003

Resultados	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Investimentos aprovados (R\$ milhões) *	10	16	20	41	50	40	26	30	30	29
Energia economizada/ geração adicional (GWh/ano)	344	572	1970	1758	1909	1852	2300	2500	1270	1300
Redução de demanda na ponta (MW)	70	103	293	976	532	418	640	690	309	270
Usina equivalente (MW)**	80	135	430	415	440	420	552	600	305	312
Investimento evitado (R\$ milhões)	160	270	860	830	880	840	2019	2818	1486	1914

Fonte: [www.eletrabras.com.br](http://www.eletrabras.com.br) – Out/2005

\* Não incluindo os custos com pessoal Eletrobrás/PROCEL

\*\* Obtidas a partir da energia economizada e geração adicional, considerando um fator de capacidade típico de 56% para usinas hidrelétricas e considerando 15% de perdas médias na Transmissão e Distribuição para a parcela de conservação de energia.

## 2.5 O PROGRAMA RELUZ

O ReLuz é um programa criado pelo governo federal com o propósito de financiar parte do custo de projetos que promovam melhorias dos sistemas de Iluminação Pública existentes e/ou expansão dos sistemas de Iluminação Pública existentes e/ou iluminação especial (destaque) em obras e monumentos de valor histórico, artístico, cultural e ambiental, bem como em praças públicas de grande circulação, orlas marítimas e/ou inovações tecnológicas na Iluminação Pública.

O manual criado pelo ReLuz (PROCEL RELUZ, 2005) apresenta os critérios e os procedimentos destinados a orientar as concessionárias de energia elétrica,

distribuidoras, geradoras e transmissoras, no cumprimento das etapas para obtenção de financiamento de projetos no âmbito do programa.

O ReLuz tem como objetivos promover o desenvolvimento de sistemas eficientes de Iluminação Pública, bem como a valorização dos espaços públicos urbanos, contribuindo para melhorar as condições de segurança e de qualidade da iluminação das cidades brasileiras.

Um dos pontos que o programa ReLuz do PROCEL tem atuado é na substituição das lâmpadas de vapor de mercúrio por lâmpadas mais eficientes, de vapor de sódio.

Com a substituição destas lâmpadas, o programa tem por meta tornar eficientes 9,5 milhões de pontos de Iluminação Pública, equivalentes a 77% do potencial de melhoria da eficiência e instalar 3 milhões de novos pontos eficientes, observando os princípios da eficiência energética, até o ano de 2010 (ELETROBRÁS, 2005).

Para atingir este objetivo, o Programa ReLuz prevê a aplicação de R\$ 2,6 bilhões, aproximadamente, sendo R\$ 2 bilhões oriundos da Reserva Global de Reversão – RGR - até o ano de 2010 e o restante como contrapartida das concessionárias e dos municípios. Os projetos serão financiados às concessionárias de energia elétrica (distribuidoras, geradoras e transmissoras) que, em articulação com as prefeituras, executarão os serviços. Para participar do Programa ReLuz, a concessionária deverá encaminhar a ELETROBRÁS, carta de Solicitação de Participação, anexando informações cadastrais e o(s) projeto(s). A Reserva Global de Reversão é um fundo federal constituído por recursos provenientes de quotas incidentes sobre os investimentos em instalações e serviços das concessionárias de energia elétrica de acordo com as leis nº 10.438 de 26/04/02 e nº 5.655 de 20/05/71. Fonte de financiamento do ReLuz, que é administrada pela ELETROBRÁS (2005).

O programa ReLuz também tem como um de seus objetivos buscar benefícios para o setor elétrico, para as concessionárias e para os municípios.

Para o Setor Elétrico, os principais objetivos são a redução de 540 MW da carga, no horário de ponta do sistema elétrico (aproximadamente a potência da Usina Nuclear

de Angra 1) e uma economia de 2.400 milhões kWh/ano, o equivalente à soma do consumo de energia elétrica, no ano 2000, dos sistemas de Iluminação Pública das regiões norte e sul do País (ELETROBRÁS, 2005).

Para as concessionárias, o ReLuz pretende: a redução das perdas, melhorias das condições operativas, uma melhor disponibilidade de energia elétrica para atendimento aos novos consumidores e o desenvolvimento de novos negócios na área da conservação de energia.

Para os Municípios, o ReLuz definiu como metas, a melhoria da qualidade da Iluminação Pública, com a redução média de 30 a 40% no consumo de energia elétrica, com uma contribuição à segurança pública, especialmente nos aspectos relacionados à proteção da população urbana, à segurança do tráfego viário e à melhoria da qualidade de vida. Considera ainda este programa, uma melhoria na iluminação de obras e monumentos, associando a luz a um processo educativo de valorização de bens referenciais para o município e para a comunidade. Pretende assim, uma melhoria da imagem da cidade e das condições noturnas de uso dos espaços públicos, em atividades de turismo, comércio, esporte e lazer, promovendo ainda uma diminuição dos itens de estoque face à padronização e à maior vida útil dos equipamentos utilizados (ELETROBRÁS, 2005).

Conforme explica o Manual do ReLuz (PROCEL, RELUZ, 2005), este programa é implementado pelas concessionárias de energia elétrica através de contratos com os municípios. Ao mesmo tempo, como um complemento educacional para alunos de classes de primeiro grau, a ELETROBRÁS aplica ações do PROCEL nos municípios que participam do programa.

A prefeitura municipal interessada em participar do convênio deve encaminhar à ELETROBRÁS correspondência informando suas intenções. Os recursos aportados para os convênios com os municípios são provenientes da ELETROBRÁS com uma contrapartida das concessionárias, dos municípios ou de outros agentes envolvidos. Através destes convênios, o programa PROCEL colabora com os municípios na concretização de um conjunto de medidas de estímulo ao uso eficiente e racional da energia elétrica, incluindo aí o desenvolvimento de campanhas públicas. O PROCEL

promove ainda ações de melhoria da eficiência energética nos prédios públicos; ajuda na elaboração de Planos Municipais de Gestão da Energia Elétrica – PLAMGE.

O projeto do sistema de Iluminação Pública à ser implantado ou a ser reformado, será financiado para as concessionárias de energia elétrica, que juntamente com as Prefeituras Municipais executarão todos os serviços. O valor do financiamento corresponderá a até 75% do valor total do projeto, com uma carência de até 24 meses, com juros de 5% ao ano. O restante do valor constituirá a contrapartida das concessionárias e/ou das prefeituras municipais, que poderá ser feita por meio de serviços próprios como: transporte, mão de obra e outros necessários a execução do projeto.

A Tabela 5, retirada do Manual de instruções do ReLuz (PROCEL RELUZ, 2005) apresenta alternativas de substituição de lâmpadas na Iluminação Pública. Na tabela apresentada, há de se observar que as lâmpadas de vapor de mercúrio de 250 e 400 W, que são as mais encontradas nos sistemas mais antigos de Iluminação Pública, estão sendo trocadas por lâmpadas de 150 e 250 W de vapor de sódio, respectivamente.

O programa ReLuz, permite que nos casos de logradouros em que a Iluminação Pública apresente índice abaixo daquele previsto pela NBR 5101, que este índice seja aumentado. É preciso que esta informação conste do projeto, justificando um aumento de potência.

Outra abertura que existe nas normas do ReLuz é que em monumentos, praças, praias ou edificações históricas e artísticas, onde existe a necessidade de um elevado *Índice de Reprodução de Cores* (IRC) e a necessidade da preservação de sua identidade, poderão ser utilizadas lâmpadas do tipo multivapores metálicos. Para esse caso, a justificativa deve também ser apresentada no projeto.

O manual do ReLuz, disponível na Internet (ELETROBRÁS, 2005), fornece todas as condições necessárias para o financiamento do projeto, assim como seu detalhamento.

A Tabela 6, retirada do sítio da ELETROBRÁS, mostra os resultados do ReLuz, por região do país.

Tabela 5 - Alternativas de Substituição de Lâmpadas

Lâmpada existente	Alternativa de lâmpada Eficiente (VSAP)
2 x Fluorescentes de 40 W	70 W
Fluorescente 110 W	70 W
Halógena 400 W	150 W
Halógena 500 W	150 W
Halógena 1000 W	250 W
Halógena 1500 W	400 W
Incandescente 100 W a 300 W	70 W
Incandescente 500 W	100 W
Incandescente 1000 W	150 W
Mista 160 W	70 W
Mista 250 W	70 W
Mista 500 W	150 W
VM 80 W	70 W
VM 125 W	100 W
VM 250 W	150 W
VM 400 W	250 W
VM 700 W	400 W
VSAP 350 W (intercambiável)	400 W

Fonte: [www.eletronbras.com.br](http://www.eletronbras.com.br) – Out/2005

## 2.6 A REGULAMENTAÇÃO DOS SERVIÇOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A prestação dos serviços públicos de interesse local – nos quais se insere a Iluminação Pública –, do ponto de vista constitucional, é de competência dos municípios. Por se tratar também de um serviço que requer o fornecimento de energia elétrica, está submetido, neste particular, à legislação federal.

Tabela 6 – Resultados do ReLuz

	Região				
	Norte	Nordeste	C-Oeste	Sudeste	Sul
Redução de demanda no horário de ponta [kW]	5.666	26.379	22.249	139.648	23.879
Economia no consumo energia elétrica [MWh/ano]	24.747	113.884	74.151	626.080	104.585
Pontos de luz a serem substituídos	91.841	388.315	277.586	1.745.520	533.854
Instalação de pontos novos	14.377	10.932	-	12.875	-
Pontos já substituídos	14.082	-	-	-	-

Fonte: [www.eletronbras.com.br](http://www.eletronbras.com.br) – Out/2005

As condições de fornecimento de energia destinado à Iluminação Pública, assim como ao fornecimento geral de energia elétrica, são regulamentadas especificamente pela Resolução ANEEL nº 456/2000. Esta resolução substitui as antigas Portarias DNAEE 158/89 e DNAEE 466/97 (das condições gerais de fornecimento de energia elétrica) (ELETROBRÁS, 2005).

## 2.7 A NORMALIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Conforme citado por COSTA (2000), no Brasil, as normas relativas aos projetos de sistemas de Iluminação, ainda são escassas. A NBR 5413, que trata dos níveis mínimos de iluminação, é o ponto de partida para os projetos e no aspecto de fabricação ficam as empresas condicionadas aos projetos empregados na sua matriz. As normas de Iluminação Pública precisam ser reformuladas frente às novas concepções de projetos introduzidos pela Comissão Internacional de Iluminação.

COSTA (2000) faz ainda uma citação interessante sobre o aspecto reprodução de cores, afirmando que, ainda que a reprodução de cores nas lâmpadas utilizadas na Iluminação Pública não seja adequada, deve ser dada prioridade ao uso destas fontes

luminosas de alta eficiência, uma vez que a segurança das pessoas contra assaltos e acidentes deve ser priorizada sobre uma melhor reprodução das cores.

## 2.8 IMPLANTAÇÃO DE UMA REDE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Para a implantação de uma rede de Iluminação Pública, alguns cuidados devem ser tomados e algumas normas devem ser seguidas. A normatização para a Iluminação Pública no Brasil ainda é deficiente, por isto muito é feito com base em normas de outros países e principalmente baseado no bom senso.

Para o projeto de um sistema de Iluminação Pública eficiente, é preciso atender a critérios qualitativos para atender as necessidades visuais dos usuários. Um bom projeto é importante para a qualidade de vida, pois mais que um mero agente físico, a luz interfere diretamente no comportamento das pessoas à sua volta.

O nível de iluminância de vias públicas é recomendado pelo CIE, e apresentado em sua publicação CIE 115. É também recomendado pela norma brasileira NBR 5101, onde podem ser obtidas informações mais detalhadas.

Ao se realizar o estudo para um projeto deste tipo devem ser observados os seguintes pontos: O tipo de via, se rural ou urbana; se existe fluxo de veículos e tráfego de pedestres; os níveis de iluminância adequados; a definição do tipo de equipamento a utilizar, tais como altura e tipo das luminárias; localização e tipo dos postes.

As vias públicas, no aspecto iluminação, são classificadas pela Norma Brasileira de Iluminação Pública NBR 5101 em três categorias: Classe A, são as vias rurais e estradas, pressupondo-se tráfego leve de até 500 veículos/hora e pedestres, iluminância recomendada 2 a 10 lux; Classe B, são as vias de conexão entre centros urbanos, tráfego de até 1.200 veículos/hora e pedestres, níveis de iluminância recomendados de 5 a 14 lux; Classe C, são aquelas vias urbanas, com tráfego intenso de mais de 1.200 veículos/hora e pedestres. iluminância recomendada de 10 a 17 lux.

Ao se fazer um projeto de Iluminação Pública, como em todos os projetos, não se deve esquecer das considerações sobre a manutenção do equipamento.

## 2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram feitas algumas considerações sobre a matriz energética brasileira e uma avaliação do sistema de Iluminação Pública com base nos conceitos e expectativas do PROCEL e do ReLuz. As estatísticas e levantamentos feitos dentro destes programas, seus objetivos e resultados foram apresentadas. Uma breve explicação sobre os procedimentos a serem adotados por prefeituras e concessionárias, para que possam se beneficiar das vantagens e financiamentos proporcionados por estes programas, foram mostrados. Os principais tópicos das normas e procedimentos que regulam estes processos tiveram aqui sua apresentação e discussão.

## **CAPÍTULO 3 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO E LÂMPADAS EFICIENTES**

Este capítulo tem como finalidade apresentar e comentar alguns aspectos do que se está fazendo em termos de sistemas de iluminação e o que está sendo pesquisado sobre o assunto iluminação e lâmpadas, assim como sistemas eficientes.

Serão mostrados e definidos alguns dos termos mais utilizados em sistemas de iluminação.

Um panorama sobre os tipos de lâmpadas mais utilizadas será apresentado.

### **3.1 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO**

Os assuntos iluminação e lâmpadas vêm sendo estudados e desenvolvidos desde o final do século XIX com a invenção da lâmpada por Edson. Desde a primeira lâmpada, que permaneceu acesa por alguns segundos, até as lâmpadas de hoje, que tem vida média esperada de 24.000 horas, muito foi feito.

RIOS et al (1996) comparam através de medições realizadas em lâmpadas instaladas em redes de distribuição, dois tipos de lâmpadas de descarga: vapor de sódio de alta pressão e vapor de mercúrio. Em seu estudo são medidos os harmônicos de corrente e tensão, e o fator de potência das lâmpadas de descarga de sódio de alta pressão, e de mercúrio, dos tipos mais usados atualmente. Conforme será mostrado, os valores encontrados nas medições realizadas no Laboratório de Alta Tensão e Qualidade de Energia da UNESP, e apresentadas neste trabalho, são compatíveis com àqueles mostradas no artigo em questão.

Outro tipo de estudo que está sendo atualmente desenvolvido é a aplicação da redução de luminosidade em lâmpadas de descarga (HID) através de controles inteligentes. Estes controles reduzem a intensidade luminosa quando não há movimentação no recinto, entretanto muitas vezes fazem com que seja aumentada a geração de harmônicos. Ou seja, há uma redução de consumo, porém poderá haver uma redução da qualidade da energia elétrica, no local. Este controle, conforme afirma

CORREA et al (2002) em seu artigo, pode afetar diversos parâmetros da lâmpada como: vida, fator de potência, temperatura da cor, percurso do arco de descarga, além de outros efeitos. Uma análise comparativa dos efeitos da redução de luminosidade nas lâmpadas halógenas e alta pressão de sódio (HPS) é apresentada no artigo. Diversas lâmpadas são caracterizadas e modelos elétricos desenvolvidos para sua simulação em *softwares*.

Como demonstrado pelas referências anteriores, progressos estão sendo obtidos no que diz respeito aos aspectos de melhoria das condições de iluminação, tanto no conforto do usuário, como na redução de gastos. Porém, isto muitas vezes poderá ter um custo tecnológico, que são os aumentos nos harmônicos, ou seja, redução da Qualidade de Energia. Por isto, mais pesquisas devem ser feitas no sentido de se corrigir os efeitos desta deterioração da tensão de alimentação, já que ainda não existe outra forma de redução do nível de corrente na lâmpada a não ser “recortando” a onda de tensão, por intermédio de dispositivos eletrônicos.

Muito há ainda à fazer em relação à forma de se medir correntes e tensões, e avaliar harmônicos. EMANUEL (1995), em seu artigo analisa estas interações entre as variações incrementais dos fasores de correntes harmônicas injetadas por diversos tipos de cargas nos sistemas e as variações resultantes da tensão e potência harmônica. Os exemplos por ele apresentados mostram, que nem sempre é possível, por simples medições de componentes harmônicos, definir se uma certa corrente harmônica ultrapassa os níveis que comprometem a Qualidade de Energia da rede.

Comparativamente aos sistemas convencionais de iluminação, se bem projetados, os novos sistemas podem proporcionar: maior iluminação no local de trabalho, iluminação sem cintilação, melhor discernimento de cores, redução de ofuscamento, operação em temperaturas mais baixas, redução de manutenção e opção de redução de intensidade luminosa, com menor potência.

As lâmpadas e os sistemas utilizados para a Iluminação Pública vêm evoluindo desde o aparecimento da lâmpada à vapor de sódio de alta pressão nos meados de 1930, nos Estados Unidos. A qualidade dos invólucros melhorou, os materiais utilizados nos

eletrodos são hoje bastante superiores, e os condutores internos não são tão frágeis, permitindo assim que a vida das lâmpadas tenha sido bastante ampliada.

COOK (2000), apresenta um artigo onde é mostrado o desenvolvimento na tecnologia das lâmpadas e no controle de luminosidade, abaixando assim o custo operacional, e incrementando de maneira significativa a qualidade da iluminação do local. O artigo apresenta como inovação uma lâmpada recentemente desenvolvida utilizando enxofre e argônio, com excitação por micro-ondas, e eficiência de 130 lm/W, boa reprodução de cores, vida de 60.000 horas, com luminosidade constante por toda a vida, acendimento instantâneo e que pode ter sua potência reduzida através de controlador a até 20% do valor nominal de potência e que não usa mercúrio nem outros tipos de materiais tóxicos.

Apesar de ter sido mencionado em alguns trechos anteriores os avanços sobre o controle de luminosidade em lâmpadas a vapor de sódio, este tipo de controle não se aplica às lâmpadas utilizadas na Iluminação Pública. Em outros tipos de iluminação, que não àqueles destinados à Iluminação Pública, onde são utilizadas lâmpadas à vapor de sódio, não se deve desligá-las por curtos períodos de tempo, à título de economia, e sim utilizar circuitos limitadores de corrente, abaixando assim o nível de corrente e conseqüentemente o nível de iluminamento.

### 3.2 A LÂMPADA A VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO

Quando se fala em fontes luminosas, é necessário que se conheça algumas características, que são convencionadas e padronizadas. Dentre as diversas características, temperatura de cor e índice de reprodução de cores são parâmetros importantes e não muito conhecidos, em seus aspectos técnicos.

A Temperatura de Cor é a medida de quão quente ou fria é uma fonte luminosa. As lâmpadas incandescentes têm uma característica de fonte quente. A luz emitida por este tipo de lâmpada tem uma luz mais vermelha, enquanto as lâmpadas fluorescentes, por exemplo, emitem uma luz que geralmente vai mais para o azul. As pessoas, via de regra, preferem fontes luminosas mais quentes em áreas pequenas, como uma sala de

estar e fontes luminosas mais frias em grandes áreas iluminadas como um supermercado.

Uma escala com a temperatura das cores é mostrada na Figura 1. A temperatura de cor se refere à cor de um corpo negro radiante (radiador de Plank) à uma certa temperatura, expressa em Kelvins. Um corpo negro radiante troca de cor à medida que a sua temperatura sobe. Primeiro vermelho, depois para laranja, amarelo e finalmente branco azulado nas temperaturas mais altas. Uma fonte de luz de cor quente tem uma temperatura de cor baixa. Por exemplo, uma lâmpada fluorescente “branca fria” tem uma cor azulada, com uma temperatura de cor em torno de 6.000 K. A lâmpada fluorescente tipo “quente” parece mais amarelada e tem uma temperatura de cor em torno de 3.000 K. A lâmpada incandescente, utilizada hoje, emite uma luz com uma temperatura de cor entre 2.500 a 3.000 K. A luz branca natural, emitida pelo sol em céu aberto ao meio-dia, tem temperatura de cor próxima de 5.800 K.

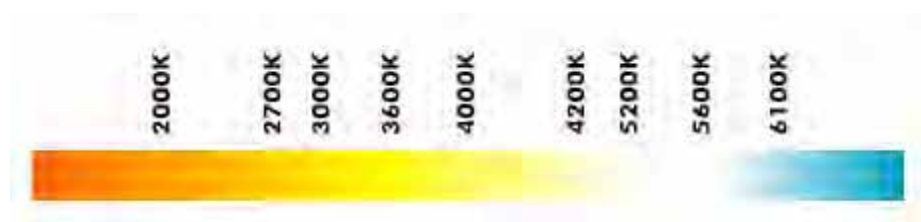


Figura 1 – Temperatura da cor

O Índice de reprodução de cores – IRC – é um outro parâmetro utilizado em luminotécnica que é bastante importante, porém muitas vezes desconhecido.

O IRC é uma escala relativa, variando de 0 a 100. Ele indica como a percepção das cores está em relação às cores reais. Ele mede o grau de percepção das cores dos objetos, iluminados por uma dada fonte de luz, em relação às cores daqueles mesmos objetos, quando iluminados por uma fonte de luz padrão. Quanto maior for este índice, menor será a ocorrência de distorção das cores. O IRC não é uma indicação de qual cor está diferente ou de quanto. Ele é a melhor indicação do deslocamento médio de oito cores padrão. Duas fontes de luz diferentes podem ter o mesmo valor de IRC e as cores

parecerem diferentes. A Tabela 7 mostra o exemplo de alguns tipos de lâmpadas com os respectivos valores de IRC.

Tabela 7 – Alguns tipos de lâmpadas e seus IRC

<b>Lâmpada</b>	<b>IRC</b>
Halógena palito	100
Halógena dicróica	100
Incandescente	100
Fluorescente trifósforo T5	85
Fluorescente compacta	80
Fluorescente comum	70
Vapor metálico	70
Mista	50
Mercúrio	40
Sódio	25

Cada aplicação necessita de determinada característica para sua iluminação. Cada tipo de lâmpada tem suas particularidades. A aplicação deve então explorar de acordo com sua necessidade, a lâmpada e o sistema mais adequados.

No caso de um conjunto de Iluminação Pública os principais componentes são: a luminária, lâmpadas, reator, ignitor, capacitor e relé fotoelétrico, e em alguns casos um transformador dedicado ao conjunto.

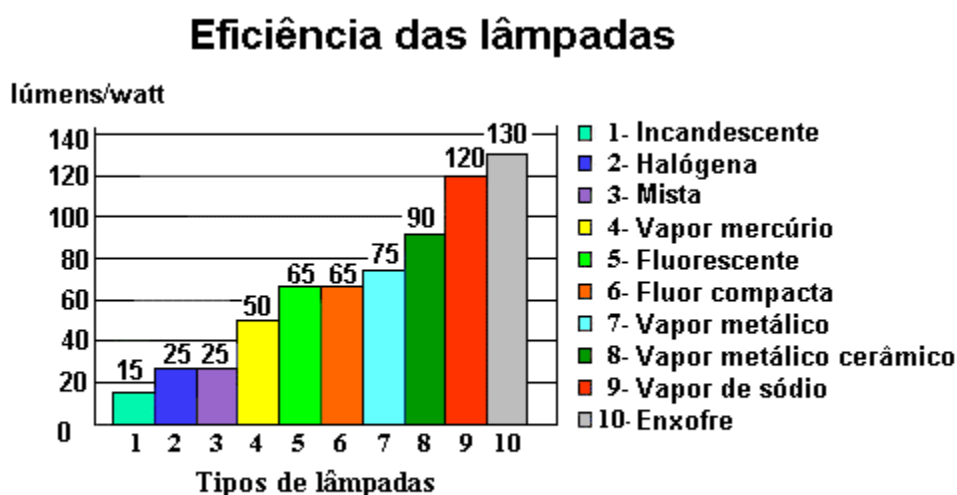
Algumas lâmpadas são mais eficientes na conversão de energia em luz visível do que outras. A eficiência da lâmpada é definida como sendo o número de lúmens que a lâmpada libera comparada a potência elétrica em watts requerida pela lâmpada e pelo reator, quando usado. É expresso em lúmens por watt.

O termo lúmen se refere à medida do fluxo luminoso. É uma grandeza obtida à partir de uma fonte de luz puntiforme e invariável de uma Candela, de mesmo valor em

todas as direções, no interior de um ângulo sólido de 1 esferorradiano. Seus limites são os comprimentos de ondas percebidos pelo olho humano. Seu símbolo é lm.

Outra unidade de medida utilizada normalmente em luminotécnica é o lux, que é definido como a iluminância de uma superfície, sobre a qual incide um fluxo luminoso uniformemente distribuído. Seu símbolo é lx.

