



21 a 25 de Agosto de 2006
Belo Horizonte - MG

Eficiência Energética versus Qualidade da Energia Elétrica: Um Estudo de Caso em Prédios Públicos

Eng. Milton de Souza Ochiuto

Arnulfo Barroso de Vasconcellos

Mário Kiyoshi Kawaphara

Roberto Apolonio

Edson Raupp Junior

Cemat-Centrals Elétricas Matogrossenses S.A. Universidade Federal de Mato Grosso
milton.ochiuto@redecemat.com.br

arnulfo@cpd.ufmt.br,
apolonio@cpd.ufmt.br

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os resultados decorrentes da aplicação do programa de conservação e eficiência energética proposto pelo governo federal e implantado na Universidade Federal de Mato Grosso-UFMT, com a substituição inicial de 2500 luminárias de alto rendimento, cada qual contendo duas lâmpadas fluorescentes de 32 W e reatores eletrônicos. Trata-se da avaliação da economia do consumo de energia elétrica através do uso de lâmpadas fluorescentes mais econômicas e luminárias mais eficientes, aliadas ao uso de reatores eletrônicos com menores perdas. Além do aspecto relacionado às melhorias da iluminância no recinto, o trabalho procura identificar e quantificar os efeitos relacionados com a qualidade da energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE

Conservação da energia elétrica, correntes harmônicas no neutro, distorção de corrente, eficiência energética, qualidade da energia elétrica.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade do crescimento do produto interno de uma nação exige o incremento das atividades industriais, comerciais e de serviços, bem como a atividade primária: agricultura e pecuária. O crescimento da produção requer quantidades cada vez maiores de energia, sendo que a energia elétrica ocupa destaque no quadro de insumos energéticos. O momento vivido recentemente no Brasil, no qual se impôs a adoção de medidas para a redução do consumo, bem como a ameaça de interrupção do fornecimento, pela escassez da energia elétrica, despertou nas instituições e na sociedade a necessidade de se tomar medidas que fazem uso mais eficiente e racional da energia elétrica. Diante da crise no abastecimento de energia elétrica, o Presidente da Câmara de Gestão da Crise de Energia – CGE criou, em 10 de julho de 2001, o Comitê Técnico para Eficientização do Uso da Energia com o objetivo de propor medidas para conservação e racionalização do uso de energia elétrica.

A utilização racional da energia elétrica requer dentre outras ações, a escolha e utilização de equipamentos de maior eficiência, que em geral exigem um investimento inicial maior. Dentre as oportunidades para uma eventual redução do consumo (ou conservação) da energia elétrica estão os dispositivos utilizados na iluminação. Apesar da não existência de estudos mais detalhados, estima-se que 20% da energia elétrica consumida no Brasil e mais de 40% da energia elétrica do setor de comércio e serviço destinam-se à iluminação. Hoje, as indústrias ligadas a iluminação, movimentam aproximadamente um bilhão de dólares anuais no Brasil, e as empresas de eletricidade devem investir cerca de dez dólares na ampliação do fornecimento de energia elétrica para cada um dólar adicional gasto pelo consumidor em lâmpadas incandescentes. Neste sentido torna-se evidente quando da utilização do sistema de iluminação artificial a preocupação em evitar ao máximo o desperdício, normalmente proporcionado pela ineficiência na fonte de luz, super dimensionamento da luz artificial, falta de manutenção, posicionamento incorreto das luminárias, comandos não apropriados, ausência de pinturas adequadas e a não utilização da iluminação natural.

Dentre as ações propostas pelo governo Federal, cabe destacar os projetos para a otimização de sistemas motrizes, modernização tecnológica, incentivo ao uso de coletores solar e a promoção de ações de eficientizações em prédios públicos. Considera-se prédio público as edificações ocupadas pelos órgãos públicos federais, estaduais e municipais, pelas empresas públicas e de economia mista. Dentro deste contexto, cabe ressaltar a proposta de implantação do projeto de eficientização energética na Universidade Federal de Mato Grosso, com a substituição inicial de 2500 luminárias, com refletores de alto rendimento e lâmpadas fluorescentes de 32 W, associadas às substituições dos reatores eletromagnéticos pelos eletrônicos de menor consumo, no sentido de conseguir uma redução substancial no consumo de energia elétrica, além de se buscar a capacitação de agentes de conservação de energia e da conscientização dos funcionários. Neste sentido este trabalho tem como objetivos avaliar os sistemas artificiais hoje existentes, assim como, avaliar o potencial efetivo na economia do consumo de energia elétrica. Além do aspecto relacionado às melhorias nos índices luminotécnicos, o trabalho procura identificar e quantificar os efeitos relacionados com a qualidade da energia elétrica.

