



ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DUAS LÂMPADAS DE DESCARGA DE BAIXA PRESSÃO: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Gustavo Duarte Neves (1); Paulo Sérgio Scarazzato (2)

(1) Eng. Mecatrônico, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade da Faculdade de Eng. Civil, Arquitetura Urbanismo UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Brasil – e-mail: gustavoduarteneves@gmail.com

(2) Dr, Professor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Brasil – e-mail: paulosca@fec.unicamp.br

RESUMO

A constante procura pela eficiência em projetos de iluminação nas edificações tem envolvido os profissionais da construção civil, engenharias e arquitetura na busca por informações confiáveis que melhor adéquem as inúmeras fontes de iluminação disponíveis, sejam elas artificiais ou a luz natural. Este estudo apresenta dados analíticos sobre as fontes de luz artificial, mais especificamente para o período denominado pós-fluorescente, limitando a pesquisa nas lâmpadas de descarga de baixa pressão, haja vista a grande utilização desta fonte de luz nos ambientes hoje em dia. Assim, o objetivo deste estudo é demonstrar o comparativo entre as lâmpadas fluorescentes tubulares e as lâmpadas de catodo frio quanto a sua eficiência e os benefícios da eventual substituição (*retrofit*). Aborda as características peculiares destas lâmpadas, calcula os fatores econômicos *Payback*, *VPL* e *TIR*, e também apresenta argumentos para a tomada de decisão do investidor, a partir dos custos iniciais de implantação, de operação e de manutenção dos sistemas de iluminação. Toda a análise foi realizada através da comparação dos valores luminotécnicos e de eficiência energética, ambos obtidos por meio dos dados fornecidos pelos diferentes fabricantes para as aplicações das lâmpadas. E, como resultado preliminar, verifica-se maior viabilidade econômica para o catodo frio em algumas aplicações, principalmente devido ao seu maior tempo de vida útil e baixo consumo de energia elétrica, tornando o retorno sobre o investimento inicial próximo de 3,4 anos com taxas de retorno de 30,51% para uma das condições adotadas.

Palavras-chave: Lâmpadas Fluorescentes, Lâmpadas de Catodo Frio, Estudo Comparativo, *Payback*, *Retrofit*

ABSTRACT

The current search for lighting efficiency on building projects has involved constructors, engineers and architects to look for reliable information which fits different available light sources. This study presents analytical data about light sources, more specifically the post-fluorescent period, limiting this research on low pressure discharge lamps, given the widespread use of this light source in the environments today. Thus, the main objective of this study is to present a comparison between the fluorescent lamps and the cold cathode lamps concerning its efficiency and the eventual retrofit benefits. Considering both peculiar characteristics calculates economic index as *Payback*, *NPV* and *IRR* and also presents arguments to investor's decision covering initial costs, operation costs and maintenance of the lighting systems. All analysis was meant by the illumination and energetic efficiency values obtained by the different manufacturer's data for its appliance. And, as a preliminary result, there is greater economic viability for the cold cathode in some applications, mainly due to its longer life spam and low power consumption, making the return on the initial investment next to 3.4 years with return rates on 30,51% for one of the conditions adopted.

Keywords: Fluorescent Lamps, Cold Cathode Lamps, Comparative Study, *Payback*, *Retrofit*

1. INTRODUÇÃO

A luz natural sempre teve papel dominante na arquitetura, tanto para revelar o desenho arquitetônico das edificações e criar uma atmosfera particular, como para proporcionar aos ocupantes das edificações o conforto visual e funcional da iluminação. No passado recente, o uso idealizado da luz natural, em tempos de energia barata, foi frequentemente entendido como um ajuste supérfluo ao projeto (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1993). As deficiências de iluminação destas construções eram, invariavelmente, corrigidas por meio da luz artificial. A crise do petróleo, o conseqüente aumento nos custos da energia elétrica e, mais recentemente, a consciência do impacto da produção de energia para o meio ambiente, deram novos arrosos aos projetos.

Historicamente, a partir da década de 1970, deu-se, em ampla escala, o uso das lâmpadas fluorescentes de descarga de baixa pressão, em grande parte, aplicadas pelas edificações não-domésticas, devido aos avanços quanto à sua eficácia luminosa e melhoria do índice de reprodução de cor (YEN; SHIONOYA; YAMAMOTO, 2006). É a partir deste período, com o desenvolvimento dos pós de fósforos, que as lâmpadas fluorescentes apresentam seu maior desenvolvimento, conforme demonstrado na figura 1.

