

ESTUDO DA VIABILIDADE DE *RETROFIT* EM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO COM USO DE LAMPADAS LED E DE DESCARGA COMO INTERVENÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

PAULO E. D. ROCHA*, CARLOS A. FERREIRA*, LAYLLA S. RAMALHO*,
JÚLIA F. ARAUJO*, DANIELLE C. M. VILA NOVA*

**Laboratório de Instalações Elétricas, Departamento de Engenharia Elétrica,
Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
R. São Francisco Xavier, 524 - 5º andar, Sala 5111F, 20550-900,
Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, Brazil*

*E-mails: paulo.rocha@uerj.br, carlosaparecidoeng@gmail.com,
laylla.ramalho@gmail.com, julia.araujo@gmail.com,
daniellemenezes92@yahoo.com.br*

Abstract— This paper presents the feasibility of an energy efficiency intervention in a educational unit, contributing to reduction in consumption and consequent reduction in electricity costs. The chosen environments were the classrooms, because they are places with increased length of stay of users. After taking measurements with the digital lux meter, we found that the illumination did not meet the minimum requirements of the Brazilian technical standards. Thus, was accomplished a lighting study of the retrofit proposing lamps and luminaires efficient suitable for the proposed activities. With the aid of software were made simulations for lighting with fluorescent and LED lamps in order to get the desired lighting values. For the study in question were carried out energy consumption comparisons, and the lifting of the cost of implementation of the energy efficiency project. An economic analysis was performed in order to verify the feasibility and return time of investment.

Keywords— Energy efficiency, technical lighting, Fluorescent lamp, LED lamp and Economic Analysis.

Resumo— O presente trabalho visa apresentar a viabilidade de uma intervenção de eficiência energética em uma unidade educacional, contribuindo com redução no consumo e consequente redução dos custos com energia elétrica. Os ambientes escolhidos foram as salas de aula, por serem locais com maior tempo de permanência dos usuários. Após a realização das medições com luxímetro digital, foi possível verificar que o iluminamento não atendia aos requisitos mínimos das normas técnicas brasileiras. Desta forma, foi realizado um estudo luminotécnico de *retrofit* propondo lâmpadas e luminárias eficientes, adequadas para as atividades propostas. Com o auxílio de *software* foram efetuadas simulações para iluminação com lâmpadas fluorescente e LED, a fim de obter os valores de iluminamentos desejados. Para o estudo em questão foram realizadas comparações de consumo energético, bem como o levantamento dos custos referentes à implementação do projeto de eficiência energética. Uma análise econômica foi realizada com objetivo de verificar a viabilidade e o tempo de retorno do investimento.

Palavras-chave— Eficiência Energética, Luminotécnica, Lâmpadas Fluorescentes, Lâmpadas LED e Análise Econômica.

1 Introdução

Nas últimas décadas, a Eficiência Energética (EE) tem ganhado força em políticas públicas em vários países, pois além da racionalização da energia também é possível obter benefícios financeiros e ambientais.

O Brasil, por apresentar características de um país em desenvolvimento, possui uma grande demanda reprimida nesta área, atrelado aos altos índices nacionais de perda em toda rede, especialmente em alguns estados da região norte e nordeste (EPE, 2015). De acordo com dados coletados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), e diretamente do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o total de desperdício chega a 40 milhões de kW por ano. Diante deste cenário, especialistas da área sugerem alternativas para promover o uso racional da energia, com a substituição de tecnologias por outras mais eficientes e com menor impacto financeiro (ao longo da vida útil) e ambiental. Além da questão tecnológica, ações e campanhas de EE para a conscientização da sociedade são forte-

mente recomendadas, de forma a aperfeiçoar o comportamento dos usuários de energia.

Uma das intervenções mais comuns em instalações residenciais e comerciais envolve modernização dos sistemas de iluminação, com a substituição de lâmpadas e luminárias por equipamentos mais eficientes, além da revitalização de superfícies para melhor aproveitamento do fluxo luminoso.