2. EQUIPAMENTOS DE ILUMINAÇÃO

2.1 Os equipamentos de iluminação existentes

2.1.a Luminárias e Lâmpadas

A iluminação artificial existente é realizada principalmente através do uso de lâmpadas fluorescentes. Em geral, os equipamentos de iluminação possuem as seguintes características:

- Luminárias para duas ou quatro lâmpadas fluorescentes de 40W, para ser usada com difusor de plástico transparente martelado, cujo fator de depreciação é da ordem de 0,7 (fig. 1);
- As lâmpadas fluorescentes são do tipo universal (super ou extra luz do dia especial, temperatura de cor de 6000-6400K), com fluxo luminoso inicial de 2700 lumens;

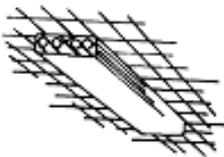
Luminária		Teto	75%			50%			Descrição
		Paredes	50%	30%	10%	50%	30%	10%	
Fator de depreciação	Tipo	Índice do local	Coeficientes de utilização						
(18)  $d = 0,70$	↑	J	0,22	0,17	0,14	0,21	0,16	0,14	Luminária de plástico $l = 1,1 h$
		I	0,27	0,22	0,19	0,26	0,22	0,19	
		H	0,32	0,27	0,23	0,30	0,26	0,23	
		G	0,36	0,31	0,28	0,34	0,30	0,27	
		F	0,39	0,34	0,31	0,37	0,33	0,30	
		E	0,43	0,39	0,36	0,41	0,37	0,35	
		D	0,46	0,42	0,39	0,45	0,40	0,38	
		C	0,48	0,45	0,42	0,45	0,43	0,40	
		B	0,50	0,48	0,46	0,48	0,46	0,44	
		A	0,52	0,49	0,48	0,50	0,48	0,46	

Figura 1 – Tipo de luminária existente e dados para o projeto luminotécnico¹.

2.1.b Reatores

Os reatores utilizados são do tipo eletromagnético de 2x40W, partida rápida, tensão 118-127V, numa variedade de modelos e fabricantes, cujas perdas variam entre 12 a 18W e, na sua maioria, com fator de potência $\geq 0,92$.

2.2 Os novos equipamentos de iluminação

2.2.a Luminárias e Lâmpadas

As luminárias que irão substituir aquelas existentes possuem as seguintes características:

- Tipo de sobrepor, com corpo em chapa de aço tratada e pintada;
- Refletor facetado em alumínio anodizado e brilhante de alta refletância e alta pureza (99,85%);
- Soque de engate rápido, rotor de segurança e contatos em bronze fosforoso.

A figura 2 mostra a curva de distribuição da intensidade luminosa para a luminária a ser utilizada.

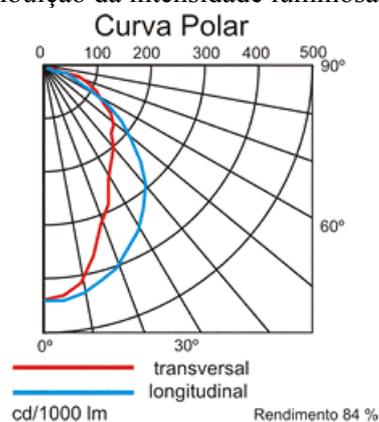


Figura 2 – Curva de distribuição da Intensidade luminosa da nova luminária.

2.2.b Reatores

Os reatores que substituirão aqueles existentes nas instalações são do tipo eletrônico, para duas lâmpadas de 32W/127-220V. A tabela 1 resume as principais características elétricas desse dispositivo.