Na Figura 2 são mostradas as eficiências para os diversos tipos e lâmpadas disponíveis. A lista está disposta da lâmpada de menor eficiência, a incandescente, para a mais eficiente. O penúltimo tipo de lâmpada, de vapor de sódio é o tipo mais utilizado hoje em dia, para a Iluminação Pública. Sua eficiência é de aproximadamente 120 lúmens/watt, dependendo do subtipo e do fabricante.



Fonte: [www.mercolux.com.br](http://www.mercolux.com.br)

Figura 2 – Eficiência das lâmpadas

A Figura 2 mostra como mais eficiente a lâmpada à base de enxofre e argônio. Esta lâmpada ainda está em fase de estudo, em potências da ordem de 1.000 W, e não está disponível comercialmente.

### 3.2.1 Princípios de operação das lâmpadas

Segundo o princípio de operação, as lâmpadas elétricas podem ser divididas em dois grandes grupos, a saber: incandescentes e de descarga.

A Figura 3 mostra, de forma resumida, os diversos tipos de lâmpadas.

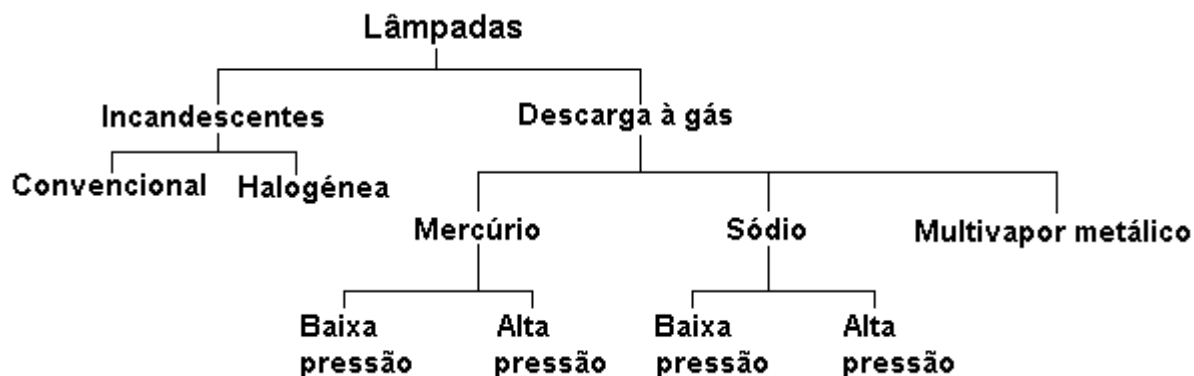


Figura 3 – Família de lâmpadas

As lâmpadas do tipo incandescentes podem ainda ser subdivididas em convencionais ou halógenas. As convencionais são lâmpadas que usam um filamento de tungstênio, instalado em um bulbo de vidro sob vácuo ou gás inerte, por onde circula uma corrente. Devido a esta corrente o filamento fica incandescente, liberando luz. São as lâmpadas mais baratas e de menor eficiência, com um valor próximo de 15 lúmens/watt. Dentro do mesmo grupo estão as lâmpadas halógenas, que têm uma melhor eficiência, valor que está em torno de 25%. Estas lâmpadas têm como melhor característica uma reprodução de cores muito boa. O Índice de reprodução de cores – IRC, é elevado, próximo à 100.

Em outro grupo, estão as lâmpadas de descarga a gás, por ordem crescente de eficiência, à saber: vapor de mercúrio, vapor metálico, vapor de sódio alta pressão e vapor de sódio baixa pressão. O termo baixa pressão ou alta pressão se refere à pressão de gás dentro da lâmpada.

As lâmpadas de descarga são constituídas por um tubo de quartzo, contendo gases e vapores metálicos. A emissão de luz ocorre quando uma corrente flui dentro deste

tubo, através de um arco elétrico, e os elétrons do arco colidem com os átomos do metal vaporizado. O tubo por sua vez, é recoberto por um bulbo de vidro, que pode ou não ser revestido internamente com substâncias fosforescentes que brilham quando da incidência da radiação emitida pelo tubo interno, de quartzo. Este tipo de lâmpada necessita de um reator para a partida e funcionamento. Neste grupo, as lâmpadas de mercúrio são as mais antigas. As unidades utilizadas para a Iluminação Pública, têm uma elevada eficiência e baixo IRC.

As lâmpadas de descarga tiveram seu desenvolvimento iniciado nos Estados Unidos, no ano de 1908 (BOWERS, 1995), com a lâmpada a vapor de mercúrio, e o grande problema na época era como reduzir a emissão do raio ultravioleta. Em 1931 surgiu a lâmpada de vapor de sódio, baixa pressão, alimentada em corrente contínua e o desafio era alimentar este tipo de lâmpada em corrente alternada. Outra grande dificuldade estava nos eletrodos, que reagiam com os vapores metálicos da lâmpada. Também havia dificuldades no desenvolvimento de vidros que pudessem suportar as altas temperaturas dos vapores metálicos, e permitir que os fios dos eletrodos fossem selados sem que o invólucro se quebrasse. Em 1933, buscava-se uma melhoria na reprodução de cores das lâmpadas vapor de sódio de baixa pressão. Somente em 1965, depois do desenvolvimento da lâmpada à vapor de sódio de alta pressão, que se conseguiu uma melhora na reprodução de cores. Atualmente existem lâmpadas deste tipo com elevado IRC. As soluções para estes problemas tornaram possível o desenvolvimento da moderna lâmpada de descarga de alta intensidade.

Nas lâmpadas à vapor metálico ou multivapor metálico o tubo de descarga é preenchido com mercúrio de alta pressão e uma mistura de vapores de argônio e neônio, e ainda com sódio e tálio. São utilizadas para iluminação de interiores e para iluminação de monumentos, *outdoors*, etc. Têm alta eficiência e o IRC é elevado.

A lâmpada de sódio de baixa pressão é constituída por um tubo contendo gases à baixa pressão. O bulbo de vidro desta lâmpada é revestido internamente com substâncias fosforescentes. De todas as lâmpadas atualmente em uso, é a de maior eficiência, porém a sua reprodução de cores é muito ruim, fazendo com que todas as cores tenham aparência de tons de cinza.

Nas lâmpadas de sódio de alta pressão, devido à alta pressão dos gases no interior do tubo, o comprimento de onda da energia emitida está concentrado no espectro de luz visível e não necessita da cobertura de fósforo como um filtro. Dos três tipos de lâmpadas de descarga, as que oferecem a melhor eficiência são os dois tipos de lâmpadas de vapor de sódio.

Como um exemplo, uma lâmpada de sódio de alta pressão de 400 watts produz 50.000 lúmens. Uma lâmpada da mesma potência à vapor metálico produz 40.000 lúmens, e uma lâmpada à vapor de mercúrio da mesma potência produz 21.000 lúmens. Exemplos de lâmpadas de vapor de sódio são mostrados na Figura 4.

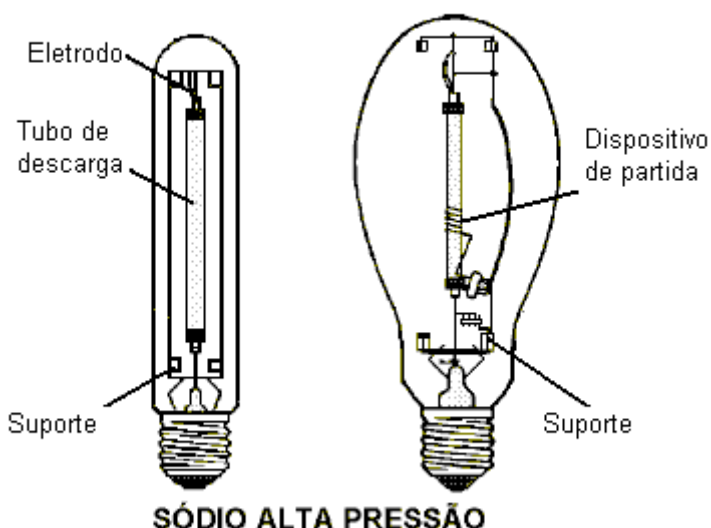


Figura 4 – Exemplos de lâmpadas de vapor de sódio

Outra característica interessante e que pode ser aproveitada na lâmpada à vapor de sódio de alta pressão, é que ela pode ser utilizada com um redutor de luminosidade, com a redução da tensão aplicada, com o objetivo de redução de consumo e custos. O circuito pode ser dotado de sensores de modo que em períodos em que não seja necessária uma grande iluminação, a potência da lâmpada seja reduzida, por exemplo, em 50%. Esta característica é boa para os casos de iluminação de interiores, ou pátios, não sendo, entretanto, recomendada para casos de Iluminação Pública. Esta redução de potência deve ser utilizada, em lugar de desligamento da lâmpada com fins de economia de custos com energia, pois esta lâmpada não deve ser desligada e religada, por dois

motivos: em primeiro lugar pelo tempo que necessita para o reacendimento, e em segundo lugar, e mais importante, alguns fabricantes informam que as lâmpadas deste tipo devem permanecer ligadas por pelo menos 10 horas a cada partida. Qualquer redução neste tempo resultará em redução da sua vida. Daí a necessidade de um redutor de luminosidade, quando o objetivo é reduzir custos.

As lâmpadas de descarga, como é o caso da lâmpada à vapor de sódio, necessitam de um reator e de um dispositivo de partida para iniciar o arco voltaico. O ignitor fornece um pulso de partida, que através do reator gera uma tensão mais alta, necessária à ionização inicial do gás, no interior da lâmpada, iniciando-se o arco voltaico. Depois da partida, o reator tem como função estabilizar a corrente, pois uma vez que o arco se estabeleceu, o valor da resistência do arco voltaico diminui à medida que a corrente aumenta. A corrente tenderia a subir indefinidamente, se não fosse a ação de limitação de corrente, exercida pelo reator.

O reator é um dispositivo de grande importância no conjunto de iluminação. Por ser um elemento constituído por bobinas, o reator tem um comportamento de carga indutiva, proporcionando um fator de potência baixo e considerável energia perdida, pelo aquecimento do núcleo e dos enrolamentos, comprometendo bastante a fonte de suprimento de tensão com o aparecimento da potência não ativa de deslocamento. Para que o sistema de Iluminação Pública apresente um melhor desempenho, é aconselhável o uso de reatores que disponham de um capacitor, incorporado ao equipamento, ou então utilizar reatores eletrônicos. Os reatores eletrônicos de boa qualidade são muito mais caros que os reatores eletromagnéticos, e têm como vantagem a não deterioração da tensão de alimentação do conjunto, que é o foco desta dissertação. Este simples procedimento pode reverter desperdícios com a energia não ativa, devido a grande quantidade de instalações que ainda utilizam reatores com fator de potência abaixo de 0,92, valor fixado pela portaria 1569 de 1993 do DNAEE.

Segundo o sítio MERCOLUX (2005), as perdas financeiras para os municípios são da ordem de R\$ 170 a 490 milhões/ano, em dados recentes, considerando-se um fator de potência médio entre 0,712 e 0,5. Com a utilização de reatores de alto fator de potência, a perda com a potência não ativa cairia para alguma coisa em torno de R\$ 13

milhões/por ano. A substituição destes reatores resultará em uma economia significativa.

Reatores de baixa qualidade também fazem com que o nível de ruído do conjunto de iluminação seja elevado. Nestes reatores, com o desprendimento do verniz, as placas de seu núcleo vibram como se fosse uma campainha.

Já foi comentada a necessidade de se observar os fatores para a conservação de energia, assim como, a eficiência e a qualidade dos conjuntos de iluminação. Assim, ao se definir um projeto, é importante lembrar que existem basicamente três fatores que devem ser avaliados: os componentes, a mão-de-obra e a manutenção. Muitas vezes a parte mais considerada para o fator economia é o custo das peças e se esquece que na realidade o maior custo de um sistema de iluminação é o da energia elétrica, ou seja, não adianta economizar no custo das peças, principalmente das lâmpadas, e depois se ter um custo elevado pela energia consumida e pela manutenção exigida. Um projeto deve avaliar o que é mais econômico e não o que é mais barato.

Para a Iluminação Pública, o tipo de lâmpada que oferece o melhor conjunto de condições é a lâmpada à vapor de sódio de alta pressão, e por isto é hoje a mais utilizada. Considerando seus vários aspectos, esta lâmpada é a que apresenta o melhor custo/benefício, pois é a mais eficiente entre as lâmpadas de descarga à alta pressão. Sua eficiência luminosa está em torno de 120 lm/W e sua vida média varia de 16.000 a 24.000 horas, dependendo da potência da lâmpada. As lâmpadas à vapor de sódio de 400 W, por exemplo, são as que possuem as melhores características dentro deste grupo. Convertem cerca de 34% da potência elétrica em radiação visível, 10% em radiação infravermelha e 56% em calor, que é dissipado pelo bulbo. As lâmpadas de 250 W, são as mais usadas no sistema de Iluminação Pública, seguidas pelas lâmpadas de 400 W. Por estes motivos, a lâmpada à vapor de sódio de alta pressão é o tipo de lâmpada ideal para a iluminação de ruas, túneis, trevos, rodovias, vias especiais, praças e calçadas.

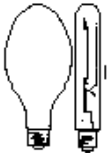
O único ponto em que a lâmpada à vapor de sódio de alta pressão perde para os outros tipos, é no aspecto reprodução de cores, pois seu espectro luminoso, de cor amarelo-dourado não é apropriado para aplicações onde a identificação das cores é

importante. Seu IRC é igual a 23, embora existam lâmpadas especiais com IRC igual a 70. Entretanto, este fator não é importante em se tratando de Iluminação Pública, onde os mais importantes são os aspectos segurança, conforme já mencionado no item 2.7, e a eficiência do conjunto.

A Figura 5 mostra parte do catálogo de lâmpadas Sylvania, onde são apontadas e grifadas em amarelo, as três lâmpadas utilizadas para as medições nesta dissertação.

A Figura 6 apresenta as três lâmpadas utilizadas para as medições, e que são alimentadas pela subestação experimental.

**SYLVANIA** ILUMINAÇÃO



**A INTENSIFICAÇÃO**

Potência (watts)	Bulbo	Acabamento	Compr. (mm)	Larg. (mm)	Base	Fluxo Lum. (Lumens)	Rend. (Lm/W)	Temper. de Cor	IRC	Posição de Trab.	Unid. p/cx.	Vida média (Horas)
<b>VAPOR DE SÓDIO GOLD LIGHT</b>												
70	Ovóide	Revestido	165	72	E-27	5.800	83	2.000K	20	Universal	20	16.000
100	Tubular	Claro	211	46	E-40	9.000	90	2.000K	20	Universal	20	16.000
100	Ovóide	Revestido	177	75	E-27	8.600	86	2.000K	20	Universal	20	16.000
100	Ovóide	Revestido	186	78	E-40	8.330	83	2.000K	20	Universal	20	16.000
150	Ovóide	Revestido	227	91	E-40	14.000	93	2.000K	20	Universal	20	24.000
150	Tubular	Claro	211	46	E-40	14.500	97	2.000K	20	Universal	20	24.000
250	Ovóide	Revestido	223	90	E-40	29.000	116	2.000K	20	Universal	20	24.000
250	Tubular	Claro	252	46	E-40	30.000	120	2.000K	20	Universal	20	24.000
400	Ovóide	Revestido	280	117	E-40	49.000	123	2.000K	20	Universal	20	24.000
400	Tubular	Claro	280	46	E-40	50.000	125	2.000K	20	Universal	20	24.000

Figura 5 – Parte do catálogo Sylvania



Figura 6 – Lâmpadas de vapor de sódio utilizadas

A Tabela 8, retirada do sítio da ELETROBRÁS, mostra por potência e tipo de lâmpada, algumas características como luminosidade, rendimento, vida média e perdas nos reatores. Pode-se notar na tabela que quanto maior for uma lâmpada, maior será seu rendimento luminoso e sua vida média.

Tabela 8 - Características gerais de lâmpadas e perdas nos reatores\*

Lâmpadas	Fluxo Luminoso (lm)	Eficiência Luminosa (lm/W)	Vida mediana		Perdas nos reatores (W)*	
			Horas	Anos	Convenc.	Eletrônico
I 100 W	1.300	13	1.000	-	-	-
I 150 W	2.200	15	1.000	-	-	-
I 200 W	3.150	16	1.000	-	-	-
I 300 W	5.000	17	1.000	-	-	-
I 500 W	8.400	17	1.000	-	-	-
H 300 W	5.000	17	2.000	-	-	-
H 500 W	9.500	19	2.000	-	-	-
H 1.000 W	22.000	22	2.000	-	-	-
H 1.500 W	33.000	22	2.000	-	-	-
F 40 W	2.700	68	7.500	-	11	4
F 110 W	8.300	76	7.500	-	25	-
M 150 W	3.100	19	6.000	-	-	-
M 250 W	5.500	22	6.000	-	-	-
M 500 W	13.500	27	6.000	-	-	-
VM 80 W	3.600	45	9.000	-	9	-
VM 125 W	6.200	50	12.000	-	12	-
VM 250 W	12.700	50	12.000	-	16	-
VM 400 W	22.000	55	15.000	-	25	-
VM 700 W	38.500	55	15.000	-	35	-
VM 1.000 W	58.000	58	15.000	-	45	-
MVM 70 W	5.000	72	8.000	1,8	13	-
MVM 150 W	11.000	73	8.000	1,8	12	-
MVM 250 W	20.000	72	12.000	2,7	25	-
MVM 400 W	38.000	80	12.000	2,7	35	-
VSAP 70 W	5.600	80	16.000	3,7	15	-
VSAP 100 W	9.500	95	24.000	5,5	15	-
VSAP 150 W	14.000	94	24.000	5,5	20	-
VSAP 250 W	26.000	104	24.000	5,5	25	24
VSAP 350 W	34.000	97	14.000	3,2	40	-
VSAP 400 W	48.000	120	24.000	5,5	40	-
VSAP 600 W	90.000	150	32.000	6	50	-

\* Valores médios, de referência, com base em informações de vários fabricantes. Caso os equipamentos existentes e/ou a serem instalados apresentem valores diferentes, estes devem ser especificados conforme os dados do fabricante.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou uma fundamentação teórica sobre sistemas de iluminação e lâmpadas eficientes. Foi feita uma pesquisa na Internet para que se pudesse conhecer o estado da arte em sistemas de iluminação eficientes e dispositivos utilizados. Vários artigos foram estudados e citados, mostrando o atual estado da técnica de iluminação. Foram apresentados os termos técnicos utilizados na luminotécnica, sendo mostrados os tipos de lâmpadas existentes e suas variações nas aplicações. Foram ainda mostrados dados sobre os problemas e os altos custos que o fator de potência baixo pode trazer para o sistema de iluminação e para o sistema de distribuição de energia elétrica.

Foram comentadas as vantagens das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão sobre os outros tipos de lâmpadas.

## CAPÍTULO 4 QUALIDADE DE ENERGIA E HARMÔNICOS

Qualidade de Energia e Qualidade de Iluminação. É preciso que se faça a distinção entre estes dois termos. Como Qualidade de Energia, definem-se aspectos sob a ótica de operação do sistema de distribuição de energia elétrica, assim como a energia que é entregue aos consumidores. Como Qualidade de Iluminação compreende-se o conforto visual que o usuário recebe.

Muitos pesquisadores têm-se dedicado ao estudo da economia de energia e da utilização de equipamentos de última geração para o controle da energia elétrica utilizada no processo. Da mesma forma, o impacto desta utilização no sistema de distribuição de energia elétrica tem sido avaliado. O controle de potência, proporcionado por estes equipamentos, se utiliza principalmente do efeito de recortar a senóide da onda de tensão para assim abaixar o valor RMS da corrente entregue à carga. Isto faz com que a corrente de carga fique distorcida, distante da forma ideal, que seria também uma senóide. A utilização destes dispositivos eletrônicos, realmente faz com que a demanda seja reduzida, aliviando assim os picos no sistema. Esta necessidade de energia é a soma das potências elétricas ativas e não ativas, durante um intervalo de tempo especificado, que são solicitadas ao sistema elétrico pela carga instalada, na unidade consumidora. A tecnologia de controle de energia, se não for aplicada adequadamente, pode trazer prejuízos à qualidade da energia elétrica fornecida à outros equipamentos ligados à mesma rede de distribuição, caso o equipamento responsável pela execução deste controle não disponha de filtros adequados.

Devido ao formato distorcido da onda de corrente de carga, vários fenômenos ocorrem, assim como o aumento das perdas nas redes e nos transformadores de distribuição; aumento das perdas e fenômenos de ressonância nos capacitores utilizados para corrigir o fator de potência das redes de distribuição; aumento das perdas dos motores em geral. Estas perdas, consideradas em conjunto, representam um custo significativo (HEYDT et al).

O fator de potência de um circuito elétrico para um sinal periódico não senoidal é definido como sendo a potência ativa  $P$  de um circuito – que é na verdade o trabalho

realizado – em relação a uma potência aparente  $S$ , que é a ocupação do circuito ou sistema elétrico. A ocupação do circuito deve ser vista como sendo o produto da corrente pela tensão, independente da defasagem que exista entre as duas formas de onda. O fator de potência (FP) é representado matematicamente pela Equação 1. Quando o circuito elétrico está equilibrado, simétrico e com cargas lineares, o fator de potência coincide com o cosseno do ângulo de defasagem entre corrente e tensão.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Onde:

- FP Fator de potência
- P Potência ativa da onda com harmônicos
- S Potência aparente

Quando uma onda de corrente ou tensão tem um formato não senoidal, por exemplo, a onda mostrada na Figura 7, diz-se que esta onda está repleta de harmônicos. Harmônicos são definidos como os componentes sinusoidais de uma onda periódica, que possuem frequência múltipla inteira da frequência da frequência da fundamental.

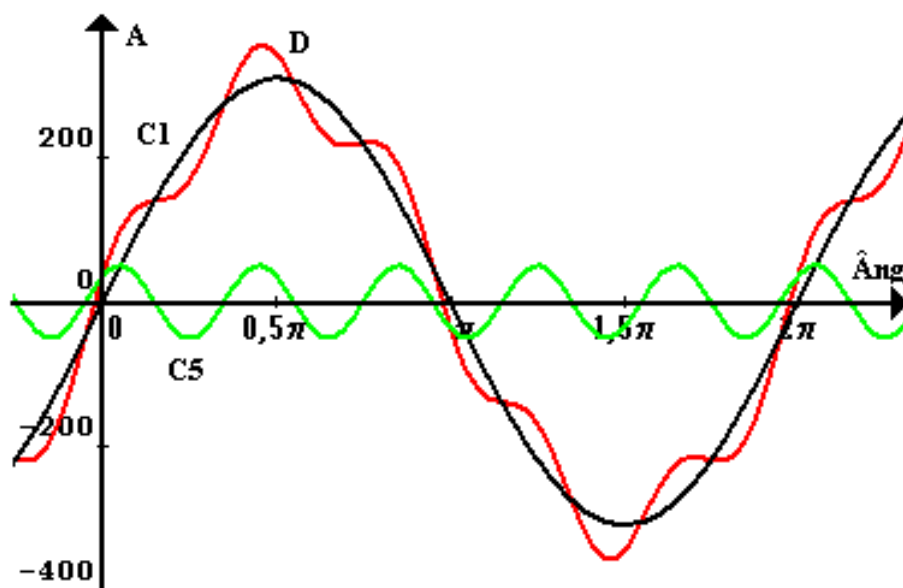


Figura 7 – Onda distorcida e componentes

Os harmônicos são fenômenos contínuos e não devem ser confundidos com fenômenos de curta duração, que duram apenas alguns ciclos. Estão entre os fenômenos responsáveis pela distorção das formas de onda, pelas alterações da frequência e do valor eficaz da tensão e da corrente. São perturbações responsáveis por sobreaquecimento de cabos e transformadores, aumento de perdas elétricas, redução do fator de potência, elevação do potencial do neutro, má operação do controle digital de equipamentos, conjugados pulsantes em máquinas elétricas e falhas em equipamentos de uma instalação elétrica, entre outras perturbações.

Os harmônicos são causados por cargas não-lineares, que são cargas em que a corrente que é absorvida pelo equipamento não tem a mesma forma de onda da tensão de alimentação. Como exemplo de cargas não-lineares têm-se todas as cargas alimentadas por dispositivos eletrônicos de potência, os acionamentos estáticos.

As lâmpadas utilizadas na Iluminação Pública são outro exemplo de cargas não-lineares, onde as formas de onda de corrente são diferentes das formas de onda das tensões aplicadas.

A Análise de Fourier informa que qualquer função periódica, ou seja, qualquer onda que se repita a intervalos regulares de tempo, pode ser representada por uma série de termos sinusoidais, com um número infinito de termos. Cada um dos termos da série representa uma onda. Estas ondas poderão estar defasadas da onda fundamental. Cada termo é precedido por um coeficiente que representa o valor máximo daquela componente. Segundo CLOSE (1966), um conjunto de condições suficientes para a existência da série é que os valores da função sejam finitos, que a curva tenha um número finito de máximos, mínimos e descontinuidades no período, e que a área sob a curva seja finita.

A Equação 2 mostra o formato geral para a série de Fourier, segundo CLOSE (1966).

