

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS**

JULIANA ZANDONA FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LÂMPADAS FLUORESCENTES
TUBULARES T8 E TUBULARES DE LED**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2014**

JULIANA ZANDONA FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LÂMPADAS FLUORESCENTES
TUBULARES T8 E TUBULARES DE LED**

Monografia apresentada para a obtenção do título de Especialista no Curso de Pós Graduação em Construções Sustentáveis, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. José Alberto Cerri

**CURITIBA
2014**

JULIANA ZANDONA FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LÂMPADAS FLUORESCENTES
TUBULARES T8 E TUBULARES DE LED**

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do título de *Especialista* no Curso de Construções Sustentáveis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, pela comissão formada pelos professores:

Orientador (a):

Prof. Dr. José Alberto Cerri

Professor do III CECONS, UTFPR

Banca:

Prof. Dr. Jair Urbanetz,

Departamento Acadêmico de Eletrotécnica - DAELT, UTFPR

Prof. MTec. João Gois

Departamento Acadêmico de Eletrônica - DAELN, UTFPR

CURITIBA

2014

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, e em especial à minha mãe, Adriana Zandona Ferreira por guiar meus passos... Saudades....

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial à Nicole Albizu Piaskowy por seu bom humor, parceria e amizade, o que me incentivou a concluir este trabalho;

Agradeço a meu irmão, Alexandre Zandona Ferreira, futuro engenheiro eletricista, “mago do DIALux”, pelas assessorias no uso do software e revisão de conteúdo;

Ao Luiz Henrique Mussi Maestrelli pela inspiração na escolha do tema, fornecimento das lâmpadas de LED utilizadas no trabalho, por sua paciência, atenção e suporte;

Ao professor Aloísio Schmid da UFPR, pela prontidão e fornecimento de material utilizado nos estudos;

Ao professor José Alberto Cerri, pelas assessorias e atenção;

Ao Paulo e ao Wesley, da UTFPR, pela colaboração na substituição das lâmpadas;

Ao meu pai Adilson Ferreira pelos incentivos a realizar essa especialização.

RESUMO

O uso de lâmpadas de LED em projetos de iluminação artificial vem aumentando nos últimos anos e em muitos casos, já foi comprovada sua durabilidade, eficiência energética e luminosa em comparação com lâmpadas convencionais. Toda essa economia e maior durabilidade reduz os impactos ao meio ambiente, seja na redução da emissão de CO₂ por kWh de energia gerada, seja por reduzir a quantidade de lixo ou pela ausência de elementos tóxicos a saúde humana e ao meio ambiente. No entanto, faltam estudos comparativos que comprovem a viabilidade da substituição de lâmpadas econômicas, como é o caso das fluorescentes tubulares T8, por tubulares do tipo LED. Este trabalho tem como objetivo comparar os dois tipos de lâmpadas, verificando o desempenho luminoso do LED e sua viabilidade econômica.

Palavras-chave: eficiência, lâmpadas fluorescentes tubulares T8, tubulares de LED, estudo comparativo.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	8
1.1 Justificativa da pesquisa.....	9
1.2 Objetivo.....	9
1.3 Estrutura da pesquisa	9
2. REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1 Panorama mundial e nacional sobre consumo energético	10
2.2 Conceituação.....	17
2.2.1 Conceitos luminotécnicos	17
2.2.2 Evolução tecnológica das lâmpadas	26
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
3.1 Cálculo do <i>payback</i> a partir de dados de fábrica	37
3.2 Simulação no software DIALux	38
3.3 Ensaio fotométrico	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Cálculo do <i>payback</i> a partir de dados de fábrica	42
4.2 Simulação no software DIALux	47
4.3 Ensaio fotométrico	52
5. CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

A desestabilização da economia mundial na década de 70 - quando os preços do barril de petróleo chegaram a quadruplicar, provocando a recessão nos Estados Unidos e na Europa (DIPLÔ, 2014) - levou a humanidade a perceber sua dependência do petróleo. Foi nesse contexto que surgiram as primeiras iniciativas em buscar fontes alternativas de energia, em aumentar a eficiência energética e reduzir o consumo.

Esses padrões de consumo exacerbado característicos do fim do século XIX e do século XX, embasaram o surgimento dos conceitos de sustentabilidade que começaram a ser propagados em 1972 com a Conferência de Estocolmo sobre o Ambiente Humano e se popularizaram com a Eco-92 no Rio de Janeiro.

Os últimos dados sobre a produção de energia no mundo, indicam que as maiores fontes geradoras de energia elétrica são as maiores emissoras de gases CO₂, agravadores do efeito estufa: mais de 67% da energia elétrica produzida vem da queima de derivados de petróleo, carvão mineral e gás natural; e apenas 16% tem origem na hidroeletricidade, uma fonte energética considerada renovável por muitos estudiosos. No Brasil, a maior parte da energia elétrica produzida é de origem em hidrelétricas, e pequena parcela vem de termelétricas (ANTÔNIO GUILHERME, 2014).

O dióxido de carbono (CO₂) em conjunto com o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) são os principais agentes agravadores do aquecimento global. (INSTITUTO CARBONO BRASIL, 2014). Para cada quilowatt (kW) de energia economizada ocorre uma redução da taxa de emissão de CO₂, chegando a 1tonelada para cada megawatt hora. A utilização de lâmpadas e aparelhos eletrônicos mais econômicos e mais duráveis também contribui na redução da demanda energética e na geração de lixo (LEDSOLUTIONS, 2014).

Na construção civil, a busca por projetos de edificações mais eficientes, de baixo impacto ao meio ambiente e de reduzida demanda energética, vêm forçando a indústria e os profissionais das áreas de engenharia, design de produto, interiores e arquitetura a se renovarem e a criarem novas soluções.

As áreas relacionadas a iluminação artificial são responsáveis por parcela significativa na demanda energética, tanto em grande escala - como na iluminação de vias públicas ou de edifícios industriais, - quanto em escalas menores - em edifícios comerciais e habitacionais. O desenvolvimento de luminárias com tecnologia LED (*Light Emitting Diode*) surge, nesse

contexto, como alternativa para as lâmpadas convencionais de baixo rendimento energético.

