



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ - 31
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ**

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DE LÂMPADAS E ACESSÓRIOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA NA
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DOS SISTEMAS SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO**

Gentil M. de Moraes Júnior * Euler B. dos Santos Renata Keli S. Silva Antônio C. Baleeiro Alves

Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Federal de Goiás

RESUMO

Motivado pelas ações dos programas de eficiência energética, este trabalho tem como objetivo determinar grandezas elétricas relacionadas à qualidade da energia elétrica decorrente da substituição de lâmpadas e acessórios do sistema de iluminação pública. A proposta visa apresentar estudos comparativos do comportamento elétrico entre diferentes tipos de lâmpadas utilizadas na iluminação pública. Todavia, será apresentado um estudo mais detalhado referente a lâmpada vapor de sódio a alta pressão e seus componentes, uma vez que tal lâmpada é a recomendada pelo Programa Nacional de Iluminação Pública (ReLuz).

PALAVRAS-CHAVE

Harmônicos, Conservação de Energia, Iluminação Pública, Qualidade de Energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

A iluminação pública é um serviço relevante que visa garantir condições mínimas para o tráfego noturno de pedestres e veículos nos logradouros públicos, além de propiciar melhores condições de segurança e valorização dos espaços públicos urbanos.

Os programas de eficiência energética têm contemplado a iluminação pública, principalmente pelo fato dessa carga estar em funcionamento no horário de ponta, contribuindo para uma possível sobrecarga do sistema. Como a iluminação pública encontra-se conectada ao sistema de distribuição em baixa tensão, melhorias do ponto de vista da eficiência energética tem sido implementadas. Estas ações tornaram-se um importante alvo de investigação, no que se refere à qualidade da energia elétrica.

Com incentivos do PROCEL, no final de 1989 foram substituídas 284.000 lâmpadas incandescentes (150-200 W) por lâmpadas vapor de mercúrio (80 W), resultando numa economia de eletricidade da ordem de 114 GWh/ano (8).

O Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente (ReLuz), instituído pela ELETROBRÁS/ PROCEL, possui a meta de atingir até 2010 uma efficientização energética de 9,5 milhões de pontos de iluminação pública, além de uma expansão de 3 milhões de novos pontos. Esta meta visa gradativamente tornar eficiente toda a iluminação pública do Brasil. Dentre as ações do programa ReLuz está a substituição de lâmpadas dos tipos incandescentes, halógenas, mistas, vapor de mercúrio entre outras por lâmpadas vapor de sódio alta pressão, existindo ainda a recomendação para se utilizar reatores eletromagnéticos de alto fator de potência ou reatores eletrônicos, conforme (10).

A Tabela 1 mostra os valores de eficiência energética para alguns tipos de Lâmpadas utilizadas na iluminação pública (9).

TABELA 1 – eficiência energética das lâmpadas.

Tipo de lâmpada	Eficiência (Lúmens/watt)
Incandescente	10-20
Mista	17-25
Multivapores metálicos	69-115
Vapor de mercúrio	42-63
Vapor de sódio a alta pressão	68-140

Neste trabalho foram realizados estudos comparativos entre os tipos de lâmpadas, em seguida procedeu-se investigação minuciosa relacionada a lâmpada vapor de sódio e seus componentes. Isto se justifica pelo fato desta ter sido escolhida como lâmpada padrão de iluminação pública de acordo com o programa ReLuz.

2.0 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os fundamentos teóricos aqui apresentados têm a finalidade de permitir a obtenção de parâmetros associados à qualidade da energia elétrica, oriundos de grandezas efetivamente medidas (tensão e corrente). O equacionamento desenvolvido se aplica para a situação monofásica, em decorrência desta ser a característica das cargas investigadas.