Tabela 1 – Características do Reator Eletrônico

Tensão (V)	Lâmpada(s)	P _{TOTAL} (W)	I _N (A)	F.Pot.	Fator de Fluxo Luminoso
127	2x32W	67	0,53	0,98	1,0
220	2x32W	63	0,30	0,98	1,0

3. ANÁLISE DA POTÊNCIA ATIVA

Para as análises das potências requeridas procede-se neste caso especificamente às lâmpadas e aos reatores. Quanto às lâmpadas são avaliadas, na maioria das vezes, através da sua eficiência luminosa em lumens por watts. No entanto, este índice não é adequado para averiguar o seu real rendimento como fonte de luz. Dependendo da fonte luminosa, estes números são relativamente elevados, não permitindo traçar nenhum paralelismo quanto ao seu comportamento, no sentido de se buscar um máximo aproveitamento da energia. Ao avaliar as principais fontes artificiais de luz em função do seu

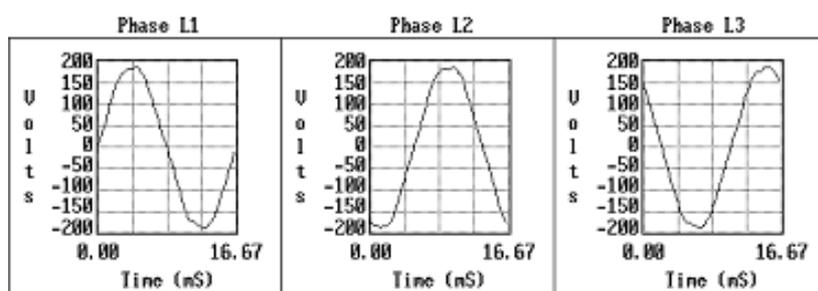
rendimento médio, observa-se que o que apresenta maior rendimento é a lâmpada vapor de sódio de alta pressão com 14,58%, enquanto que as incandescentes com rendimentos extremamente críticos de 2,23%. Na realidade o rendimento médio das lâmpadas fluorescentes é 4,58 vezes o rendimento médio das incandescentes. São números bastante significativos quando avaliados entre eles, no entanto, todas as fontes artificiais de luz via energia elétrica são altamente ineficientes para fins de iluminação. Mas considerando-se as fontes atuais existentes as fluorescentes tornam-se umas das alternativas mais significativas para atendimentos de salas de aulas, pois apresentam um bom índice de reprodução de cores, tem um rendimento bem melhor que as incandescentes e um custo de aquisição plenamente justificável.

Os resultados apresentados nas tabelas 2 referem-se às medições realizadas para um conjunto de 189 luminárias (2x32W), pertencente ao QDL do Bloco D (FAET).

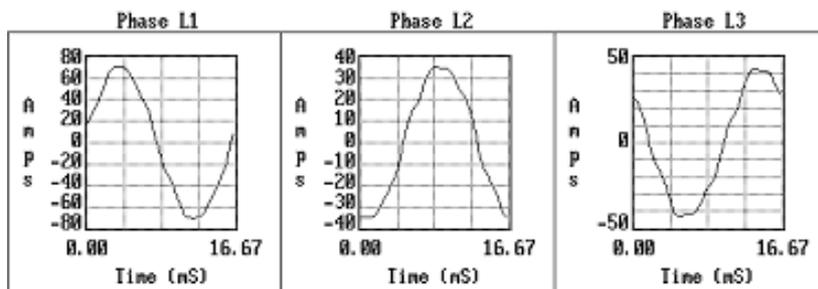
A figura 3 mostra as formas de onda das tensões e correntes trifásicas presentes no quadro de distribuição de luz (QDL) sob medição. Observa-se uma ligeira deformação nas formas de ondas das tensões e correntes, conforme evidenciado na Tabela 2, com valores máximos da THDV de 3,59% na fase B e THDI de 5,95% na fase C, valores bem abaixo do permitido pela norma.

Tabela 2 - Principais grandezas elétricas medidas no QDL

Grandeza	fases		
	A	B	C
Tensão (V)	133,63	134,77	134,27
Corrente (A)	46,37	25,29	28,24
P. ativa (W)	6130,00	3376,67	3753,33
P.Reativa (VAr)	-713,33	-316,67	-430,00
P.Aparente (VA)	6196,67	3406,67	3793,33
F.potência	-0,989	-0,991	-0,989
THDV(%)	3,17	3,52	2,96
THDI(%)	4,64	5,39	6,50



(a)



(b)

Figura - 3 (a) Formas de onda das tensões presentes no QDL; (b) Formas de onda das correntes nas três fases. (medição para um conjunto de 189 luminárias 2x32W/127V).