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Já foram comprovadas, em inúmeros estudos, as vantagens de luminárias LED sobre outras que utilizem lâmpadas incandescentes ou halógenas, como no o artigo “LED *versus* Lâmpadas Convencionais” (BLEY, 2011), no “Estudo Fotométrico de Lâmpadas de LED” (BARBOSA, 2012) e no “LED, o novo paradigma da iluminação pública” (SALES, 2011).

No entanto quando se trata de comparar lâmpadas fluorescentes, já mais econômicas, com LEDs equivalentes, há poucos estudos comparativos que possam comprovar que o LED se apresente como alternativa viável. Alguns estudos a respeito já buscaram essa resposta, como no artigo em inglês “*Should You Replace your T8 Fluorescent Lamps with T8 LED tubes?*” (PREMIER LIGHTNING, 2013) e no “Viabilidade da transição da Fluorescente para o LED no Ambiente Industrial” (MODENA, 2011).

1.2 OBJETIVO

Deste modo, o presente estudo tem como objetivo comparar os dois tipos de lâmpadas, as tubulares fluorescentes compactas, muito utilizadas em edifícios públicos e comerciais, e as tubulares de LED, como opção para a substituição dessas lâmpadas.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho se estrutura em cinco capítulos e referência bibliográfica. No capítulo 2, será apresentado o panorama mundial e nacional sobre a demanda e produção energética e tendências desse consumo para os próximos anos. Serão abordadas as características da luz, os conceitos de iluminação e tipos de lâmpadas comercializadas. Serão apresentados fatores relevantes das lâmpadas convencionais, com ênfase nas fluorescentes, como: história, fabricação, funcionamento, descarte e propriedades técnicas. Será explicado o conceito de funcionamento das lâmpadas de LED, abrangendo os aspectos de produção das lâmpadas, os aspectos econômicos (*payback*), e estudo de caso.

No capítulo 3, será apresentada a metodologia do trabalho, cuja análise dar-se-á em um procedimento experimental dividido em três etapas: a primeira através da comparação de valores luminotécnicos e da eficiência energética fornecidos pelos fabricantes; na segunda, de simulações no software DIALux; e por último, de medições *in loco* da iluminância de uma pequena cozinha da UTFPR.

No capítulo 4, serão analisados os dados obtidos em cada etapa, quando será possível fazer uma comparação real e mais justa dos dois tipos de lâmpadas.

No capítulo 5, da conclusão geral do trabalho, será demonstrado se as lâmpadas tubulares de LED podem ser alternativas viáveis às tubulares fluorescentes.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PANORAMA MUNDIAL E NACIONAL SOBRE CONSUMO ENERGÉTICO

Para compreender melhor as razões do desenvolvimento deste trabalho, faz-se necessário avaliar o panorama mundial e nacional a respeito do consumo e da geração de energia e seus desdobramentos ambientais e sociais.

As fontes de energia são classificadas em renováveis - aquelas oferecidas pela natureza de maneira ininterrupta, como o sol, os ventos e os mares - e não-renováveis, esgotáveis pois seu uso ocorre em uma velocidade muito superior ao tempo necessário para serem formados de maneira natural – tais como os combustíveis fósseis, o carvão mineral, o petróleo, o gás natural, e os combustíveis radioativos. As chamadas **fontes primárias de energia**, ou fontes de energia natural, são aquelas obtidas diretamente de recursos naturais que podem gerar energia de forma direta, tais como a energia hídrica, solar e eólica; biomassa, oceânica e geotérmica; carvão mineral, gás natural e petróleo. As **fontes secundárias de energia**, são aquelas obtidas da atuação do homem sobre as fontes primárias, como a gasolina e a eletricidade (que pode ser gerada a partir da transformação da energia eólica, solar e hídrica, por exemplo) (ELETROBRÁS, 2014).

O desenvolvimento econômico de um país demanda geração de energia para produzir luz, calor, força e movimento, sejam elas produzidas por fontes primárias ou secundárias. O consumo de energia elétrica *per capita* é um grande indicador dos índices de desenvolvimento de uma nação:

O consumo total de energia elétrica não deve ser utilizado para comparar diversos países porque não leva em consideração as diferenças de população. Por isso, o índice de consumo utilizado mundialmente é o consumo de energia elétrica por habitante, denominado de consumo *per capita*.

Não é por acaso que a Islândia possui o maior consumo de energia per capita e apresenta o maior índice de desenvolvimento humano. Brasil e Rússia, praticamente empatados, são os únicos países, do grupo denominados **BRICs**, no grupo de países com IDH elevado. Contudo, isto nos coloca apenas no distante 70 lugar na classificação do Índice de Desenvolvimento Humano, último lugar no grupo de IDH elevado (ANTÔNIO GUILHERME, 2014).

As projeções apontam para um aumento de 56% no consumo energético em escala mundial entre 2010 e 2040, segundo o IEO 2013 – EIA (sigla em inglês para *International Energy Outlook 2013 – U.S. Energy Information Administration*). O consumo de países não-OCDE¹ deve aumentar em 90% e de países OCDE em 17%, aumento ilustrado na gráfico 1, a seguir.

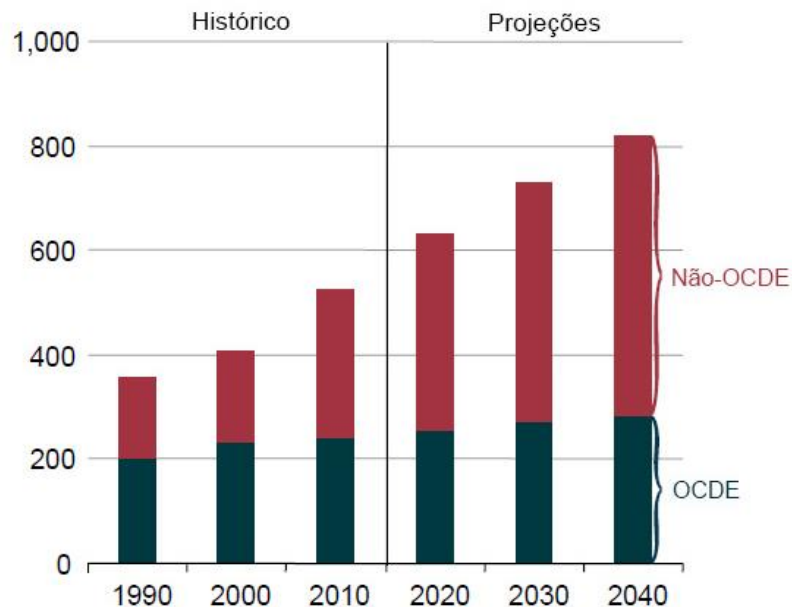


GRÁFICO 1: Consumo energético mundial (Quadrilhões Btu) 1990-2040

FONTE: EIA (2013a)