A partir dos sinais instantâneos e periódicos (de período T) da tensão (v(t)) e da corrente (i(t)), conforme [1] e [2] (2), chega-se aos seus valores eficazes como mostram [3] e [4] (5).

$$v(t) = V_o + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(h\omega t + \alpha_h) \quad [1]$$

$$i(t) = I_o + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(h\omega t + \beta_h) \quad [2]$$

$$V = \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt \right]^{1/2} \quad [3]$$

$$I = \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt \right]^{1/2} \quad [4]$$

As grandezas V e I ainda podem ser obtidas em função de suas componentes harmônicas, conforme [5] e [6]:

$$V = \left[\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2 \right]^{1/2} \quad [5]$$

$$I = \left[\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2 \right]^{1/2} \quad [6]$$

Onde:

V - valor eficaz de tensão;

I - valor eficaz da corrente;

ω - frequência angular;

t_0 - instante inicial considerado;

h - ordem harmônica;

α_h - ângulo de fase da h-ésima harmônica de tensão;

β_h - ângulo de fase da h-ésima harmônica de corrente.

Elevando-se ambos os membros de [5] e [6] ao quadrado, as mesmas podem ser expressas de acordo com [7] e [8]:

$$V^2 = \sum_{h=0}^{\infty} V_h^2 = V_1^2 + V_H^2 \quad [7]$$

$$I^2 = \sum_{h=0}^{\infty} I_h^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad [8]$$

Onde:

$$V_H^2 = \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2 \text{ e } I_H^2 = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2$$

O produto de V e I de [3] e [4] resulta na potência aparente (S) de acordo com [9].

$$S = V I \quad [9]$$

O quadrado da potência aparente pode ser representado pelo produto entre [7] e [8], resultando em [10]:

$$S^2 = V_1^2 I_1^2 + V_1^2 I_H^2 + V_H^2 I_1^2 + V_H^2 I_H^2 \quad [10]$$

Pode-se reescrever [10] como uma soma de duas parcelas, conforme mostra [11] (7):

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad [11]$$

Sendo:

$$S_1^2 = V_1^2 I_1^2;$$

$$S_N^2 = V_1^2 I_H^2 + V_H^2 I_1^2 + V_H^2 I_H^2$$

Onde:

S_1 - componente fundamental da potência aparente;

S_N - componente não fundamental da potência aparente.

A potência ativa, que quantifica a potência elétrica que efetivamente será convertida em outra forma de energia é dada pelo valor médio do produto entre tensão e corrente instantâneos, conforme [12]:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) i(t) dt \quad [12]$$

A potência ativa também pode ser obtida em função das componentes harmônicas de tensão e corrente e seus respectivos defasamentos angulares, de acordo com (13):

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad [13]$$

Onde:

$\varphi_h = \alpha_h - \beta_h$ (diferença de fase do h-ésimo harmônico de tensão e corrente respectivamente).

A componente fundamental da potência aparente, presente em [11] pode ser reescrita em função das potências ativa fundamental e reativa fundamental, conforme [14]:

$$S_1 = [P_1^2 + Q_1^2]^{1/2} \quad [14]$$

Sendo:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\varphi_1);$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\varphi_1)$$

A relação entre a potência ativa fundamental e a componente fundamental da potência aparente resulta no fator de potência de deslocamento, como mostra [15] (4):

$$PF_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\varphi_1) \quad [15]$$

Para se conhecer o grau de aproveitamento da energia elétrica é preciso determinar o fator de potência verdadeiro (6), que é dado pela relação entre as potências ativa e aparente, conforme [16]:

$$PF = \frac{P}{S} \quad [16]$$

Quanto aos conteúdos harmônicos, torna-se possível quantificá-los no que se refere ao grau de distorção em relação a componente fundamental através da taxa de distorção harmônica total, como mostram [17] e [18] (1):

$$DHT_V = \left[\frac{V_H^2}{V_1^2} \right]^{1/2} \times 100(\%) \quad [17]$$

$$DHT_I = \left[\frac{I_H^2}{I_1^2} \right]^{1/2} \times 100(\%) \quad [18]$$

Onde:

DHT_V – Distorção harmônica total da tensão;

DHT_I – Distorção harmônica total da corrente.