Para uma avaliação global do sistema sob a ótica da diminuição do consumo de energia, calculou-se e mediu-se a potência ativa solicitada do sistema de suprimento para a situação antes e após as substituições das luminárias, considerando um conjunto de 189 luminárias localizadas no Bloco D (FAET), pertencente aos circuitos de distribuição de luz (QDL). Os resultados encontram-se evidenciados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores calculados e medidos da potência ativa trifásica no QDL

Grandeza	Valor calculado (antes da troca das luminárias)	Valor medido (após a troca das luminárias)
Potência ativa total (W)	20519,00	13260,00

De acordo com os dados da tabela 3, após a substituição pelas luminárias de alto rendimento, com reatores eletrônicos e lâmpadas de 32W, houve uma diminuição significativa na potência ativa, passando dos 20.519W para somente 13.260W, evidenciando uma redução de aproximadamente 33,9%. Além da diminuição da potência ativa, observou-se um fator de potência próximo à unidade, aliviando o sistema elétrico e conseqüentemente diminuindo as perdas de energia.

4. ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A instalação de dispositivos mais eficientes, sob a ótica do consumidor normalmente é analisada sob o ponto de vista puramente “econômico”, tomando-se por base somente à redução do consumo e demanda da componente ativa. Entretanto, outros aspectos devem ser considerados, principalmente em se tratando de dispositivos com características não lineares, que alteram muitas vezes significativamente o comportamento do sistema elétrico como um todo. Neste sentido, após a instalação de novos equipamentos, procederam-se às medições dos parâmetros, no sentido de avaliar o comportamento do sistema elétrico sob a ótica da qualidade. Para sistema de iluminação fluorescente tubular, o reator é o equipamento expressivo na interferência do sistema sob o princípio da “poluição” na instalação elétrica.

A figura 4 mostra a forma de onda da tensão e corrente num conjunto consistindo de um reator eletromagnético e duas lâmpadas de 40W. É visível a não-linearidade presente na forma de onda da corrente.

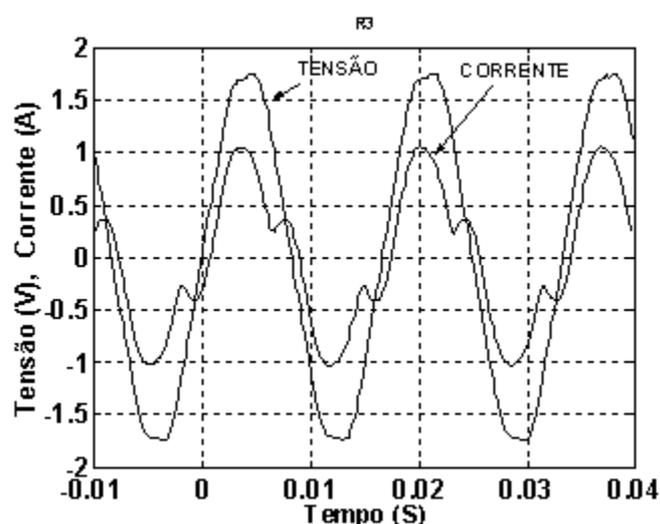


Figura 4 - Tensão aplicada e corrente no conjunto reator e lâmpadas (2x40W); Reator eletromagnético; (Nota: multiplicar a escala de tensão por 100).

A tabela 4 mostra o resultado da decomposição harmônica da corrente para reatores eletromagnéticos de três diferentes fabricantes encontrados na instalação de iluminação antes da troca das luminárias. A forma de onda da corrente da figura 4 está associada ao conjunto reator-lâmpada 1 na tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos testes com reatores eletromagnéticos; Decomposição harmônica da corrente - conjunto 2x40W/127V

Conj. Reator-lâmpada	Ordem harmônica da corrente (A) (rms)					I _{TOTAL} (rms)	THDI (%)
	Fund	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a		
1	0,581	0,140	0,057	0,020	0,010	0,601	26,30
2	0,640	0,174	0,053	0,018	0,009	0,665	28,59
3	0,772	0,077	0,070	0,025	0,012	0,779	13,95

A figura 5 mostra a forma de onda da tensão e da corrente num conjunto reator eletrônico e duas lâmpadas de 32W, a serem instalados em substituição aos dispositivos existentes.