O gráfico 2 ilustra as tendências a nível mundial de aumento do consumo energético por origem, de 2010 até 2040. Os combustíveis fósseis (carvão mineral, o petróleo e o gás natural) ainda serão a maior fonte de energia no mundo, porém nas projeções, o consumo principalmente de petróleo deve sofrer uma queda de 2% entre 2010 e 2040, em sua maioria devido à alta prevista nos preços, o que levará muitos consumidores a procurarem fontes alternativas de energia. O aumento mais significativo se dará nas fontes renováveis subindo de 11% em 2010 para 15% em 2040 seguido da energia nuclear, de 5% para 7% (EIA, 2013a).

Sobre as emissões de gases poluentes, apesar das políticas e leis limitadoras do uso de combustíveis fósseis, a emissão de dióxido de carbono (CO₂) relacionado à produção energética

¹ A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE (em inglês *OECD*) é uma organização internacional composta por 34 membros fundada em 14 de dezembro de 1961 com o objetivo de trocar informações e alinhar políticas com o objetivo de potencializar seu crescimento econômico e colaborar com o desenvolvimento de todos os demais países membros. A OCDE é um órgão internacional e intergovernamental que reúne os países mais industrializados e alguns emergentes como México, Chile e Turquia. O Brasil não é membro da OCDE, porém participa do programa de *enhanced engagement* (engajamento ampliado) que lhe permite participar de Comitês da Organização. (PCN, 2014)

deve subir 46% em trinta anos: de 31 bilhões de toneladas em 2010, para 36 bilhões em 2020, e para 45 bilhões em 2040 (EIA, 2013a).

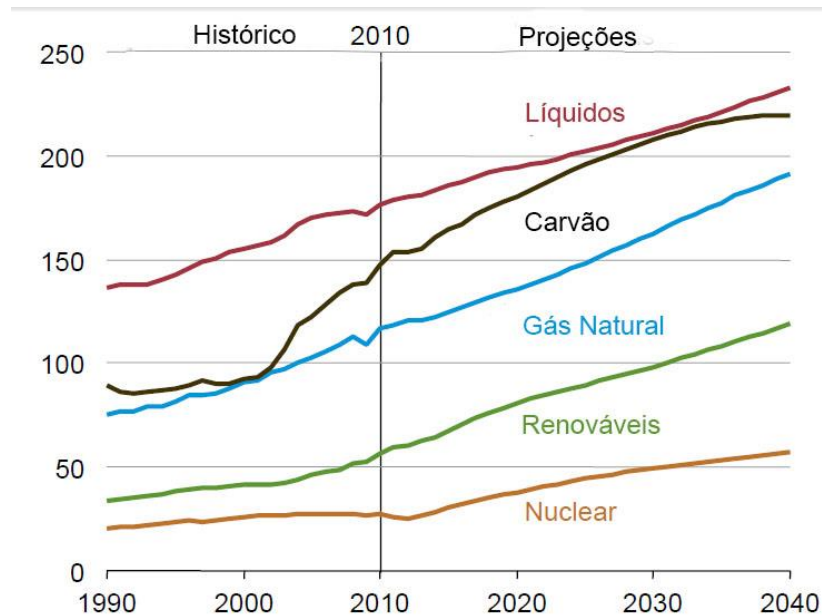


GRÁFICO 2: Consumo energético mundial por tipo de combustível 1990-2040

FONTE: EIA (2013a)

O gráfico 3, ilustra o cenário de consumo por fonte energética em 2010, o uso de combustíveis fósseis é responsável por mais de 80% do consumo. A maior fonte energética é o petróleo (32,4%), seguido pelo carvão mineral (27,3%), gás natural (21,4%), fontes renováveis (10%), nuclear (5,7%), hidráulica (2,3%), e outras fontes de energia em pequena representatividade (0,9%).

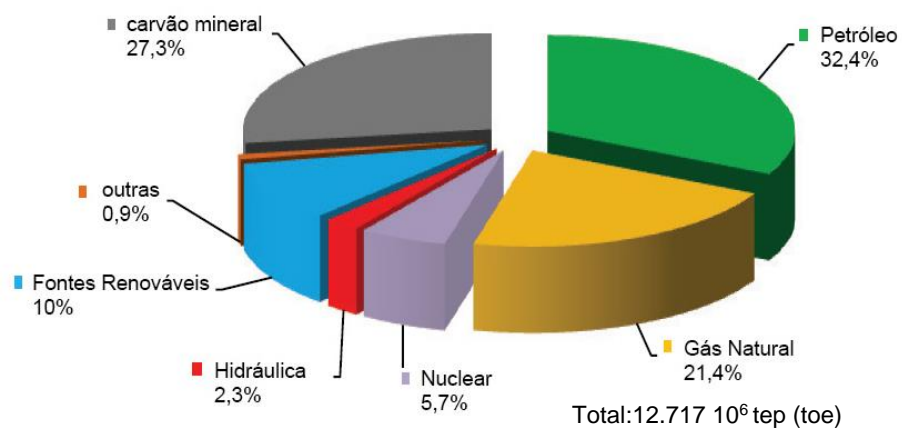


GRÁFICO 3: Gráfico sobre consumo mundial de combustíveis em 2010

FONTE: EIA (2013a)

O gráfico 4 aponta que, tratando apenas da energia **elétrica** em escala mundial, a maior fonte geradora em 2010 era o carvão mineral, seguido pelo gás natural, hidráulica, nuclear, renováveis (não hidráulicos), e por último de combustíveis líquidos (como petróleo e outros óleos). Ou seja, as fontes geradoras de energia elétrica mais significativas no período corresponde às maiores emissoras de CO₂, o que torna necessária uma substituição dessas fontes de energia por outras renováveis menos poluentes e de uma redução da demanda de energia elétrica.

