



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 07 7622  
Tópico: Impacto da Conservação de Energia Elétrica

## ANÁLISE DO IMPACTO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA COPEL

MATEUS D.  
TEIXEIRA\*

LACTEC

GILSON  
PAULILLO

LACTEC

ALEXANDRE R.  
AOKI

LACTEC

RODRIGO  
A.PENICHE

LACTEC

DANIEL L.  
ARCHANJO

COPEL

### RESUMO

O presente trabalho apresenta resultados relacionados com o impacto causado pelo uso massivo de lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) em sistemas de distribuição (127/220 V), no tocante às distorções harmônicas. A investigação compreende estudos computacionais, associados à modelagem de circuitos, e trabalhos em campo. Para atingir tais propósitos fez-se necessário à obtenção e implementação computacional de um modelo que representasse, de maneira fiel, o funcionamento de uma LFC. Os resultados computacionais são confrontados com os correspondentes obtidos por meio de medições em campo na intenção de validar o modelo implementado. Finalmente, são realizados estudos computacionais para investigar os possíveis efeitos do uso de LFC's em um sistema típico em baixa tensão.

### PALAVRAS CHAVE

Lâmpadas Fluorescentes Compactas, Distorção Harmônica, Qualidade da Energia, Sistemas de Distribuição.

### 1.0 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os sistemas de distribuição de energia elétrica vêm experimentando uma crescente expansão do uso das lâmpadas fluorescentes compactas (LFC's), motivada, sobretudo, pela queda dos preços das lâmpadas e por programas de eficiência energética promovidos pelas concessionárias de energia bem como, mais recentemente, pela Resolução 492/2002 da ANEEL. Todavia, não obstante aos benefícios relacionados à redução do consumo de energia elétrica, constata-se uma carência de maiores investigações acerca dos impactos da utilização em larga escala das LFC's, como por exemplo, a emissão de correntes harmônicas, suportabilidade e sensibilidade destas às variações de tensão de curta duração, dentre outras.

Alguns estudos recentes [1, 2] realizaram investigações tanto sobre penetração harmônica em redes de distribuição de energia, abordando desde aspectos da modelagem das cargas residenciais, quanto monitoração de sistemas reais. Em [3] pode-se encontrar resultados deste mesmo estudo, porém, utilizando técnicas de modelagem no domínio da frequência, bem como dados

de medições de um circuito de distribuição diferente do aqui apresentado. Já a suportabilidade das LFC's à interrupções de energia foi investigada em [4], onde foram realizados testes de desligamento com intuito de observar a redução da vida útil destes dispositivos.

Assim, este trabalho tem como objetivo estabelecer as bases de uma metodologia de análise do impacto destes equipamentos para os sistemas de distribuição em baixa tensão (127/220 V) utilizando técnicas de simulação no domínio do tempo (Simulink/MATLAB®). Sendo assim, os estudos conduzidos levaram a adoção de modelos computacionais para as LFC's, baseados em elementos de circuito, que permitiram avaliar o comportamento em regime permanente de circuitos elétricos de baixa tensão com grande presença de LFC's.

Vale ressaltar que, da mesma forma que [3], para a realização destes trabalhos, três etapas foram cumpridas. A primeira, relacionada aos ensaios laboratoriais e modelagem das LFC's. Na segunda etapa dos trabalhos foram conduzidas campanhas de medições em campo, e na terceira e última etapa foram feitas simulações computacionais de um sistema para estimar o comportamento do mesmo após a instalação das lâmpadas.

## 2.0 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MODELOS DAS LFC's

Esta etapa dos trabalhos foi dedicada à modelagem das lâmpadas fluorescentes compactas em um software que permitisse a realização de análise harmônica. O ponto de partida deste processo foi a definição do tipo de modelagem a ser empregada nos estudos de penetração harmônica.

A técnica de modelagem no domínio da frequência para simulações de fluxo harmônico permite uma economia de tempo no processo de modelagem. Contudo, decidiu-se, para este trabalho, a adoção do software Simulink/MATLAB® que contém uma ampla biblioteca de componentes elétricos que permitem a

modelagem das LFC's através do circuito equivalente no domínio do tempo.

Inserido neste contexto, a modelagem das lâmpadas seguiu os seguintes passos:

- Levantamento do circuito equivalente;
- Modelagem no domínio do tempo;
- Validação computacional do modelo implementado.