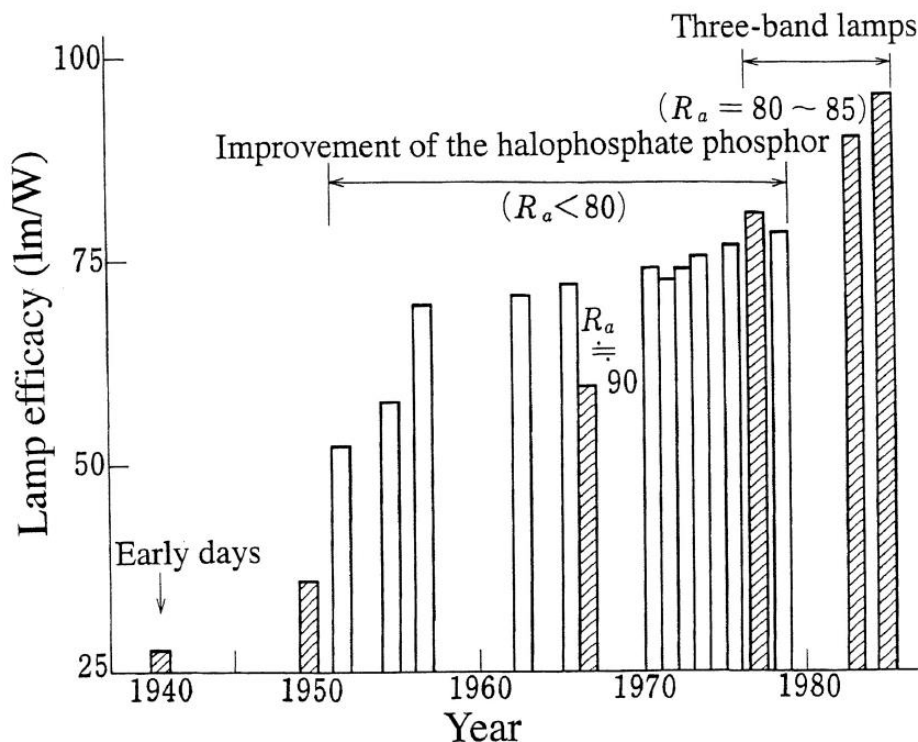


Figura 1. Aumento da eficácia luminosa das lâmpadas fluorescentes (40W) a partir do desenvolvimento dos pós de fósforos. As barras sombreadas mostram o aumento do Índice de Reprodução de Cor (IRC) nas lâmpadas com fósforos combinados.

Fonte: Phosphor handbook 2nd edition (YEN; SHIONOYA; YAMAMOTO, 2006).

Já na década de 1990, estimava-se que metade da energia utilizada nas edificações não-domésticas eram consumidas pela iluminação artificial (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1993). Isso motivou o aumento significativo do uso, principalmente, de fontes de iluminação artificial que não comprometam o consumo de energia elétrica e, portanto, que apresentem melhor eficiência. Então, ocorre o atual e crescente interesse em projetos com conscientização do uso de energia que, em geral, estabelece novas práticas tanto no uso da iluminação natural como no baixo consumo de energia elétrica nas edificações.

Com isso, não só as lâmpadas se tornaram mais eficientes mas, com o desenvolvimento da tecnologia digital, os reatores eletromagnéticos puderam ser substituídos pelos reatores eletrônicos. A compreensão do funcionamento dos sistemas de iluminação, principalmente quanto à fragilidade dos eletrodos nas lâmpadas fluorescentes quando do seu acionamento, tornaram os sistemas mais eficientes, aumentando o tempo de vida útil do conjunto a partir do uso da tensão elétrica de pré-aquecimento nas lâmpadas. Esta tecnologia ainda possibilitou o desenvolvimento de reatores eletrônicos dimerizáveis, o que capacitou o uso das lâmpadas fluorescentes em sistemas de controle e automação.

A busca pela eficiência no sistema de iluminação fluorescente, no entanto, contribuiu para que este estudo trouxesse novas perspectivas e um diferente ponto de vista para o uso da iluminação comercial. E os

critérios de avaliação, para isso, envolveram os dados luminotécnicos dos fabricantes das fontes de iluminação comparadas, as exigências da norma NBR5413 (1992), análises de fluxo de caixa financeiro para o investimento, despesas de operação e manutenção e, portanto, de viabilidade econômica. Desta forma, evitando decisões de cunho meramente promocional e muitas vezes denotada como “soluções prontas” pelo mercado, foi possível comparar as lâmpadas tubulares (T5 e T8) com o catodo frio – ainda de pouco uso no mercado brasileiro. De maneira análoga, o estudo de Neves e Scarazzato (2011), utiliza os mesmos paradigmas financeiros. Porém, a pesquisa anterior limitou-se apenas ao comparativo entre a lâmpada de catodo frio Tecnolux #66-6500-Triphosphor e a comercialmente utilizada lâmpada fluorescente tubular Philips do tipo TLD36W/965. Este estudo amplia, em muito, os itens de comparação.

1.1 Lâmpadas de Descarga de Baixa Pressão

O conceito científico por detrás das lâmpadas de descarga foi primeiramente identificado em 1675, quando o astrônomo francês Jean Picard observou um fraco brilho num barômetro de mercúrio, utilizado para medir a pressão atmosférica. Só em 1902 em Paris, França, o engenheiro, químico e inventor francês Georges Claude (1870-1960), inspirado nos experimentos do contemporâneo engenheiro e inventor norte-americano Daniel McFarlan Moore (1869-1933) e do físico e inventor alemão Heinrich Geissler (1814-1879), produziu a primeira descarga elétrica em tubo selado contendo gás neônio (Ne) com a intenção de criar uma lâmpada. A partir deste experimento, os tubos de descarga passaram a ser denominados como “tubos de neon”.