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos n\omega_0 t + b_n \cdot \sen n\omega_0 t] \quad (2)$$

Onde:	$a_0$	Componente de corrente contínua da função
	$n$	Ordem da componente sinusoidal
	$t$	Tempo
	$a_n$ e $b_n$	Valores máximos da componente harmônica
	$\omega_0$	Ângulo de fase da componente harmônica fundamental, em radianos, $2\pi/T$

Os termos  $a_1$  e  $b_1$  juntos constituem a componente fundamental, enquanto  $a_n$  e  $b_n$  são os harmônicos de ordem  $n$ . Uma vez que o valor médio de cada um dos termos sinusoidais da série é igual a zero, a constante  $a_0$  é a componente contínua de  $f(t)$ .

Como já foi dito, uma série de Fourier é composta por infinitos termos, porém na prática não há necessidade de se utilizar mais do que 25 termos.

A Análise de Fourier dispõe ainda de meios para que sejam determinados a magnitude e o ângulo de fase da componente fundamental e dos demais componentes harmônicos. Porém, para as avaliações práticas, hoje se dispõem de equipamentos que fazem esta análise em tempo real e mostram as amplitudes e ângulos de fase para cada uma das componentes presentes.

Uma outra forma de verificar se uma onda de tensão ou de corrente é senoidal é através do cálculo do fator de crista ( $fc$ ). Este fator é a relação entre o valor de pico de uma forma de onda senoidal e o seu valor eficaz (RMS). Para uma onda senoidal o fator de crista será sempre igual à  $\sqrt{2}$ . Qualquer diferença encontrada neste cálculo apontará a onda como sendo não senoidal. O fator de crista é representado na Equação 3.

$$fc = \frac{I_{\text{Pico}}}{I_{\text{Eff}}} \quad (3)$$

Onde:	$fc$	Fator de crista
	$I_{\text{pico}}$	Corrente (ou tensão) de pico
	$I_{\text{Eff}}$	Corrente (ou tensão) eficaz harmônica total

Como exemplo para o fator de crista, considere-se a Figura 7 de uma forma de onda de corrente medida. Esta onda, um pouco distorcida, é formada por uma onda fundamental, representada na figura pela curva C1, que conforme apurado nas medições trata-se de uma onda de 60 Hz e de uma segunda curva, que através da medição no circuito se verificou tratar-se do 5º harmônico, uma vez que apresentou na medição uma frequência de 300 Hz, e uma diferença de fase de 30°, em relação à onda fundamental, representada na figura pela curva C5. A curva D é a resultante do somatório ponto à ponto das duas curvas C1 e C5. A medição das correntes revelou os valores mostrados na Tabela 9. Para a curva C1, o fator de crista calculado segundo a Equação 3 é igual a 1,41, o que demonstra que a curva é uma senóide. Para a curva C5, o fator de crista calculado também é igual a 1,41, tratando-se portanto de outra senóide. Já a curva D apresentou um fator de crista igual a 1,62, não se tratando, portanto, de uma senóide.

A curva D vista anteriormente como o resultado de uma soma gráfica, pode também ser obtida matematicamente pelo uso da Equação 2, e terá como representação a Equação 4, onde os coeficientes da onda fundamental e do 5º harmônico, respectivamente, 310 e 50 A, são obtidos por medições, mostradas na Tabela 9. Na curva mostrada na Figura 7, por exemplo, para o ponto correspondente a um dos valores de pico da corrente total, um dos valores máximos da função, corresponde ao valor instantâneo de 85,19° e  $f(x)$ , calculado pela equação, será igual a 358,63 A, muito próximo ao valor medido.

Tabela 9 – Medição das correntes

Sinal	$I_{\text{Pico}}(\text{A})$	$I_{\text{Eff}}(\text{A})$	fc	Frequência	Obs.
C1	310	219,2	1,41	60	Senóide
C5	50	35,4	1,41	300	Senóide
D	359	222	1,62	-	Distorcida

$$f(t) = 310 \cdot \text{sen}(t) + 50 \cdot \text{sen}(5t + 30^\circ) \quad (4)$$

A preocupação com os harmônicos presentes nos sistemas de distribuição não é recente. Nos casos de sistemas de iluminação utilizando lâmpadas eficientes, vários pesquisadores vêm se dedicando ao estudo da influência na Qualidade de Energia do sistema elétrico. Existem muitos casos relatados, em que a queima de lâmpadas, reatores e cabeação se devem ao aparecimento de harmônicos (IEEE, 1992) e (NTT, 2004). O estudo dos fenômenos dos harmônicos apresenta dificuldades quanto ao uso de equipamentos e dispositivos que meçam e mostrem as formas de ondas distorcidas. Estes fenômenos ainda não são muito estudados.

Nesta dissertação serão mostradas também algumas características dos harmônicos, sua interação com os equipamentos e circuitos elétricos. Será apresentado ainda um estudo prático sobre a influência de algumas cargas especiais sobre os circuitos resistivos.

#### 4.1 A QUALIDADE DE ENERGIA

Todo equipamento elétrico para poder funcionar adequadamente depende da alimentação de uma fonte confiável e com a melhor qualidade possível. Como a melhor qualidade possível deve-se entender que a onda de tensão deve ter seu formato próximo da forma de onda considerada ideal para o caso. A tensão normalmente utilizada, e disponível comercialmente, é a tensão alternada – assim chamada, pois seus valores instantâneos variam no tempo –. Estes valores instantâneos variam segundo um padrão senoidal, valores estes que correspondem àqueles representados pela Equação 5. Como boa qualidade da tensão, pode-se então entender, que os valores de tensão instantânea sejam o mais próximo possível dos valores de uma senóide, cuja amplitude máxima, frequência e ângulo de fase sejam os valores de uma onda senoidal padrão. O mesmo raciocínio é válido para a corrente, cuja representação matemática é mostrada na Equação 6.

$$u = U_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t \pm \theta) \quad (5)$$

$$i = I_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t \pm \varphi) \quad (6)$$

Onde:

u	Tensão instantânea [V]
$U_{\max}$	Valor de pico de tensão [V]
I	Corrente instantânea [A]
$I_{\max}$	Valor de pico da corrente [A]
$\omega$	Velocidade angular [rad/s ou graus/s]
t	Tempo [s]
$\theta$	Ângulo de fase de uma tensão senoidal [rad ou graus]
$\varphi$	Ângulo de fase de uma corrente senoidal [rad ou graus]

A corrente alternada senoidal, mais conhecida como corrente alternada (CA), tem três características principais, pelas quais é utilizada mundialmente. São elas: variação de valores instantâneos segundo um padrão senoidal, facilidade no recolhimento das tensões geradas em geradores rotativos e facilidade de alteração dos níveis de tensão. Estas três características serão vistas agora em detalhes.

A alternância dos valores instantâneos segundo um padrão senoidal de tensão permite que, de forma relativamente simples, seja feita a montagem de bobinas com três elementos dispostos em forma circular, dentro de um anel metálico próprio, e assim ser criado um campo elétrico girante, que é a base de funcionamento dos motores elétricos de corrente alternada.

A outra grande justificativa do uso da corrente alternada é a facilidade de recolhimento das tensões geradas em geradores elétricos rotativos. As tensões podem ser geradas na parte fixa da máquina, eliminando assim o coletor utilizado em máquinas do tipo corrente contínua. O coletor é um componente caro e de difícil manutenção em uma máquina rotativa, e sua principal fonte de defeitos. Na parte rotativa da máquina de corrente alternada (rotor), ficam as bobinas que produzem o campo magnético necessário à geração da tensão, na parte fixa da máquina (estator). A parte rotativa é então alimentada através de dois anéis, ligados a escovas fixas. A manutenção destas

escovas fixas e anéis girantes é fácil e não traz nenhum tipo de problema para a operação da máquina.

A terceira e última vantagem citada para a corrente alternada, é que devido à variação dos valores instantâneos da corrente, o nível de tensão pode ser facilmente variado. Este é o princípio básico de funcionamento dos transformadores.

A utilização da energia elétrica, na forma de corrente alternada, ganhou ainda um maior impulso na década de 1980, devido às novas facilidades que a eletrônica de potência trouxe para o seu controle.

O circuito elétrico mais simples que se pode ter, mostrado na Figura 8, é composto por uma fonte, no caso de tensão alternada, uma chave e uma resistência ôhmica pura.

Neste tipo de circuito, a corrente elétrica que circula pela resistência segue a lei de ohm.

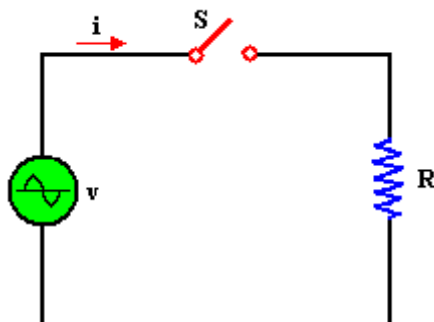


Figura 8 – Circuito simples

Na Figura 9 são mostradas as formas de ondas de tensão e de corrente, presentes neste tipo de circuito. A tensão alternada mostrada é a tensão gerada industrialmente em geradores, sendo seu nível adaptado ao uso que se pretende. A corrente, cuja representação também pode ser vista na figura, segue o mesmo formato de onda, pois esta corrente terá o mesmo formato da onda de tensão, uma vez que é consequência da divisão da onda de tensão, Equação 5, por uma constante, a resistência. Outro aspecto que se pode observar é que estas duas formas de onda estão em fase entre si, ou seja, os valores instantâneos de mesmas características ocorrem no mesmo instante, ou, em

linguagem matemática, o valor do ângulo de defasagem entre tensão e corrente é igual a zero. Nas Equações 5 e 6 foram mostrados estes ângulos de defasagem.

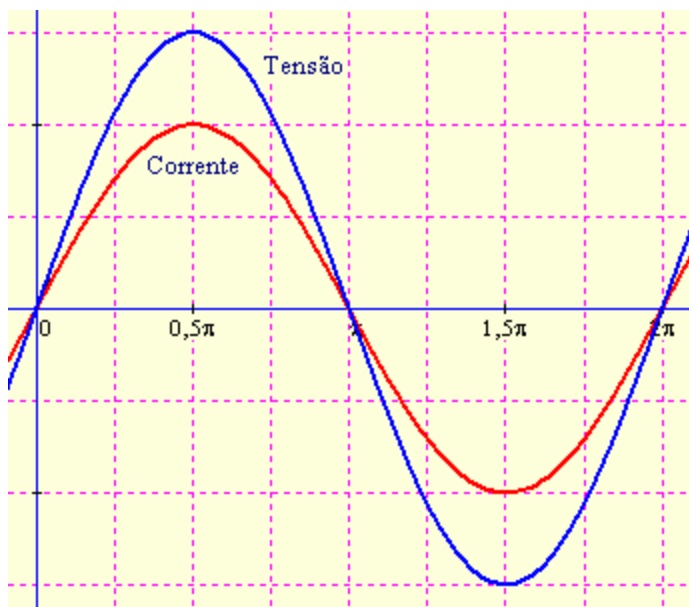


Figura 9 – Tensão e corrente na resistência

Se as formas de onda de corrente e de tensão são as mostradas na Figura 9, pode-se dizer que estas ondas têm boa qualidade pois seguem exatamente as Equações 5 e 6. Pode-se observar também que o fator de crista ( $f_c$ ) é igual a  $\sqrt{2}$ . Cargas deste tipo, onde a onda de corrente tem a mesma forma da onda de tensão, são chamadas de cargas lineares.

Existem cargas que não seguem esta linearidade. São as cargas compostas por e dispositivos chaveados (tais como os tiristores). Uma carga deste tipo é mostrada na Figura 10. Nesta figura, está representado de forma simplificada um gerador de corrente alternada, dois tiristores e uma carga qualquer, que pode ser uma lâmpada, um resistor, um motor ou qualquer outro tipo de carga linear ou não-linear. Como esta carga está sendo alimentada por um circuito chaveado eletronicamente, o conjunto, mostrado na Figura 10 dentro do retângulo tracejado, se torna uma carga não-linear.

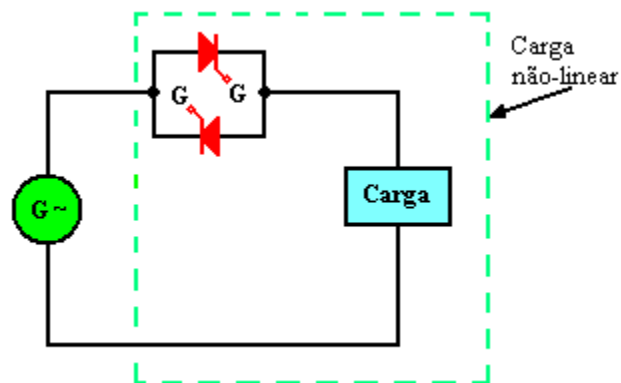


Figura 10 – Carga não-linear

O funcionamento deste circuito será agora detalhado. O tiristor é um dispositivo que, em seu estado de repouso não conduz corrente. Ao receber um sinal de tensão em seu gatilho, os tiristores representados na figura pela letra G, podem se tornar condutores e permanecer conduzindo até que a corrente que circula por eles inverta seu sentido. A tensão entregue pelo gerador da Figura 10 é uma tensão alternada (que normalmente é o tipo de tensão entregue pelas concessionárias de energia elétrica). Esta tensão está representada na Figura 11, pela curva  $U_s$ .

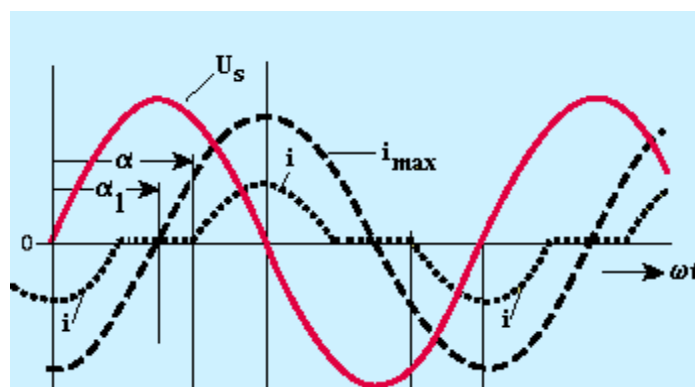


Figura 11 – Corrente não-linear

A tensão que é aplicada ao gatilho dos tiristores tem uma frequência igual à do gerador principal da Figura 10, de forma que quando a tensão do gerador está em seu semi-ciclo positivo um dos tiristores tem condição para conduzir, só dependendo agora da existência de tensão em seu gatilho, e em seguida, no semi-ciclo negativo o outro

tiristor terá condição para conduzir, também só dependendo da existência de tensão em seu gatilho. Considerando agora, que em um determinado instante, representado na Figura 11 pelo ângulo  $\alpha$ , um dos tiristores recebe a tensão em seu gatilho, seu processo de condução é iniciado, permanecendo assim até que sua corrente atinja o valor zero. Neste instante ocorre o bloqueio do tiristor. No instante correspondente ao ângulo ( $\alpha + 180^\circ$ ) uma tensão é aplicada no gatilho do outro tiristor, que assim inicia sua condução até que sua corrente se torne igual a zero. A corrente que circulará pela carga será então a curva  $i$ , mostrada na Figura 11, uma corrente não-linear.

Cargas deste tipo fazem com a corrente que circula pelo circuito não seja mais senoidal, não podendo portanto, serem representadas pela Equação 6. A corrente média do circuito depende do ângulo de gatilhamento  $\alpha$ . Esta corrente, para o caso da figura, terá seu maior valor quando  $\alpha = \alpha_l$  e a curva de corrente correspondente será a curva  $i_{\max}$ .

## 4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS HARMÔNICOS

Quando cargas não-lineares são conectadas à rede de distribuição de energia elétrica, correntes harmônicas circulam pelo circuito e podem fazer com que tensões harmônicas sejam geradas. O aparecimento de tensões harmônicas depende da grandeza desta corrente em relação à potência da fonte utilizada, assim como da impedância desta rede. Se a onda de tensão ficar distorcida poderá causar problemas a equipamentos ligados a esta rede de distribuição, pois as correntes nestes equipamentos serão também correntes com presença de harmônicos.

### 4.2.1 Ordem dos harmônicos

Os problemas causados pelos harmônicos tornam-se cada vez mais críticos, pois ao mesmo tempo em que aumenta o número de fontes geradoras de harmônicos nos sistemas elétricos, aumenta também o número de dispositivos sensíveis ao seu efeito, tais como conversores, microprocessadores, capacitores, linhas de comunicação, etc. Ou seja, os mesmos dispositivos de potência que geram a maioria dos harmônicos são também sensíveis a estes harmônicos.

As correntes harmônicas, então, são causadas por cargas não-lineares conectadas à rede. A circulação destas correntes harmônicas pode gerar tensões harmônicas através das impedâncias da rede, causando a degeneração da onda de tensão de alimentação, fazendo com que a onda de tensão, que chega à carga, não seja mais senoidal.

A ordem de um harmônico é definida como sendo a razão entre a sua frequência e a frequência fundamental. Desta forma, para uma frequência fundamental de 60 Hz, uma onda com a frequência de 300 Hz corresponde a um harmônico de 5ª ordem, a de 360 Hz corresponde ao harmônico de 6ª ordem e assim por diante.

Os harmônicos podem ainda ser classificados como característicos e não característicos. Os harmônicos não característicos são aqueles que são gerados por dispositivos tais como: fornos a arco, lâmpadas fluorescentes e a vapor de sódio, assim como os transformadores e reatores operando na região de saturação de sua curva de magnetização. Os harmônicos característicos são aqueles gerados por dispositivos que fazem uso de semicondutores de potência (diodos e tiristores) tais como, conversores estáticos de potência (retificadores e inversores), compensadores estáticos de reativos e equipamentos de controle de velocidade de motores, em condição de funcionamento equilibrado.

Já foi visto que uma parcela significativa dos harmônicos presentes em sistemas elétricos ocorre devido ao grande uso de dispositivos semicondutores, de ampla aplicação em sistemas de energia elétrica, tanto em sistemas de transmissão como em consumidores industriais, comerciais e também residenciais. É esperado que até o ano 2010 50% da energia produzida seja processada por dispositivos semicondutores (NTT, 2004).

Para o caso dos conversores estáticos, a ordem dos harmônicos característicos gerados pelo conversor é determinada pela quantidade de dispositivos semicondutores utilizados. Esta ordem segue a Equação 7, onde  $n$  varia de 1 até no máximo 50 (Já foi comentado que na prática não são necessários mais do que 25 termos).

$$h = pn \pm 1 \tag{7}$$

Onde:    h    Ordem do harmônico  
          p    Número de pulsos do conversor  
          n    Número inteiro qualquer (1, 2, 3,...)

Como cada dispositivo semicondutor necessita de um pulso em seu gatilho, a cada dispositivo corresponde um pulso, e quanto maior o número de pulsos de um conversor, maior será a ordem dos harmônicos presentes, e conseqüentemente menos distorcida será a senóide que representa a onda de corrente e de tensão. Porém quanto mais pulsos utilizar um equipamento, maiores serão os dispositivos semicondutores a se utilizar e também maior o número de transformadores de controle utilizados. Com isto, há um encarecimento do sistema.

Por exemplo, no caso de um conversor de 6 pulsos, os harmônicos que aparecerão serão os de ordem 5 e 7, 11 e 13, 17 e 19 e assim por diante. Na Figura 12 estão mostrados esquemas simples para alguns tipos de conversores. Um conversor que apresenta uma boa relação custo/benefício utiliza 36 pulsos.

Quanto à ordem, os harmônicos podem ser classificados como: de ordem par e de ordem ímpar. Os harmônicos de ordem ímpar são encontrados nas instalações elétricas em geral e os de ordem par são encontrados nas instalações elétricas em que há a ocorrência de assimetria de sinal devido à presença de uma componente contínua. Para o caso dos harmônicos de ordem ímpar, na Equação 2, o termo com o cosseno se torna igual a zero.

A automação dos processos industriais tem aumentado a utilização de fontes que provocam distorção harmônica na tensão de alimentação, uma vez que alguns equipamentos energeticamente eficientes contribuem para a degradação da qualidade da energia. Conforme já mencionado, para se fazer o controle energético de um equipamento é necessário se recortar a onda senoidal de tensão de alimentação deste equipamento.

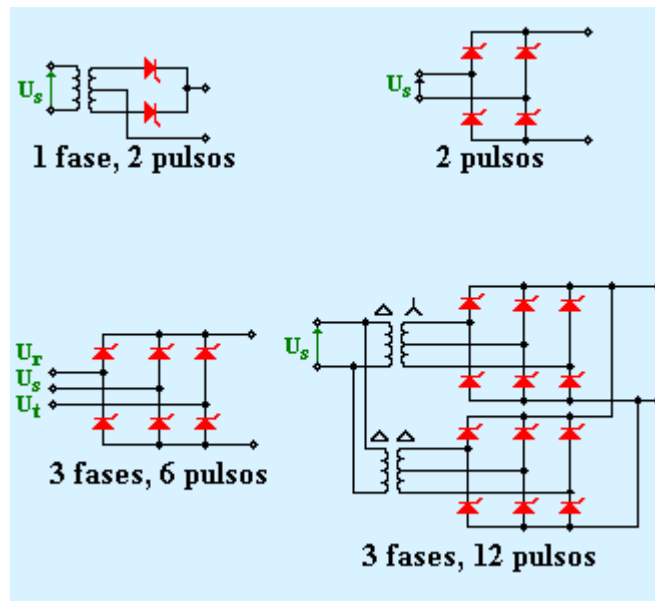


Figura 12 – Tipos de conversores

Também no setor residencial é cada vez maior a presença de cargas não-lineares como televisores, fornos de micro-ondas, computadores e outros dispositivos eletrônicos.

A Iluminação Pública é outra área onde o impacto do fenômeno da distorção harmônica está se tornando significativo para o sistema de distribuição, uma vez que as lâmpadas de descarga são dispositivos não-lineares. Daí a preocupação em se elaborar este trabalho.

Houve um grande avanço da tecnologia no uso de variados tipos de lâmpadas eficientes, porém como nos casos de equipamentos industriais, os novos dispositivos fazem uso de projetos mais sofisticados e geralmente mais sensíveis à distorção da forma de onda de tensão alimentação.

Os modelos polinomiais das lâmpadas de descarga foram desenvolvidos no passado (LASKOWSKI, 1981), (TAMBY, 1988) e incluídos nos algoritmos de análise de harmônicos (GRADY, 1985). Estes modelos usam métodos experimentais para determinar os coeficientes destas equações polinomiais. Estes dados experimentais são obtidos em laboratórios, com medições em pequenas amostragens de lâmpadas e não em redes de distribuição (GRADY, 1985).

### 4.2.2 Distorção Harmônica Total

O parâmetro Distorção Harmônica Total – DHT foi definido para suprir a necessidade de se quantificar numericamente a distorção de uma onda. Existem duas formas de se quantificar numericamente este indicador. A  $DHT_F$  representa a distorção do sinal em relação à componente fundamental e a  $DHT_R$  representa a distorção da onda em relação ao sinal total. Estas duas formas são representadas por equações próprias.

A  $DHT_F$  é a relação entre o valor RMS das amplitudes dos harmônicos presentes e a amplitude da onda fundamental, sendo mostrada na Equação 8.

A  $DHT_R$  é a relação entre o mesmo valor RMS das amplitudes dos harmônicos presentes e o valor RMS da onda total, e é apresentada na Equação 9.

$$DHT_F = \frac{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + h_4^2 + \dots + h_n^2}}{h_1} \times 100 \quad (8)$$

$$DHT_R = \frac{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + h_4^2 + \dots + h_n^2}}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + \dots + h_n^2}} \times 100 \quad (9)$$

Onde: $DHT_F$	Distorção Harmônica Total em relação à onda fundamental
$DHT_R$	Distorção Harmônica Total em relação ao sinal total
$h_1$	Valor RMS da onda fundamental
$h_n$	Valor RMS do harmônico de ordem n

A existência de duas diferentes definições para a DHT, uma em comparação com a onda fundamental e a outra com o valor RMS do sinal total, pode causar ambigüidade e erros de interpretação na medição dos dados.

SHMILOVITZ (2005) examina em seu artigo a diferença entre estas definições e sugere que para as medições de DHT, no contexto dos sistemas de potência, se adote sempre a definição mostrada pela Equação 8, a  $DHT_F$ .

Fazendo-se o desenvolvimento matemático das duas equações, Equação 8 e Equação 9, chega-se à relação entre os valores da  $DHT_R$  e da  $DHT_F$ , representada pela Equação 10.

$$DHT_R = \frac{DHT_F}{\sqrt{1 + DHT_F^2}} \quad (10)$$

Quando os valores de DHT são baixos, não há muita diferença entre os dois valores.

Examinando-se a Equação 10, verifica-se que a  $DHT_R$  não pode assumir valores maiores que 100% e que a  $DHT_F$  pode assumir valores tão altos como, por exemplo infinito, para um caso hipotético em que a frequência da onda fundamental seja igual a zero (que seria o caso da corrente contínua).

Neste trabalho será sempre utilizada a  $DHT_F$ , que será referida somente como  $DHT^2$ ,  $DHT_I$  ou  $DHT_V$ ,

Onde:      $DHT$      Expressão genérica para Distorção Harmônica Total;  
             $DHT_I$      Distorção Harmônica Total de Corrente;  
             $DHT_V$      Distorção Harmônica Total de tensão.