As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, o circuito interno da lâmpada fluorescente compacta de 15 W utilizada e o modelo elétrico equivalente implementado.

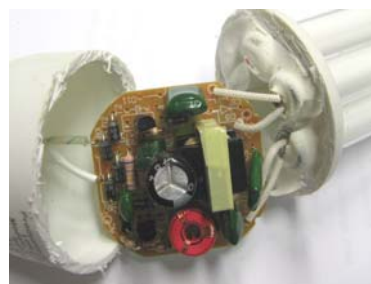


Figura 1 – Circuito interno da LFC 15 W

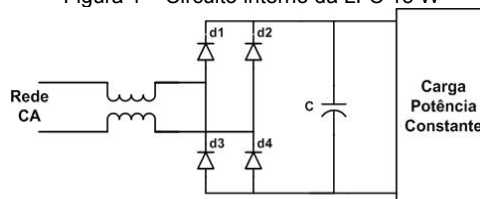


Figura 2 – Circuito elétrico equivalente utilizado nos estudos computacionais

Assim, utilizando elementos de circuito (diodo, resistor, indutor, capacitor), como mostrado na figura 2, efetuou-se a implementação computacional da LFC de 15 W. Os valores das grandezas elétricas utilizadas podem ser visualizados na Tabela I.

Tabela I - Parâmetros elétricos para o fluxo de carga

LFC	S (VA)	FP
15 W - Fabricante A	13,23	0,965 CAP

Com a implementação do modelo, passou-se a etapa de validação do mesmo. As Figuras 3 e 4 mostram as formas de onda para a corrente de

suprimento da LFC e seus correspondentes espectros harmônicos, tanto para o caso experimental (a) quanto para o caso computacional (b).

Para a aquisição das formas de onda foi utilizado um osciloscópio digital de alta resolução. Porém, devido à baixa corrente associada com a característica não linear do arco elétrico da lâmpada, nota-se alguns ruídos na forma de onda experimental, fenômeno que não é encontrado na forma de onda obtida via simulação computacional.

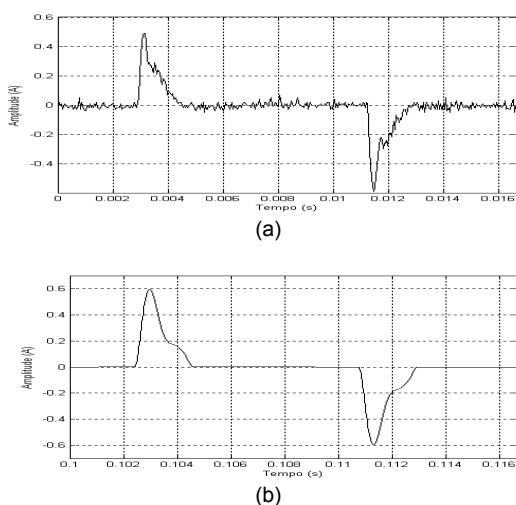


Fig. 3. Formas de onda da corrente solicitada pela LFC de 15 W: (a) Experimental e (b) Computacional.

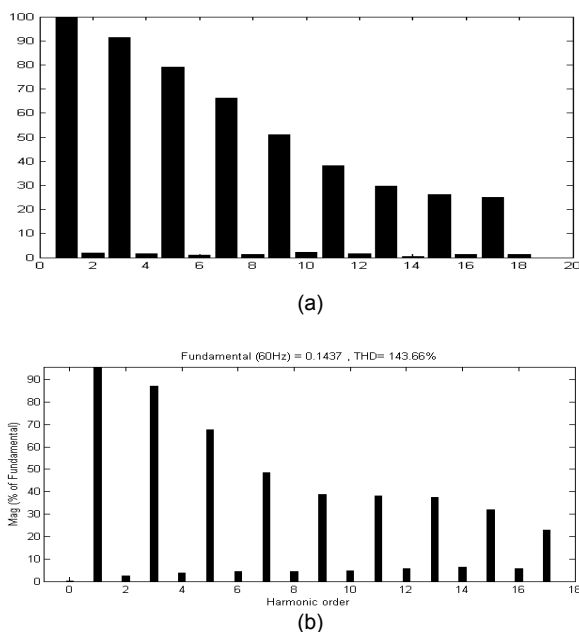


Fig. 4. Espectro harmônico da corrente solicitada pela LFC de 15 W: (a) Experimental e (b) Computacional.