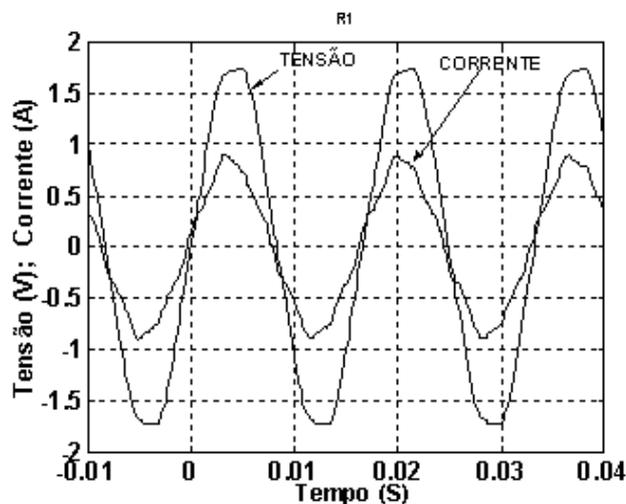


Figura 5 - Tensão aplicada e corrente no conjunto reator e lâmpadas (2x32W); Reator eletrônico (Nota: multiplicar a escala de tensão por 100).

Seguindo o procedimento utilizado para o reator eletromagnético, a tabela 5 sintetiza a decomposição harmônica da corrente para três reatores eletrônicos de diferentes fabricantes. A forma de onda da corrente da figura 5 está associada ao conjunto reator-lâmpada 1 na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados dos testes com reatores eletrônicos; Decomposição harmônica da corrente - conjunto 2x32W/127V

Conj. Reator-lâmpada	Ordem harmônica da corrente (A) (rms)					I _{TOTAL} (rms)	THDI (%)
	Fund	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a		
1	0,588	0,021	0,024	0,024	0,008	0,589	6,92
2	0,486	0,013	0,017	0,016	0,000	0,487	5,50
3	0,581	0,038	0,025	0,028	0,008	0,588	9,30

Observa-se nas Tabelas 4 e 5, que a decomposição harmônica das correntes nos reatores eletromagnéticos apresentaram uma distorção harmônica total de corrente (THDI) bastante superior a distorção provocada pelos reatores eletrônicos.

A figura 6 apresenta os resultados dos testes de tensão aplicada ao conjunto 1 da tabela 5. A corrente absorvida pelo conjunto foi medida e registrada para três valores de tensão aplicada: 0,93; 1,0 e 1,05 da tensão nominal.

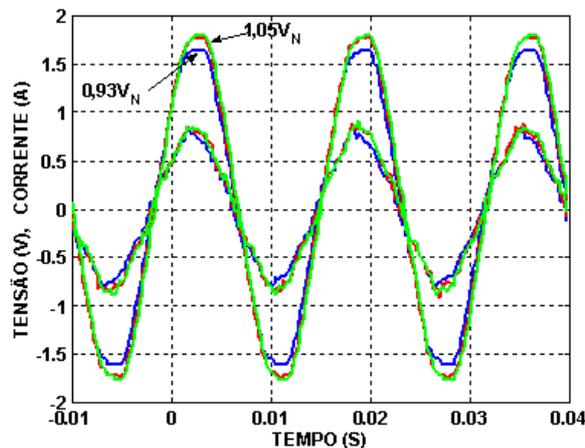


Figura 6 – Formas de onda das tensões e correntes no reator eletrônico.

A tabela 6 resume a decomposição harmônica da corrente eficaz no conjunto reator e lâmpada para os três valores de tensão aplicada: 0,93; 1,0 e 1,05 da tensão nominal.