#### **4.2.3 Considerações sobre o valor da $DHT_V$ medido e fenômenos observados em uma instalação**

Conforme visto acima, a  $DHT_V$ , caracteriza a deformação da onda de tensão. SHMILOVITZ (2005), aponta os seguintes valores e conseqüências para a  $DHT_V$  :

- Um valor de  $DHT_V$  inferior a 5% pode ser considerado como normal. Não ocorrerão problemas no funcionamento do equipamento;

---

<sup>2</sup> A notação para este inglês é THD, Total Harmonic Distortion

- Um valor de  $DHT_V$  compreendido entre 5 e 8% revela uma “poluição” harmônica significativa. É provável que problemas apareçam no funcionamento do equipamento em questão;
- Um valor de  $DHT_V$  superior a 8% revela uma “poluição” harmônica considerável. Problemas no funcionamento dos equipamentos podem ocorrer. Uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.

#### **4.2.4 Considerações sobre o valor da $DHT_I$ medida e fenômenos observados em uma instalação**

Da mesma forma que a  $DHT_V$ , a  $DHT_I$  prejudica o funcionamento dos equipamentos. A pesquisa do “poluidor” é efetuada medindo-se a  $DHT_I$  na entrada e em cada uma das saídas dos diferentes circuitos.

Segundo as considerações feitas por SHMILOVITZ (2005), são as seguintes as conseqüências:

- Um valor de  $DHT_I$  inferior a 10% é considerado como normal. Não haverá problemas de mau funcionamento do equipamento;
- Um valor de  $DHT_I$  compreendido entre 10 e 50% revela uma poluição harmônica que deve ser considerada, pois existe o risco de aquecimento e implica no sobredimensionamento dos cabos e das fontes;
- Um valor de  $DHT_I$  superior a 50% aponta para uma poluição harmônica que certamente trará problemas para o circuito e seus efeitos obrigatoriamente devem ser avaliados. Problemas de mau funcionamento são prováveis. Uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.

Os harmônicos têm um impacto econômico considerável nas instalações. Seus principais efeitos são: o aumento das despesas com energia, o envelhecimento dos materiais e perdas de produtividade.

Entre os efeitos de harmônicos em cabos condutores de eletricidade destacam-se: sobreaquecimento devido ao aumento das perdas por efeito Joule; uma maior solitação do isolamento devido a possíveis picos de tensão, provocando aquecimento e conseqüentemente uma deterioração do material isolante.

No caso dos transformadores submetidos às distorções de tensão e corrente, ocorre um sobreaquecimento causado pelo aumento das perdas no cobre e no ferro. As correntes harmônicas provocam um aumento das perdas no cobre, devido ao efeito joule e um aumento das perdas no ferro causado pelas correntes parasitas. As tensões harmônicas, por sua vez, provocam o aumento das perdas no ferro, devido à uma maior histerese. A parcela de perdas no cobre é proporcional ao quadrado da DHT de corrente e a parcela das perdas no ferro é linearmente proporcional à DHT de tensão. Esta consideração pode ser representada pela Equação 11.

$$p = k_1 \cdot \text{THD}_I^2 + k_2 \cdot \text{THD}_V \quad (11)$$

Onde:     p           Perdas  
           k<sub>1</sub>        Coeficiente de proporcionalidade das perdas no cobre  
           k<sub>2</sub>        Coeficiente de proporcionalidade das perdas no ferro  
           THD<sub>V</sub>     Distorção Harmônica Total de Tensão  
           THD<sub>I</sub>     Distorção Harmônica Total de Corrente

Como um exemplo dos problemas causado por harmônicos pode-se citar aquele mostrado na Figura 13, que é a curva estimada de vida útil de um transformador, em função da DHT<sub>I</sub>, conforme OLESKOVICZ (2004).

Um motor de indução, operando sob a influência de harmônicos, pode apresentar, de forma semelhante ao transformador, um sobreaquecimento em seus enrolamentos.

Um capacitor constitui-se de um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas estando, portanto, constantemente sobrecarregado, e assim sujeito a

sobreaquecimento excessivo, podendo até ocorrer uma atuação dos dispositivos de proteção da rede de distribuição elétrica, causando desligamentos indevidos.

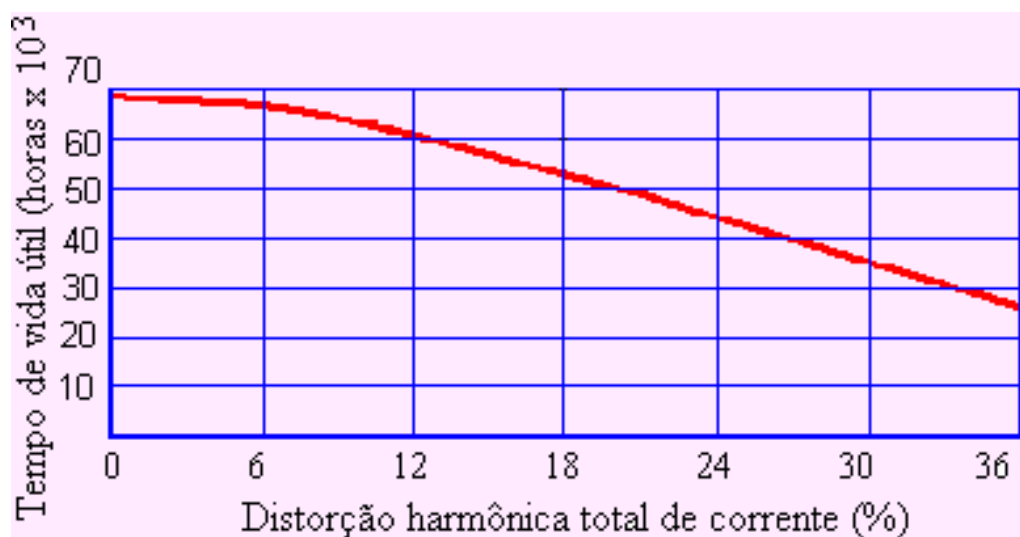


Figura 13 – Vida útil de transformador

Um outro efeito causado pelas distorções harmônicas refere-se à operação anormal ou indevida dos medidores de energia elétrica. O medidor de energia do tipo indução tem sua operação baseada no fenômeno da interação eletromagnética entre a tensão aplicada e a corrente que circula pelo medidor (e pela carga). Quando este medidor é submetido a tensões e correntes harmônicas, conjugados criados fazem com que o disco altere sua velocidade, ocasionando erros de medição.

Um outro aspecto muito importante e que deve ser destacado refere-se ao carregamento anormal do condutor de neutro, principalmente em instalações que reúnem muitos aparelhos eletrônicos, como microcomputadores, onde há uma predominância muito grande do 3º harmônico, que se propaga pelo neutro, podendo dar origem a tensões “perigosas”.

#### 4.2.5 As perturbações causadas pelos harmônicos

Os harmônicos de corrente ao circularem pelas redes de distribuição de energia elétrica deterioram a qualidade da energia, e podem provocar sobrecargas nesta rede,

devido ao aumento da corrente eficaz. Outro problema que pode acontecer quando existem harmônicos de 3ª ordem presentes é a sobrecarga do condutor de neutro em razão da soma destes harmônicos, gerado pela carga trifásica. A corrente eficaz total é mostrada na Equação 12.

$$I_{\text{Eff}} = I_1 \sqrt{1 + \text{DHT}_1^2} \quad (12)$$

Onde:  $I_{\text{Eff}}$  Corrente eficaz harmônica total  
 $I_1$  Corrente eficaz da onda fundamental

Com a utilização da equação 12 pode-se facilmente verificar que para uma  $\text{DHT}_1$  de 50% – valor que apesar de elevado poderá aparecer em muitos circuitos com cargas não-lineares –, haverá um aumento de 12% da corrente eficaz<sup>3</sup> que circulará pelos condutores de fase e de neutro.  $I_{\text{Eff}}$  é a corrente que deverá ser usada para os cálculos das perdas por aquecimento ou para o dimensionamento dos condutores à serem utilizados.

#### 4.2.6 As conseqüências dos harmônicos

São cada vez mais freqüentes os danos causados por harmônicos nas redes de distribuição de energia elétrica. Os harmônicos são difíceis de se combater. Mais fácil é evitar a sua geração com a utilização de equipamentos que tenham sido projetados com este fim. No caso da Iluminação Pública, pode-se utilizar lâmpadas com projetos otimizados, que provoquem menores deformações na tensão de distribuição. Da mesma

---

<sup>3</sup> Por definição, corrente RMS e corrente eficaz tem o mesmo significado.

RMS: Root mean square, é um processo de cálculo para tensão e corrente alternadas. O cálculo RMS tem como objetivo fornecer um valor de corrente CA que é equivalente a uma corrente CC, de comparação.

forma, reatores bem projetados proporcionam uma baixa geração de harmônicos e um alto fator de potência.

No caso de redes trifásicas, os harmônicos mais frequentemente encontrados são os harmônicos de ordem ímpar. Além da 25ª ordem, as correntes harmônicas são desprezíveis e sua medição não é significativa. Uma boa precisão da medição é então obtida considerando-se os harmônicos até a 25ª ordem. Os distribuidores de energia, via de regra, supervisionam os harmônicos de ordem 3, 5, 7, 11 e 13. Assim, a compensação dos harmônicos até a 13ª ordem é imperativa.

#### 4.2.7 Relação entre o fator de potência e DHT

Assim como os índices DHT já discutidos, o fator de potência pode ser utilizado para se determinar o sobredimensionamento dos cabos de alimentação de uma instalação.

Para uma tensão senoidal, a potência ativa do circuito será igual ao produto do valor eficaz da tensão aplicada, da corrente eficaz que circula e do cosseno do ângulo formado entre esta tensão e corrente. Para uma tensão senoidal com poucos componentes harmônicos ( $DHT_V < 5\%$ ), pode-se ainda considerar que a potência ativa da onda fundamental é aproximadamente igual à potência ativa total, conforme representado pela Equação 13.

$$P \cong P_1 = U_1 \times I_1 \times \cos \varphi_1 \quad (13)$$

Onde:	P	Potência ativa da onda com harmônicos
	$P_1$	Potência ativa da onda fundamental
	$U_1$	Tensão eficaz da onda fundamental
	$I_1$	Corrente eficaz da onda fundamental
	$\cos\varphi_1$	Cosseno do ângulo de defasagem da onda fundamental

Dividindo-se a Equação 13 pela potência aparente  $S$ , tem-se no primeiro membro da equação a relação  $P/S$ , que é o fator de potência, mostrado na Equação 1. Substituindo-se o valor de corrente  $I_1$  por seu valor, retirado da Equação 11, tem-se a Equação 14.

$$FP \cong \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + DHT_1^2}} \quad (14)$$

Para a medição dos indicadores DHT de corrente e tensão é necessário a utilização de analisadores numéricos, aparelhos de tecnologia recente, que permitem determinar de maneira precisa o valor do conjunto.

Os instrumentos comuns não respondem aos harmônicos de forma precisa, por esta razão, ao se fazer medições de parâmetros como corrente e tensão de um circuito é importante utilizar medidores que respondam ao valor RMS verdadeiro.

#### 4.2.8 A influência da $DHT_1$ no dimensionamento do transformador

Um importante fator a se considerar no dimensionamento de um circuito com cargas não-lineares é a capacidade do transformador. No passado, o cálculo dos transformadores era feito com base no valor fundamental de corrente, nada se fazendo com relação às correntes harmônicas, desta forma, a potência do transformador é definida tradicionalmente pela Equação 15.

$$S_{nom} = U \times I \quad (15)$$

Onde:  $S_{nom}$  Potência nominal  
 $U$  Tensão na saída do transformador  
 $I$  Corrente RMS na carga

MORENO (2001) mostra que o cálculo do dimensionamento do transformador deve ser feito levando-se em consideração a corrente eficaz com todas os harmônicos presentes e ainda se corrigir a potência do transformador com um fator conhecido como Fator K. Este fator é mostrado na Equação 16, e é calculado em função do fator de crista ( $f_c$ ), Equação 3.

$$K = \frac{f_c}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Onde:            K    Fator K do transformador  
                      Fc    Fator de crista

A potência máxima que o transformador poderá fornecer será então aquela mostrada na Equação 17.

$$S = \frac{S_{nom}}{K} \quad (17)$$

Onde:            S    Potência máxima do transformador

No capítulo V será mostrado um cálculo considerando estes dois fatores citados.

#### **4.2.9 Os valores de $DHT_V$ e $DHT_I$ segundo a norma**

Várias são as normalizações para a DHT.

Na Tabela 10 são mostrados os limites globais de tensões harmônicas individuais ( $V_h$ ) e da  $DHT_V$  adotados na norma IEEE-519 (1992)

Tabela 10 – Limites de  $DHT_V$  adotados pelo IEEE (IEE Std. 519-1992)

U < 69 kV				U ≥ 69 kV			
Impares		Pares		Impares		Pares	
H	V <sub>h</sub>	H	V <sub>h</sub>	H	V <sub>h</sub>	H	V <sub>h</sub>
3,5,7	5%	2,4,6	2%	3,5,7	2%	2,4,6	1%
9,11,13	3%	≥8	1%	9,11,13	1,5%	≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DHT= 6%				DHT= 3%			

Na Tabela 11 são mostradas a DHT de corrente, que nesta norma é chamada de TDD. Na norma, os harmônicos pares estão limitados a 25% dos limites dos harmônicos impares.

Tabela 11 – DHT de corrente

U < 69 kV					
$I_{sc}/I$	H < 11	11 ≤ H < 17	17 ≤ H < 23	23 ≤ H < 35	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	20,0

Sendo:  $I_{sc}/I$  = Relação corrente de curto circuito / corrente de carga

TDD = Distorção de corrente harmônica total

#### 4.2.10 A Distorção Harmônica Individual

A Distorção Harmônica Individual é um outro indicador, que é utilizado para a quantificação da distorção individual da tensão ou corrente. Ele determina a

porcentagem de determinado componente harmônico em relação à sua componente fundamental. As equações 18 e 19 expressam tais definições, e valores percentuais.

$$DHI_V = \frac{U_n}{U_1} \times 100 \quad (18)$$

$$DHI_I = \frac{I_n}{I_1} \times 100 \quad (19)$$

Onde:	$DHI_V$	Distorção Harmônica Individual
	$DHI_I$	Distorção Harmônica Individual
	$U_1$	Valor eficaz da tensão fundamental
	$U_n$	Valor eficaz da tensão de ordem n
	$I_1$	Valor eficaz da corrente fundamental
	$I_n$	Valor eficaz da corrente de ordem n

#### 4.3 EXEMPLO DE UM CIRCUITO COM CARGA LINEAR

Com o objetivo de ilustrar o que foi dito sobre cargas lineares foram feitas medições em um conjunto de resistências, ligadas entre as fases X1 e X2 de um transformador de 30 kVA, 13,8 kV / 220 V, ligado à saída da subestação experimental.

Na Figura 14 pode-se observar as formas de onda da tensão no lado de baixa tensão do transformador, alimentando um conjunto de resistores, e a respectiva onda de corrente. Um conjunto de resistores, como já comentado, é uma carga linear.

A Figura 15 mostra que a DHT da tensão aplicada ao circuito é de 2,9%

Na Tabela 12 são mostradas a amplitude dos harmônicos de tensão, em valores percentuais e RMS, assim como as fases dos harmônicos do gráfico apresentado na Figura 15. Na coluna “fase” são mostradas as defasagens, em graus, entre a tensão aplicada e as ondas de tensões harmônicas, para cada uma das tensões componentes.

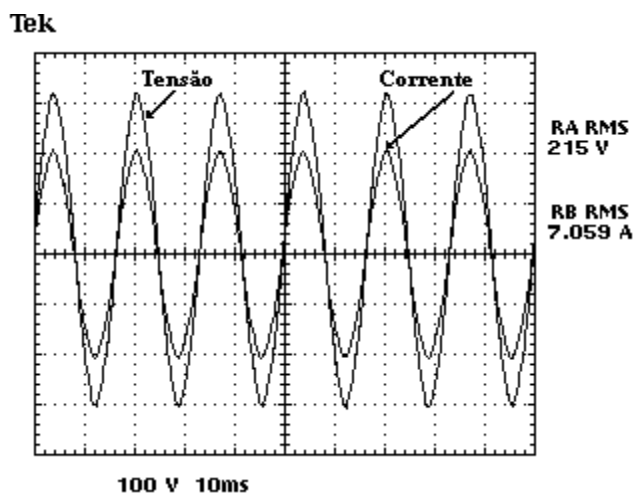


Figura 14 - Ondas de tensão e corrente para carga linear

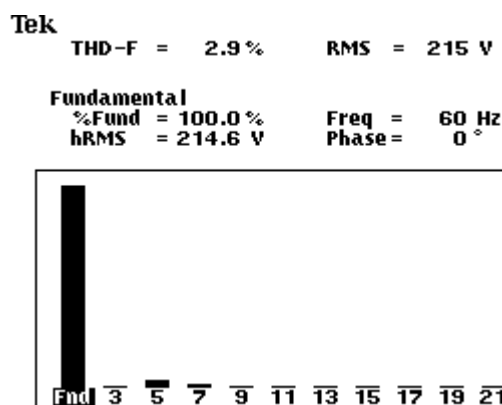


Figura 15 - DHT para a tensão de alimentação

Entrando com os valores da Tabela 12 na Equação 7, é encontrado o valor de 2,93%, conferindo com o valor que foi mostrado pelo osciloscópio, conforme Figura 15. Para os harmônicos de ordem par entre o 2º e o 22º harmônicos, de um total de 11 valores, as medições no osciloscópio mostraram 6 valores iguais a zero e 5 valores iguais a 0,1%, demonstrando que existe na onda de tensão uma componente contínua de valor muito baixo. Dada a pequena utilidade para o caso, estes valores não serão aqui considerados.

#### 4.3.1 Análise dos resultados para o estudo de caso

São os seguintes os valores retirados dos gráficos apresentados nas Figuras 14 e Figura 15 para a análise:

Curva de tensão: VALOR TRUE RMS: 215,5 V  
 Valor de pico, positivo: 332 V  
 Valor de pico, negativo: 308 V  
 DHT: 2,9%  
 fc (calculado): 1,48

Curva de corrente: VALOR TRUE RMS: 7,059 A  
 Valor de pico, positivo: 10,6 A  
 Valor de pico, negativo: 10,6 A  
 DHT: 2,9%  
 fc (calculado): 1,50

Tabela 12 – Composição de harmônicos da tensão aplicada às resistências

Ordem	Frequência	Amplitude DHT (%)	Amplitude RMS(V)	Fase ( ° )
Fund.	60	100,0	214,6	0
3° harm.	180	0,4	0,761	172
5° harm.	300	2,8	6,002	10
7° harm.	420	0,7	1,565	-150
9° harm.	540	0,1	0,234	12
11° harm.	660	0,3	0,618	-154
13° harm.	780	0,2	0,335	60
15° harm.	900	0,1	0,154	161
17° harm.	1020	0,1	0,202	13
19° harm.	1140	0	0	-
21° harm.	1260	0	0	-

Para a DHT na tensão de alimentação foi medido um valor igual a 2,9%. Isto indica que já existia na rede de alimentação do circuito uma pequena distorção na tensão de entrada demonstrando existirem harmônicos na linha que alimenta a subestação experimental. Outro indicativo é o fator de crista, um pouco maior que 1,41. Os valores pequenos dos harmônicos de ordem par, também apontam para uma componente contínua na tensão, conforme já comentado. O fato de existir diferença

entre os valores de pico positivo e negativo é também mais um indicativo de uma componente contínua no circuito de alimentação. Porém, ao se analisar o fator de crista da corrente verifica-se que seu valor está bastante próximo daquele encontrado para a tensão e que a DHT da corrente tem o mesmo valor da DHT da tensão. Este valor da DHT de corrente levado à Equação 12 e à Equação 14, mostra que a corrente da fundamental é muito próxima da corrente eficaz total – seu valor é 0,04% menor do que valor da corrente harmônica total –, e o fator de potência do conjunto é igual a 0,9992. Por se tratar de uma carga puramente resistiva, o cosseno do ângulo de defasagem entre tensão e a corrente fundamental ( $\cos\phi_1$ ) é igual à unidade. Estes dois valores de FP e  $\cos\phi_1$  estão muito próximos e podem ser considerados como iguais.

Pelo exposto, pode-se assim comprovar que na presença de cargas lineares, a DHT de corrente não existe, e que o fator de potência é igual ao  $\cos\phi_1$ .

#### 4.4 OUTRO EXEMPLO PRÁTICO PARA CARGAS LINEARES

Outro exemplo prático foi elaborado para as cargas lineares. Neste caso, três lâmpadas incandescentes foram ligadas entre as fases e o neutro de um sistema trifásico.

Na medição foi utilizado o equipamento UPD600, fabricado pela Yokogawa. Este equipamento é uma unidade de processamento digital com capacidade para adquirir 32 grandezas elétricas, transferindo-as para um microcomputador através de um conversor analógico-digital. O UPD600 foi utilizado para a obtenção dos parâmetros elétricos e para o traçado da oscilografia das tensões entre fases A, B e C, assim como as correntes nas fases A, B e neutro. Este equipamento dispõe somente de três entradas de corrente, sendo normalmente a corrente de neutro calculada pela soma vetorial das correntes das três fases. Sendo assim, a corrente na fase C não foi oscilografada, tendo sido a terceira entrada do equipamento utilizada para a observação da real corrente de neutro.

Na Figura 16 são mostradas as curvas das tensões nas três fases, as correntes das fases A e B e a corrente de neutro. Há que se observar que para a corrente de neutro o equipamento está utilizando uma escala diferente daquela utilizada para as outras curvas. A figura é a cópia da tela da oscilografia feita pelo UPD600, no *software* UPD

Viewer do fabricante do equipamento. Este é o *software* padrão, que vem com o equipamento.

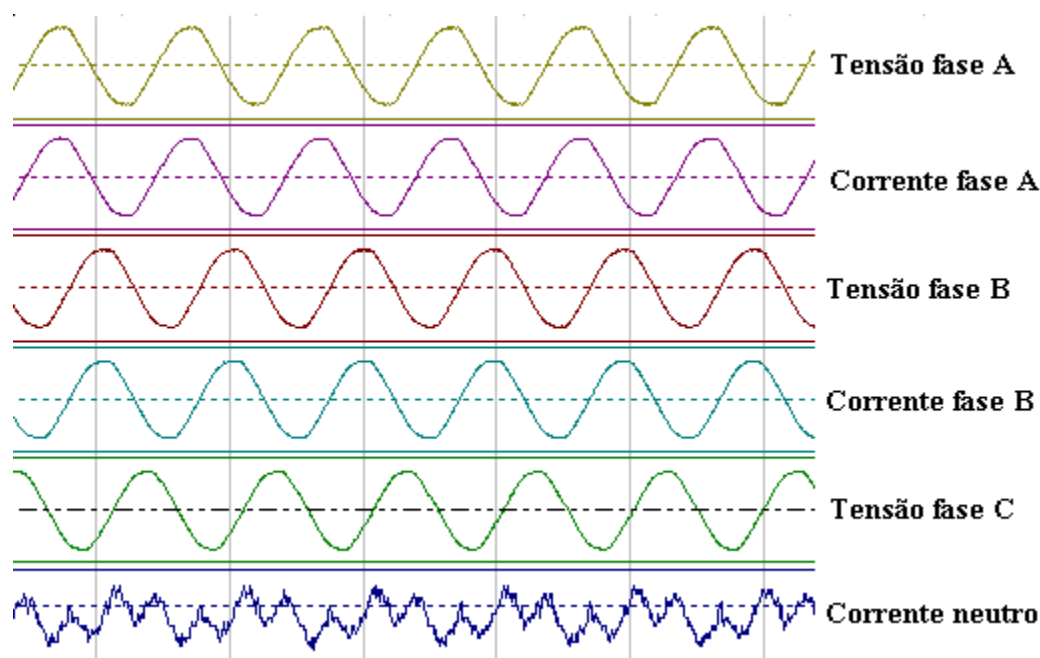


Figura 16 – Correntes e tensões em lâmpadas incandescentes

. Pode-se verificar nesta figura que a corrente de neutro não é igual a zero, como seria de se esperar. Isto se deve ao fato de que as três lâmpadas utilizadas não são exatamente iguais. Sendo assim, o circuito não está equilibrado, porém o seu valor é tão baixo que na Figura 17, que mostra na tela do microcomputador os dados adquiridos pelo UPD600, esta corrente, mostrada como corrente I3, tem o valor igual a zero. Pode-se observar que em um determinado instante mostrado na Figura 17 como 17:08:11 horas, a corrente eficaz na fase A, denominada I1, é igual a 0,465 A, a corrente eficaz na fase B, chamada de I2 na figura, é 0,470 A e a corrente eficaz de neutro, denominada na figura por I3, é igual a zero. A linha denominada IN, na Figura 17, aparece com um valor 0,462 A, pois o UPD600 considera a soma vetorial das três correntes e vê como corrente na fase C o valor próximo de zero, e desta forma, a corrente IN mostrada não pode ser considerada. O fator de potência para o conjunto é igual a 1, conforme mostrado na linha PFT da Figura 17.