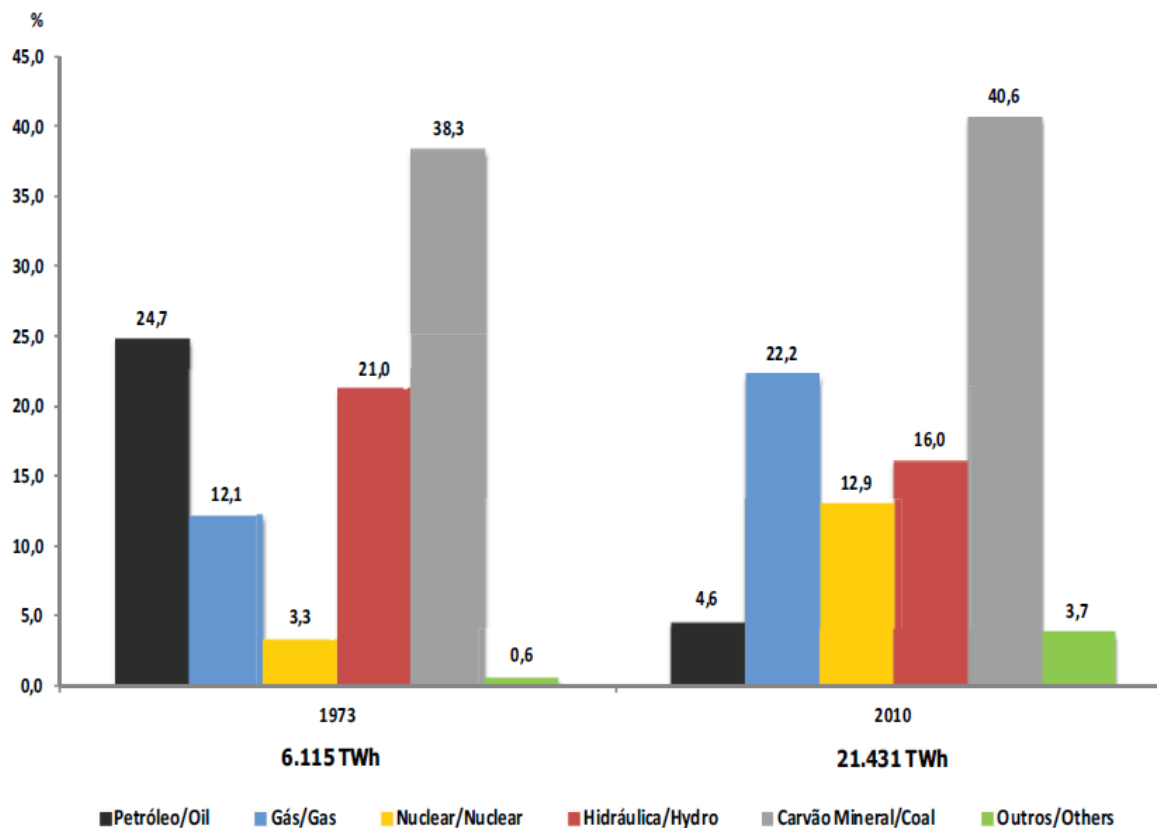


GRÁFICO 4: Produção mundial de energia elétrica por fonte

FONTE: EPE (2013)

A maior demanda de energia elétrica do setor residencial ocorre, em grande parte, em países não membros da OCDE, onde o crescimento econômico aumenta os padrões de vida e a demanda de eletricidade no setor (Gráfico 5). Em países não membros da OCDE o consumo de energia residencial sobe 2,5% por ano, em comparação com a taxa muito mais lenta de 0,4% ao ano para os países da OCDE, onde ocorrem aumentos menores da demanda devido aos padrões de consumo de energia residencial bem estabelecidos, ao crescimento populacional reduzido e ao envelhecimento de sua população. O Gráfico 6 aponta que, nos países não membros da OCDE, o crescimento econômico e as atividades comerciais tendem a aumentar rapidamente ao longo do período de projeção 2010-2040, o que acarretará num crescimento

significativo da demanda de energia nos setores de serviços. O consumo de energia no setor comercial entre as nações não pertencentes à OCDE poderá crescer 3,2% ao ano no período entre 2010-2040, pois o crescimento populacional nesses países é maior, o que resulta em aumento de necessidades como educação, saúde e serviços sociais e conseqüentemente da energia necessária para provê-los. Além disso, com o crescimento econômico dos países em desenvolvimento, espera-se que sejam criadas mais empresas relacionadas ao setor de serviços, o que irá aumentar a demanda por energia no setor comercial.

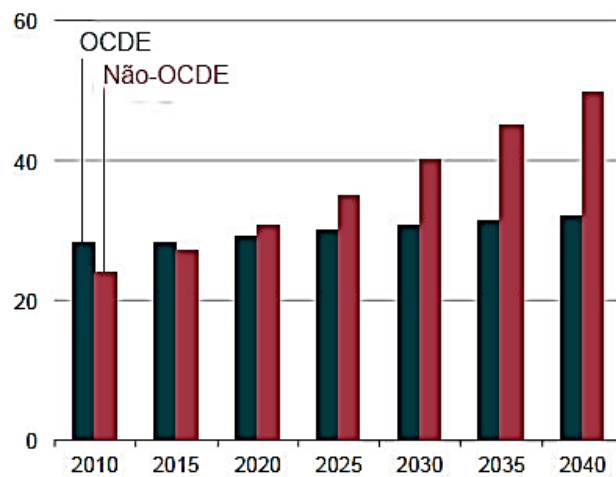


GRÁFICO 5: Demanda de energia elétrica no setor residencial de 2010-2040 para países da OCDE e não-OCDE

FONTE: EIA (2013a)