Neste trabalho a frequência da fundamental tem o valor de 60 Hz, pois, trata-se do sistema elétrico brasileiro.

Analisando algumas componentes de potência, verifica-se que de [13], retirando os elementos relacionados à frequência fundamental, obtém-se a potência ativa harmônica descrita por [19]. Analogamente a potência reativa harmônica é dada por [20].

$$P_H = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h) = P - P_1 \quad [19]$$

$$Q_H = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\varphi_h) \quad [20]$$

A potência aparente harmônica é apenas uma das parcelas da potência aparente não fundamental descrita em [11], conforme [21]:

$$S_H = V_H I_H \quad [21]$$

As componentes da potência aparente descritas por [10] foram desmembradas por (3), onde eliminando o termo referente à frequência fundamental, tem-se a potência aparente não fundamental, dada por (22):

$$S_N = [D_1^2 + D_V^2 + S_H^2]^{1/2} \quad [22]$$

Onde:

$D_1 = V_1 I_H$ (Potência de distorção de corrente);

$D_V = V_H I_1$ (Potência de distorção de tensão).

A energia elétrica consumida por uma determinada carga pode ser obtida através da integral da potência ativa durante um dado intervalo de tempo, como mostra [23]:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P \, dt \quad [23]$$

3.0 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ESTUDO DE CASOS

Montou-se em laboratório uma bancada contendo luminárias, lâmpadas e dispositivos acessórios com a finalidade de realizar medições para dois estudos de caso. Como instrumento de medidas elétricas utilizou-se o analisador digital de energia, Power Platform® PP-4300 da Dranetz BMI.

A tensão de alimentação das cargas investigadas foi proveniente da rede secundária de distribuição, não sendo utilizada nenhuma fonte externa, isto porque procurou-se estabelecer condições reais de funcionamento para as cargas analisadas.

Seguem estudos de casos realizados, aqui denominados de Caso 1 e Caso 2.

3.1 CASO 1

O objetivo da realização deste caso é verificar o comportamento elétrico de cada tipo de lâmpada possível de ser utilizada na iluminação pública. É oportuno dizer que as lâmpadas de descarga utilizaram reatores eletromagnéticos de alto fator de potência.

Neste caso foram efetuadas medições instantâneas dos sinais de tensão e corrente na condição de regime permanente para as seguintes cargas:

1. lâmpada incandescente (150 W);
2. lâmpada mista (160 W);
3. lâmpada a vapor metálico (70 W);
4. lâmpada a vapor de mercúrio (80 W);
5. lâmpada a vapor de sódio a alta pressão (70 W).

3.2 CASO 2

Neste caso, considerou-se apenas a lâmpada vapor de sódio a alta pressão, em decorrência do fato desta ter sido indicada pelo programa ReLuz como lâmpada padrão de iluminação pública. As cargas diferenciam-se quanto a potência, tipo de reator, além do relé fotoelétrico no qual foram testados duas marcas, denominadas aqui de X e Y, desta forma permite-se verificar a influência dos acessórios de iluminação no comportamento de cada conjunto. Assim sendo, as cargas serão relacionadas conforme descrição a seguir:

A₇₀ - lâmpada a vapor de sódio a alta pressão 70 W com reator eletromagnético de alto fator de potência e relé fotoelétrico da marca X;

B₇₀ - lâmpada a vapor de sódio a alta pressão 70 W com reator eletromagnético de alto fator de potência e relé fotoelétrico da marca Y;

C₇₀ - lâmpada a vapor de sódio a alta pressão 70 W com reator eletrônico de partida direta com relé fotoelétrico embutido;

D₇₀ - lâmpada a vapor de sódio a alta pressão 70 W com reator eletrônico de partida escalonada com relé fotoelétrico embutido;

Todas estas configurações descritas, foram repetidas para a lâmpada a vapor de sódio alta pressão de 150 W, sendo seus respectivos conjuntos analogamente nomeadas como: A₁₅₀, B₁₅₀, C₁₅₀ e D₁₅₀.