Tabela 6 – Decomposição harmônica das correntes no conjunto 1 da tabela 5 para diferentes valores eficazes da tensão aplicada

Tensão	I (rms) (A)	Correntes harmônicas (RMS)								THDI (%)
		Fund.	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	
0,93V _N	0,528	0,527	0,015	0,020	0,017	0,006	0,003	0,003	0,001	5,91
1,0V _N	0,566	0,565	0,021	0,015	0,020	0,006	0,003	0,001	0,001	5,97
1,05V _N	0,571	0,570	0,023	0,024	0,015	0,005	0,001	0,001	0,003	6,54

Os resultados mostrados na tabela 6 revelam pequenas variações na taxa de distorção harmônica da corrente com o aumento ou a diminuição da tensão aplicada ao equipamento. Com o aumento da tensão somente houve acréscimo mais expressivo na componente de 5^a harmônica. Em se tratando de sistemas monofásicos além da influência do THDI, a análise da componente de terceira harmônica é fundamental, pois esta componente harmônica de cada fase (R, S e T), se soma algebricamente no neutro, proporcionando elevadas correntes que poderão interferir em outros sistemas e principalmente afetar significativamente na capacidade térmica do condutor neutro. Neste sentido, os reatores eletrônicos apresentam uma melhora bastante significativa.

A figura 7 mostra as formas de onda e as respectivas correntes para três valores diferentes de tensões aplicadas ao conjunto reator eletromagnético e lâmpadas. Os ensaios foram realizados no conjunto 1 (reator e lâmpadas) da tabela 4. A tabela 7 resume numericamente a decomposição harmônica das correntes drenada pelo dispositivo para os diferentes valores de tensão aplicada. Os dados revelam mudanças mais significativas no valor da componente fundamental e na 5^a harmônica, porém o valor da taxa de distorção total de corrente permanece em torno dos 26%.

Há que se ressaltar que a forma de onda da tensão aplicada para o ensaio já possui uma pequena distorção, caracterizada pela presença da 5^a e da 7^a harmônicas de tensão.

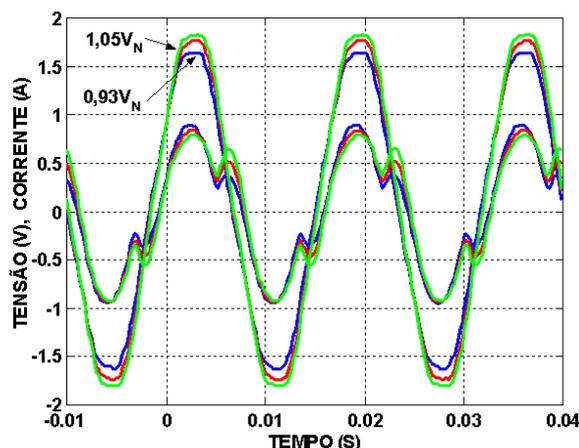


Figura 7 – Formas de onda das tensões e correntes no reator eletrônico.

Tabela 7 – Decomposição harmônica das correntes no conjunto 1 da tabela 4 para diferentes valores da tensão eficaz aplicada

Tensão	I (rms) (A)	Correntes harmônicas (RMS)								THDI (%)
		Fund.	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	
0,93V _N	0,594	0,575	0,138	0,047	0,020	0,011	0,006	0,005	0,003	25,65
1,0V _N	0,597	0,578	0,138	0,057	0,021	0,012	0,006	0,005	0,003	26,13
1,05V _N	0,601	0,581	0,138	0,067	0,024	0,012	0,006	0,006	0,003	26,82

5. ANÁLISE DO NÍVEL DE ILUMINÂNCIA

Além da preocupação em se obter sistemas mais eficientes, com índices de qualidade pré-definidos pelas normas, a energia elétrica em si, normalmente não atende as nossas necessidades devendo-se, portanto, ser transformada em outra forma de energia útil. Especificamente num sistema de iluminação, o objetivo final é atender a um ambiente típico com iluminação artificial, com índices pré-definidos pelas normas. Neste contexto, além da preocupação no consumo e na qualidade da energia elétrica, torna-se necessária avaliar se o nível de iluminância do local atende os quesitos mínimos especificados pelas normas.

Para avaliação do nível de iluminância utilizaram-se as recomendações da NBR 5413². Foram realizadas medições antes e após a troca das luminárias. No geral, substituiu-se luminárias contendo 4 lâmpadas de 40W e reatores eletromagnéticos, cujas características podem ser disponibilizadas, por luminárias de alto rendimento de 2x32W e com reator eletrônico. Apesar das substituições das luminárias de 4x40 por 2x32, as iluminâncias ficaram bem acima das condições iniciais.