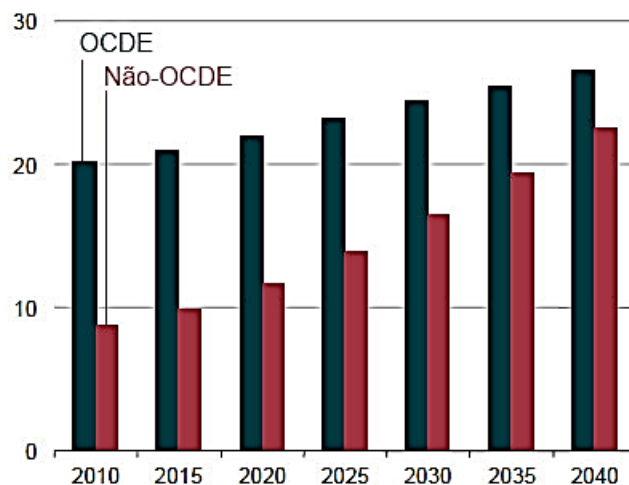


GRÁFICO 6: Demanda de energia elétrica no setor comercial para países OCDE e não-OCDE

FONTE: EIA (2013a)

O Brasil é o oitavo maior consumidor e o décimo maior produtor de energia no mundo, segundo o último relatório da EIA 2013 (*Energy Information Administration*). O Gráfico 7 ilustra que o **consumo energético** brasileiro é composto de 47% de combustíveis líquidos, seguido por 35% de hidroeletricidade e apenas 8% de gás natural.

Com relação à **produção de energia**, o setor de eletricidade brasileiro é o terceiro maior das Américas, atrás apenas dos Estados Unidos e do Canadá. Segundo o *Report Brasil* (EIA, 2013b), o Brasil tinha em 2010, 114 gigawatts de capacidade instalada e em 2011, o país gerou 531 bilhões de kWh de energia elétrica, sendo que 80% desses tem origem em hidrelétricas e em menor quantidade, em combustíveis fósseis, energia nuclear, energias renováveis e outras.

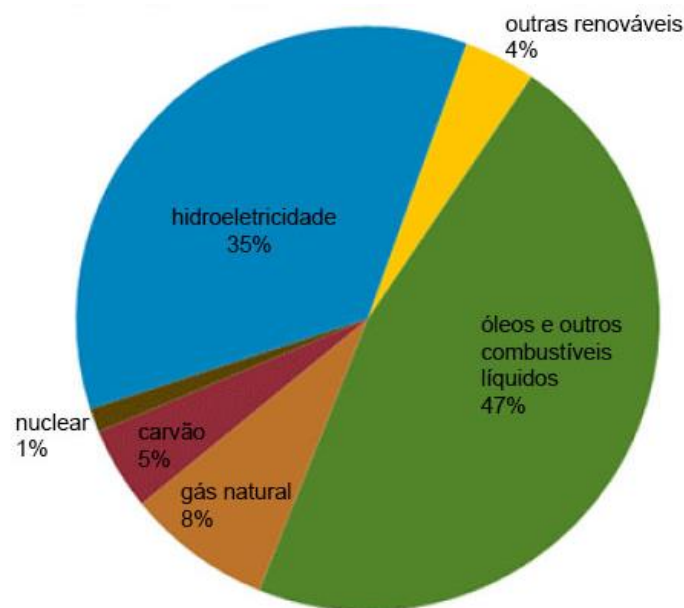


GRÁFICO 7: Consumo total de energia primária no Brasil por tipo de combustível em 2011

FONTE: EIA (2013b)

A geração de energia por combustíveis fósseis, no Brasil, foi responsável por cerca de 17% do total de energia gerada em 2011, sendo que a maior fonte deste tipo de energia é o gás natural (Gráfico 8). A tendência é que aumente a produção por esse tipo de energia à medida que o país se desenvolve e que se aumentam o número de novas fontes de fornecimento de gás natural (EIA, 2013b).

A maior parte da eletricidade gerada no Brasil tem origem em um recurso renovável, na hidroeletricidade. Apesar de ser considerada uma energia limpa e de baixo custo por megawatt, a sua construção gera muita controvérsia, manifestações e conflitos. É responsável por um grande impacto local e regional, alagando áreas de florestas nativas, áreas de comunidades indígenas e terras produtivas, além da alteração de todo o ciclo hidrológico, cadeia alimentar e

migração de peixes, chegando a eliminar espécies animais e vegetais tanto aquáticas quanto terrestres.