Ainda na Figura 17 é mostrada a DHT para as tensões e para as duas correntes das fases A e B, e a DHT para a corrente de neutro. Na figura aparece a expressão THD por se tratar de *software* escrito em inglês.

Pode-se assim verificar mais uma vez, que para cargas lineares o fator de potência é igual à unidade e a DHT de corrente não existe. A DHT que aparece na Figura 17 como “THD I1” e “THD I2”, são decorrentes das DHT das tensões de alimentação e não devido a distorções na corrente. A indicação de “THD I3”, que é a DHT da corrente de neutro, aparece com um valor bastante grande, pois a corrente de neutro apesar de ser muito próxima de zero é bastante distorcida.

Equip 1			Equip 1			Equip 1			THD		Hamônica	
	17:08:11	Un		17:09:51	Un		17:12:39				11:37:25	
V1	123,76	V	V1	124,04	V	V1	125,02	V	THD V1	3,11	1	0,007 A
V2	123,76	V	V2	124,23	V	V2	125,12	V	THD V2	2,94	3	0,011 A
V3	125,24	V	V3	125,57	V	V3	126,21	V	THD V3	2,26	5	0,000 A
V1-2	214,37	V	V1-2	214,92	V	V1-2	216,68	V	THD I1	1,69	7	0,000 A
V2-3	215,55	V	V2-3	216,29	V	V2-3	217,54	V	THD I2	2,29	9	0,000 A
V3-1	216,09	V	V3-1	216,33	V	V3-1	217,62	V	THD I3	76,92	11	0,000 A
I1	0,465	A	I1	0,466	A	I1	0,467	A			13	0,000 A
I2	0,470	A	I2	0,471	A	I2	0,473	A	Analisar I3		15	0,000 A
I3	0,000	A	I3	0,000	A	I3	0,000	A	Ímpares		17	0,000 A
IN	0,462	A	IN	0,461	A	IN	0,462	A	IEC		19	0,000 A
PF1	1,0000		PF1	1,0000		PF1	1,0000		Automático		21	0,000 A
PF2	1,0000		PF2	1,0000		PF2	1,0000				23	0,000 A
PF3	0,7647		PF3	0,7777		PF3	0,8235				25	0,000 A
PFT	1,0000		PFT	1,0000		PFT	1,0000				27	0,000 A
Freq	60,00	Hz	Freq	59,96	Hz	Freq	59,99	Hz	Ordem Harmônica	50	29	0,000 A
											31	0,000 A

Figura 17 – Valores de correntes e tensões para lâmpadas incandescentes

#### 4.5 EXEMPLO DE UM CIRCUITO COM CARGA NÃO-LINEAR

Na Figura 18 são mostradas três curvas de tensão e três curvas de correntes de um circuito formado por três lâmpadas tipo fluorescentes compactas (PL), de mesma especificação, ligadas entre as três fases e o neutro de um circuito trifásico. As lâmpadas PL têm as seguintes características:

Marca Tashibra, modelo TKT 15-1 ADG, 15 W, 127 V, 50/60 Hz, FP=0,5, Temp máx.: 45° C.

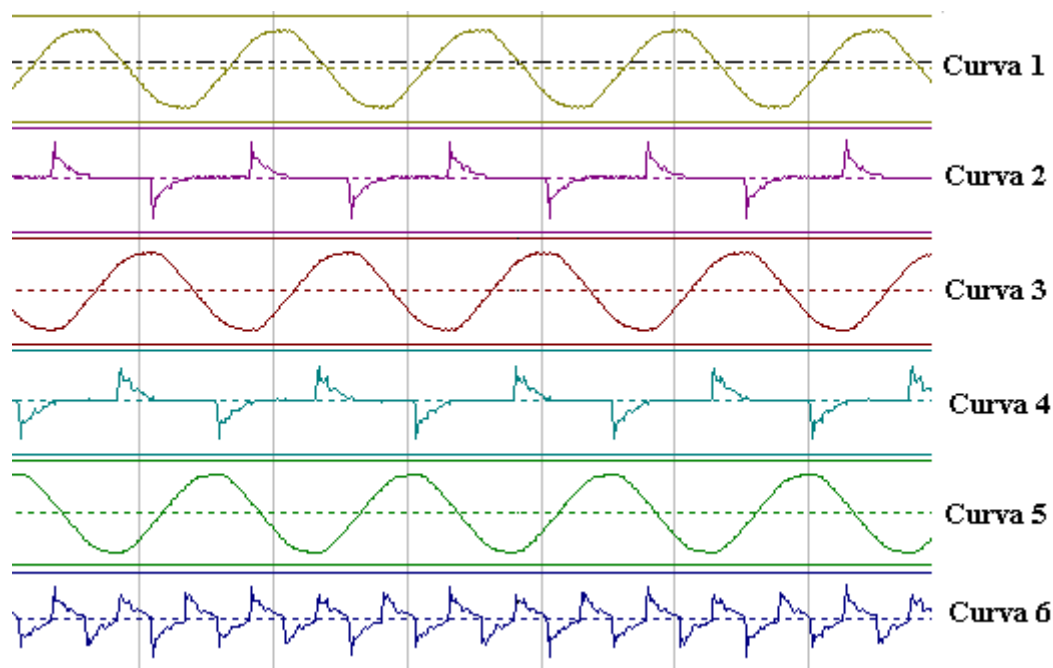


Figura 18 – Tensões e correntes para cargas não-lineares

As correntes e tensões nas lâmpadas foram também monitoradas pelo equipamento UPD600, ligado a um monitor digital e a um microcomputador.

Na Figura 18, as curvas 1, 3 e 5, obtidas por oscilografia do UPD600, mostram respectivamente as tensões nas fases A, B e C, em relação ao neutro. A curva 2 mostra a corrente na fase A, a curva 4 representa a corrente na fase B e a curva 6 representa a corrente de neutro. Da mesma forma que no item anterior, não está sendo mostrada a curva na fase C, pois o UPD600 possui três entradas de corrente, e a fase C foi utilizada para a corrente de neutro (curva 6, na figura).

#### 4.5.1 Descrição dos parâmetros retirados das curvas

Para a leitura dos parâmetros foi destacado da Figura 18 um trecho das curvas correspondentes a um ciclo da curva 1, tensão na fase A, um ciclo da curva 2, corrente na fase A e um ciclo da curva 6, corrente do neutro. Este ciclo é mostrado, com destaque em amarelo, na Figura 19. Deste intervalo foram retirados os parâmetros descritos em seguida.

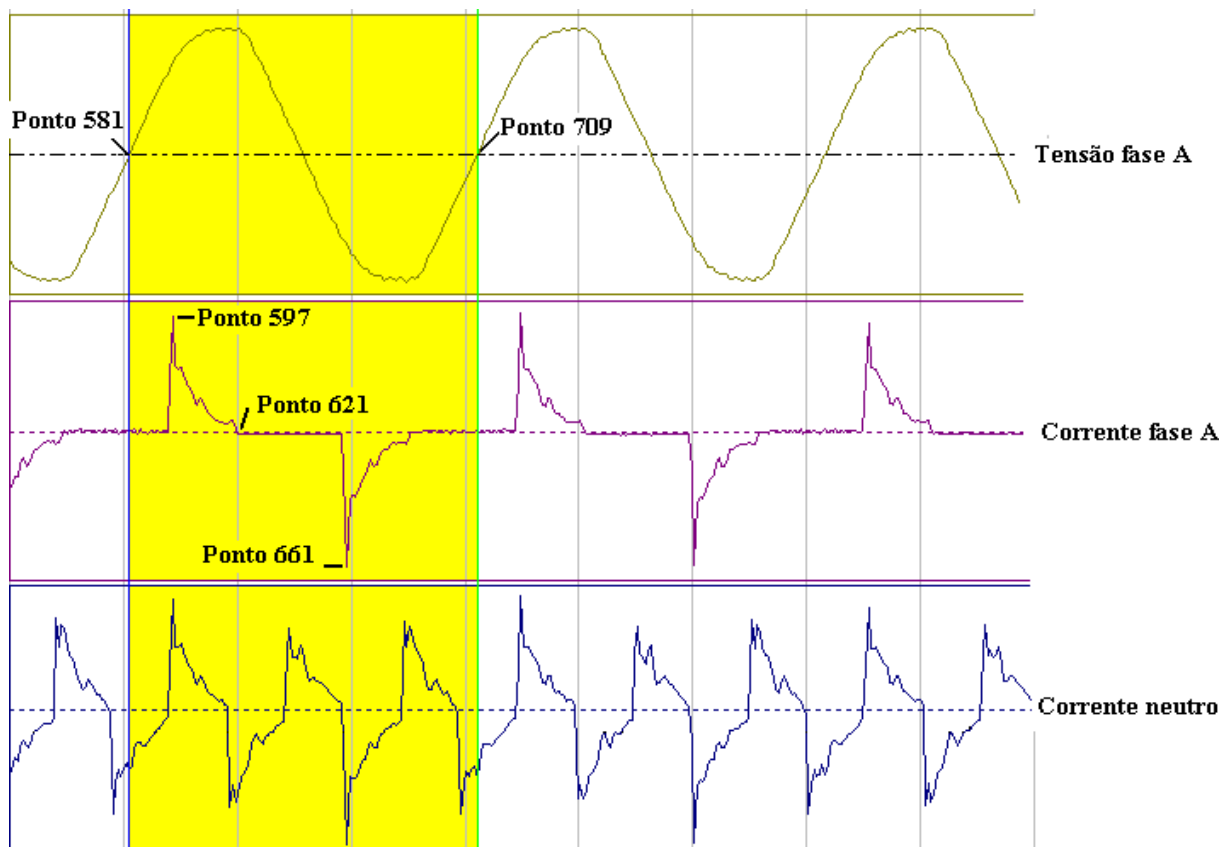


Figura 19 – Curvas de tensão e corrente em carga não-linear

O início do intervalo considerado é o ponto de leitura no tempo de 556,7 ms, (ponto 581), com uma tensão de -1,66 V. O ponto final do intervalo, correspondendo à um ciclo, é o ponto 709, correspondendo à um tempo de 573,1 ms e uma tensão igual a -0,83 V. Esta numeração dos pontos é usada como referência pelo UPD600. Este equipamento faz a aquisição de dados em amostragem com um intervalo de 0,1281 ms, com um total de 128 pontos no ciclo, sendo as curvas traçadas à partir destes valores. Sendo assim, o ponto inicial da senóide (tensão zero) é obtido graficamente.

O tempo obtido na Figura 19 para o ciclo, representado pela área amarela é, portanto de 16,4 ms, correspondendo à uma senóide de 61,0 Hz. Este erro de 1 Hz é menor do que a variação indicada pelo UPD600 para a frequência da onda de tensão, podendo assim serem aceitos os pontos 581 e 709 como início e fim da senóide representativa da tensão da fase A, e como intervalo de referência para as outras curvas.

Com os dados dos pontos 708, 709 e 710 indicados pelo UPD600, poderia ter sido calculado o ponto exato de valor zero da tensão, porém como vimos este valor é menor do que a variação de frequência observada.

#### 4.5.2 Valores retirados das curvas

Das curvas registradas pelo UPD600, e representadas da Figura 18 e algumas em destaque na Figura 19, foram retirados alguns valores notáveis de tensão e de corrente, assim como alguns dos intervalos de tempo importantes para definição das frequências. Estes valores estão listados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de tensão e corrente retirados das curvas

Fase	Tensão (U)			Corrente (A)		
	Pico positivo	Pico negativo	RMS	Pico positivo	Pico negativo	RMS
A	166,97	- 168,63	120,445	0,79	- 0,94	0,187
B	169,04	- 167,80	121,670	0,60	- 0,74	0,172
C	168,21	-168,63	122,091	*	*	*

\* Corrente na fase C não foi medida

Considerando ainda a Figura 18, a corrente na fase A torna-se zero no ponto 621, correspondente a 561,8 ms, e a corrente na fase B torna-se zero no ponto 662, correspondente a 567,1 ms.

A corrente do neutro, conforme pode ser observado na Figura 19, apresenta três valores de picos positivos e três valores de picos negativos, uma vez que há a predominância do 3º harmônico. Estes valores são:

Valores de pico positivo: ..... 0,73 A; 0,54 A; 0,59 A

Valores de pico negativo: ..... -0,64 A; -0,89 A; -0,68 A

Valor RMS no intervalo: ..... 0,303 A

Tempo inicial do intervalo: ..... 556,7 ms

Tempo para o intervalo: ..... 16,5 ms.

Da Tabela 13 é possível verificar que os valores RMS para as correntes nas fases A e B são iguais a 0,187 e 0,172 A. Como o circuito utilizado é formado por três lâmpadas com mesma especificação é de se esperar que o circuito esteja equilibrado, que a corrente de neutro seja igual a zero e a corrente na fase C, calculada, seja igual a 0,180 A. Na verdade existe um pequeno desequilíbrio devido às diferenças construtivas entre as lâmpadas. Porém, ao se observar a corrente do neutro oscilografada, verifica-se que ela não é zero e a sua frequência é na verdade três vezes a frequência da onda fundamental. Isto indica que está ocorrendo uma predominância do 3º harmônico. O UPD600 encontrou para esta corrente de neutro um valor RMS igual a 0,303 A, portanto maior do que a corrente RMS em cada uma das fases. Isto mostra a importância de se considerar os harmônicos no dimensionamento dos cabos de alimentação, inclusive no cabo de neutro.

Os valores absolutos das correntes harmônicas da fase A são mostradas na Figura 20. Nesta figura podem ainda ser observados os valores da DHT de corrente (THD na figura), que são valores elevados. Os valores para a DHT de tensão são baixos. Valores baixos de DHT aparecem nas ondas de tensão, pois as correntes no circuito são muito pequenas se comparadas com a corrente nominal do transformador que está alimentando este circuito e pode-se considerar esta fonte de alimentação como uma barra infinita, onde a tensão não varia com a carga. As DHT de tensão que aparecem na Figura 20 são aquelas já existentes na fonte de alimentação destas cargas, que conforme já foi visto oscila entre 2 a 4%.

Na Figura 21 são mostrados, os valores percentuais para as correntes da fase A, assim como os valores da DHT de tensão e de corrente.

Os valores destas duas últimas figuras diferem um pouco, uma vez que os instantes de medição não são os mesmos, pois o *software* utilizado não armazena estes dados, que são mostrados sempre em tempo real. Para que se pudesse fazer o registro das medições, as telas foram gravadas em dois instantes diferentes.

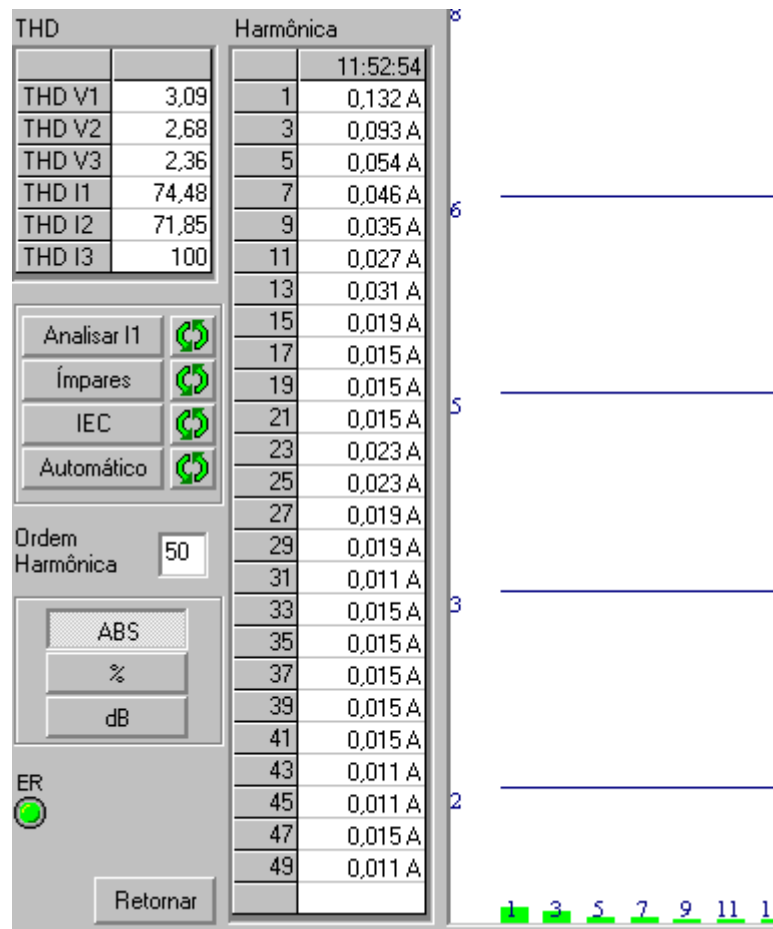


Figura 20 – Harmônicas de corrente, fase A, valores absolutos

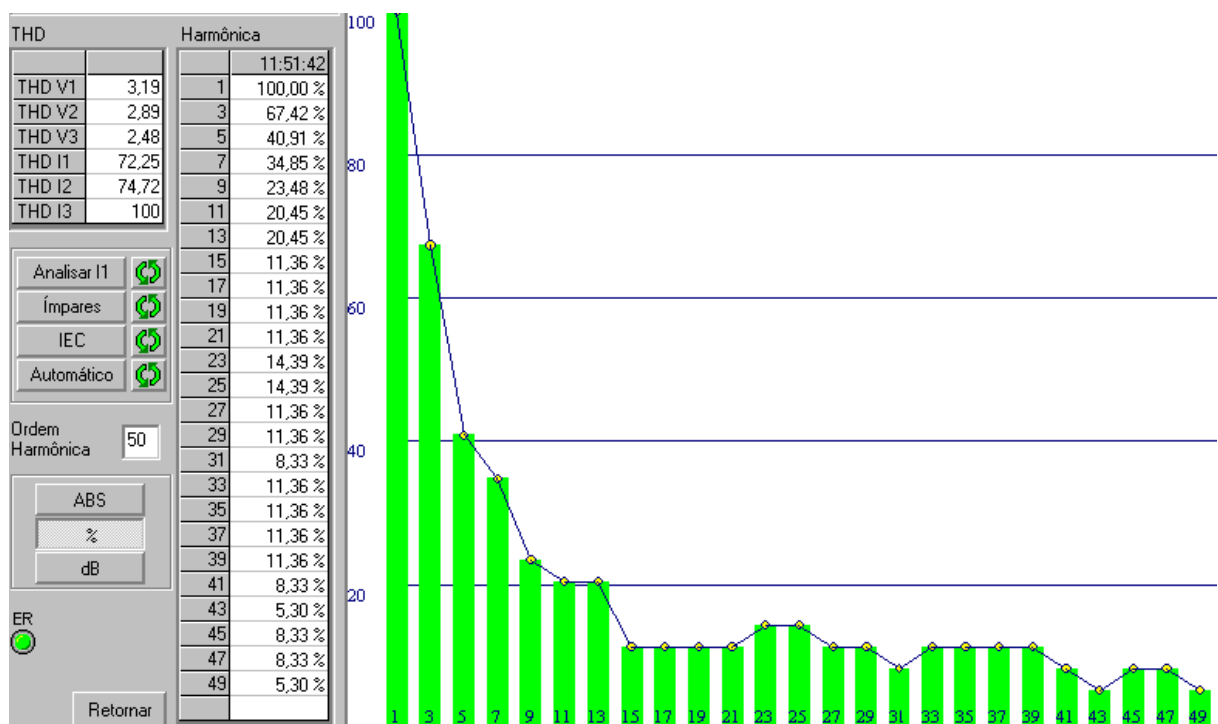


Figura 21 – Correntes harmônicas na fase A, valores percentuais

#### 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tratou da Qualidade de Energia e dos harmônicos. Foi discutida a influência das cargas não-lineares nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Foi mostrado que os mesmos equipamentos que fazem uso do recorte da onda de tensão e assim introduzem a “poluição harmônica” nestas ondas de tensão, são os que mais sofrem com estas distorções.

Foi visto que as cargas não-lineares podem trazer incorporados dispositivos que filtrem os harmônicos. Desta forma as distorções são eliminadas ou reduzidas na origem.

Ainda neste capítulo foram mostradas as vantagens de se usar a série de Fourier para representar formas de ondas distorcidas e que desta forma, cada componente harmônica pode ser analisada separadamente, e a distorção final é determinada pela superposição das várias componentes constituintes deste sinal distorcido. Foi comentado que se pode obter uma representação matemática exata da onda de corrente ou de tensão e essa representação caracteriza a função real por suas respectivas frequências. O único inconveniente que a série de Fourier apresenta é que a forma de onda do sinal tem que ser necessariamente periódica, e deve ainda satisfazer as condições de Dirichlet. Se estas condições não forem satisfeitas, outro tipo de representação matemática terá que ser utilizado.

O capítulo tratou ainda da medição da DHT de tensão e de corrente. Outro ponto importante visto foi a influência da DHT no fator de potência do circuito e no dimensionamento do transformador utilizado para alimentação do sistema de iluminação. Foram apresentados exemplos reais de circuitos com cargas lineares.

Uma das metas deste trabalho é apresentar resultados feitos em uma subestação experimental, montada em laboratório. A metodologia adotada é de se observar o desempenho das lâmpadas à vapor de sódio, analisando suas curvas de tensão aplicada e a corrente circulante. Foi comentado no capítulo 4 que estas lâmpadas se comportam como cargas não-lineares, e como tal apresentam uma corrente com o formato de onda totalmente distorcido e repleto de harmônicos.

Nas curvas apresentadas para cargas lineares é possível verificar que não existe distorção da onda de corrente, e pode ser observado ainda que não há alterações no fator de potência.

## **CAPÍTULO 5 ENSAIOS UTILIZANDO A SUBESTAÇÃO EXPERIMENTAL**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

A maioria dos trabalhos de pesquisa dedicados à análise da qualidade de sistemas elétricos em função de cargas não-lineares tem sido realizada a partir de alimentação elétrica em baixa tensão. Não há dúvida de que este procedimento tem fornecido importantes dados sobre o desempenho da qualidade da energia fornecida pela instalação, porém, isto deixa de considerar os efeitos da qualidade da energia elétrica no sistema de distribuição, em média ou alta tensão. O fato se agrava quando se observa a questão pelos efeitos dos componentes harmônicos nos principais dispositivos de entrada das subestações, particularmente nos transformadores de corrente e de potencial utilizados para alimentar o sistema de medição e proteção da instalação. Este trabalho apresenta os resultados de uma análise comparativa do comportamento de tensões e correntes e seus componentes harmônicos entre a tensão secundária e a tensão primária de uma subestação de alimentação em média tensão. Com isto, pretende-se cooperar para uma melhor compreensão do comportamento dos transformadores de medição e a sua influência na medição, proteção e controle, quando instalados em equipamentos com predominância de cargas não-lineares.

A predominância e o constante aumento de cargas não-lineares no sistema elétrico e a sua influência na Qualidade de Energia, vem sendo objeto de estudos e publicações, por introduzir problemas no sistema elétrico que ainda não são totalmente conhecidos conforme citados por BOLLEN (2000), e nos manuais (DRANETZ-BMI, 1991), (DRANETZ-BMI, 1997). A maior parte destes estudos visa o comportamento do sistema elétrico sob o ponto de vista da Qualidade de Energia, do lado da alimentação em baixa tensão uma vez que é mais acessível, conforme citado por MALDONADO (2004) e DIAS (2002).

O objetivo deste trabalho é, portanto, identificar e se possível quantificar o erro que pode ser introduzido nas leituras das grandezas elétricas em subestações de média tensão, na presença de componentes harmônicas originadas de cargas não-lineares. Com

esta finalidade foi realizada a montagem de uma subestação experimental no Laboratório de Alta Tensão e Qualidade de Energia Elétrica da UNESP - Campus de Guaratinguetá, mostrada na Figura 22.

### **5.1.1 Montagem experimental**

No conjunto de fotografias da Figura 22 são mostrados detalhes da subestação experimental. Na fotografia número 1 é mostrado o conjunto de frente, podendo ser visto os três transformadores de potencial (TP), na parte de cima, e os dois transformadores de corrente (TC) logo abaixo, usados para a medição. Nos extremos direito e esquerdo da fotografia podem ser vistos os transformadores de entrada e saída da subestação, ambos para as tensões 13.200 / 220 V.

Na fotografia número 2 é mostrado o conjunto de lado com o transformador de entrada em primeiro plano.

Na fotografia número 3 são mostrados detalhes do painel de controle da subestação. A proteção é feita por fusíveis NH e por relés de sobrecorrente.

Na fotografia número 4 é mostrado o conjunto montado. Este conjunto, por motivos de segurança, está encerrado atrás de uma cerca metálica aterrada e possui duas sinalizações para indicar quando o equipamento está energizado, e também intertravamento elétrico da porta com o controle, impedindo que o equipamento seja energizado com a porta aberta, ou mesmo, quando energizado, provoca o desligamento caso a porta seja aberta. As três barras de média tensão estão conectadas a pára-raios de estado sólido, devidamente conectados à terra. As estruturas que suportam os transformadores de potência, assim como aquelas dos transformadores de medição estão conectadas ao sistema de terra do laboratório.