A tabela 8 sintetiza os resultados das medições realizadas em uma das salas de aula representativa do conjunto de salas nas quais se efetuou a troca das luminárias e lâmpadas. A figura 8 mostra um gráfico tridimensional dos níveis de iluminância apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Níveis de iluminância na sala de aula (antigas luminárias)

Coordenada (y) - Comprimento (m)	Coordenada (x) - Largura (m)						
	0.675	1.25	2.40	3.55	4.7	5.85	6.475
	Nível de Iluminamento (lux)						
0.90	170	190	200	190	200	190	170
1.80	227	281	339	281	339	281	227
3.55	225	284	320	284	320	284	225
5.30	227	281	339	281	339	281	227
6.20	170	190	200	190	200	190	170

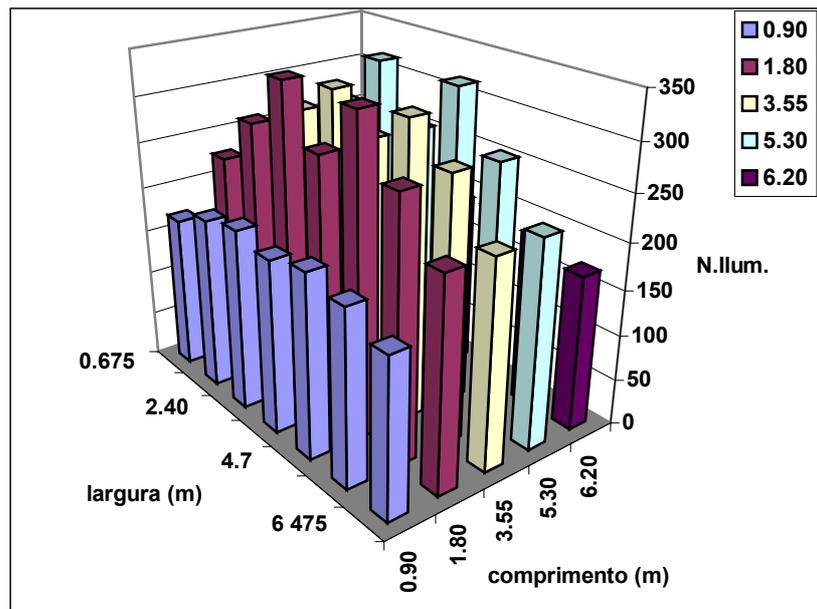


Figura 8 – Níveis de iluminância com as antigas luminárias; dimensões do recinto: larg=7,10; compr=7,10 m e altura=3,00 m.

As seis luminárias existentes estão localizadas nas coordenadas: (1,25; 1,80); (3,55; 1,80); (5,85; 1,80); (1,25; 5,30); (3,55; 5,30); (5,85; 5,30), conforme figura 9. Os maiores índices de iluminância ocorrem ao longo do alinhamento das luminárias (coordenada y) e entre as luminárias.

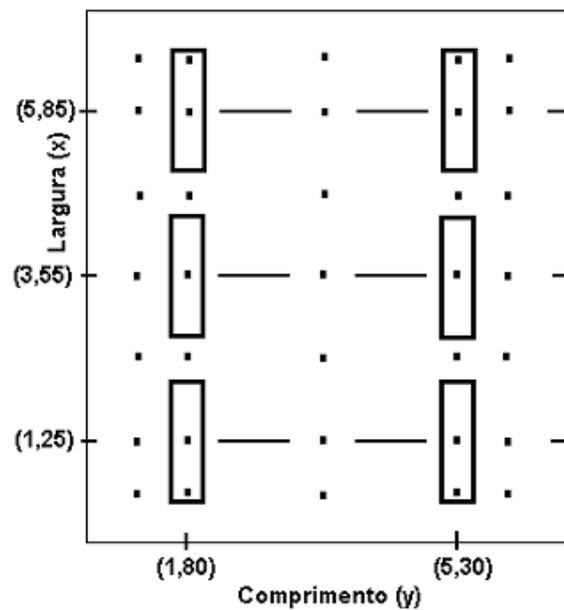


Figura 9 – Distribuição das luminárias (dimensões: larg=7,10; compr=7,10 e altura=3,0 m).

A tabela 9 apresenta os valores dos níveis de iluminância medidos no mesmo recinto, porém com as novas luminárias. Como esperado observa-se um expressivo aumento na iluminância, principalmente ao longo do eixo das luminárias. As novas luminárias possuem um fator de utilização 50% superior em relação às antigas luminárias. Possuem, também, um melhor rendimento e uma curva de distribuição da intensidade luminosa mais concentrada.