Para os espectros de frequência mostrados nas figuras anteriores foram consideradas apenas as ordens harmônicas mais significativas, uma vez que a corrente nominal é extremamente baixa ( $I = 108 \text{ mA}$ ). Este fato, aliado à imprecisão dos equipamentos utilizados para aquisição dos dados, poderia levar a conclusões equivocadas no tocante a composição harmônica da referida corrente.

Desta forma, através da análise das formas de onda e do espectro de frequência, pode-se concluir que a modelagem utilizada atende perfeitamente aos propósitos do estudo sendo seus resultados altamente satisfatórios e capazes de representar o comportamento das lâmpadas fluorescentes compactas em regime permanente.

### 3.0 MEDIÇÕES DE CAMPO

Para a realização dos estudos dos impactos das LFC's em sistemas de distribuição, foram realizadas medições em um circuito de BT do sistema de distribuição da COPEL (Companhia Paranaense de Energia), antes e após a instalação das LFC's, para a quantificação dos diversos parâmetros elétricos a serem analisados. Tais parâmetros, conjuntamente com os resultados de simulações computacionais poderão indicar os principais efeitos decorrentes da utilização das LFC's nos sistemas elétricos, bem como as soluções a serem implementadas para a mitigação dos mesmos.

Vale ressaltar que o circuito escolhido para a amostragem, trata-se de um condomínio residencial constituído por edifícios de três andares com doze apartamentos cada. Tal condomínio, Ilha de Capri, é localizado no Bairro Alto na cidade de Curitiba. A escolha por este circuito recaiu, especialmente, no fato dos condôminos terem acordado em realizar a substituição das lâmpadas de suas residências pelas LFC's doadas através do projeto. Contudo, deve-se mencionar que a adesão, para este caso, foi de cerca de

60%, totalizando aproximadamente de 520 pontos de iluminação.

Para a realização dos trabalhos de medição, adotou-se como estratégia principal monitorar a entrada de energia do condomínio, ou seja, o secundário do respectivo transformador alimentador. Esta estratégia se justifica no interesse em avaliar o impacto da interação das LFC's com os demais eletrodomésticos.

As Figuras 5 e 6 mostram a curva de carregamento do transformador de alimentação para um dia típico de semana.

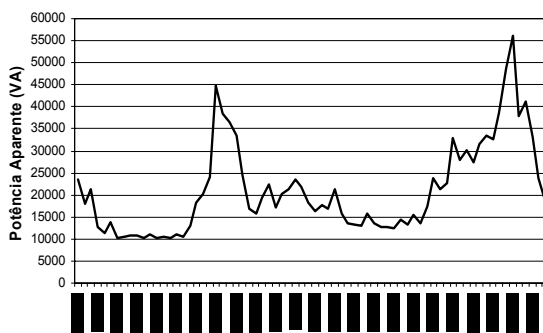


Fig. 5. Carregamento do transformador com predominância de lâmpadas incandescentes.

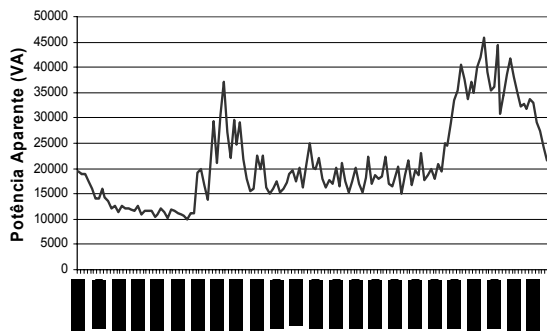


Fig. 6. Carregamento do transformador com predominância de LFC's.

Como pode ser observado pelas medições, não houve alteração significativa na curva de carregamento do transformador a partir da troca das lâmpadas, a não ser pela redução dos valores máximos encontrados nos períodos da manhã e do horário de ponta.

As figuras de 7 a 10 mostram o comportamento das distorções na forma de onda da tensão e da corrente para a entrada do condomínio ao longo de um dia típico.