A lâmpada de descarga é formada por um invólucro translúcido, também chamado de tubo de descarga, e por dois eletrodos posicionados em suas extremidades, que podem ser hastes metálicas ou filamentos, que assim que aquecidos serão responsáveis pela emissão dos elétrons no interior deste tubo que deve conter, a certa pressão, uma mistura de gás(es) inerte(s) com vapor(es) metálico(s). Para seu funcionamento, aplicada uma determinada diferença de potencial externa nos eletrodos, os elétrons provenientes do eletrodo negativo (catodo) são atraídos e acelerados para a outra extremidade, e o eletrodo positivo (anodo), excitando e colidindo com os átomos do(s) vapor(es) metálico(s) durante este percurso.

Sem a quebra da estabilidade do átomo, as chamadas colisões elásticas provocam o aumento da temperatura enquanto as colisões inelásticas provocam a sua ionização. Neste processo, quando ocorre o decaimento do átomo para seu estado de menor energia ocorre a emissão da radiação que, dependendo da sua distribuição espectral, poderá ser utilizada como fonte de luz visível para o olho humano – comprimentos de onda entre 380 e 760 nanômetros – ou então, esta radiação será absorvida pelo revestimento interno deste tubo de descarga, um pó denominado “fósforo” e assim, convertê-la para uma distribuição espectral mais adequada.

As lâmpadas de descarga de baixa pressão, em geral, apresentam pressão interna de cerca de 10^{-3} atmosferas onde inicialmente existe um meio gasoso não condutor, cujos átomos precisam da aplicação da diferença de potencial externa nos eletrodos para iniciar o processo de excitação e/ou ionização e, portanto, para que seja possível a circulação da corrente elétrica. Quando aplicada a fontes de baixa tensão, praticamente não existe a formação de corrente elétrica entre os eletrodos, porém, quando aplicadas a altas voltagens, acima de um determinado limiar que podem ser de algumas centenas de Volts, ocorre a descarga elétrica e, portanto, a corrente elétrica se eleva bruscamente, podendo atingir valores elevados.

1.2 Lâmpadas Fluorescentes Tubulares

Aplicada com frequência em projetos de iluminação, as lâmpadas fluorescentes tubulares, como são comercialmente conhecidas, foram desenvolvidas na década de 1940 e seguem o princípio descrito acima. O revestimento interno em pó de “fósforo(s)” é o responsável por absorver e converter as radiações com comprimento de ondas ultravioleta a 253,7 nanômetros – não visível para o olho humano – em emissão de luz visível.

A estrutura interna de uma lâmpada fluorescente convencional é demonstrada na figura 2.

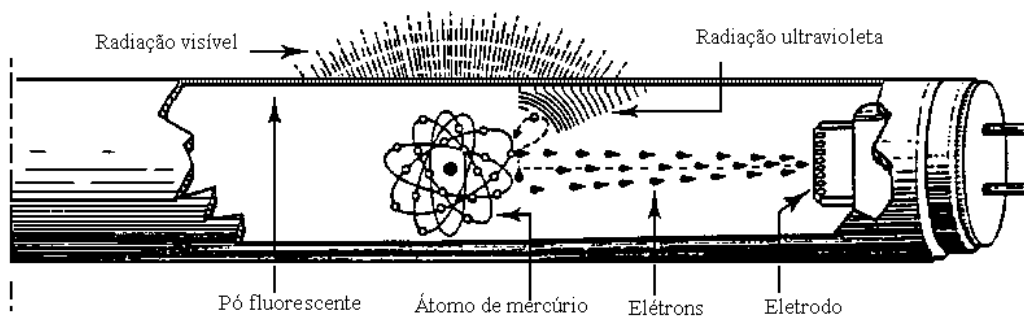


Figura 2. Estrutura interna e princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente tubular.

Fonte: Daylighting in Architecture (BAKER; FANCHIOTTI; STEEMERS, 1993).

Os eletrodos utilizados nas fluorescentes tubulares também são denominados catodo quente. Por serem constituídos por filamentos em tungstênio, aquecem-se facilmente não sendo necessária a aplicação de altas tensões elétricas para seu acionamento.

Tais filamentos são construtivamente semelhantes aos utilizados nas lâmpadas incandescentes, porém, operam em temperaturas mais baixas (800°C à 1100°C). Apresentam ainda um revestimento de material com baixa função de trabalho (por exemplo, óxido de bário), que emite elétrons por efeito termiônico. Durante a partida, ou seja, o acendimento, os filamentos são alimentados por uma fonte de tensão elétrica, sendo aquecidos pela circulação da corrente elétrica, até atingir a temperatura desejada, a qual é mantida pelo calor gerado na descarga com a lâmpada já em funcionamento. Chamado de pré-aquecimento dos filamentos, este procedimento influencia diretamente na vida útil da lâmpada, o que nas lâmpadas fluorescentes convencionais mais eficientes é por cerca de 20.000 horas (Guia de Iluminação, Philips, 2005).