Utilizando esta subestação, foram realizados diversos ensaios com configurações de carga que representam uma típica pequena instalação industrial. Durante a realização dos ensaios, foram realizados os registros de tensão e correntes, bem como da composição harmônica encontrada, tanto do lado de baixa tensão, em 220 Volts no secundário do transformador de distribuição que alimenta as diversas configurações de

carga, como também, foi feito o registro de tensão e correntes e da sua composição harmônica fornecida pelos transformadores de potencial e de corrente da subestação, isto é, do lado de média tensão, 13.200 Volts.

As observações e conclusões apresentadas foram obtidas a partir da comparação e análise destes resultados.



Figura 22 – Fotografias da subestação experimental

A subestação experimental desenvolvida e implantada no Laboratório de Alta Tensão e Qualidade de Energia Elétrica da UNESP - Campus de Guaratinguetá é composta por:

- 2 transformadores de 30 kVA, 13,2 kV / 220 V, ligados um na entrada da subestação e outro na saída;
- 3 chaves secas monofásicas, instaladas entre os dois transformadores;

- 3 pára-raios;
- 3 transformadores de corrente, com precisão para medição de 0,3% para carga de até 25 VA, e de 10B para proteção;
- 2 transformadores de potencial com precisão de 0,3% para medição com carga de até 75 VA e proteção.

Na Figura 23 é mostrado o diagrama unifilar da subestação.

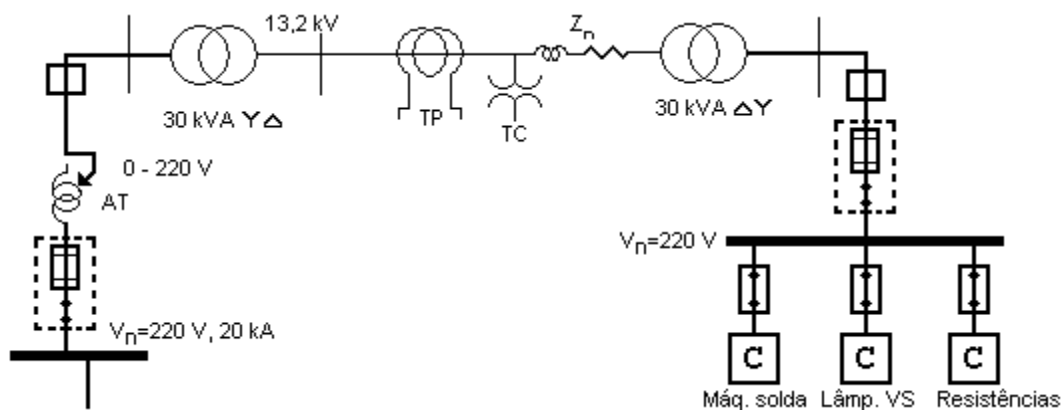


Figura 23 – Subestação experimental

As cargas, utilizadas em diversas configurações, foram constituídas por lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão dos três tipos mais utilizados em instalações industriais ou públicas. Estas lâmpadas estão listadas na Tabela 14, com a nomenclatura utilizada pelo fabricante.

Tabela 14 – Lâmpadas utilizadas

Item	Tipo	Potência (W)	Fabricação
1	Vapor de sódio AP	150	Sylvania
2	Sodio Gold light	100	Sylvania
3	V.S. Gold light	250	Sylvania

Foram também utilizadas duas máquinas de solda elétrica com as seguintes características: potência de 6,5 kW cada, regime contínuo, alimentação em 220 V, saída 24 V, corrente máxima 107 A.

As cargas lineares, existentes em qualquer instalação, foram representadas neste estudo, por três bancos de resistências totalizando uma potência de 12 kW.

Foram os seguintes os equipamentos de medição utilizados para esta finalidade:

- 2 “Unidades de Processamento Digital” da Yokogawa, modelo UPD600;
- 1 microcomputador que fez os registros dos dados através de um *software* da própria Yokogawa;
- 1 medidor digital da Yokogawa modelo 2482D;
- Para a obtenção das curvas de tensão e corrente foi utilizado um osciloscópio Tektronix modelo THS720P.

Os transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC) têm as características mostradas na Tabela 15 e 16, respectivamente, e estão de acordo com as normas ABNT NBR6566. A coluna Obs., nas tabelas de características, conduz a uma rápida explanação sobre cada uma destas características.

Tabela 15 – Características do TP

Parâmetro	Valor	Obs.
Relação de transformação	13.200 V / 115 V	
Exatidão	0,3 P 75	1
$U_{m\acute{a}xima}$	15 kV	2

Obs.:

1. Classe de precisão 0,3% para medição, para até 75 VA;
2. Tensão máxima de operação.

Tabela 16 – Características do TC

Parâmetro	Valor	Obs.
$U_{\text{máxima}}$	15 kV	3
NI	34/110 kV	4
$I_p$	10 x 20 A	5
$I_s$	5 – 5 A	6
$I_t$	50 x $I_n$ ef – is	7
$F_t$	1,2 x $I_n$	8
$I_d$	125 $I_n$ CR	9
Exatidão	0,3 C 25 1s1 – 1s2	10
	10 B 200 2s1 – 2s2	

Obs.:

3. Classe de isolação;
4. Tensão aplicada 34 kV, 60 Hz, 1 min, HiPot, norma IEC;  
Isolação 110 kV impulso de onda 1,2x50  $\mu$ s;
5. Corrente primária;
6. Corrente secundária, 2 núcleos de 5 A para medição e proteção;
7. Capacidade térmica: 50 x a corrente nominal, durante 1 s;
8. Fator térmico. Suporta em regime permanente 1,2 x I nominal;
9. Núcleo de medição com classe de precisão 0,3 % para uma carga de até 25 VA, nos bornes 1s1-1s2;
10. Núcleo de proteção, com classe de precisão de 10 %, tipo toroidal, baixa impedância, suporta até 200 V nos terminais 2s1-2s2.

Utilizando esta montagem foram realizados diversos ensaios com o levantamento dos parâmetros elétricos assim como o oscilograma das componentes harmônicas encontradas nas diversas configurações.

Todo o sistema experimental foi conectado à malha de terra do laboratório, para evitar influências do neutro do alimentador da concessionária.

## 5.2 MEDIÇÕES FEITAS NAS LÂMPADAS EM BAIXA TENSÃO

Para verificação da  $DHT_1$  nas lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, foram feitas medições nas três lâmpadas listadas na Tabela 14.

### 5.2.1 Metodologia utilizada

A realização dos ensaios foi iniciada tentando-se visualizar as formas das ondas de correntes das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, no lado de média tensão. Foram feitas medições para as três lâmpadas de vapor de sódio, tendo sido as lâmpadas ligadas uma por vez, sem qualquer outra carga conectada à saída do transformador de 30 kVA. Foram tomados os sinais nos secundários dos transformadores de medição (TC e TP), conforme a Figura 23, e enviados ao UPD600. Porém, estes valores se mostraram muito pequenos para que fossem registrados com confiabilidade pelo equipamento.

Devido a esta dificuldade, as correntes no lado de baixa tensão do transformador de distribuição, foram então registradas utilizando-se o osciloscópio Tektronics, tendo sido o canal 1 conectado às fases A e C do transformador de distribuição, através das pontas de prova de tensão. No canal 2 do osciloscópio foi conectado um transformador de corrente, apropriado para medições com o osciloscópio, que fez o registro da corrente do secundário do transformador em questão. Este osciloscópio foi posteriormente conectado à um microcomputador, para que se fizesse a cópia das curvas registradas em suas memórias.

### 5.2.2 Medições feitas na lâmpada 1

Na Figura 24 é mostrada a tensão aplicada às três lâmpadas, que é a tensão na saída do transformador abaixador da subestação experimental. A carga está ligada aos terminais X1 e X3 do transformador.

O diagrama de barras para os harmônicos desta tensão aplicada também é mostrado na Figura 24, e os valores dos harmônicos, percentuais e absolutos assim como as fases são listadas na Tabela 17. A DHT desta tensão aplicada é igual a 1,8%, com um valor RMS igual a 212,3 V. Dos harmônicos de ordem par, dois dos valores são iguais a 0,2%, cinco são iguais a 0,1% e quatro são iguais a zero. Devido a estes valores baixos para os harmônicos de ordem par, eles são desprezados.

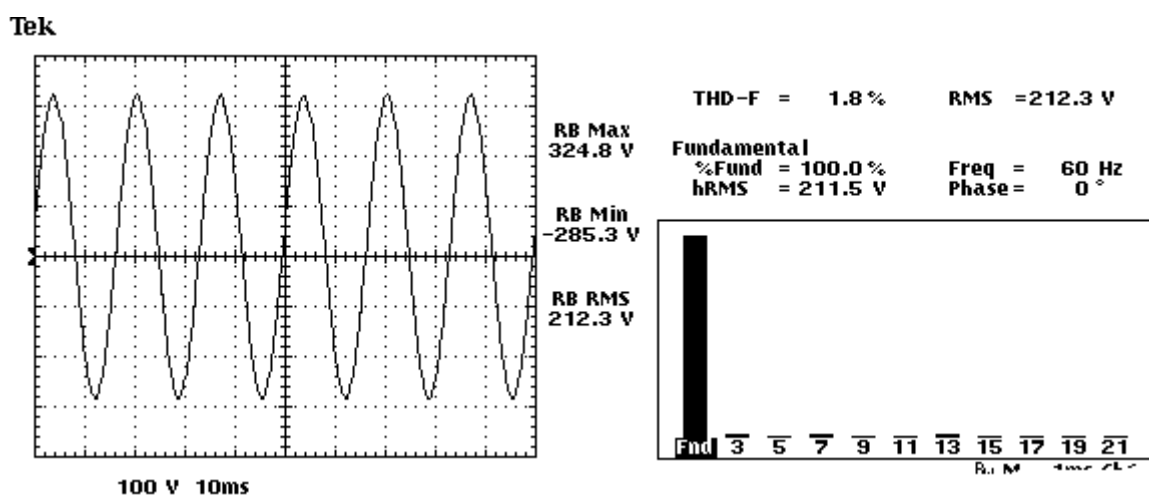


Figura 24 – Tensão aplicada às lâmpadas

Conforme foi visto na Figura 24, a DHT da tensão aplicada é de 1,8%. Esta grandeza, que a rigor deveria ser igual a zero, tem este valor devido às distorções presentes na rede causadas por alguma carga não-linear de potência elevada e às lâmpadas de descarga existentes no campus. Em alguns momentos, este valor chegou a 3,8%. Foi verificado que as cargas utilizadas para as medições, por serem pequenas em relação à potência do transformador de saída da subestação, em nenhum momento causou deformações no DHT de tensão.

Tabela 17 – Composição de harmônicos da tensão aplicada as lâmpadas

Ordem	Freq.	Amplitude DHT(%)	Amplitude(V)	Fase (°)
Fundam.	60	100	211,500	0
3° harm.	180	0,7	1,583	161
5° harm.	300	0,4	0,831	-93
7° harm.	420	1,1	2,424	-141
9° harm.	540	0,4	0,777	-29
11° harm.	660	0,4	0,843	-137
13° harm.	780	0,9	1,918	-108
15° harm.	900	0,3	0,601	-27
17° harm.	1020	0,1	0,288	126
19° harm.	1140	0,1	0,154	-100
21° harm.	1260	0,1	0,262	16

Na Figura 25 é mostrada a forma de onda para a corrente na lâmpada 1 (150 W) e o diagrama de barras com a composição das amplitudes dos valores RMS destas correntes, assim como suas fases e frequências. A  $DHT_I$  total é de 34,6%, e o valor RMS da corrente no secundário é igual a 821,4 mA. Os valores das amplitudes e fases de cada componente harmônica são apresentados na Tabela 18.

Tek

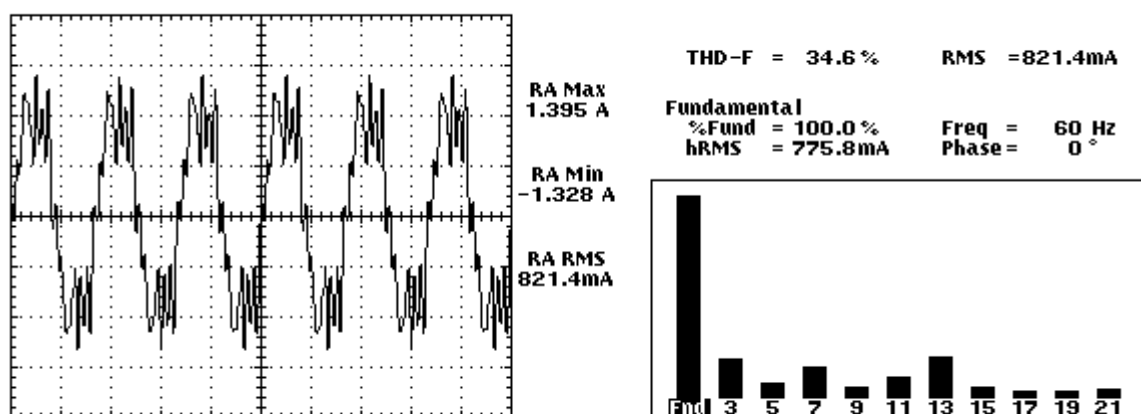


Figura 25 – Corrente e componentes harmônicos na lâmpada 1

O valor da DHT de corrente para esta lâmpada é bastante elevado, pois conforme pode-se observar no gráfico da Figura 10, esta onda é bastante irregular. Observa-se também que o maior harmônico presente é o de 13ª ordem, seguido pelo de 3ª ordem e pelo de 7ª ordem.

Na Tabela 19 são apresentados os valores para os harmônicos pares da corrente na lâmpada de 150 W, lâmpada número 1. Conforme já foi comentado, estes valores são muito baixos e também não foram considerados.

Tabela 18 – Composição de harmônicos ímpares da corrente na lâmpada 1

Ordem	Freq.	AmplitudeDHT (%)	Amplitude (mA)	Fase (°)
Fundam.	60	100	775,800	0
3º harm.	180	18,6	143,900	14
5º harm.	300	6,7	51,870	154
7º harm.	420	14,6	113,000	93
9º harm.	540	5,0	38,410	-148
11º harm.	660	9,9	76,450	172
13º harm.	780	19,8	153,800	-123
15º harm.	900	5,4	41,660	-19
17º harm.	1020	3,5	27,080	167
19º harm.	1140	2,8	21,670	23
21º harm.	1260	4,4	34,480	152

Tabela 19 – Composição de harmônicos pares da corrente na lâmpada 1

Ordem	Freq.	AmplitudeDHT (%)	Amplitude (mA)	Fase(°)
Fundam.	60	100	775,800	0
2º harm.	120	0,2	1,572	-91
4º harm.	240	0,3	2,389	105
6º harm.	360	0,3	2,177	173
8º harm.	480	1,7	12,850	-33
10º harm.	600	1,7	13,100	32

### 5.2.3 Medições feitas na lâmpada 2

A tensão aplicada na lâmpada de 100 W (número 2), foi a mesma tensão das fases X1 e X3 do transformador de saída da subestação experimental mostrada na Figura 24, com os mesmos valores de harmônicos, listados na Tabela 17.

Na Figura 26 é mostrada a forma de onda para a corrente na lâmpada 2, assim como os valores de corrente RMS, valor de pico positivo e pico negativo. Na mesma figura é mostrado o diagrama de barras para os harmônicos de corrente nesta lâmpada.

A DHT total de corrente é de 42,3%, com um valor RMS igual a 519,3 mA. O diagrama de barras para os harmônicos desta corrente é também mostrado na figura, e os valores dos harmônicos, percentuais e absolutos, assim como as fases, são listados na Tabela 20.

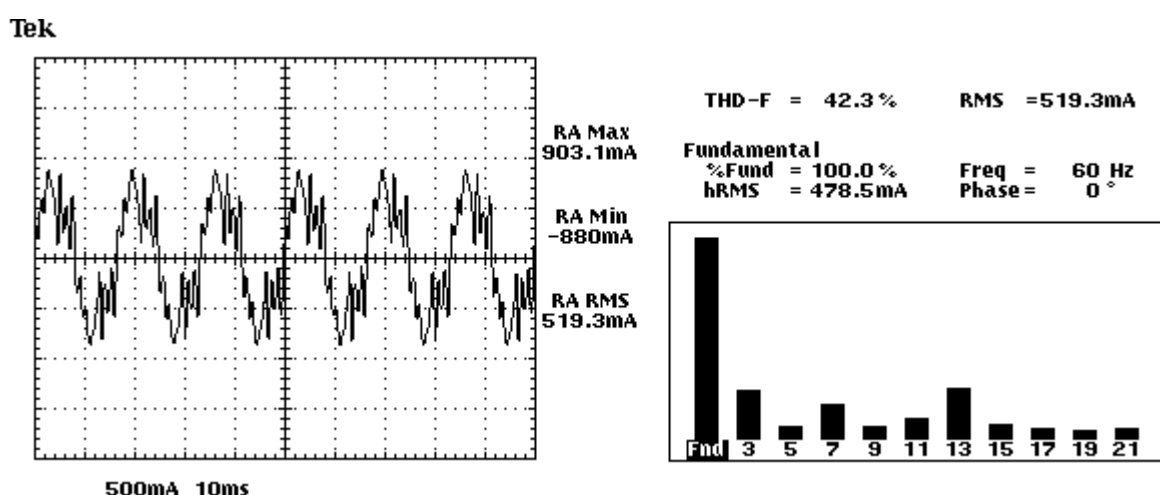


Figura 26 – Corrente e sua composição harmônica na lâmpada 2

### 5.2.4 Medições feitas na lâmpada 3

A tensão aplicada na lâmpada de 250 W (número 3), foi a mesma tensão das fases X1 e X3 do transformador de saída da subestação experimental mostrada na Figura 24, com os mesmos valores e formato das tensões aplicadas às outras lâmpadas. A curva de tensão e o diagrama de barras para a composição harmônica desta tensão são aqueles mostrados na Figura 24, e os valores são apresentados na Tabela 17. A DHT total da tensão aplicada foi de 1,8%, com um valor RMS igual a 212,3 V.

Na Figura 27 é mostrada a forma de onda para a corrente na lâmpada 3, com os respectivos valores de corrente RMS, frequência, valor de pico positivo e pico negativo. Na mesma figura é mostrado o diagrama de barras dos componentes harmônicos da corrente da lâmpada 3, sendo os valores mostrados na Tabela 21. A DHT total de corrente é de 40,8%, com um valor RMS igual a 1,25 A.

Tabela 20 – Composição de harmônicos da corrente na lâmpada 2

Ordem	Freq. (Hz)	Amplitude DHT (%)	Amplitude (mA)	Fase (°)
Fund.	60	100	478,500	0
3° harm.	180	23,7	113,300	-69
5° harm.	300	60,0	28,650	54
7° harm.	420	17,2	82,450	-59
9° harm.	540	6,5	31,090	18
11° harm.	660	9,7	46,280	-64
13° harm.	780	24,9	119,400	-37
15° harm.	900	6,9	33,040	34
17° harm.	1020	5,2	25,110	-171
19° harm.	1140	4,0	19,050	-11
21° harm.	1260	5,2	25,040	68

Tek

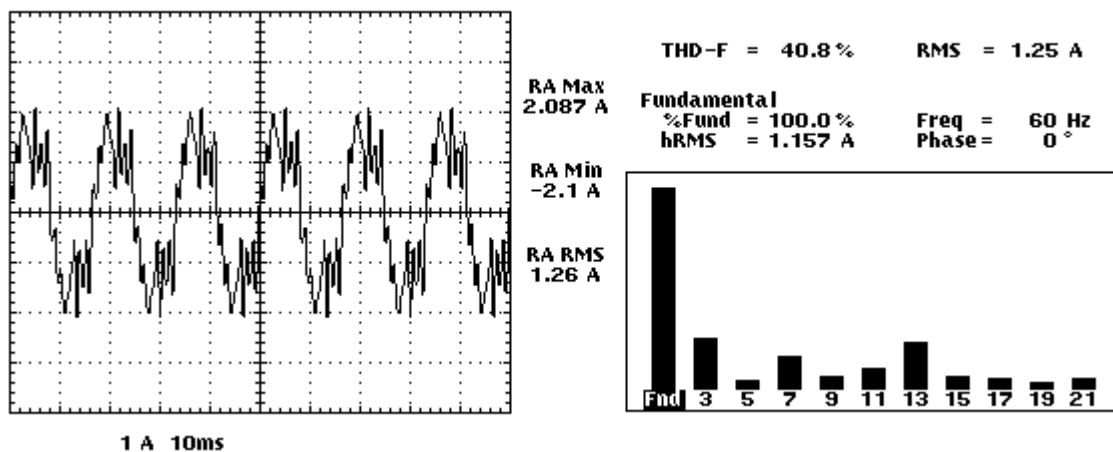


Figura 27 – Corrente e sua composição na lâmpada 3

Tabela 21 – Composição de harmônicos da corrente na lâmpada 3

Ordem	Freq.(Hz)	Amplitude DHT (%)	Amplitude (A)	Fase (°)
Fund.	60	100	1,157	0
3° harm.	180	24,9	0,288	-40
5° harm.	300	3,6	0,041	79
7° harm.	420	15,9	0,184	-2
9° harm.	540	6,0	0,069	90
11° harm.	660	9,7	0,112	17
13° harm.	780	23,1	0,268	64
15° harm.	900	6,2	0,072	141
17° harm.	1020	5,1	0,059	-40
19° harm.	1140	3,4	0,040	138
21° harm.	1260	4,6	0,054	-131

### 5.2.5 Potência na lâmpada 3

Na Figura 28.a é mostrada a curva de potência instantânea traçada pelo osciloscópio. Pode-se observar nesta curva que a potência para este tipo de lâmpada é pulsante como a corrente na lâmpada. Apresenta um pico máximo positivo igual a 597,2 W e um pico máximo negativo igual a -8,281 W, com um valor RMS igual a 298,3 W. Na Figura 28.b são apresentados os valores numéricos medidos pelo osciloscópio. Estes valores são mínimos, máximos e médios para esta mesma onda de potência. A parte da potência da lâmpada responsável pela emissão de luz e calor é a potência ativa, representada na Figura 28.b por W, com um valor médio igual a 241,6 W. Este valor é menor que os 250 W nominais da lâmpada, uma vez que no instante da medição, a tensão aplicada à lâmpada era igual a 212,3 V, abaixo do valor nominal de tensão (220V). O fator de potência para a lâmpada, medida pelo osciloscópio foi igual a 0,91, valor que confere com o valor nominal especificado pelo fabricante.

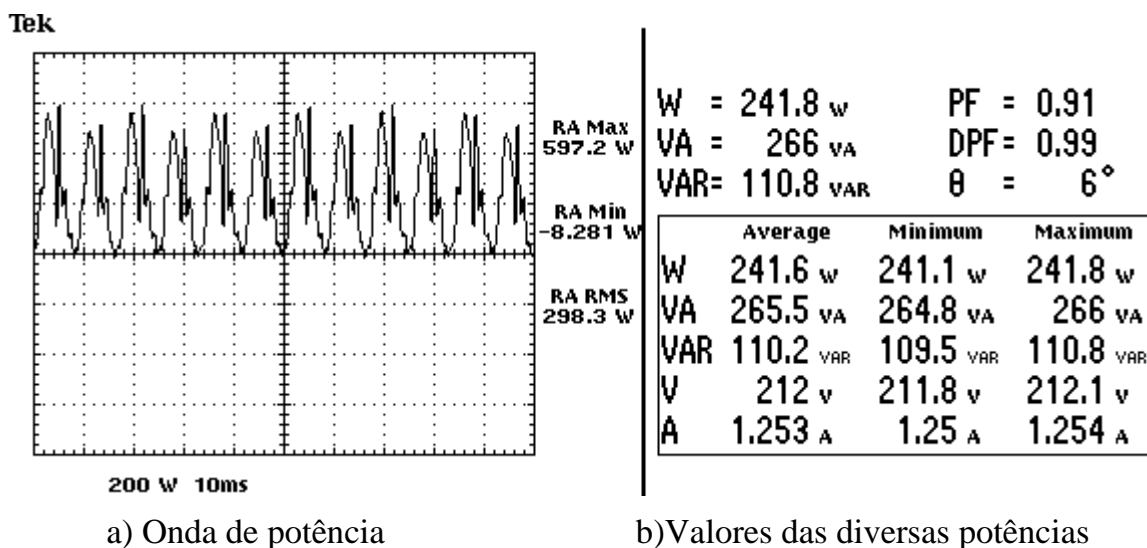


Figura 28 – Potência medida na lâmpada 3

### 5.2.6 Influência do $DHT_V$ na corrente das lâmpadas

Para que se pudesse observar a influência da  $DHT_V$  sobre a corrente na carga, foi feita uma nova medição num instante em que a  $DHT_V$  estava mais alta. Os valores encontrados nas duas medições estão mostrados na Tabela 22. Nesta tabela pode-se observar que na primeira medição a tensão estava 3,5% mais baixa e na segunda medição a tensão estava praticamente igual à nominal, porém a distorção harmônica na segunda medição estava bem maior. Esta  $DHT_V$  maior fez com que a  $DHT_I$  se tornasse também maior. Na Tabela 22,  $V_{nominal}$  e  $I_{nominal}$  são a tensão e a corrente de projeto. O fator de potência nominal é igual a 0,90 e o valor medido foi igual a 0,91.