Um projeto contendo um planejamento adequado da iluminação resulta em economia e conforto ao usuário, já que um ambiente com nível adequado de iluminação evita fadiga e está associado a um melhor desempenho das atividades realizadas (Giacobbo, 2014).

Em instalações escolares, a avaliação das condições de conforto é de suma importância, pois o desenvolvimento do processo de ensino e aprendizagem necessita de um ambiente que ofereça condições adequadas de conforto térmico, lumínico e acústico para a realização das atividades diárias. Essas condições podem refletir diferentes fatores como sociabilidade dos usuários, desempenho acadêmico e, inclusive, na saúde dos mesmos (Ritter, 2014).

Este trabalho apresenta alternativas para a iluminação de uma instalação escolar, através de *retrofit*

luminotécnico, com objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica, adequar o iluminamento e atender aos requisitos mínimos das normas técnicas brasileiras (MTE, 2009; ABNT, 2013). São comparados estudos para implementação de lâmpadas tubulares fluorescentes e de tecnologia *Light Emitter Diode* (LED) e apresentadas as análises energética e econômica demonstrando a viabilidade da utilização da tecnologia LED.

2 Metodologia

O presente projeto teve seu desenvolvimento a partir de pesquisa exploratória, cujas características são de inovações tecnológicas e de aquisição de alternativas para implementar medidas de EE em uma unidade educacional (Araujo & Vila Nova, 2015). Os ambientes escolhidos foram as salas de aula, por serem os locais com maior tempo de permanência dos usuários.

Com o intuito de realizar o *retrofit* luminotécnico, inicialmente foi necessário realizar a verificação da iluminância de interiores. Para a adequada medição foi utilizado um luxímetro digital portátil, da marca da INSTRUTHERM, modelo LDR-225, com display duplo de cristal líquido (LCD) de 4 dígitos, a uma altura de 80cm do piso do local. Antes de iniciar a medição, as fotocélulas foram expostas a uma iluminância próxima à da instalação até as mesmas se estabilizarem, conforme orientado para calibração do equipamento.

Foi verificado que as salas eram equipadas, em fileira única, com *plafonier* para o suporte das lâmpadas compactas do tipo 4U-30W e circular com reator de 32W, não adequadas para o uso em uma sala de aula.

Deste modo, para ambientes com luminárias espaçadas em fileira única, orienta-se que a iluminância média I_m seja obtida por:

$$I_m = \frac{Q(N-1) + P}{N} \quad (1)$$

onde N é o número de luminárias, Q é a média aritmética das leituras q realizadas em oito pontos indicados em procedimento normativo, e P é a média aritmética das leituras p realizadas em dois pontos indicados em procedimento normativo.

Os valores de I_m obtidos através da eq. (1) e o quantitativo de pontos existentes instalados por sala, totalizando 672 W de carga instalada, são apresentados na tabela 1.

Para instalações escolares, considerando que o arranjo das mesas pode ser feito de forma aleatória, a área de trabalho pode ser considerada igual à área do ambiente, com entorno imediato de faixa marginal igual a 0,5m (ABNT, 2013). Como as atividades são realizadas em período diurno para turmas primárias, recomenda-se uma iluminância mantida (E_m) de 300

lux para as áreas de tarefas, e para o entorno imediato (E_{ent}) igual a $0,5E_m$, não devendo ser menor que 200 lux. A norma também estabelece que a uniformidade da iluminância (U_m) não seja inferior a $0,7E_m$. Desta forma,

$$U_m \leq I_m \leq E_m \quad (2)$$

Tabela 1. Valores de I_m obtidos através de medição

Ambiente	N	$P(W)$	$I_m(lux)$
Sala 1	3	90	198,75
Sala 2	2	62	177
Sala 3	2	62	174,25
Sala 4	3	92	242,75
Sala 5	2	62	138,25
Sala 6	2	60	105,5
Sala 7	2	62	120,75
Sala 8	2	60	93,5
Sala 9	2	60	86,5
Sala 10	2	62	120,53

Na figura 1 é verificado que, em 90% das salas de aula, as condições de iluminância I_m não respeitam a eq. (2), ou seja, os valores de iluminância para as salas de aula, obtidos por meio de medição *in locu*, não estão de acordo com as exigências mínimas da norma. Apenas a sala 4 atende às condições necessárias. As demais salas apresentam o valor de I_m abaixo de 200 lux, com isto não garantem o mínimo de qualidade e conforto para o desenvolvimento das tarefas. Além disto, tal iluminação deficitária pode provocar aos alunos e professores diversos desconfortos como: cansaço, dor de cabeça, lesão na visão, desânimo, baixa produtividade, além do risco de acidente.