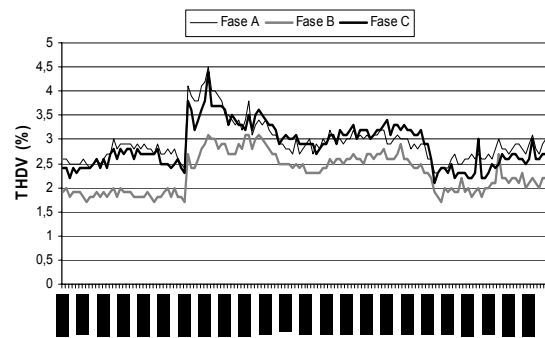


Fig. 7. Distorção Harmônica Total de Tensão com predominância de lâmpadas incandescentes.

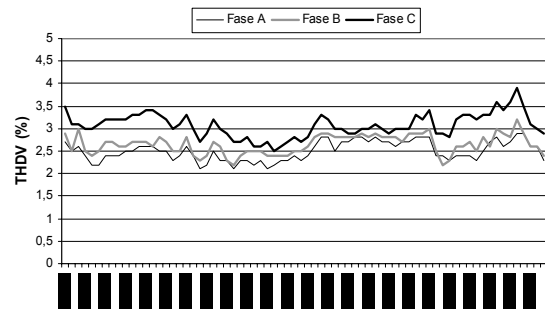


Fig. 8. Distorção Harmônica Total de Tensão com predominância de LFC's

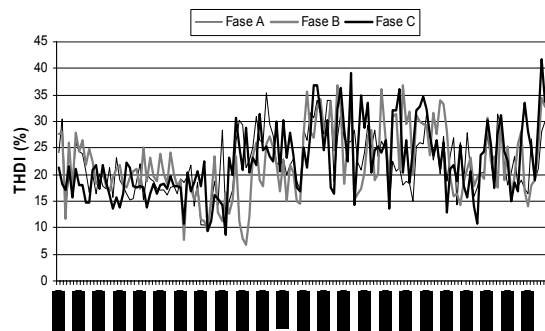


Fig. 9. Distorção Harmônica Total de Corrente com predominância de lâmpadas incandescentes.

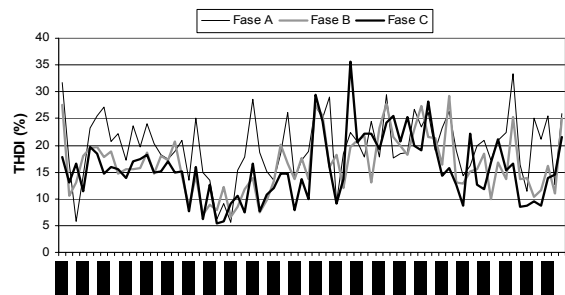


Fig. 10. Distorção Harmônica Total de Corrente com predominância de LFC's

Após a análise dos gráficos acima ilustrados, algumas constatações puderam

ser extraídas. Assim, para obtenção dos valores típicos (representativos) do período de monitoração, foi utilizado o tratamento estatístico conhecido como P95, para o caso das distorções harmônicas, tanto de tensão e corrente. Assim, pode-se observar que:

- A substituição das lâmpadas não surtiu grande redução no comportamento médio da curva de carregamento do transformador. Todavia, nota-se uma redução significativa do consumo durante o horário em que geralmente a iluminação é solicitada;
- A distorção harmônica de tensão aumentou em 11,6%, ao longo de um dia típico, passando de DHTV(P95%) = 3,00% com predominância de lâmpadas incandescentes, para DHTV(P95%) = 3,35%;
- Já a distorção de corrente aumentou em 21,5%, passando de DHTI(P95%) = 25,70%, para DHTI(P95%) = 31,22%.

Através dos gráficos e valores apresentados pode-se verificar que a distorção harmônica, tanto para a tensão quanto para a corrente, apresentou um ligeiro aumento após a substituição das lâmpadas incandescentes pelas LFC's. Isto era esperado uma vez que as medições realizadas em uma única residência haviam mostrado que a distorção de corrente aumentara de DHTI(%) = 10,4, para DHTI(%) = 35,7, com uma redução de cerca de 51% da demanda de potência ativa. Contudo deve-se considerar a aleatoriedade no uso da iluminação residencial.