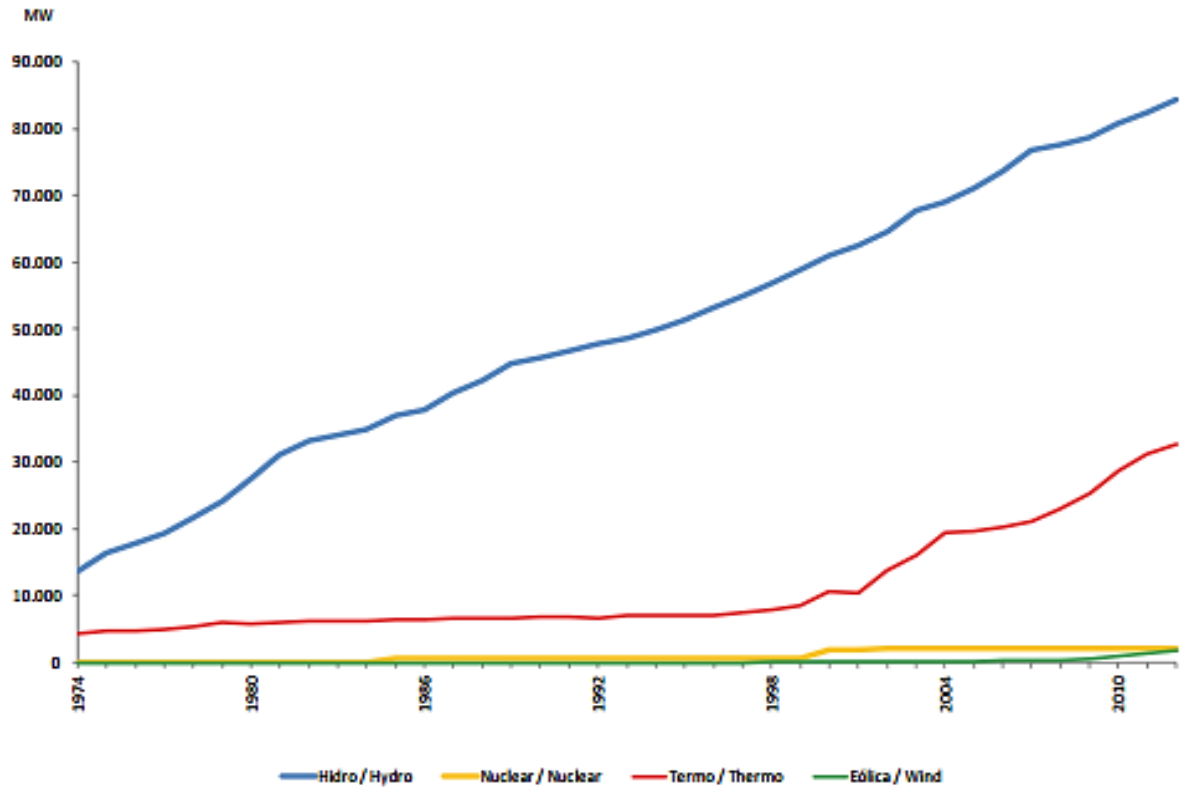


GRÁFICO 8: Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil por fonte

FONTE: EPE (2013)

No entanto para o crescimento econômico do país faz-se necessário expandir a capacidade de energia instalada para atender ao aumento da demanda, como por exemplo o projeto da Usina Hidroelétrica de Belo Monte, no Rio Xingu no estado do Pará, que se concluída, será a terceira maior hidroelétrica em potência instalada do mundo.

Um outro problema do sistema elétrico brasileiro são as grandes perdas durante a transmissão e distribuição, o que gera custos desnecessários e interrupções na transmissão. As grandes distâncias das fontes de energia são os principais motivos de tanta perda. Exemplo da principal fornecedora de energia, a hidroelétrica binacional de Itaipu, no Rio Paraná na fronteira com o Paraguai, que é transmitida até o Estado de São Paulo, de onde pode ser distribuída para as cinco regiões brasileiras, inclusive Norte e Nordeste (ELEKTRO, 2014).

A iluminação artificial é responsável por aproximadamente 20% de toda a energia elétrica consumida no país, desses, cerca de 20% representa o consumo no setor residencial e

mais de 40% representa a energia elétrica consumida pelo setor de comércio e serviços (ELEKTRO, 2014).

2.2 CONCEITUAÇÃO

O uso de lâmpadas fluorescentes é maior no setor comercial e de serviços públicos, onde uma redução do consumo energético com iluminação deve gerar economias significativas e reduzir a demanda energética total no setor

Para reduzir esse consumo, é importante que sejam implantados projetos arquitetônicos mais bem elaborados que aproveitem a luz natural durante o dia, criem soluções de circulação de ar natural e sombreamento, reduzindo o uso de ar-condicionado, além de um projeto de iluminação artificial mais eficiente, adequado aos usos e aos horários de utilização, com lâmpadas e luminárias mais econômicas, dentre outras estratégias de projeto.

2.2.1 CONCEITOS LUMINOTÉCNICOS

A) LUZ

Para que se entendam os fundamentos norteadores de um projeto luminotécnico, é necessário compreender primeiramente o conceito de luz. A luz pode ser entendida como uma forma de energia radiante que pode ser percebida por nossos órgãos visuais, produzindo a sensação de visão (SÓ FÍSICA, 2014). Muitos outros autores tentaram explicar seus conceitos, como:

“A luz é uma modalidade de energia radiante que se propaga através de ondas eletromagnéticas” (JAMES CLERK MAXWELL *apud* EDUCAR, 2014).

“Uma fonte de radiação emite ondas eletromagnéticas. Elas possuem diferentes comprimentos, e o olho humano é sensível a somente alguns. Luz é, portanto, a radiação eletromagnética capaz de produzir uma sensação visual. A sensibilidade visual para a luz varia não só de acordo com o comprimento de onda da radiação, mas também com a luminosidade” (OSRAM, 2014a).

Desse modo, entende-se que a luz é uma parcela visível de radiação do espectro eletromagnético, ilustrado no gráfico 9. As ondas eletromagnéticas são aquelas que não precisam de um meio para se propagar, podendo ser propagadas no vácuo. O olho humano é

sensível a apenas uma faixa de comprimento de onda, compreendida entre 380 e 780 nm (nanômetros²).

Conforme o gráfico 9, os raios gama possuem o menor comprimento de onda (menor que 0,1 ângström, símbolo Å), seguido pelos raios X, Ultravioleta, e a luz visível; com comprimentos de ondas maiores que o da luz visível, estão o Infravermelho, micro-ondas, e as ondas de rádio, estas últimas com comprimentos de onda de mais de 10⁹ ângström (Å) (INSTITUTO DE FÍSICA, 2014).

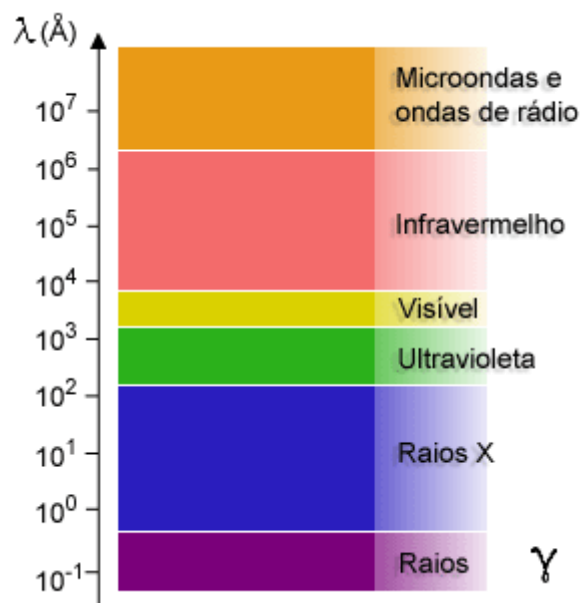


GRÁFICO 9: Comprimentos de onda em ângströms do espectro eletromagnético.