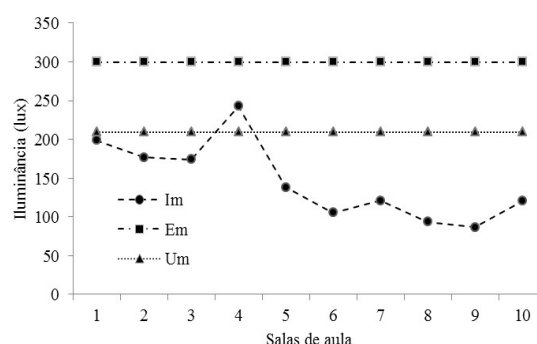


Figura 1. Condições da iluminância nas salas de aula

Cabe ressaltar que os índices de iluminação deficitária estão muitas vezes associados à falta de um programa de manutenção eficiente que garanta os níveis iluminamento necessários ao bom desempenho da atividade fim do ambiente. Um programa de manutenção deve ater-se principalmente à limpeza das superfícies refletoras, à limpeza das luminárias e à substituição das lâmpadas de acordo com sua vida

útil. Problemas como este, encontrados na unidade escolar analisada, infelizmente são comuns e relatados em outros trabalhos (De Sá, 2014).

3 Desenvolvimento do projeto

3.1 Considerações iniciais

Para o desenvolvimento do projeto de *retrofit* luminotécnico e simulação do ambiente virtual em 3D, foi utilizado o software *DIALux* versão 4.12. Esta ferramenta utiliza dois algoritmos de iluminação global, o *Radiosity*, método usado para modelar a interação da luz entre superfícies difusoras e o *Ray Tracing*, que é uma técnica que permite adicionar destaque, reflexões e transparências.

A partir das simulações realizadas, foram feitos dois projetos luminotécnicos utilizando luminárias com lâmpadas fluorescentes e luminárias com lâmpadas LEDs, e dois projetos considerando os ambientes com a pintura original e com o clareamento das paredes, esperando-se obter um menor consumo energético e um iluminamento compatível com a atividade fim.

A unidade educacional é composta por 10 salas de aula equivalentes, com dimensões iguais à nove metros de comprimento, quatro metros de largura e pé direito igual a três metros. As paredes são originalmente da cor branca na metade superior e azul royal na metade inferior, o teto é da cor branca e o piso na cor cinza claro. É importante lembrar que estas salas possuem planos de trabalho de aproximadamente 0,65 metros de cor clara.

3.2 Estudo de Retrofit com pintura original

Após realizar simulações buscando atender às condições normativas, concluiu-se que a iluminância adequada pode ser obtida distribuindo seis luminárias contendo duas lâmpadas cada. As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados das simulações para atender o nível de iluminância exigido considerando o uso de lâmpadas fluorescentes e LED, respectivamente.

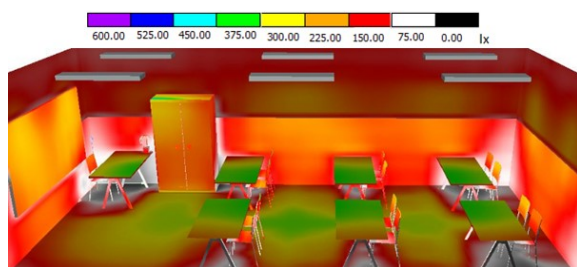


Figura 2. Retrofit com lâmpadas fluorescentes

É possível visualizar a evolução dos níveis da iluminação das salas de aula, quando comparadas com os níveis apresentados anteriormente, deixando-os o mais próximo ao nível sugerido pela norma. Em ambas as situações, foram consideradas luminárias compatíveis com o uso de lâmpadas LED ou fluores-

cente. Desta forma, garantimos o mesmo rendimento das luminárias para ambas as simulações, concentrando a análise apenas nas diferenças entre as tecnologias das lâmpadas.