#### 4.0 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As simulações computacionais são uma importante ferramenta para se estimar o comportamento dos sistemas elétricos frente a modificações, inserção de novas cargas, instalação de bancos de capacitores e/ou filtros harmônicos, dentre outras. Neste sentido, como forma de avaliar o impacto da substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas

fluorescentes compactas em determinados circuitos de distribuição de energia, algumas simulações foram conduzidas, empregando o modelo de LFC anteriormente apresentado.

Desta maneira, procurou-se submeter o modelo para o caso do condomínio residencial avaliado nas etapas de medição. Assim, foi adotada a seguinte estratégia de simulação:

- Os dados de carregamento utilizados como base para as simulações foram obtidos através da média dos valores medidos para o horário compreendido entre as 17:00 e 18:00 de um dia típico;
- Os valores de DHTV(%) e DHTI(%) empregados para fins de comparação foram as médias simples para o mesmo horário;
- O transformador alimentador do circuito é de 112,5 kVA;
- A carga total de iluminação considerada para os casos simulados foi de 130 lâmpadas, totalizando 7800 W incandescentes e 1950 W de LFC's.

O fato de se utilizar como parâmetros base a média dos valores obtidos no final da tarde, deve-se ao fato de que neste horário ainda é baixa a incidência de chuviscos elétricos.

As correntes harmônicas presentes na situação anterior à troca da iluminação foram consideradas como injeções de corrente.

Quanto ao carregamento devido à iluminação, foi empregado um fator de utilização igual a 0,25, para o horário estabelecido, multiplicado pelo o número total de pontos de iluminação em que houve troca de lâmpadas, ou seja, 520 pontos.

A Figura 11 mostra o diagrama unifilar do sistema em estudo, onde cada barra representa um prédio de 12 apartamentos. A Tabela II traça um paralelo entre o caso simulado e a medições realizadas para o secundário do transformador alimentador do circuito.

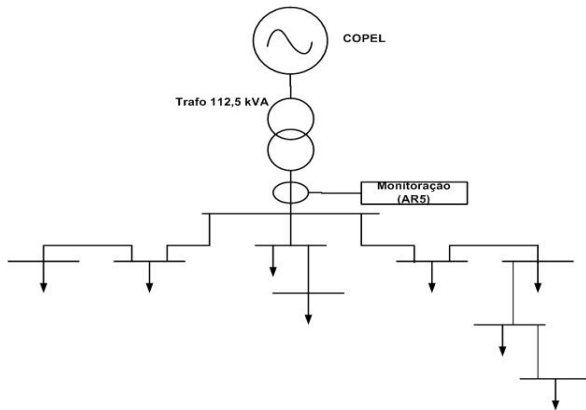


Fig.11. Diagrama unifilar do Cond. Ilha de Capri

Tabela II - Quadro Comparativo: Medição x Simulação

Grandeza Analisada	Medição	Simulação
	Incandescente	Incandescente
THDV(%)	2,60	2,37
THDI(%)	21,60	19,76
S (kVA)	17,00	16,10
I rms (A)	47,83	43,98

A Figura 12 traz um comparativo entre a medição e simulação para a tensão e a corrente no secundário do transformador.

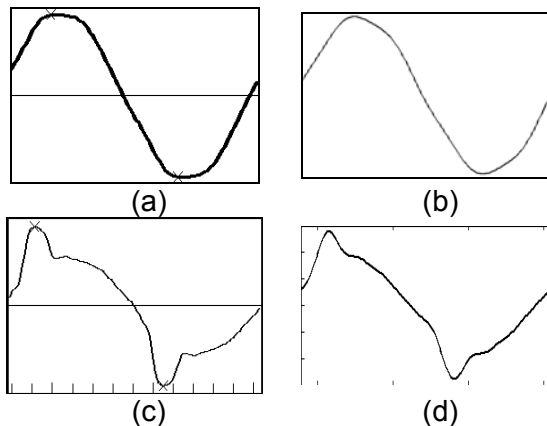


Fig.12. Formas de onda da tensão. (a) Medição; (b) Simulação; corrente (c) Medição; (d) Simulação

Assim, através da análise da tabela e dos gráficos acima, observa-se que os resultados computacionais, quando confrontados com os correspondentes resultados de medição apresentaram uma grande similaridade, tanto no que se refere aos aspectos quantitativos, como qualitativos, fato este que ratificou a

eficácia do modelo computacional representativo do condomínio Ilha de Capri.