O tempo de vida útil de uma lâmpada fluorescente é, normalmente, determinado pelas condições de seus eletrodos. Se durante o tempo de sua operação houver perda parcial, ou total do material responsável pela emissão, a lâmpada não acenderá ou, eventualmente, iniciará o processo de tremulação, luz vacilante, cintilação (*flicker*¹, da língua inglesa). Mas, o tempo de vida útil das lâmpadas fluorescentes também é influenciado por fatores externos como a alternância da frequência do sistema elétrico de alimentação, pelo tipo de reator utilizado e pelo tipo de ignitor de descarga luminescente presente no conjunto. Mas, independentemente do sistema adotado, ao final do tempo de vida útil, a emissão do fluxo luminoso é reduzida consideravelmente.

1.3 Lâmpadas de Catodo Frio

Apesar de tecnicamente conhecidas, as lâmpadas de descarga de baixa pressão de catodo frio são pouco estudadas, sendo, portanto, escassa a literatura científica sobre seu desempenho quando comparado com outras fontes de iluminação. As lâmpadas de catodo frio seguem os mesmos princípios das lâmpadas de descarga de baixa pressão. Porém, em sua estrutura construtiva, diferem-se principalmente das fluorescentes tubulares devido à diferente composição dos seus eletrodos. Constituídos por cápsulas metálicas com impurezas menores de 0,1%, parecidas com dedais de ferro, aparentemente indestrutíveis e revestidas internamente por um composto químico emissivo ativo, denominado de “ativação”, utilizam uma superfície maior para a emissão dos elétrons. O formato destas cápsulas também propicia o processo contínuo de autorregeneração da ativação. Quando um elétron é atraído pela outra extremidade – eletrodo positivo (anodo) – ele deixa uma lacuna (degeneração da ativação) que será preenchida por outro elétron, proveniente do eletrodo negativo (catodo), quando houver a alternância do processo da descarga elétrica, regenerando a ativação.

Devido a sua grande massa, os eletrodos operam em temperaturas relativamente baixas, quando comparadas às fluorescentes tubulares. Esta mesma diferenciação quanto à massa dos eletrodos afeta, principalmente, a diferença na expectativa de vida da lâmpada. Produzidos em diferentes tamanhos, podem adequar a necessidade de corrente elétrica a ser aplicada para manutenção do fluxo luminoso desejado.

¹ A cintilação ou efeito *flicker* pode ser notada pela sensação visual de que a luminosidade está variando no tempo. Em lâmpadas fluorescentes, o fósforo leva um pequeno tempo para perder luminosidade. Reatores eletromagnéticos, que operam em frequência de linha (60 Hz), regeneram o arco elétrico da lâmpada entre 100 e 120 vezes por segundo, o que é tempo suficiente para o olho humano perceber a variação de luminosidade do fósforo. Reatores eletrônicos, que operam em alta frequência (20 kHz a 50 kHz), regeneram o arco elétrico mais de 40.000 vezes por segundo, tempo curto demais para que o olho humano perceba essa variação.

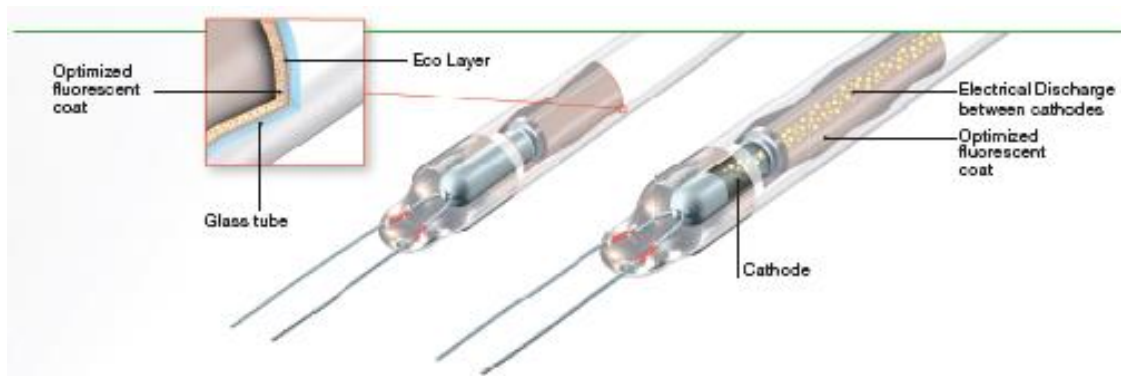


Figura 3. Estrutura interna e princípio de funcionamento de uma lâmpada de catodo frio.
Fonte: Catálogo (TECNOLUX, 2010).

Segundo a IESNA, é uma lâmpada de descarga elétrica cujo modo de operação é tal que o brilho da descarga dos vapores metálicos provenientes do revestimento interno fluorescente (fósforo) transforma energia ultravioleta em luz (IESNA, 2009).

O catodo frio também pode se referir a um tipo de lâmpada fluorescente fabricada sob encomenda, com características únicas. Esteticamente, o maior atrativo quanto ao uso do catodo frio é sua capacidade de ser dobrado, moldado, fabricado para se adaptar a quase todo tipo de configuração, podendo acompanhar detalhes da arquitetura ou do mobiliário.