Vale salientar que neste caso foram feitos registros das grandezas elétricas em intervalos de 10 em 10 segundos, durante 23 minutos, tempo este suficiente para que os conjuntos de iluminação pudessem atingir a situação de regime permanente. Desta forma, tornou-se possível verificar o comportamento transitório dos referidos conjuntos de iluminação. Com o intuito de comparar energia e iluminância, utilizou-se ainda um luxímetro em uma montagem, como mostra a Figura 1.

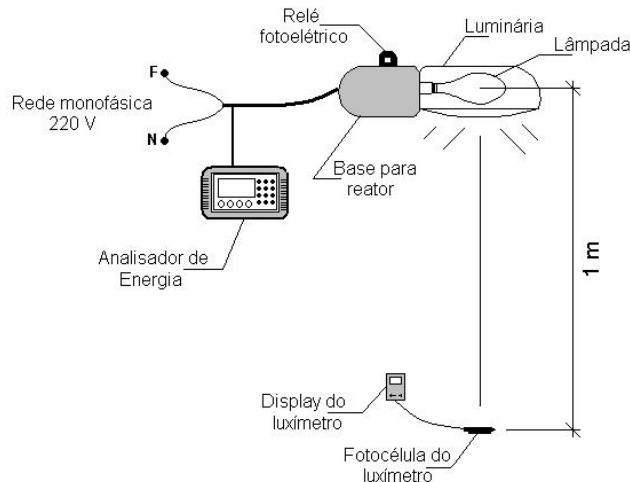


FIGURA 1 - Esquema ilustrativo dos componentes utilizadas nos ensaios do CASO 2.

4.0 - PROCESSAMENTO DE SINAIS E RESULTADOS

O processamento dos dados obtidos através das medições, envolveu a utilização de rotinas computacionais aplicando métodos da análise numérica, transformada rápida de Fourier (FFT) além de cálculos algébricos e vetoriais, conforme exposto na seção II deste trabalho.

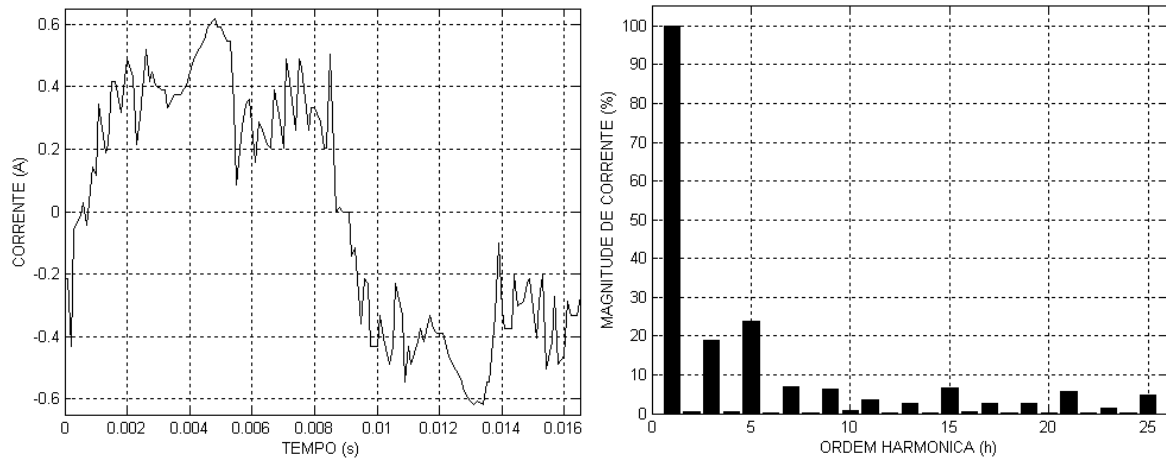
Antes que as cargas fossem colocadas em operação, foi medida a tensão a vazio da rede, verificando que esta possuía naqueles instantes uma DHT não superior a 2,9 %. Entre os harmônicos de ordem superior, verificou-se a predominância da componente de 5ª ordem, representando no máximo 2,68% da fundamental.