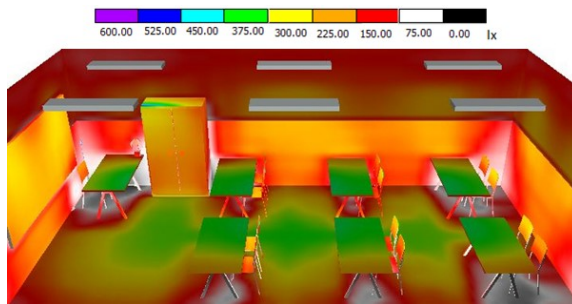


Figura 3. Retrofit com lâmpadas LED

As características das lâmpadas são apresentadas na tabela 2. Cabe ressaltar que foram utilizadas lâmpadas com mesmo diâmetro, em ambos os estudos, com o objetivo de igualar o rendimento nas simulações.

Tabela 2. Características das lâmpadas selecionadas

Dados técnicos	Fluorescente	LED
Potência elétrica (W)	32	18
Temperatura de cor (K)	6.500	6.500
Fluxo luminoso (lúmens)	2.350	2.300
IRC (%)	85	85
Largura (mm)	1.200	1.200
Diâmetro (mm)	26 (T8)	26 (T8)
Vida média (horas)	8.000	45.000
Rendimento (lúmens/W)	73.4	127.8

Pode ser observado nas figuras 2 e 3 que, para ambos os casos, foram obtidos o mesmo número de luminárias e a mesma distribuição luminosa. Isto ocorre devido às características das lâmpadas selecionadas, que apresentam as mesmas dimensões, temperatura de cor, e índice de reprodução cromático (IRC). Além disto, os valores de fluxo luminoso são aproximados: 2.350 lúmens para a lâmpada fluorescente e 2.300 lúmens para a lâmpada LED. Cabe destacar, todavia, que as lâmpadas LED possuem menor potência e uma vida média muito maior que a fluorescente. Assim, apesar de serem mais caras, consumirão menos energia elétrica e serão substituídas com menor frequência, acarretando em benefícios econômicos.

3.3 Estudo de Retrofit com paredes brancas

Nesta análise de projeto, foi verificada a influência da refletância das superfícies no dimensionamento do número de pontos. As características das luminárias e das lâmpadas são idênticas às do caso anterior, sendo alterada apenas a pintura das paredes.

Nas Figuras 4 e 5, são apresentados os resultados para as simulações considerando lâmpadas fluores-

centes e lâmpadas LEDs, respectivamente. Em ambos os casos, para atingir a iluminação adequada, foram necessárias quatro luminárias, duas a menos que na análise com pintura original nas paredes. Desta forma, foi verificado que o aumento da refletância das superfícies promoveu um melhor aproveitamento do fluxo emitido pelas lâmpadas no plano de trabalho.