Nas lâmpadas de catodo frio faz-se necessária a aplicação de tensões elétricas mais elevadas para ativação do sistema. Por não possuir filamentos, a eficiência quanto ao tempo de vida útil das lâmpadas de catodo frio é muito maior, chegando a 100.000 horas, ou seja, cerca de cinco vezes mais quando comparada as lâmpadas fluorescentes convencionais mais eficientes do mercado. Por não necessitar de pré-aquecimento dos eletrodos para ignição, o catodo frio tem sua capacidade de controle (automação) e dimerização mais facilitada.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar as aplicações das lâmpadas de descarga de baixa pressão em edificações, mais especificamente as lâmpadas de catodo frio, para compreender, quando comparadas com as lâmpadas fluorescentes tubulares, se há viabilidade econômica de seu uso, consideradas as suas características como, por exemplo, longo tempo de vida útil e baixo consumo de energia elétrica.

A partir de cálculos financeiros, também apresenta subsídios para a tomada de decisão do investidor para a eventual substituição (*retrofit*) dos sistemas de iluminação nas edificações, sem perda do conforto visual aos seus usuários.

3. MÉTODO

A análise comparativa entre lâmpadas fluorescentes e lâmpadas de catodo frio considerou os valores luminotécnicos (fluxo luminoso, índice de reprodução de cor, temperatura de cor e distribuição do espectro de energia visível) e os relacionados à eficiência energética (potência, consumo por metro linear e vida útil da lâmpada). A presente pesquisa limitou-se ao comparativo entre a lâmpada de catodo frio, *Tecnolux² Cold Cathode Lamps* e as comercialmente utilizadas lâmpadas fluorescentes tubulares T5 e T8 da Philips, devido as suas características e aplicações semelhantes.

Comparativamente, as lâmpadas têm semelhanças na distribuição do espectro de energia visível e foram escolhidas por possuírem temperaturas de cor equivalentes. Este estudo analisa as temperaturas de cor comercialmente mais disponíveis no mercado para as fluorescentes tubulares, de 3000K, 4000K e 6500K, mesmo que existam maiores diversidades em temperatura de cor nas lâmpadas de catodo frio, de 1900K a 9000K.

² Tecnolux é uma marca universal para os sistemas de iluminação de néon e catodo frio. Em 1950, na Itália, o fundador do grupo, o Sr. Benito Tacconi, iniciou as atividades com a fabricação de transformadores eletromagnéticos para iluminação em néon. Hoje o grupo Tecnolux está presente em cinco países e é composto por oito empresas das quais cinco são indústrias dirigidas principalmente para o campo de iluminação em catodo frio e néon.

Com base nestes fatores, foi estabelecida uma tabela de equivalências entre as lâmpadas, reatores eletrônicos, reatores eletrônicos dimerizáveis e conversores eletrônicos. Ao todo são 97 diferentes itens comparados entre suas equivalências de aplicação, sendo:

- ✓ 19 tipos de lâmpadas T5 (de 14, 28, 54 e 80W);
- ✓ 17 tipos de lâmpadas T8 (de 18, 36, e 58W);
- ✓ 18 tipos de lâmpadas de catodo frio;
- ✓ 05 tipos de reatores eletrônicos para lâmpada T5;
- ✓ 08 tipos de reatores eletrônicos dimerizáveis para lâmpadas T5;
- ✓ 16 tipos de reatores eletrônicos para lâmpada T8;
- ✓ 08 tipos de reatores eletrônicos dimerizáveis para lâmpadas T8 e
- ✓ 06 tipos de aplicações para conversores eletrônicos.

Para análise econômica considerou-se ainda: i. Custos iniciais de implantação do sistema de iluminação, restrito às lâmpadas e reatores necessários para o adequado funcionamento de cada uma das fontes objeto de estudo; ii. Custos de operação do sistema de iluminação e iii. Custos de manutenção das duas fontes, que guarda proporção com a vida útil respectiva.

A análise da tríade – custo inicial, custo operacional e custo de manutenção – permite obter dados consistentes sobre a viabilidade do *retrofit*: substituição das fluorescentes tubulares por lâmpadas de catodo frio.

Entram nessa análise o *Payback Simples*, o *Valor Presente Líquido (VPL)* e a *Taxa Interna de Retorno (TIR)*, termos esses detalhados a seguir:

Payback Simples – obtido pelo quociente entre os custos iniciais de implantação, neste caso específico pelo sistema de iluminação, e a redução conseguida no custo de energia elétrica em consequência desta decisão;

Valor Presente Líquido (VPL) – obtido pelo somatório de todas as capitalizações/ dispêndios do fluxo de caixa, calculados como valor presente por meio de uma taxa de juros de mercado considerada. Em geral, utiliza-se a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) ou também chamada de Taxa de Oportunidade ou Taxa de Desconto como sendo a taxa paga pelo mercado financeiro para corrigir os investimentos correntes como poupanças e fundos de investimentos etc.

Taxa Interna de Retorno (TIR) – é obtida quando o somatório do valor presente do fluxo de caixa é nulo, dentro de um determinado período de tempo adotado.

Um empreendimento será economicamente viável quando a TIR de um investimento for superior a TMA à disposição do investidor, dentro do período calculado. Da mesma maneira, ao se comparar duas possíveis alternativas de investimento, a que oferecer TIR mais elevada irá possibilitar o retorno do capital investido em menor tempo.