4.1 Resultados – CASO 1

Devido ao fato da lâmpada incandescente ser uma carga considerada linear, o formato de onda de corrente é similar à da tensão aplicada sobre a mesma, logo o espectro de frequência da corrente é bastante próximo do espectro da tensão, o mesmo não ocorre com as lâmpadas de descarga, como a vapor de mercúrio e a vapor de sódio.

A lâmpada a vapor de sódio a alta pressão, destacada pelo programa ReLuz, apresenta um valor de DHT maior que a de vapor de mercúrio. A Figura 2 ilustra graficamente o perfil da onda de corrente da mencionada lâmpada a vapor de sódio.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos para as lâmpadas do CASO 1. Vale lembrar que a legenda da numeração dos tipos de lâmpadas foi descrita na seção 3.



(a) (b)
 FIGURA 2 – Gráficos da onda de corrente referente a lâmpada a vapor de sódio a alta pressão:
 (a) Onda no domínio do tempo, (b) Espectro harmônico.

TABELA 2 - Resultados do CASO 1

	Carga				
	1	2	3	4	5
S (VA)	140,57	163,80	85,19	84,79	82,85
S ₁ (VA)	140,44	157,62	79,88	81,44	77,14
S _H (VA)	0,13	1,26	0,87	0,67	0,84
S _N (VA)	6,04	44,57	29,60	23,60	30,21
P (W)	140,55	156,87	77,27	81,27	74,98
P ₁ (W)	140,43	156,54	77,40	81,33	75,11
P _H (W)	0,12	0,33	-0,14	-0,06	-0,13
Q _t (var)	-1,25	18,41	19,74	4,16	17,60
Q _H (var)	-0,01	-0,01	-0,60	-0,34	-0,49
D _v (vad)	0,06	1,22	0,62	0,57	0,67
D ₁ (vad)	4,54	44,33	29,49	23,48	30,12
D _H (vad)	0,06	1,22	0,62	0,57	0,67
DHT _v (%)	2,84	2,84	2,95	2,83	2,79
DHT ₁ (%)	3,23	28,12	36,92	28,83	39,05
FP	1,00	0,96	0,91	0,96	0,90
FP1	1,00	0,99	0,97	1,00	0,97

4.2 Resultados – CASO 2

Os resultados obtidos da análise transitória, permitiram verificar o comportamento das variações de potência ativa e iluminância, ambas em função do tempo, como pode ser visto na Figura 3.