Tabela 22 – Resultados das duas medições

	1ª medição			2ª medição		
	150 W	100 W	250 W	150 W	100 W	250 W
$V_{nominal}$	220	220	220	220	220	220
$I_{nominal}$	0,682	0,455	1,136	0,682	0,455	1,136
$V_{Fonte}$	212,3	212,3	212,3	220,3	220,3	220,3
$DHT_V$	1,8	1,8	1,8	3,6	3,6	3,6
$I_{RMS}$	0,821	0,519	1,260	0,901	0,568	1,378
$DHT_I$	34,6	42,3	40,8	37,2	75,2	47,1

### 5.2.7 Avaliação teórica das correntes harmônicas

Com o objetivo de se fazer uma avaliação teórica do fenômeno das correntes harmônicas e da observação da aplicabilidade do teorema de Fourier à este tipo de onda, foi traçada a curva da corrente total para a lâmpada de 250 W, com o auxílio do *software Graphmatica*.

Os harmônicos da corrente na lâmpada de 250 W, mostrados na Tabela 21, são utilizados para a montagem da Equação 1, à ser transportada para o *software*, para o traçado da curva. Os valores das amplitudes mostrados na tabela são os valores eficazes (ou RMS). Como na equação do valor instantâneo, utilizada para traçar a curva, são utilizados os valores máximos de corrente, os valores da Tabela 21 são multiplicados pela  $\sqrt{2}$ . Da mesma tabela são utilizados os valores das fases das senóides harmônicas, convertidos para radianos, já que estes valores, na tabela, estão apresentados na unidade graus. A curva obtida é mostrada na Figura 29.

$$\begin{aligned}
 i = & 1,636 * \text{sen}(t) + 0,407 * \text{sen}(3t - 0,698) + 0,058 * \text{sen}(5t + 1,379) + 0,260 * \text{sen}(7t - 0,035) + \\
 & 0,098 * \text{sen}(9t + 1,571) + 0,158 * \text{sen}(11t + 0,297) + 0,379 * \text{sen}(13t + 1,117) + \\
 & 0,102 * \text{sen}(15t + 2,461) + 0,083 * \text{sen}(17t - 0,698) + 0,057 * \text{sen}(19t + 2,409) + \\
 & 0,076 * \text{sen}(21t - 2,286)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Comparando as Figuras 27 e 29, pode-se observar que, conforme esperado, as curvas de corrente são bastante parecidas. Importante lembrar que na curva construída pelo *software* só são utilizados os harmônicos ímpares até o de ordem 21, ao passo que na curva mostrada pelo osciloscópio (Figura 27) são considerados todos os harmônicos até a ordem 50.

Uma avaliação da Figura 27 mostra que devido à diferença entre os valores de pico positivo e negativo da curva de corrente, existem harmônicos de ordem par, de pequena amplitude. A assimetria da curva em relação ao eixo X faz com que apareçam estes harmônicos pares.

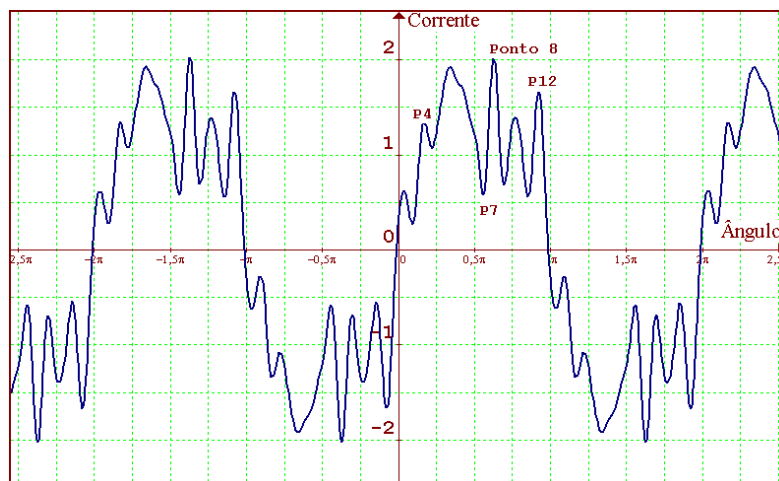


Figura 29 – Corrente na lâmpada de 250 W

O *software Graphmatica* também permite uma leitura com precisão dos valores da curva. Os pontos críticos, que são os pontos de máximo, mínimo e zeros são mostrados na Tabela 23. Nesta tabela pode-se observar que o maior valor de Y, ou seja, a corrente de pico para a lâmpada de 250 W ocorre no ponto 8, com o valor de 2,0241 A e o osciloscópio forneceu o valor de 2,087 A, valores que são coerentes, pois conforme já foi comentada, a curva construída pelo osciloscópio é traçada com mais pontos.

Na Figura 30 é mostrada a curva quadrática da corrente. Feita a integração da área sob a curva, com o auxílio do *software Graphmatica*, no intervalo 0 a  $2\pi$ , foi encontrado para esta área um valor igual a 9,7943. A Equação 20 apresenta a forma gráfica de se calcular um valor RMS (que por definição é a raiz quadrada do valor médio da curva quadrática). Este valor calculado é igual a 1,2485 A, valor muito próximo ao mostrado pelo osciloscópio (1,25 A), confirmando assim que o osciloscópio utilizado indica o valor RMS verdadeiro de uma onda.

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{A}{2\pi}} \quad (21)$$

Onde:  $I_{\text{RMS}}$  Corrente RMS  
 A Área sob a curva

Tabela 23 – Valores críticos da curva da lâmpada de 250 W

Ordem	Tipo	Valor X	Valor Y
1	Zero	-0,0358	0
2	Max	0,1169	0,6253
3	Min	0,2919	0,2688
4	Max	0,5375	1,3505
5	Min	0,6947	1,0712
6	Max	1,0688	1,9265
7	Min	1,7557	0,5761
8	Max	1,9754	2,0241
9	Min	2,1883	0,6855
10	Max	2,4130	1,3956
11	Min	2,6859	0,5442
12	Max	2,9001	1,6732
13	Zero	3,1058	0

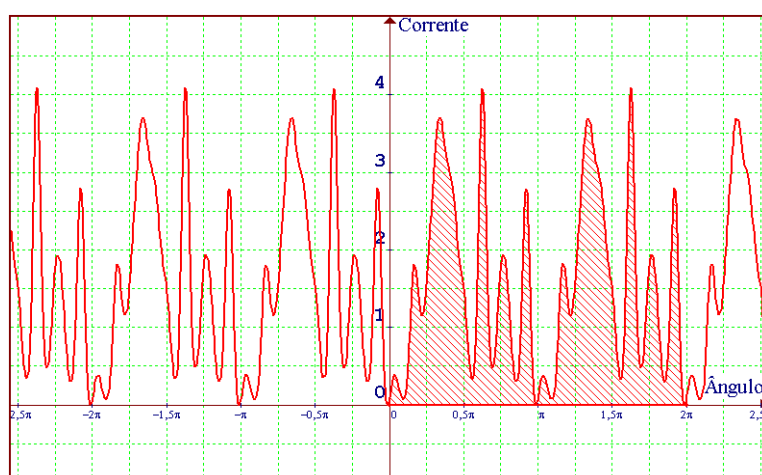


Figura 30 – Curva quadrática da lâmpada de 250 W

### 5.3 LÂMPADAS DE DESCARGA E SEUS EFEITOS NOS TRANSFORMADORES DE MEDIÇÃO

Transformadores são dispositivos não-lineares quando estão operando na região de saturação do material ferromagnético que compõe o núcleo. Como se está estudando fenômenos cuja frequência de operação pode chegar a 3 kHz, é preciso considerar o efeito desta frequência sobre o núcleo. Os estudos realizados para os harmônicos são realizados considerando-se o lado de baixa tensão, onde transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP) não são utilizados nas medições.

O objetivo, nesta fase do trabalho, foi de se verificar a influência dos TC nas correntes no lado de média tensão comparando-as diretamente com as correntes em baixa tensão.

Os resultados obtidos do lado de baixa tensão do transformador de saída foram comparados com os resultados apresentados pelos TC conectados à média tensão. A análise do desempenho ou comportamento dos transformadores de medição foi realizada a partir desta comparação. Os resultados mostraram que é de extrema importância considerar os efeitos da presença de componentes harmônicas na utilização de TC e TP em instalações de alta ou média tensão.

Um dos aspectos a se considerar na utilização das lâmpadas à vapor de sódio de alta pressão em sistemas de iluminação, é a sua influência nos transformadores de medição das subestações de média tensão, quando estes fazem parte da instalação. Em instalações industriais isto também deve ser observado quando o número de lâmpadas a vapor de sódio for considerável em relação à potência do transformador que alimenta estas cargas.

#### 5.3.1 Metodologia utilizada

Para efeito de entendimento dos efeitos de cargas não-lineares, optou-se por uma avaliação com duas máquinas de solda operando à vazio e sob carga, para em seguida se levantar as características do banco de resistores. Posteriormente, as cargas foram agrupadas em diferentes configurações.

Quando do levantamento das características de carga das duas máquinas de solda isoladamente, verificou-se que seus compensadores internos atuam de forma a reduzir as deformações das ondas de tensão e corrente observadas quando da operação à vazio destas máquinas. As Figuras 31 e 32 mostram respectivamente os aspectos das formas de onda de corrente para estas duas situações. As medições foram efetuadas com o osciloscópio Tektronic especificado no item 5.1.1.

Na Figura 31, é mostrada a corrente entregue a uma máquina de solda, na situação sem carga. A corrente RMS entregue à máquina é de 1,115 A. O diagrama de barras das componentes harmônicas mostra uma DHT total de 35,8%.

Na Figura 32 é mostrada a corrente entregue a uma máquina de solda, numa situação de carga. A corrente RMS entregue à máquina é de 35,56 A. A DHT total é de 6,2%.

Comparando a Figura 31 com a Figura 32 pode-se notar a influência do circuito de compensação e sistema de filtro da máquina de solda.

Diante disto, ainda com o objetivo de avaliar o comportamento de cargas não-lineares, optou-se por analisar uma configuração composta pela associação dos três tipos de cargas, de forma a garantir que os valores de corrente obtidos a partir do transformador de corrente, apresentem uma confiabilidade maior, permitindo a análise dos resultados. Estes resultados não são afetados por esta decisão uma vez que a análise é comparativa e que a configuração utilizada pode de fato representar uma configuração real de carga em pequenas oficinas industriais.

### **5.3.2 Realização de ensaios experimentais: medições na baixa tensão**

Considerando o esquema visto na Figura 23, foi adotada a seguinte configuração de carga: duas máquinas de solda ligadas em 220 V entre as fases A e C do transformador de distribuição, três lâmpadas à vapor de sódio de alta pressão, ligadas também nas fases A e C e três bancos de resistências conectados nas mesmas fases.

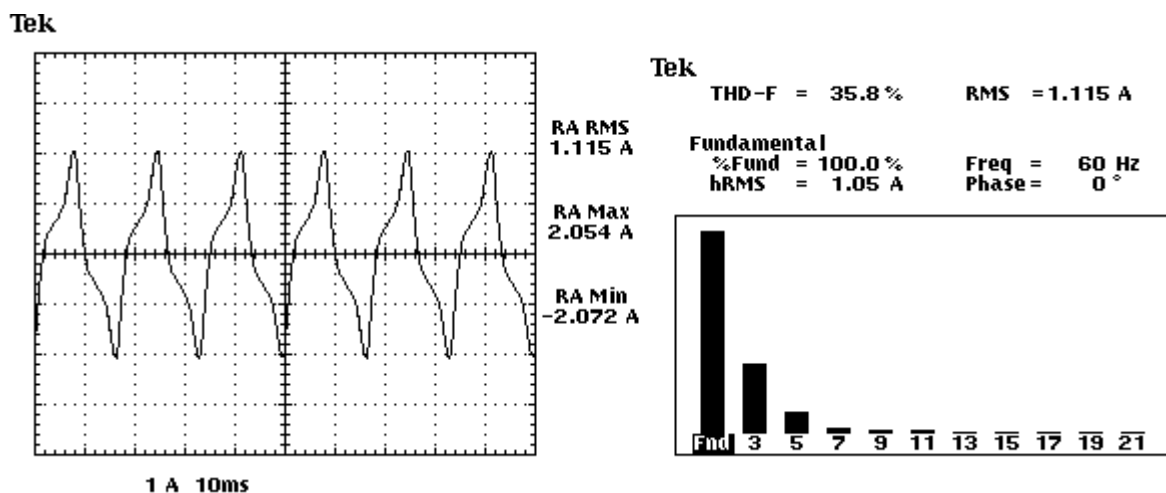


Figura 31 – Forma de onda de corrente máquina de solda elétrica a vazio

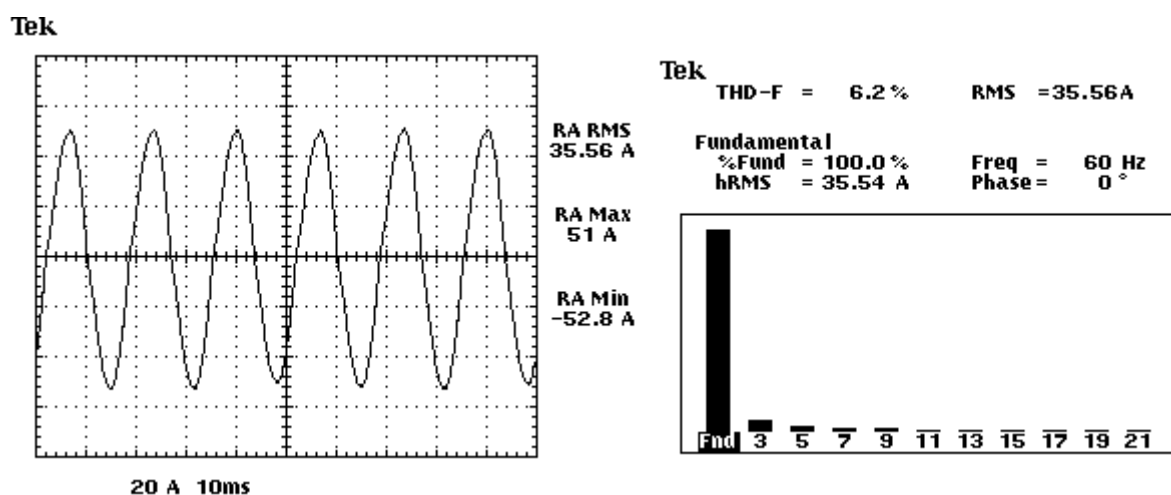


Figura 32– Forma de onda de corrente para máquina de solda elétrica , com carga

O oscilograma da corrente do secundário do transformador de distribuição que alimenta as cargas, para a configuração sob estudo, é mostrado na Figura 33, juntamente com o diagrama de barras para as componentes harmônicas presentes.

Observa-se da Figura 33 que a DHT em relação à fundamental é de 15,9%. A composição harmônica até o componente de 9ª ordem, é mostrada na Tabela 24.

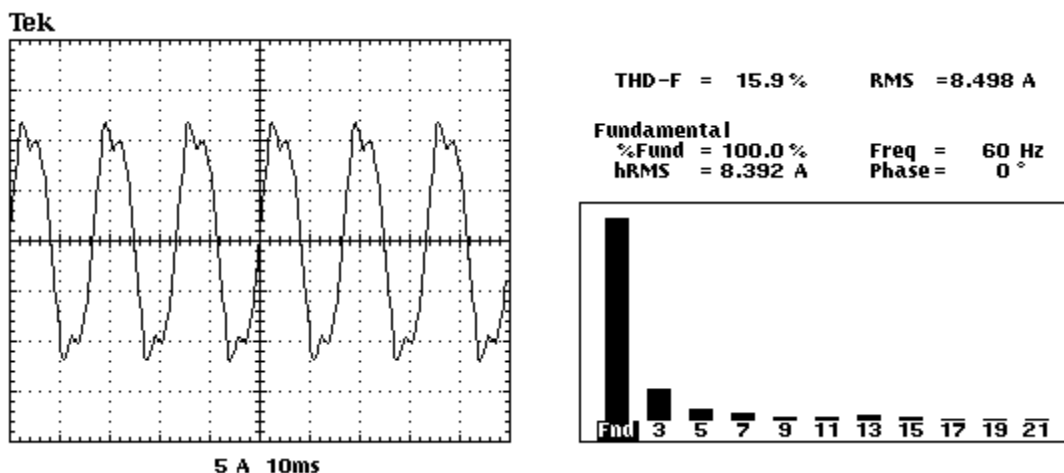


Figura 33 – Forma de onda de corrente para máquina de solda à vazio, lâmpadas e resistências, fases A e C

### 5.3.3 Realização de ensaios experimentais: medições na média tensão

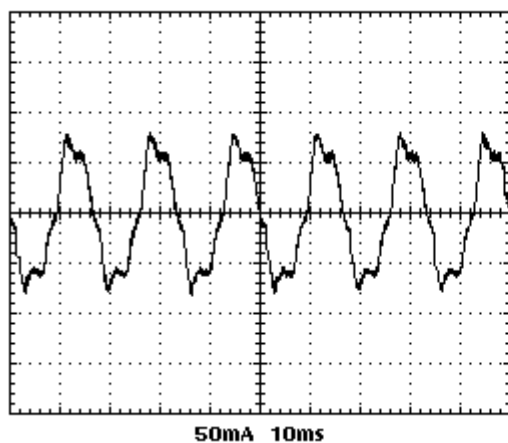
Em seguida foram feitas medições nos TC ligados ao lado de média tensão da subestação experimental.

Na Figura 34 é mostrado o oscilograma da onda de corrente no secundário do TC conectado à fase A, no lado de média tensão. Observa-se nesta figura que o valor RMS da corrente é de 65,85 mA. Aplicando-se a relação de transformação do TC, a corrente RMS no lado de média tensão será igual a 131,70 mA. A DHT mostrada nesta mesma figura é igual a 19,3%. A composição harmônica até o componente de 9ª ordem, é mostrada na Tabela 24.

Na Figura 35 é apresentado o oscilograma da corrente do lado de média tensão, para a fase B da subestação, obtida do secundário do TC. Observa-se nesta figura que a DHT para a fase B é de 24,7%. A composição harmônica até o componente de 9ª ordem, é mostrada na Tabela 24.

Na Figura 36 é apresentado o oscilograma da corrente do lado de média tensão, para a fase C da subestação, obtida do secundário do transformador de corrente. Pode-se observar nesta figura que a DHT para a fase C na média tensão é de 19,2%. A composição harmônica até o componente de ordem 9, também é mostrada na Tabela 24.

Tek

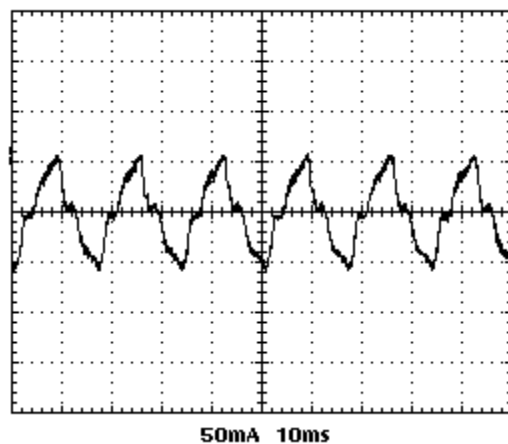


THD-F = 19.3%      RMS = 65.85mA  
**Fundamental**  
 %Fund = 100.0%      Freq = 60 Hz  
 hRMS = 49.32mA      Phase = 0°



Figura 34 – Forma de onda de corrente, no lado de média tensão, fase A

Tek



THD-F = 24.7%      RMS = 66mA  
**Fundamental**  
 %Fund = 100.0%      Freq = 60 Hz  
 hRMS = 32.41mA      Phase = 0°

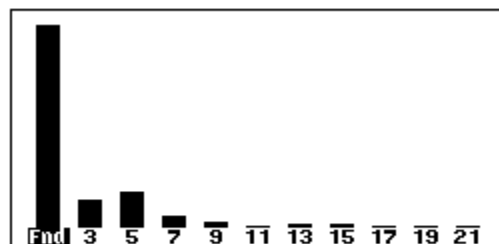
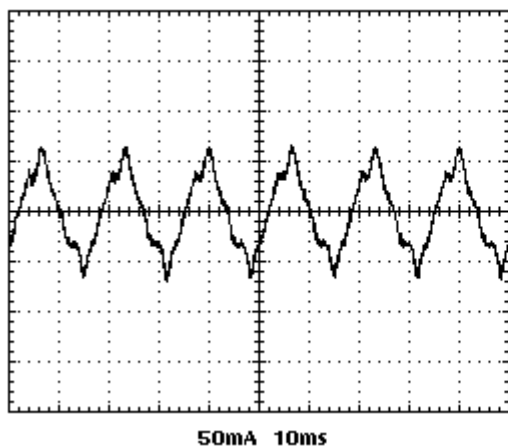


Figura 35 – Forma de onda de corrente, no lado de média tensão, fase B

Tek



THD-F = 19.2%      RMS = 75.31mA  
**Fundamental**  
 %Fund = 100.0%      Freq = 60 Hz  
 hRMS = 34.79mA      Phase = 0°



Figura 36 – Forma de onda de corrente, no lado de média tensão, fase C

Tabela 24 – Valores percentuais dos harmônicos de corrente, cargas não-lineares

Ordem	Valor percentual do harmônico (%)				DHT <sub>I</sub>
	3	5	7	9	
Baixa tensão – Fases A e C	14,6	5,0	3,0	1,1	15,9
Média tensão – Fase A	10,4	13,2	3,1	0,8	19,3
Média tensão – Fase B	13,5	17,4	5,4	2,0	24,7
Média tensão – Fase C	10,7	12,9	5,2	1,4	19,2

### 5.3.4 Análise dos resultados

Os resultados mostraram em primeiro lugar que existe uma influência dos transformadores de medição na avaliação das curvas de cargas não-lineares. Esta influência se manifesta pela diferença entre os valores obtidos entre a baixa tensão e os valores de média tensão, no que se refere a DHT<sub>I</sub>, aos valores percentuais das componentes harmônicas, aos formatos das ondas de corrente e aos valores destas correntes. Nesta análise, foram consideradas somente as componentes harmônicas de corrente de cada fase, até a nona ordem, uma vez que os demais valores são bastante baixos.

Em relação aos valores na baixa tensão obtidos para a DHT<sub>I</sub> na fase A e C, e aqueles obtidos para a média tensão, verifica-se que existe uma variação de 21,4% entre as fases A, uma diferença de 55,3% em relação à fase B e uma diferença de 21,4% em relação à fase C. Uma parte destes resultados deve-se sem dúvida ao desequilíbrio da carga, mas é um forte indicio de que cuidados devem ser tomados para não se cometer erros de interpretação e avaliação na hora de decidir medidas de controle da qualidade de uma instalação, baseado em dados dos transformadores de medição.

Da mesma forma, em relação as componentes harmônicas, verifica-se que a diferenças entre os valores na baixa e na média tensão, chegam a 28,7% para o 3º harmônico, a 71,2% para o 5º, a 44,4% para o 7º e a 45% para o harmônico de 9ª ordem.

Os valores percentuais das componentes harmônicas estão agrupados para melhor visualização na Tabela 24. A partir desta tabela é construído o gráfico de barras mostrado na Figura 37.

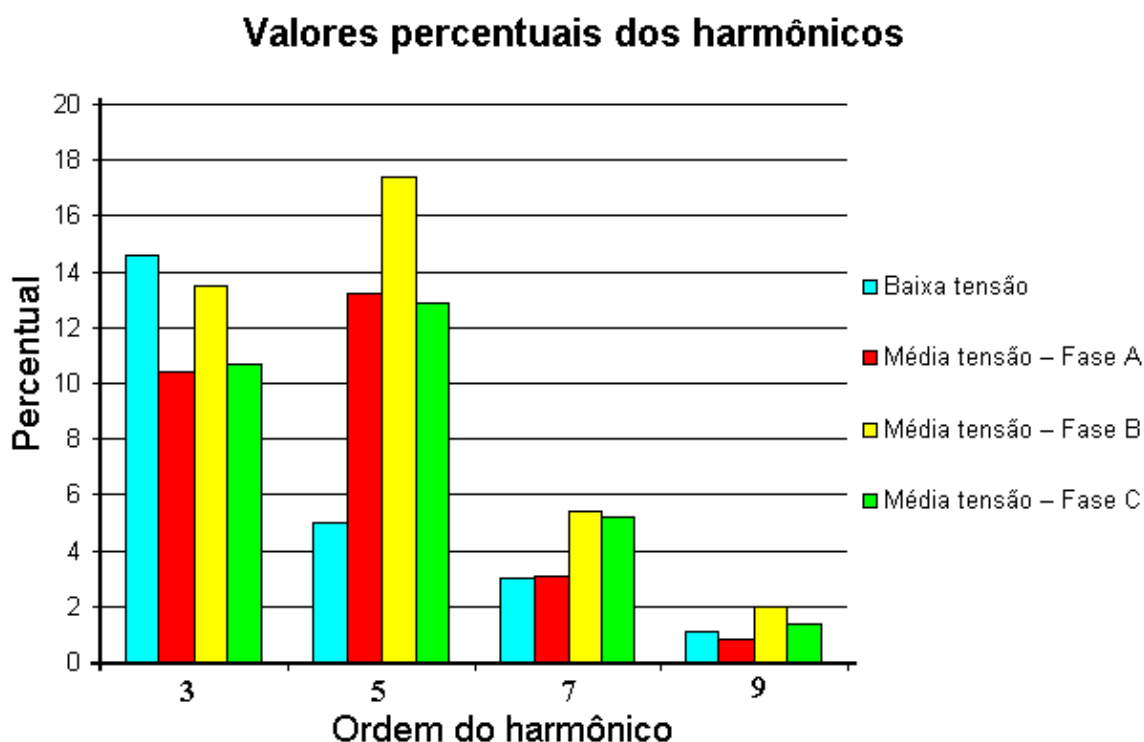


Figura 37 – Valores percentuais dos harmônicos de corrente, cargas não-lineares

As barras que representam os harmônicos no lado de baixa tensão e média tensão podem ser comparadas, uma vez que estes valores mostram percentuais em relação à corrente da onda fundamental, em cada uma das fases.