Segundo CADDET (1995), a iluminação, de forma geral, é responsável por aproximadamente 30% do total de eletricidade para operar muitos edifícios comerciais, sendo que 2/3 aproximadamente poderiam ser economizados com a utilização de sistemas eficientes de iluminação. Isto representaria uma economia total de cerca de 20% no consumo de eletricidade do edifício. No Brasil, de acordo com a Avaliação do Mercado de Eficiência Energética (Procel-Eletronbras, 2007), a iluminação representa 22% do total de energia elétrica consumida pelo setor comercial, seguida pelas demais cargas (31%) e pelo ar condicionado (47%).

A NBR5413 (1992) – Iluminância de Interiores – estabelece valores médios mínimos para a iluminação artificial em ambientes, definindo iluminância como “o limite da razão do fluxo luminoso recebido pela superfície em torno de um ponto considerado, para a área da superfície quando esta tende a zero”. Segundo esta norma, as áreas com “iluminação geral usadas ininterruptamente ou com tarefas visuais simples” como em corredores, por exemplo, devem ter iluminâncias médias mínimas da ordem de 75 – 100 – 150 lux, conforme os “fatores determinantes da iluminação adequada”, que levam em consideração as “características da tarefa e do observador”, como a idade, a velocidade e a precisão da tarefa e a refletância do fundo da tarefa.

GHISI (1997) considera que se avaliadas as condições do atual sistema de iluminação e a possibilidade de realização de um *retrofit*, deve-se elaborar um novo projeto luminotécnico para cada ambiente da edificação visando atender as iluminâncias recomendadas pela NBR5413 (1992). Sugere-se, ainda, a utilização do método dos lumens por ser um método bastante simples e de fácil entendimento (GHISI, 1997).

As lâmpadas devem ser escolhidas sobretudo pela eficiência luminosa, além da vida útil, temperatura de cor e índice de reprodução de cor (GHISI, 1997).

Neste estudo, o termo *Retrofit* define, especificamente, a substituição de sistemas de iluminação através de tecnologias energeticamente eficientes, visando à conservação de energia elétrica sem detrimento

da satisfação e conforto do usuário (GHISI, 1997). Considerados os parâmetros luminotécnicos de comparação das lâmpadas (citados anteriormente), a análise deste estudo se dá, principalmente, pela emissão máxima do fluxo luminoso das fontes de luz para o eventual *retrofit* e, portanto, não considera o ambiente a ser iluminado – que a partir do método dos lúmens, subentende-se, ser o suficiente para atingir os valores mínimos de iluminância, conforme recomendado pela norma técnica.

Como existe uma ampla gama de fontes de luz elétrica, tanto na família das fluorescentes, como nas de catodo frio, esta pesquisa pode suscitar desdobramentos de novos estudos comparativos, para análises de viabilidade de *retrofit*.

Este trabalho considerou os dados fornecidos pelos fabricantes em seus catálogos comerciais, portanto ainda carentes de comprovações por meio de testes laboratoriais de entidades homologadas pelas agências reguladoras.

4. RESULTADOS

Antes da realização dos cálculos foi necessário assumir algumas premissas, para garantir a operação das lâmpadas comparadas nas seguintes condições:

- ✓ Lâmpadas acesas por 12 horas diárias, 365 dias por ano – uma aplicação bastante próxima da realidade em centros comerciais (shopping centers, hall de hotéis ou em galerias comerciais), quando não aproveitada a iluminação natural, por exemplo;
- ✓ Custo do quilowatt-hora de R\$ 0,47, valor próximo ao aplicado no estado de São Paulo;
- ✓ Mão de obra de instalação e/ou manutenção não considerados no cálculo por ser difícil mensurar sua necessidade, tempo de utilização e valor correspondente, consideradas as diferentes faixas salariais e os impostos trabalhistas envolvidos no cálculo e
- ✓ Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10,00% ao ano pois, para o investidor, esta taxa estaria acima do valor nominal de mercado obtido pelos rendimentos – sem o desconto da inflação do período – comparada, por exemplo, com a caderneta de poupança que não possui taxa administrativa ou ainda aos rendimentos dos fundos de renda fixa, ambos considerados investimentos bastante seguros pelo mercado financeiro.

Devido ao grande número de variáveis (fatores luminotécnicos, premissas e desembolso financeiro), fez-se necessário o uso de tabelas de equivalência de lâmpadas, reatores e conversores, que foram inter-relacionadas para a composição de um banco de dados geral. Dessa forma, algumas outras variáveis puderam ser manipuladas facilmente dentro da planilha de cálculo final, dando ao usuário quatro oportunidades de aplicação para as lâmpadas comparadas:

a. Nas fluorescentes tubulares:

- ✓ Vida útil com dimmer – “Sim” ou “Não”³.
- ✓ Vida útil mais eficiente nas fluorescentes, sem dimmer (melhor condição) – “Sim” ou “Não”;
- ✓ Vida útil menos eficiente nas fluorescentes, sem dimmer (pior condição) – “Sim” ou “Não”;

b. No catodo frio:

- ✓ Uso de linhas paralelas para obtenção de fluxo luminoso equivalente.

Definidos os critérios para a avaliação, estabeleceu-se 16 comparativos. A tabela 1, a seguir, demonstra as melhores aplicações, quando há viabilidade econômica pela substituição das fluorescentes tubulares pelo catodo frio:

³ Quando utilizados os reatores eletrônicos dimerizáveis, devido a sua característica de funcionamento, já se considera que o conjunto trabalhe sempre de maneira eficiente.