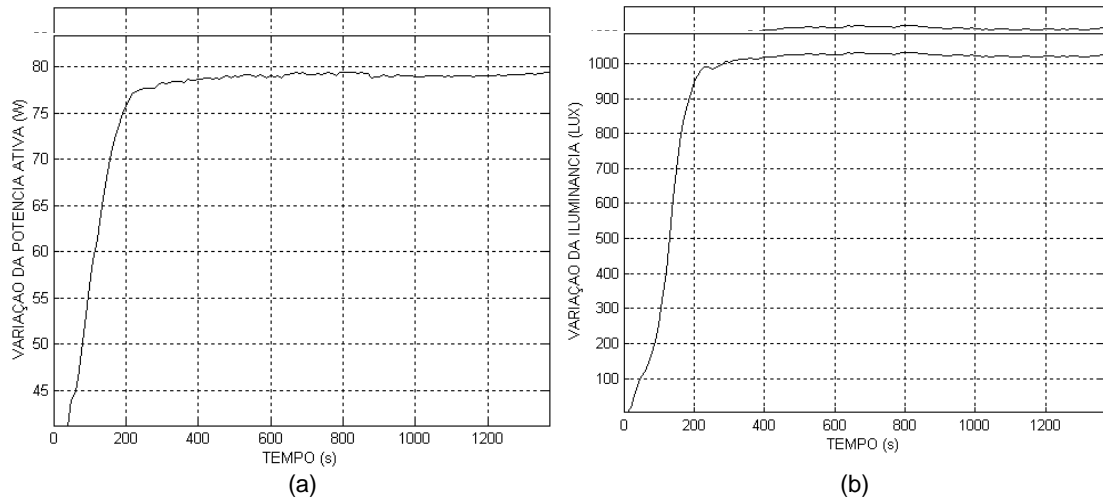


FIGURA 3 – Gráficos do comportamento transitório da carga A₇₀ : (a) potência ativa x tempo; (b) iluminância x tempo.

Uma substituição do dispositivo de acionamento (relé fotoelétrico), neste sistema, provocou uma redução da potência em regime permanente, no entanto o mesmo ocorre com a iluminância, como mostra a Figura 4.

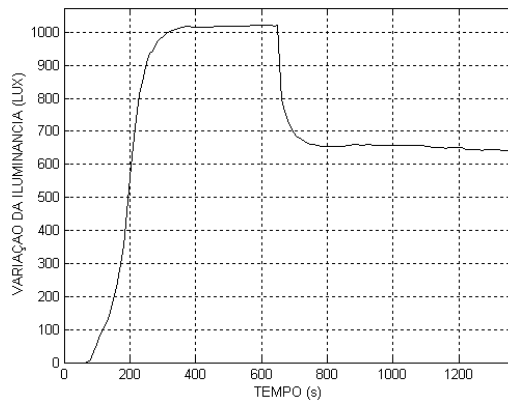


FIGURA 4 - Iluminância x tempo – carga B₇₀.

Quanto às distorções harmônicas, a medida que os acessórios de iluminação são trocados, os níveis de distorção também modificam-se. A pior situação entre as amostras ensaiadas ocorre no conjunto F₁₅₀, cujo espectro harmônico da corrente é mostrado na Figura 5.

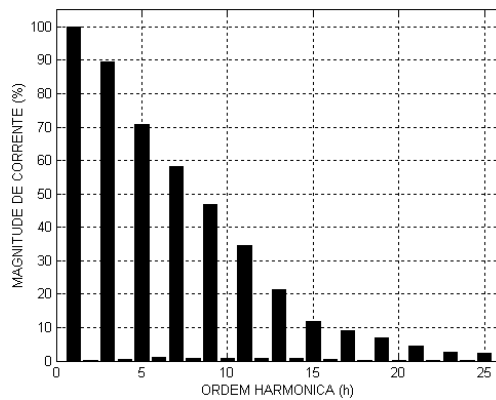


FIGURA 5 - Espectro harmônico – carga F₁₅₀.

Os resultados quantitativos do CASO 2 são mostrados na Tabela 3, onde são apresentadas informações obtidas para as lâmpadas vapor de sódio a alta pressão de 70 W e 150 W respectivamente, de acordo com cada conjunto de iluminação.

TABELA 3 - Resultados do CASO 2: Lâmpadas a vapor de sódio a alta pressão 70 W e 150 W.