Tabela 9 – Níveis de Iluminância (novas luminárias)

Comprimento (m)	Largura (m)						
	0.675	1.25	2.40	3.55	4.7	5.85	6.475
0.90	306	328	353	328	353	328	306
1.80	600	686	706	686	706	686	600
3.55	301	341	373	341	373	341	301
5.30	600	686	706	686	706	686	600
6.20	306	328	353	328	353	328	306

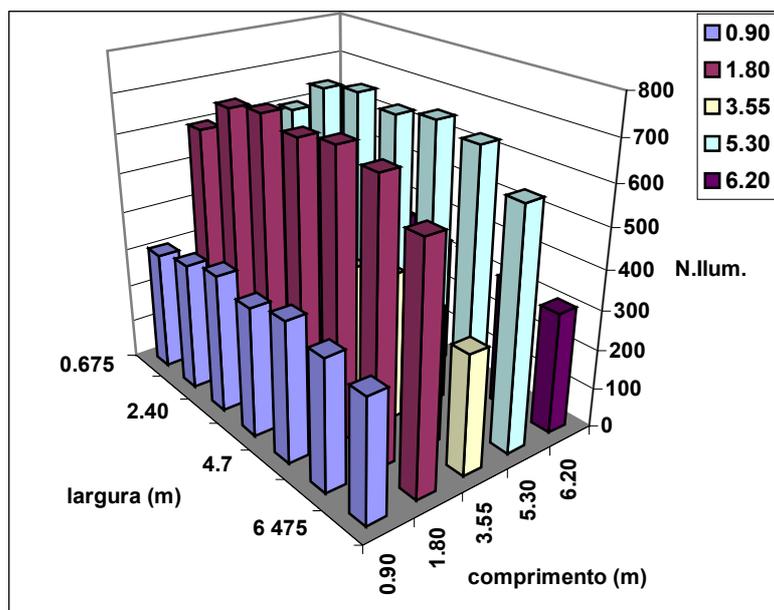


Figura 10 – Níveis de iluminância com as novas luminárias; dimensões do recinto: larg=7,10; compr=7,10 m e altura=3,00 m.

Os resultados mostram que apesar da troca das luminárias com quatro lâmpadas por luminárias de duas lâmpadas, estas, porém, possuindo refletores em alumínio anodizado, há um significativo aumento no nível de iluminância. O aumento no nível de iluminância dá-se principalmente ao longo do eixo das luminárias. Os valores medidos nestes pontos estão ligeiramente acima dos valores máximos sugeridos pela norma técnica para o ambiente em questão, qual seja, salas de aula.

6. CONCLUSÕES

Os resultados das medições apontam para uma redução na potência ativa solicitada do sistema de suprimento em aproximadamente 33,9%. Estes valores são decorrentes da substituição do conjunto (reator eletromagnético, lâmpadas de 40 W e luminárias) pelo conjunto (reator eletrônico, lâmpadas de 32 W e luminárias de alto rendimento), com uma melhora significativa nos níveis de iluminância.

A utilização do reator eletrônico realmente diminuiu a perdas no conjunto, ao contrário do que se previa, não intensificou a deterioração na qualidade da energia elétrica, pois os reatores eletrônicos apresentaram uma THDI bastante inferior quando comparado com os reatores eletromagnéticos. A redução da componente de 3ª harmônica da corrente do conjunto quando se utiliza reator eletrônico é um dado importante para as instalações elétricas, principalmente nas instalações em que os circuitos de iluminação estão ligados entre fase e neutro. Percebe-se, portanto, que utilizar racionalmente materiais e equipamentos é na realidade introduzir mais uma fonte de geração no sistema, com isto ganha a comunidade com maior disponibilidade de energia e o usuário, pois a sua necessidade continua a ser atendida, com mais conforto, menos perdas e menor consumo de energia elétrica. Como resultado temos, maior segurança na instalação do consumidor, por aliviar o sistema com menos

perdas e cargas, menor valor a ser pago pelo consumo da energia elétrica e ainda, resguardar um pouco da política do governo de um custo ascendente na tarifa de energia elétrica a ser cobrada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 H. CREDER, *Instalações Elétricas*, 14^a Edição, LTC Editora, 2002.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5413: Iluminância de Interiores.