Bulbo	Temperatura de Cor (K)	Potência (W)	Dimmer	Eficiência	TIR %	Payback Anos	Observação
T5	3000	28	Não	Não	31,17	3,2	1350 Lm menor
		54	Não	Sim	28,36	3,5	2500 Lm menor
		80	Não	Não	40,65	2,7	1900 Lm menor
	4000	28	-	-	-	-	-
		54	-	-	-	-	-
		80	Não	Não	40,65	2,6	2400 Lm menor
	6500	28	Não	Não	31,17	3,1	1200 Lm menor
		54	Não	Não	60,02	2,0	2100 Lm menor
	T8	3000	36	Sim	Sim	30,51	3,5
36 > Fluxo			Sim	Sim	42,03	2,8	1300 Lm menor
58			Sim	Sim	42,03	2,8	1300 Lm menor
4000		36	Sim	Sim	30,51	3,5	700 Lm menor
		58	Sim	Sim	47,00	2,2	1500 Lm menor
		58 > Fluxo	Sim	Sim	46,84	2,2	1900 Lm menor
6500		36	Sim	Sim	30,51	3,4	500 Lm menor
		58	Sim	Sim	47,00	2,2	1200 Lm menor

Tabela 1. Resumo dos resultados comparativos entre lâmpadas T5, T8 e o catodo frio.

Nas melhores condições, ambas quando comparadas com o uso das T8, 36W, nas temperaturas de cor de 3000K e 6500K, o fluxo luminoso é muito próximo ao fornecido pela fluorescente tubular comparada. Porém, devido ao seu consumo energético por metro linear ser inferior e a vida útil muito maior, os valores para decisão do investidor são bastante favoráveis, com *payback* simples na metade do terceiro ano após o investimento e considerada a TMA de 10% a.a., com VPL de R\$ 510.285,67 e TIR de 30,51% a.a., para um sistema de iluminação dimerizado e, portanto, considerado eficiente.

A terceira melhor condição se ocorre também em relação ao uso da T8, 36W, porém, agora, com temperatura de cor de 4000K. A diferença para o fluxo luminoso é de cerca 700 Lm/m, para um sistema dimerizado, eficiente, com os mesmos valores de VPL de R\$ 510.285,67 e TIR de 30,51% a.a..

Os demais valores comparativos de viabilidade econômica, como por exemplo, da T5, 28W, nas temperaturas de cor de 3000K e 6500K, com VPL de R\$ 464.849,44 e TIR de 31,17% a.a. só seriam possíveis se, dependendo da aplicação, atendessem as diretrizes da norma NBR5413 (1992) para iluminâncias de interiores e, portanto, não comprometessem a qualidade da iluminação. Mas, neste caso, como já mencionado por GHISI (1997), faz-se necessário um novo projeto luminotécnico para aplicação do *retrofit* para atender as necessidades das iluminâncias recomendadas pela NBR5413. O mesmo ocorre para as demais comparações.

Em todos os casos, confrontando o tempo de utilização diária de 12 horas ininterruptas com o tempo de vida útil teórico das lâmpadas informado pelos fabricantes, nas fluorescentes tubulares a necessidade das trocas completas varia conforme o sistema adotado (utilização de reatores com ou sem pré-aquecimento, por exemplo) e no catodo frio, teoricamente, as lâmpadas poderiam ser utilizadas por até 22,83 anos. Como informado pelos fabricantes, estes valores podem variar, pois dependem de alguns fatores externos, como por exemplo, número de acendimentos e estabilização da tensão de entrada.

Os cálculos financeiros consideram 10 anos de utilização, como demonstrados nos gráficos, onde fica também evidente que, após este período, a diferença gerada pela tecnologia economizadora atinge um ganho superior ao valor do investimento inicial.

5. CONCLUSÃO

O estudo corrobora a expectativa inicial dos autores. A partir dos dados obtidos pela pesquisa, pode-se dizer que a opção mais eficiente energeticamente e de maior viabilidade econômica para a iluminação pode variar entre a aplicação das lâmpadas fluorescentes tubulares e as lâmpadas de catodo frio - sempre considerando a manutenção da qualidade da iluminação para os usuários, na realização de suas tarefas, conforme sugerido pela NBR5413 (1992) e facilmente comprovada pelo *Método dos Lúmens*. Porém, evidencia-se que são

inúmeras as variáveis que devem ser assumidas para o estudo comparativo das fontes de luz, principalmente quanto a sua percepção.

Devido ao tempo de vida útil das lâmpadas de catodo frio ser extremamente maior, pode-se também sugerir sua aplicação em condições de difícil acesso, como pé-direito duplo, em elementos decorativos, sob telas tensionadas e demais aplicações onde a manutenção é dificultada ou ainda fator preponderante na redução dos custos.

Deve-se considerar também a possibilidade de menor descarte de material, ainda como consequência da vida útil do catodo frio. Hoje, mesmo sendo possível sua reciclagem, estima-se que apenas cerca de 5% a 6% do total anual de lâmpadas fluorescentes tubulares comercializadas – cerca de 100 milhões de unidades no Brasil em 2009 (Abilux, 2010) – tenham tido este encaminhamento.