FONTE: EFISICA (2014)

B) COR

As cores que os objetos apresentam sob determinada luz, correspondem à parcela do espectro de luz que eles refletem. Esse raio de luz refletido, possui um determinado comprimento de onda, característico de cada cor, e é recebido por células especializadas na nossa retina e transmitidas ao nosso sistema nervoso através do nervo óptico. enxergamos um objeto na cor verde por exemplo, pois sob a incidência de uma luz branca, ele reflete a porção verde do espectro de luz, que possui determinado comprimento de onda (entre 500 e 570 nm para a cor verde) e absorve as ondas de outros comprimentos. Se retirássemos a porção de verde da fonte de luz, o objeto pareceria ter a cor negra. A cor preta portanto, é a ausência de reflexão

² 1 nanômetro = 10 ângströms (Å)

de luz, ou seja, todos os comprimentos de onda são absorvidos por determinado objeto. O maior comprimento de onda é enxergado como vermelho, e o menor, na cor violeta, conforme figura 1, a seguir (OSRAM, 2014a).

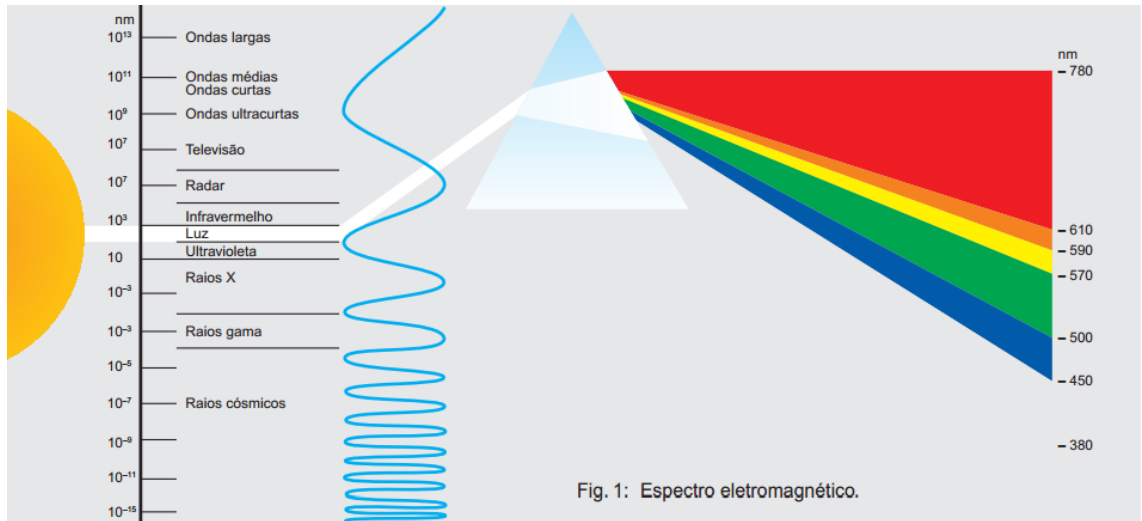


FIGURA 1: Espectro eletromagnético com detalhe do intervalo de comprimento de luz visível

FONTE: OSRAM (2014a)

O espectro de luz visível é composto de sete cores: vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul, anil e violeta. A cor percebida como branca é composta da reflexão de três cores primárias: o vermelho, o verde e o azul, da sigla em inglês RGB (*Red, Green, Blue*). As cores secundárias são obtidas da combinação de duas primárias, tais como o magenta, o amarelo e o ciano, conforme ilustrado na figura 2 abaixo (OSRAM, 2014a).



FIGURA 2: Composição das cores

FONTE: OSRAM (2014a)

Maior é a sensibilidade visual quanto menor o comprimento de onda, ou seja, para ondas de menor comprimento, como as ondas violeta e azul, maior a intensidade de sensação luminosa, ocorrendo o contrário para os raios de cor laranja e vermelho, que possuem maior comprimento de onda (OSRAM, 2014a).

C) TEMPERATURA DE COR

A temperatura de cor refere-se a uma associação da sensação térmica de quente e frio a uma percepção visual da cor da luz (Figura 3). É uma analogia a uma cor emitida ao se aquecer um corpo negro (que absorve toda a luz que incide sobre ele) que parte de um tom avermelhado e passa a uma cor mais esbranquiçada à medida em que é aquecido a maiores temperaturas (CAMBRIDGE IN COLOUR, 2014). Logo quando se diz que uma luz é “fria”, mais clara ela é e maior sua temperatura de cor ($> 6000\text{K}$ - kelvin), de aparência azul roxeada; quanto menor a temperatura de cor, mais amarelada será a luz ($< 3000\text{K}$); a “luz branca natural”, emitida pelo Sol em céu aberto ao meio-dia, possui temperatura de cor de 5.800K (ELEKTRO, 2014).

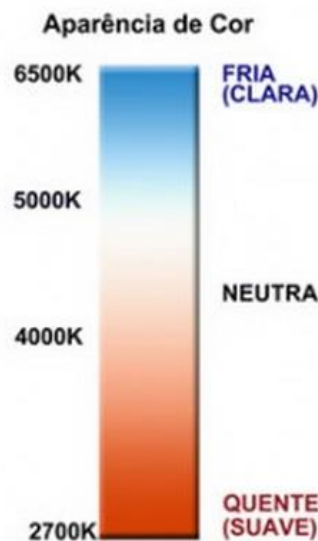


FIGURA 3: Temperatura de cor
FONTE: SOLELUX (2014)

A temperatura de cor da iluminação afeta o funcionamento do corpo humano em conjunto com a intensidade luminosa. O hormônio produzido na glândula pineal, a melatonina, é liberada a medida que o sol se põe promovendo o sono. O cortisol, o hormônio do estresse, funciona de maneira oposta mantendo o organismo ativo para solucionar problemas durante o dia. Luzes semelhantes à luz do meio-dia - mais intensa de tons mais azulados - tem um efeito

ativador aumentando a atenção e a energia (Figuras 4 e 5). Ocorre o contrário com as luzes mais amareladas por serem mais semelhantes a luz do entardecer, mais aconchegantes e relaxantes (OSRAM – 2014a).