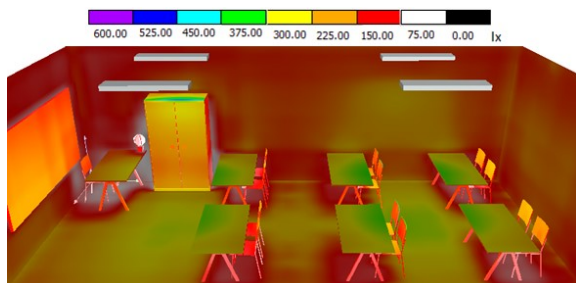


Figura 4. Retrofit com lâmpadas fluorescentes e pintura branca

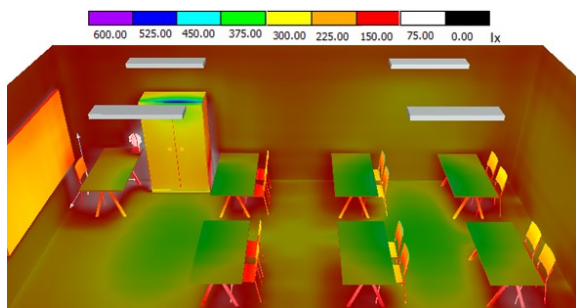


Figura 5. Retrofit com lâmpadas LED e pintura branca

4 Análise energética

A partir das análises quantitativa e qualitativa visando atender aos requisitos normativos, torna-se possível realizar a comparação entre o consumo energético relativo à iluminação com uso de lâmpadas LED e com uso de lâmpadas fluorescentes.

Para obter o consumo de energia elétrica anual do conjunto de lâmpadas LED, podemos adotar a expressão:

$$E_{aa} = n_d \cdot n_L \cdot H \cdot P_L \quad (3)$$

onde, E_{aa} é o consumo de energia elétrica anual em kWh, n_d o número de dias úteis no ano, n_L o número total de lâmpadas utilizadas, H o tempo (em horas) que as lâmpadas permanecem ligadas por dia, e P_L a potência de cada lâmpada em kW.

Para obter o consumo de energia elétrica anual do conjunto de lâmpadas fluorescentes devemos considerar o consumo do reator. Desta forma, para a equação (3) temos, n_L o número total de luminárias utilizadas, e P_L o somatório da potência do conjunto lâmpadas-reator por luminária em kW.

Como parâmetros para determinar o consumo de energia elétrica anual referente à iluminação, deve-se destacar que o ambiente educacional analisado funci-

ona no período das 07:00h às 18:00h em dias úteis. Neste período, o tempo de utilização diário das salas de aula, considerando os intervalos, é em média de 08 horas e 50 minutos. Foram considerados 254 dias úteis por ano.

Para o E_{aa} utilizando lâmpadas fluorescentes, a potência das duas lâmpadas de 32W somada à potência do reator totalizou 65W por luminária. As lâmpadas LED não necessitam de reator para seu funcionamento, desta forma foi considerado 18W por lâmpada.

O consumo de energia elétrica anual para os dois cenários analisados no retrofit luminotécnico são apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Consumo de energia anual para seis luminárias

Parâmetros	Conjunto duas lâmpadas fluorescentes + reator	Lâmpadas LED
P_L (kW)	0,065	0,018
n_d (dias)	254	254
n_L	60	120
H (horas)	8,83	8,83
E_{aa} (kWh)	8.747	4.844,5

Tabela 4. Consumo de energia anual para quatro luminárias

Parâmetros	Conjunto duas lâmpadas fluorescentes + reator	Lâmpadas LED
P_L (kW)	0,065	0,018
n_d (dias)	254	254
n_L	40	80
H (horas/dia)	8,83	8,83
E_{aa} (kWh)	5.831,33	3.229,66

Como podemos observar, embora as lâmpadas fluorescentes e as lâmpadas LED possuam as mesmas características de iluminamento, em ambos os cenários de pintura da parede, o consumo anual do conjunto constituído por lâmpadas fluorescentes é 80% maior que o consumo do conjunto constituído por lâmpadas LED, o que representará uma diferença significativa na fatura energética.

5 Análise econômica

Para atender ao nível de iluminamento adequado para a realização das atividades fim nas salas de aula, são necessários: investimentos para o aumento do número de caixas de passagem no teto para ligação das luminárias, compra e instalação de eletrodutos e condutores, mão-de-obra, além revitalização da pintura das paredes. Estes custos independem da tecnologia utilizada e não influenciam na diferença de investimento entre LED e fluorescente. Desta forma, a análise econômica fica resumida à diferença de investimento entre as tecnologias e a comparação com o consumo energético.

Dentro dos cenários propostos, foi feita uma análise econômica para avaliar a viabilidade de implementação de um projeto com uso de lâmpadas LED e o tempo de retorno quando comparado com a opção de investir em lâmpadas fluorescentes.