Uma vez que ambos os modelos da lâmpada e do circuito do Condomínio Ilha de Capri foram validados, realizou-se simulação de um caso onde foram inseridas cerca de 43 LFC's por fase. Esta situação se equivaleria àquela em que teríamos um fator de utilização de 0,25 do montante total de 520 pontos de iluminação.

Desta maneira, foram substituídos um total de 7,8 KW correspondente às lâmpadas incandescentes por 1950 KW em LFC's de 15 W cada uma. A tabela III apresenta um paralelo entre as duas condições propostas.

Tabela III  
Quadro Comparativo – Incd. x LFC

Grandeza Analisada	Incandescente	LFC
THDV(%)	2,37	3,07
THDI(%)	19,76	37,11
S (kVA)	16,10	10,50
I neutron (A)	17,54	17,85

Da Tabela III pode-se constatar, conforme esperado, que há um aumento tanto na distorção harmônica total de tensão quanto de corrente após o "retrofitting". Este fato colabora para comprovação da eficácia do modelo implementado, uma vez que nos dados obtidos via medição de campo, são observados os mesmos comportamentos das mencionadas grandezas.

No que tange ao carregamento do transformador, após a inserção de LFC's em substituição às lâmpadas incandescentes, verificou-se um redução de 35% no consumo total (KVA).

Outro fato importante a ser ressaltado diz respeito ao carregamento do condutor neutro, onde se verificam valores de corrente próximos daqueles observados para as fases A, B e C. Nota-se que mesmo com a redução da demanda, o valor da corrente de neutro permaneceu praticamente inalterado, evidenciando uma forte presença de harmônicas de

seqüência zero, sobretudo a de 3ª ordem, oriundas da inserção de LFC's no circuito.

## 5.0 COMENTÁRIOS FINAIS

O presente artigo procurou abordar a questão dos impactos do emprego em larga escala das lâmpadas fluorescentes compactas, as quais têm sido extremamente difundidas, sobretudo em consumidores de baixa renda. Desta maneira, os resultados obtidos por este trabalho, propõe uma discussão sobre as reais vantagens em incentivar a disseminação destes dispositivos. Uma vez que as concessionárias de energia estão, por um lado cumprindo seu programa de eficiência energética, mas por outro lado, podem estar extrapolando índices de distorções harmônicas.

Assim, através de modelagens, medições de campo e simulações computacionais observou-se que o emprego das LFC's eleva os níveis harmônicos, chegando próximo àqueles recomendados por normas. Verificou-se através das medições de campo que a redução do carregamento do transformador, na prática, não é tão significativa conforme se esperava. Isto se deve, dentre outros motivos, à aleatoriedade na utilização das cargas residenciais.

Outro ponto importante deve-se ao

carregamento do condutor neutro que mesmo com a redução da potência ativa e do desequilíbrio entre as fases, manteve-se inalterado após a inserção das LFC's. Este fato merece grande atenção ao analisarmos fatores como dimensionamento do neutro e aterramento do sistema. O aspecto técnico-econômico também deve ser considerado, pois a elevação das tensões harmônicas pode causar a sobrecarga de equipamentos elétricos.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. Capasso, R. Lamedica and A. Prudenzi, "Estimation of net harmonic currents due to dispersed non-linear loads within residential areas," IEEE Transaction on Power Delivery, 1998.

[2] R. Lamedica and A. Prudenzi, "A model of large load areas for harmonic studies indistribution networks." IEEE Transaction on Power Delivery, vol 12, No 1, January 1997.

[3] M. D. Teixeira, G. Paulillo, A. R. Aoki, D. L. Archanjo, "Harmonic Distortions Produced by Compact Fluorescent Lamps in Distribution Networks" VI Induscon, Joinville – SC, 2004.

[4] C. Penna, J. W. Rezende and M. I. Samesima "Avaliação das Características Elétricas, de Iluminamento e de Suportabilidade a Chaveamentos de Lâmpadas Fluorescentes Compactas" II Congresso de Inovação tecnológica em Energia Elétrica, II CITENEL, pp. 181-186.