Existe somente uma barra representando a baixa tensão, ligada entre as fases A e C. No lado de média tensão a carga se distribui pelas três fases.

Observando-se o percentual que representa o 3º harmônico, verifica-se que entre eles existe uma discrepância de valores, exceção feita à fase B, média tensão. A diferença se torna maior no 5º harmônico e ainda são grandes para o 7º e o 9º harmônico. Observando-se as barras que representam os harmônicos das correntes no lado de baixa tensão, verifica-se que existe um decaimento nos valores, à medida que a ordem do harmônico aumenta. O mesmo não acontece com os harmônicos do lado de

média tensão, pois para o 3º harmônico, os valores são mais baixos em média tensão do que em baixa tensão. Para a média tensão, os harmônicos aumentam para o 5º harmônico, caindo em seguida.

Este comportamento para o 3º harmônico é esperado, porque o transformador é um filtro natural para esta ordem de harmônicos. O transformador está ligado na configuração triângulo – estrela, e como os harmônicos são gerados no lado de baixa tensão do transformador abaixador, o harmônico de 3ª ordem, ao passar do lado de baixa tensão para o lado de média tensão tem o seu valor reduzido.

Fica evidente também, a partir dos resultados mostrados, que a avaliação do conteúdo harmônico de uma instalação, para constatação do atendimento às normas ((IEEE 519, 1992) e (IEC 61000-3-2)) não pode se basear tão somente numa análise de resultados obtidos a partir dos transformadores de medição.

Foi verificada a influência das cargas não-lineares nas medições feitas no lado de baixa tensão de um transformador, fazendo-se a consideração da DHT de corrente.

A Figura 33 mostra o gráfico de corrente na BT do transformador de saída, numa situação em que a máquina de solda está à vazia, e também estão conectadas as lâmpadas e o grupo de resistências. O valor eficaz da corrente harmônica é igual a 8,498 A. Este valor está mostrado na coluna (2) da Tabela 25. Aplicando-se a Equação 12, encontra-se o valor de 8,393 A para a corrente  $I_1$ , a componente fundamental desta onda de corrente. Este valor de  $I_1$  pode também ser encontrado na Figura 33, identificada como  $hRMS = 8,392$  A. Como a relação de transformação do transformador de saída da subestação, é igual a 60, esta corrente fundamental  $I_1$  do secundário, refletida no primário do transformador será igual a 0,140 A, conforme mostrado na Tabela 25.

Tabela 25 – Corrente na BT

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	I(A)	DHT <sub>1</sub> (%)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>1,Refletida</sub> (A)
BT (fases AC)	8,498	15,9	8,393	0,140

A corrente medida no secundário do TC, para a fase A, foi igual a 65,85 mA. Este valor é mostrado na coluna (2), correspondente à fase A da Tabela 26. Como a relação de transformação do TC é de 10 para 5 (Tabela 16), a corrente no primário do transformador de saída será igual a 0,132 A. Com uma  $DHT_I$  igual a 19,8%, pela Equação 12, a corrente fundamental  $I_1$  é igual a 0,129 A. Estes valores também são mostrados na Tabela 26. A tabela também mostra as correntes para as demais fases e as respectivas  $DHT_I$ .

Tabela 26 – Corrente nos TC, conectados à AT

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Fase	$I_{med}$ (A)	$I_{Real}$ (A)	$DHT_I$ (%)	$I_1$ (A)
A	0,06585	0,132	19,8	0,129
B	0,0660	0,132	24,7	0,064
C	0,0753	0,151	19,2	0,074

Nas Figuras 34, 35 e 36, não se pode fazer a comparação dos ângulos de fase uma vez que, devido à isolação do osciloscópio, não é possível se fazer o gatilhamento por uma única fonte de referência, tendo sido este gatilhamento feito pela própria corrente de cada fase.

A análise dos formatos das Figuras 33, 34, 35 e 36 mostram que as curvas são diferentes entre si, não sendo possível a representação das correntes no primário do transformador de distribuição pelas curvas mostradas no secundário, e vice-versa.

Os valores da 3ª linha, coluna nº 5, nas Tabelas 25 e 26 teriam que ser iguais para que pudessem representar indistintamente as correntes do secundário ou do primário do transformador de distribuição e pode-se observar que o valor da tabela correspondente ao primário do TC (Tabela 26) é 8,5% menor do que o valor do secundário (Tabela 25), mostrando mais uma vez que existe uma diferença entre as ondas de corrente em baixa e média tensão.

#### 5.4 MEDIÇÕES PARA TRÊS LÂMPADAS, DUAS MÁQUINAS DE SOLDA E GRUPO DE RESISTORES, EM MÉDIA TENSÃO

Neste trabalho buscou-se fazer as avaliações observando-se o comportamento do circuito de média tensão. Como a corrente drenada pelas três lâmpadas é muito baixa para que se possa acompanhar seu desempenho no lado de média tensão, para estas medições além das três lâmpadas vapor de sódio, é utilizado: um conjunto de resistores, como carga linear e duas máquinas de solda como cargas não-lineares.

Para efeito de comparação dos ângulos de fase, o gatilhamento das correntes nas três fases foi feito sempre pela tensão entre as fases X1 e X3, para que a referência seja sempre a mesma. É usada uma ponta de prova para tensão, no canal 1. No canal 2 foi conectada uma ponta de prova composta por um transformador de corrente, sendo usada a relação de 10 mV/A.

Na Figura 38 são mostradas as formas de onda para a tensão e corrente nas fases X1, X3 (baixa tensão), para a carga descrita acima. A defasagem entre a onda de corrente e de tensão, mostradas na figura, é de  $43,2^\circ$ .

Na Figura 39 é mostrada a forma de onda da corrente quando três lâmpadas de vapor de sódio estão ligadas entre as fases X1 e X3.

Na Figura 40 é mostrada a forma de onda para as três lâmpadas de vapor de sódio e mais duas máquinas de solda (MS) à vazão, no lado de baixa tensão.

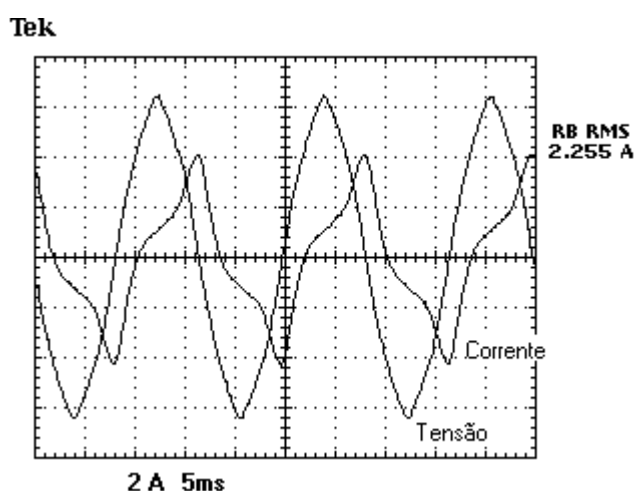


Figura 38 - Tensão e corrente, na BT, para carga não-linear

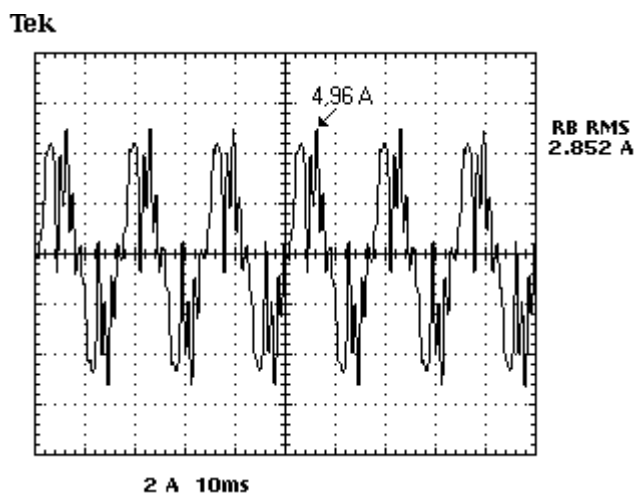


Figura 39 – Corrente na BT para 3 lâmpadas VSAP

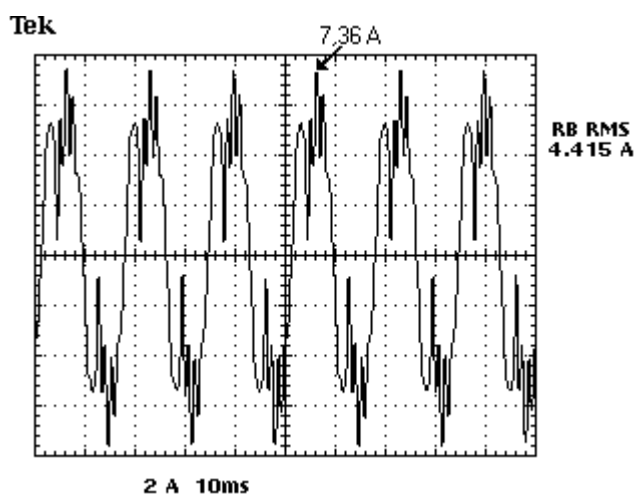


Figura 40 – Corrente para 3 lâmpadas + 2 MS

Nas Figuras 41, 42 e 43, são mostradas as correntes nos secundário dos TC, que estão ligados ao circuito de média tensão da subestação, para a carga representada na Figura 40. Os valores das correntes RMS (true RMS), correntes de picos positivos e correntes de picos negativos são mostradas na Tabela 27. Nas três figuras referidas, os ângulos de fase não podem ser comparados, pois o gatilhamento do osciloscópio foi feito pela tensão do próprio canal, não havendo portanto uma referência fixa entre eles.

Na Figura 41 é mostrada a corrente no secundário do TC, fase A; na Figura 42 é mostrada a corrente no secundário do TC, fase B; na Figura 43 é mostrada a corrente no secundário do TC, fase C.

Tek

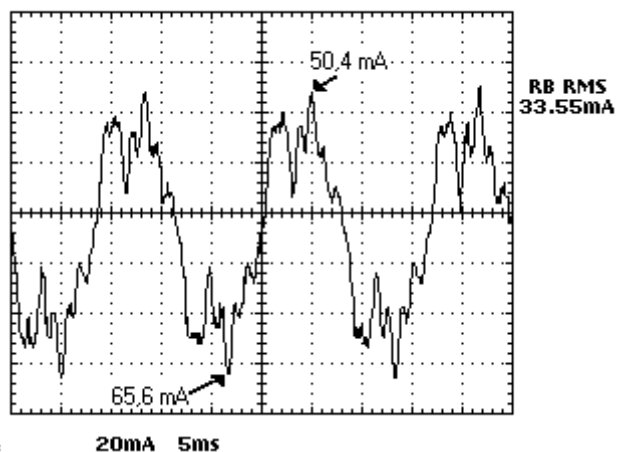


Figura 41 – Corrente no TC, fase A, 3 lâmpadas + 2 MS

Tek

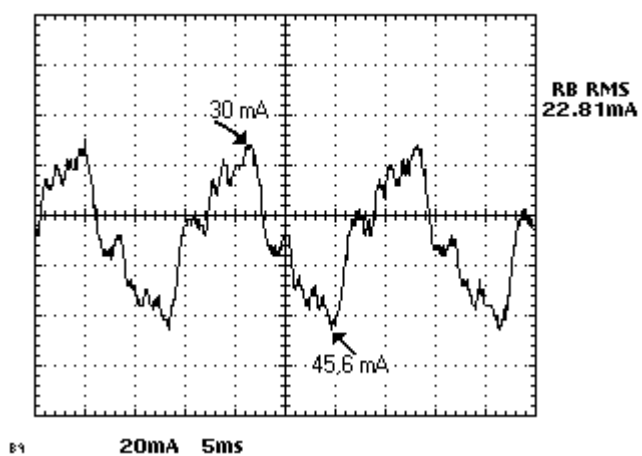


Figura 42– Corrente no TC, fase B, 3 lâmpadas + 2 MS

Tek

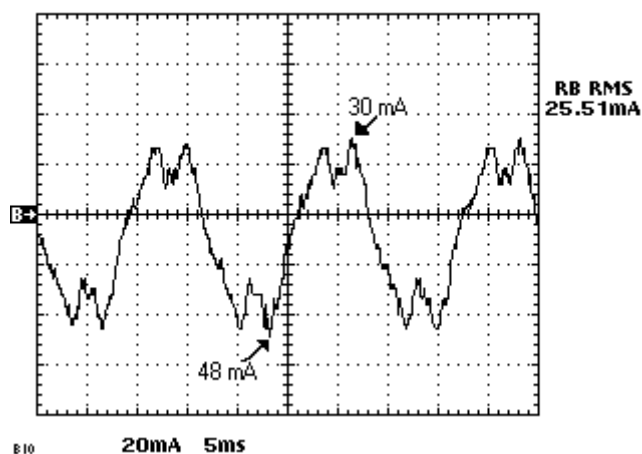


Figura 43 - Corrente no TC, fase C, 3 lâmpadas + 2 MS

Tabela 27 – Correntes na média tensão

TC	$I_{RMS}$ (mA)	$I_{Pico\ positivo}$	$I_{Pico\ negativo}$
IA	33,55	50,4	65,6
IB	22,81	30,0	45,6
IC	25,51	30,0	48,0

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tomando por base a Figura 23, observa-se que a alteração da DHT de corrente que ocorre no secundário do TC, é uma deformação maior do que a DHT que ocorre no lado de baixa tensão do transformador abaixador (segundo transformador de 30 kVA), ou seja, a deformação da onda de corrente refletida no primário deste transformador abaixador é causada pelo próprio circuito magnético deste transformador abaixador e a deformação na onda de corrente no secundário do TC, é causada pelo circuito magnético do TC.

Pode-se assim afirmar, dos resultados apresentados, que existe a introdução de um erro nas leituras das componentes harmônicas feitas a partir destes transformadores, principalmente do transformador de corrente.

No artigo de RIOS et al (1996) são apresentados os valores de DHT encontrados para lâmpadas de descarga. Estes valores estão bastante próximos aos encontrados na medição realizada na presente dissertação para a lâmpada de 250 W.

Considerando-se as medições feitas e as conclusões de RIOS et al (1996), pode-se considerar que o valor da DHT e os níveis de correntes harmônicas encontrados para a lâmpada de 250 W e apresentados nesta dissertação, são adequados para a representação dos harmônicos presentes em uma linha de distribuição e podem ser utilizados como parâmetros gerais para um cálculo estimativo das harmônicas presentes nos circuitos dos sistemas de Iluminação Pública.

Foi apresentada uma aplicação prática do Teorema de Fourier com a construção de curvas distorcidas de corrente de cargas não-lineares, com a utilização dos valores de

amplitude de correntes e das fases das senóides harmônicas consideradas, assim como uma aplicação prática da integração da área sob uma curva, para o cálculo do valor RMS da corrente.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

Uma das metas deste trabalho é apresentar resultados empíricos feitos em uma subestação experimental, montada em laboratório. A metodologia adotada para tal, foi através da observação do desempenho das lâmpadas de descarga à vapor de sódio de alta pressão, mostrando suas curvas de tensão aplicada e de corrente circulante.

Foi também apresentado um estudo experimental da influência de cargas não-lineares nos transformadores de medição de subestações em média tensão, mais precisamente em 13.200 V. A subestação experimental desenvolvida para esta finalidade, foi utilizada, tendo sido efetuados testes com a subestação alimentando uma configuração de carga com predominância de dispositivos a arco constituídos por lâmpadas de descarga a vapor de sódio de alta pressão, grupos de resistores e máquinas de solda (cargas não-lineares).

No Capítulo 1 e 2 foi visto que uma grande economia pode ser obtida com a redução das perdas técnicas e da racionalização do uso da energia elétrica. O PROCEL é uma realidade que tem contribuído bastante com estes objetivos. Outro programa que tem contribuído bastante é o RELUZ, e muito há ainda a fazer.

No Capítulo 3, foi visto que progressos estão sendo obtidos no que diz respeito aos aspectos de melhoria das condições de iluminação, tanto no conforto do usuário, como na redução de gastos. Porém, isto tem um custo tecnológico, que são os aumentos nos harmônicos, ou seja, uma redução da Qualidade de Energia. Foi verificado também que os harmônicos provocam uma redução do fator de potência, com altos custos para o sistema de iluminação pública e para o sistema de distribuição de energia elétrica.

No Capítulo 4 foi demonstrada a influência da  $DHT_1$  no fator de potência do circuito e foi verificado que a potência do transformador fica bastante comprometida e terá uma redução de potência dada pelo fator K representado pela Equação 16, ou seja a capacidade do transformador é reduzida de um valor que é o fator de crista ( $f_c$ ) dividido por  $\sqrt{2}$ .

Em algumas das medições foi observado que ocorrem oscilações na leitura do osciloscópio que impedem que o aparelho mostre o gráfico de barras das correntes

harmônicas. Isto demonstrou, como é sabido na teoria, que a Série de Fourier só é adequada quando a forma de onda da corrente distorcida é periódica. Isto é explicado pelo fato de que nos instantes em que o sistema elétrico não está estável, devido às variações de carga, o equipamento considera a onda amostrada como não periódica.

Embora os valores da  $DHT_I$  para as lâmpadas de 150, 100 e 250 W tenham sido respectivamente iguais a 88%, 108% e 104% do valor médio, a análise das curvas de correntes mostra que as formas de onda são bastante parecidas. Da mesma forma, uma comparação dos harmônicos que compõem a onda de corrente para estas lâmpadas mostra que os espectros são também bastante parecidos.

Estes resultados obtidos mostram então que se pode considerar o valor da  $DHT_I$  e os níveis de correntes harmônicas encontrados para a lâmpada de 250 W, como um valor a ser usado para a representação dos harmônicos presentes em uma linha de distribuição para qualquer potência de lâmpada deste tipo. Outro ponto a reforçar esta sugestão é que a lâmpada de 250 W de vapor de sódio de alta pressão é bastante usada na iluminação pública. Estes valores encontrados estão bastante próximos daqueles mencionados por RIOS et al (1996) em seu artigo.

Uma outra observação também importante foi que um aumento da  $DHT_V$  faz com que a  $DHT_I$  também aumente. Foi observado que para um aumento da  $DHT_V$  de 1,8% para 3,6% houve um aumento médio de 14% da  $DHT_I$ . Com o aumento da  $DHT_I$ , ocorre uma redução do valor do fator de potência do circuito, com um conseqüente aumento da corrente, de um valor em torno de 30%. Isto fará com que a vida útil da lâmpada seja reduzida.

A principal conclusão obtida da análise dos resultados apresentados é que existe uma diferença entre os valores de DHT e dos valores individuais percentuais dos harmônicos, medidos no lado de baixa tensão, onde a carga é alimentada, e os valores obtidos do lado de média tensão a partir do secundário dos transformadores de medição da subestação. A primeira interpretação a ser dada é de que, qualquer diagnóstico, medida de correção ou de análise nos problemas de Qualidade de Energia de uma instalação alimentada em média tensão, não pode ser baseada somente em medições feitas a partir dos transformadores de medição.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em vista do que foi estudado e apresentado nesta dissertação são os seguintes os trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos nesta linha de pesquisa:

- Demonstração prática da necessidade do fator K para o dimensionamento de transformadores que alimentam cargas não-lineares;
- Quantificação do erro introduzido nas leituras com a utilização de transformadores de medição;
- Avaliação da influência do 3º harmônico nos transformadores de distribuição;
- Avaliação da influência da  $DHT_V$  na corrente de carga;
- Avaliação da influência da  $DHT_V$  na vida útil das lâmpadas de vapor de sódio;
- Influência da DHT da alimentação das lâmpadas de descarga na sua DHT de corrente;
- Influência dos transformadores de distribuição nas ondas de corrente e de tensão de cargas lineares e não-lineares;
- Medição da DHT de corrente em várias lâmpadas de descarga de diferentes fabricantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLLEN, M.; MATH, H. J. **Understanding Power Quality Problems**. P. M. Anderson, Series Editor. IEEE press Editorial Board. NY USA. 2000.

BOWERS, B. **New lamps for old: the story of electric lighting**. IEE REVIEW NOVEMBER 1995.

CLOSE, CHARLES M. **The Analysis of Linear Circuits**. Harcourt, Brace & World, Inc, 1966.

COOK. B. **New developments and future trends in high-efficiency lighting**. Engineering Science And Education Journal. October 2000.

CORREA, J.; PONCE, M.; ARAU, J.; ALONSO, J. M. **Dimming in Metal-Halide and HPS Lamps operating at HF: Effects and Modeling**. 0-7803-7420-7/02/2002 IEEE.

COSTA, G. J. C. da. **Iluminação Econômica: Cálculo e avaliação**, 2ª Edição, Porto Alegre: EDIPUCRS, 2000.

COTRIM, A. **Manual de Instalações Elétricas**. 2ª edição, Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda, 1985.

Dranetz-BMI. **Handbook of Power Signatures**. Dranetz-BMI Edison. NJ,USA. 1997.

Dranetz-BMI. **Power Quality Analysis**. Dranetz-BMI Edison. NJ, USA. 1991.

**ELETROBRÁS**. Dados do PROCEL e Reluz. Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com.br>>., acesso em 5/out/2005.

EMANUEL, A. E. **The Assessment Of Harmonic Pollution**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995.

GRADY, W. M.; G. T. Heyd **Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lamps**. IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol. PAS-104, pp. 554-561, March 1985.

GUILHERME, A. D. D. **Harmônicas em Sistemas Industriais**. EDIPUCRS, 2a. Edição. Brasil. 2002.

HEYDT, G. T.; HOFFMAN, S. P.; RISAL, A.; SASAKI, R. I.; KEMPER, M. J. **The impact of energy saving technologies on electric distribution system power quality**.

IEC. **61000-3-2**: Considerations for revising: Harmonics Emissions Standard.

IEEE. **Proc. – Gener. Transm. Distrib.** Vol. 145, No. 4. Reduction of harmonic currents generated by discharge lamp systems. July 1998.

IEEE. **Std. 519-1992** Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. 1992.

LASKOWSKI, E. L.; PONOUGHUE, J. F. **A model of a Mercury Arc Lamp's Terminal V-I Behavior**. IEEE Transactions on Indushty Applications, Vol. IA-17, No. 4, July-August 1981, pp. 419-426.

MALDONADO O. A. A.; HIROSHI R. H.; REIS, L. O. M. **Efficient Lamps in Public and Residential Illumination and their Effects on the Power Quality of the Secondary Voltage Distribution System**. 8º Congresso Luso-Espanhol de Engenharia Eletrotécnica. Algarve. Portugal. ISBN 972-8822-00-6. 2004.

MORENO, H. **Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas, Efeitos e Soluções**. Instituto Brasileiro do Cobre, 1ª edição, Novembro de 2001.

NTT (Núcleo de Treinamento Tecnológico). **Reduzindo as perdas de corrente no sistema elétrico**. São Paulo, 2004.

OLESKOVICZ, M, **Qualidade da Energia – Fundamentos básicos**. 2004. Disponível em <<http://www.usp.br>>. Acesso em 1/out/2005.

Pirelli. **PT-2**: Prontuário Técnico, 2ª edição. São Paulo, 1998.

PROCEL RELUZ: síntese. Rio de Janeiro: Editora Atual, 2004, 16p. Disponível em: <<http://www.eletobras.com.br>>., acesso em 5/out/2005.

RIOS, S.; CASTAÑEDA R.; VEAS, D. **Harmonic Distortion And Power Factor Assessment In City Street Gas Discharge Lamps**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996.

SHMILOVITZ. D. **On the Definition of Total Harmonic Distortion and Its Effect on Measurement Interpretation**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 1, JANUARY 2005.

TAMBY, J. P.; JOHN, V. I. **Q-HARM - A Harmonic Power Flow Program for Small Power Systems**. IEEE Transactions on Power System, Vol. 3, No. 3, August 1988, pp, 949-955.

**Mercolux**. Venda de material elétrico. Disponível em <<http://www.mercolux.com.br>>. Acesso em 5/out/2005.