O custo para a compra do conjunto luminária, duas lâmpadas fluorescentes T8 e reator é igual a R\$187,92 e o custo para a compra do conjunto luminária, duas lâmpadas LED T8 é igual a R\$303,00. Desta forma, o investimento total para o ambiente com pintura original, contendo 60 luminárias, é igual a R\$11.275,20 para lâmpadas fluorescentes e R\$18.180,00 para lâmpadas LED. Para o ambiente com pintura branca, contendo 40 luminárias, o investimento é igual a R\$7.516,80 para lâmpadas fluorescentes e R\$12.120,00 para lâmpadas LED.

A tabela 5 apresenta o custo anual com fatura de energia elétrica para o uso de lâmpadas fluorescente e LED, considerando a tarifa atual de R\$ 0,82630/kWh. Sendo o custo anual de energia elétrica obtido por,

$$C_{aa} = 0,82630 \cdot E_{aa} \quad (4)$$

Tabela 5. Análise do custo anual de energia elétrica

Quantidade	Fluorescente	LED
60 luminárias	R\$7.227,65	R\$4.003,01
40 luminárias	R\$4.818,43	R\$2.668,67

De acordo com a análise energética pôde-se observar que as lâmpadas fluorescentes possuem um consumo energético 80% maior que as lâmpadas LED, porém o investimento em sua instalação é significativamente menor. Portanto, faz-se necessária uma análise da viabilidade econômica de uma instalação em detrimento da outra.

Na análise da viabilidade econômica foi considerado um reajuste tarifário de energia elétrica anual 6,5% e uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 8% a.a. Foram consideradas ainda uma vida útil de 4 anos para as lâmpadas fluorescentes, 10 anos para o reator e de 20 anos para as lâmpadas LED.

O gráfico da figura 6 apresenta o fluxo de caixa dos valores economizados devido a diferença do investimento para o uso de lâmpadas LED comparado com a opção de lâmpadas fluorescentes para o ambiente com pintura original, enquanto o gráfico da figura 7 apresenta uma análise similar onde houve aumento da refletância.

A análise econômica para o período de 20 anos resultou, para ambos os cenários, em uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 102%, um Tempo de Recuperação de Capital (TRC) simples de 2 anos e 1 mês e um TRC descontado o reajuste tarifário de 2 anos e 2 meses. Para o cenário com parede original, o Valor Presente Líquido (VPL) obtido foi de R\$ 52.666,83, enquanto que para o cenário com parede branca o VPL obtido foi de R\$ 35.111,22.

Desta forma, avaliamos que a opção pelas lâmpadas LED é de grande viabilidade econômica, primeiramente ao observar que o VPL não somente é positivo, como também apresenta um valor significativamente alto comparado ao investimento. Em uma segunda análise, a TIR é igual a 102% enquanto que a TMA é de apenas 8%, ou seja, o projeto seria economicamente viável para qualquer valor de taxa maior que a TMA.

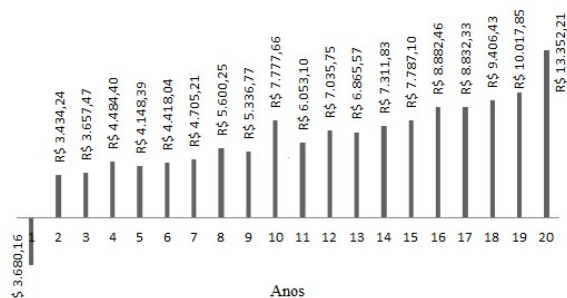


Figura 6. Retrofit com lâmpadas LED e pintura original

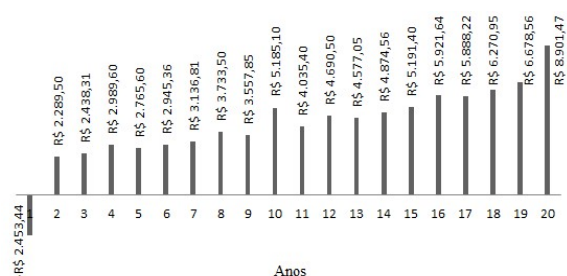


Figura 7. Retrofit com lâmpadas LED e pintura branca

6 Conclusão

Neste trabalho foi realizado um estudo de *retrofit* luminotécnico das salas de aula de uma unidade educacional com objetivo de atender aos requisitos normativos. Foram comparadas as análises energética e econômica de cenários utilizando lâmpadas tubulares, fluorescentes e LEDs, levando em consideração a influência da refletância das superfícies.