Carga								
	A₇₀	B₇₀	C₇₀	D₇₀	A₁₅₀	B₁₅₀	C₁₅₀	D₁₅₀
S (VA)	81,98	66,03	94,09	64,71	169,10	127,79	233,50	208,44
S _i (VA)	77,77	62,02	93,60	64,20	164,03	120,25	154,90	122,39
S _H (VA)	0,68	0,62	0,22	0,24	0,86	1,46	4,06	5,69
P (W)	77,39	60,25	92,33	62,49	161,73	116,51	141,70	112,58
P _i (W)	77,46	60,24	92,24	62,40	161,75	116,61	142,99	114,80
P _H (W)	-0,07	0,01	0,09	0,09	-0,03	-0,10	-1,28	-2,22
Q _i (var)	6,93	14,77	-15,94	-15,09	27,23	29,36	-59,57	-42,44
Q _H (var)	-0,48	-0,46	-0,14	-0,13	-0,50	-0,85	0,24	0,58
D _v (vad)	2,04	1,66	2,28	2,05	3,41	4,02	3,61	4,14
D _i (vad)	25,93	22,98	9,06	7,58	41,56	43,74	174,62	168,50
FP	0,94	0,91	0,98	0,97	0,96	0,91	0,61	0,54
FP _i	1,00	0,97	0,99	0,97	0,99	0,97	0,92	0,94
DHT _v (%)	2,63	2,68	2,44	3,20	2,08	3,34	2,33	3,38
DHT _i (%)	33,35	37,06	9,67	11,81	25,34	36,37	112,73	137,67
E (Wh)	28,76	24,61	31,43	23,14	57,73	47,84	51,15	41,82
Ilu (lux)	1025	653	1340	675	3130	1940	2960	1510

5.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu verificar que a substituição das diversas lâmpadas de iluminação pública por vapor de sódio a alta pressão, provocará um aumento nos índices de distorções harmônicas.

Os acessórios de iluminação influenciam diretamente no efeito da carga como um todo, tanto no que se refere aos níveis harmônicos, quanto aos níveis de iluminação. Verificou-se também que o relé fotoelétrico da marca denominada Y, reduz a energia consumida por seu conjunto tanto no regime transitório, quanto no permanente, no entanto a iluminância cai abruptamente propiciando um resultado pior no nível de iluminação.

Vale salientar que, o programa Reluz indica a substituição de componentes de iluminação, de forma a ter um sistema mais eficiente, desde que mantenha os níveis de iluminação adequados. Foi verificado que alguns destes dispositivos encontrados no mercado, além de piorar o grau de iluminação, contribuem para o comprometimento da qualidade de energia nos sistemas secundários de distribuição. Do ponto de vista de confiabilidade não seria recomendável integrar todas as funções de proteção em um único equipamento, porém essa definição traria uma enorme simplificação no projeto e grandes facilidades de alterações ou implementações de novas funcionalidades, uma vez que poderiam ser feitas internamente aos equipamentos por lógicas digitais.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Beaty, H. W., Electrical Power Systems Quality, Ed. McGraw-Hill, USA, 1995.
- (2) Arseneau, R. et.al., IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effects on Meter Performance and Definitions of Power, Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11, USA, 79-87, 1996, pp. 79-87.
- (3) Emanuel, A. E., Apparent Power: A Practical Approach to its Resolution, 1998, pp. 1-6.
- (4) Dias, G. A. D., Harmônicas em Sistemas Industriais. EDIPUCRS, Porto Alegre, 1998.
- (5) Dorf, Richard C., Svoboda, James A., Introduction to Electric Circuits, 5ª Edition, New York: John Wiley & Sons, Inc. 2001
- (6) Santos, Euler B., Moraes Jr., Gentil M., Alves, Antônio C. Baleeiro, Medeiros, Carlos A. G., Harmônicas Provocadas por Cargas de Instalações Elétricas Residenciais em Sistemas de Distribuição de Energia. Anais do Congresso Brasileiro de Automática. Natal, RN, 2002, pp. 323-328.
- (7) Moraes Jr., Gentil M., Santos, Euler B., Antônio C. Baleeiro, Ribeiro, Milton A., Nielson, Rafael, Harmonic Distortions Caused by Radio and Television Broadcasting Stations on Secondary Distribution Systems. Proceedings of the Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP'2003, Fortaleza, CE, 2003, pp. 299-304.
- (8) Geller, Howard. O Uso Eficiente da Eletricidade: Uma Estratégia de desenvolvimento para o Brasil. INEE – Rio de Janeiro, 1994.
- (9) Niskier, J, Macintyre, A. J., Instalações Elétricas. 4. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2000.
- (10) ELETROBRÁS e PROCEL - Manual do Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente – ReLuz. Rio de Janeiro, 2003, pp 1-45.