Em alguns casos, se tais condições se demonstrarem realmente vantajosas para a tomada de decisão do investidor, considerando-se os custos iniciais, de operação (energético) e de manutenção - sem perdas para os usuários - este trabalho sugere a necessidade de novos estudos que:

- a. Comproven efetivamente os dados apresentados nos catálogos comerciais via testes em laboratórios especializados e certificados;
- b. Contemplem outras aplicações e outras fontes de iluminação para efeito comparativo com o catodo frio;
- c. Considerem aspectos fisiológicos da exposição aos efeitos da radiação provenientes das lâmpadas comparadas;
- d. Comparem as mesmas fontes de iluminação estudadas neste artigo porém, utilizando outros fatores luminotécnicos, como por exemplo a iluminância (Lux) para aplicações funcionais para escritórios, salas de aula e bibliotecas ou ainda a luminância (cd/m^2) para a utilização em painéis de publicidade retro iluminadas (*backlight*).

6. REFERÊNCIAS

- ABILUX. Associação Brasileira da Indústria da Iluminação. Disponível em: <http://www.abilux.com.br> [acesso em 12/10/2010].
- ABNT (1992). **NBR 5413 - Iluminância de interiores**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 13 p.
- BAKER, N., FANCHIOTTI, A., STEEMERS, K. **Daylight in architecture – A European reference book**. Earthscan. Reino Unido, 1993.
- CADDET (1995). **Saving energy with efficient lighting in commercial buildings**. Maxi brochure 01. CADDET Energy Efficiency - Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies. The Netherlands. 22 p.
- CLS. **Cold cathode lighting and led lighting for indirect cove applications: a comparison**. Cathode lighting systems. USA, Maryland, 2010. [acesso em 01/08/2010]. 07 p.
- ELETROBRÁS. **PROCEL**. Disponível em www.eletronbras.gov.br. Acesso: setembro de 2012.
- ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - PEA Laboratório de instalações elétricas. **Lâmpadas Elétricas**. Disponível em: http://files.myopera.com/aquarits/blog/usp_lampada.pdf [acesso em 12/10/2010]. 47 p.
- CLAUDE, G. **Biography (1870-1960)**. Disponível em: <http://www.madehow.com/inventorbios/80/Georges-Claude.html> [acesso em 12/10/2010]. 01 p.
- GHISI, E. (1997). **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação: estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 246 p.
- GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Avaliação do potencial de conservação de energia elétrica através de estudo de retrofit no sistema de iluminação da UFSC**, 1997. Encac – Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído.
- IAEL. **Neon lighting – a professional advantage**. International Association of Electrical Inspectors. USA, Texas, 2006. 328 p.
- IESNA (2009). **Nomenclature and definitions for illuminating Engineering**. Illuminating Engineering of North America. USA, New York, 3 p.
- MATOS, M.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. **Estudo de melhoria no sistema de iluminação artificial da UFSC**. Encac - Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 2003.
- NEVES, G. D.; SCARAZZATO, P. S. **Estudo comparativo entre fontes de iluminação artificial em edificações (lâmpadas de descarga de baixa pressão) – Análise econômica**. Encac - Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 2011.
- OSRAM, **Manual Luminotécnico Prático** (2007). Disponível em: www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/ManualOsram.pdf. Acesso: agosto de 2011
- OSRAM, **Lâmpadas Fluorescentes Tubulares e Circulares** (2007). Disponível em: www.osram.com.br/osram.../AF_05_fluortubulares-print.pdf. Acesso: setembro de 2012
- PHILIPS, **Lâmpadas fluorescentes tubulares**. Catálogos, SPOT Serviço Philips de Orientação Técnica. Disponível em www.lighting.philips.com.br/. Acesso: novembro de 2012.
- PHILIPS, **Manual de Iluminação**, Quarta Edição, Eindhoven, Holanda, 1986.
- PHILIPS, **Guia de Iluminação** (2005). Disponível em: www.ebah.com.br/content/.../guia-iluminacao-2005-philips. Acesso: agosto de 2011.
- PHILIPS, **Guia Prático Philips Iluminação** (2009). Disponível em: www.lighting.philips.com.br/.../GuiaBolso_Sistema_09_final.pdf. Acesso: setembro de 2012.
- TECNOLUX, **Lâmpadas de catodo frio**, Catálogos. Disponível em www.tecnolux.com/. Acesso: novembro de 2012.
- TECNOLUX, **Cold Cathode Lighting Systems**. Disponível em www.tecnoluxlighting.com/. Acesso: novembro de 2012.

RIBEIRO, Wankes L. **Como calcular a viabilidade de um projeto utilizando técnicas de análise de investimento: Payback Simple, VPL e TIR.** Disponível em: <http://www.wankesleandro.com> [acesso em 12/10/2010].

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. **Estudo de viabilidade econômica de uma proposta de retrofit em um edifício comercial,** 1999. Encac – Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído.

YEN, W., SHIONOYA, S., YAMAMOTO, H. **Phosphor handbook – second edition.** CRC. USA, 2006.

7. AGRADECIMENTOS

A UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas e a FEC – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo por terem possibilitado o desenvolvimento desta pesquisa.