Foi verificado, através de medição do nível de iluminação, que 90% das salas não atendem às condições mínimas de conforto dos usuários, sendo necessário um projeto de reformulação e modernização do sistema de iluminação.

Nas simulações, através do software *DIALux* versão 4.12, foi considerado o emprego de uma luminária aplicável às duas tecnologias de lâmpadas propostas. As lâmpadas selecionadas apresentam dimensões, fluxo luminoso, temperatura de cor e IRC similares, a fim de produzirem o mesmo nível de iluminação. Desta forma, os resultados possibilitaram a comparação das tecnologias de lâmpadas em relação ao consumo de energia elétrica e ao investimento de forma isolada.

Para a verificação da influência da refletância das superfícies na quantificação de luminárias, foram considerados dois cenários: um com a pintura original em meia parede azul royal e outro com paredes brancas. Independente da tecnologia das lâmpadas utilizadas, no cenário com pintura original foram dimensionadas 06 luminárias por sala, enquanto que com aumento da refletância do fundo de tarefa foram necessárias apenas 04 luminárias. Ou seja, o aumento da refletância, contribuiu para um melhor aproveitamento do fluxo luminoso, um menor investimento e um menor consumo de energia. Após as análises quantitativa e qualitativa da iluminação das salas, as comparações energética e econômica das opções de lâmpadas mostraram que o investimento em lâmpadas LED é viável mesmo com maior investimento inicial, além de possuir maior eficiência energética.

Em ambos os cenários, o investimento total no sistema com lâmpadas LED é 61% maior e o consumo anual de energia elétrica com lâmpadas fluorescentes 80% maior. Além de mais eficiente, a lâmpada LED apresenta uma vida útil cinco vezes maior. A análise econômica para o período de 20 anos resultou uma TIR muito superior que a TMA com tempo de retorno de 2 anos e 1 mês para TRC simples e de 2 anos e 2 meses para TRC descontado, e VPL positivo com valor significativamente alto comparado ao investimento. Em uma segunda análise, a TIR é igual a 102% enquanto que a TMA é de apenas 8%, ou seja, o projeto seria economicamente viável para qualquer valor de taxa maior que a TMA. Com estes resultados, verificamos que a opção pelas lâmpadas LED é de grande viabilidade econômica.

Agradecimentos

Os autores manifestam seu agradecimento ao Laboratório de Instalações Elétricas (LABINST) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, ao Departamento de Engenharia Elétrica, bem como ao Prof. Marcio Goldenberg Sereno.

Referências Bibliográficas

- ABNT (2013). NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho - Parte 1: interior. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Araujo, J. F. & Vila Nova, D. C. M. (2015). Estudo de caso para iluminação e aquecimento de água com análise energética e econômica. Monografia. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- De Sá, J. H. F. (2014). Avaliação dos níveis de iluminância de acordo com a NBR-8995/2013 dentro de diversos ambientes de trabalho de uma instituição pública de ensino. Especialização. Curitiba: Departamento

- Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- EPE (2015). Anuário Estatístico de Energia Elétrica, Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética.
- Giacobbo, J. (2014). Estudos de caso comparativos entre normas de iluminação: NBR 5413 e NBR ISO 8995-1. Monografia. Porto Alegre: Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Federal do Rio Grande do Sul.
- MTE (2009). NR-17: Ergonomia. Brasília-DF: Ministério do Trabalho e Emprego.
- Ritter, V. M. (2014). Avaliação das Condições de Conforto térmico, lumínico e acústico no ambiente escolar, no período de inverno: O Caso do Câmpus Pelotas Visconde da Graça. Dissertação de Mestrado. Pelotas: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.