FIGURA 4: Temperatura de cor associada à luz natural e períodos do dia

FONTE: (OSRAM, 2014a)

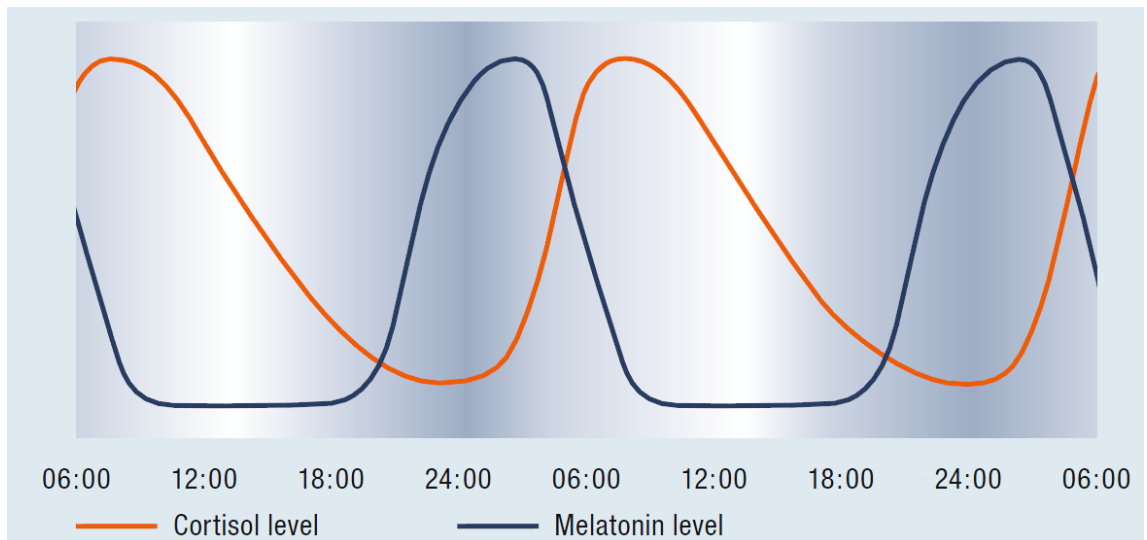


FIGURA 5: Níveis de hormônios do sono ao longo do dia

FONTE: (OSRAM, 2014a)

D) ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR (IRC)

Segundo informações da ALUMBRA (2014), o índice de reprodução de cor compara a cor de um objeto sob uma luz artificial com a cor real desse mesmo objeto, sob a luz natural, do sol. Varia de zero a cem, e quanto mais próximo de 100, maior é a fidelidade e proximidade

da cor real. O IRC não depende da temperatura de cor, pois lâmpadas com mesma temperatura de cor podem possuir índices de reprodução de cor diferentes, conforme figura 6.

Esse índice foi criado em 1931 pela comissão Internacional de Iluminação, CIE (*Commission International de Eclairage*), que concebeu um sistema que compara matematicamente como uma fonte de luz reproduz oito cores especificadas pelo CIE. Pode ser medido utilizando um espectrofotômetro *Eye-One* com aplicativo *Eye-One Share* (CORALIS, 2014).

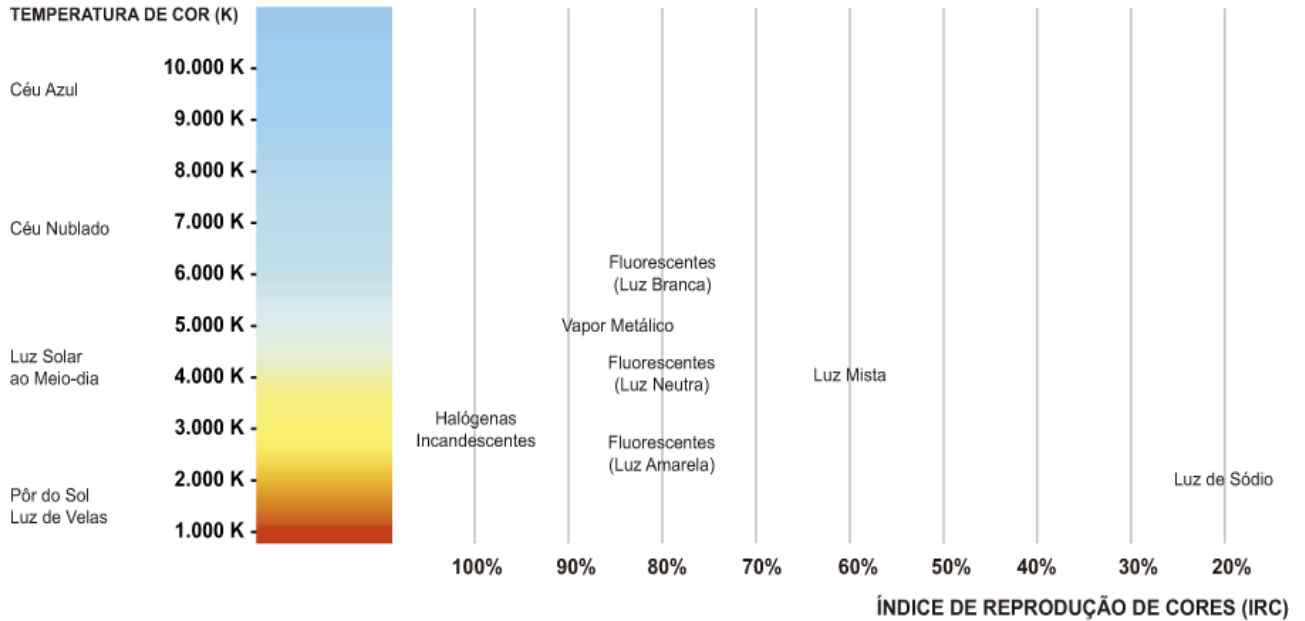


FIGURA 6: Índice de reprodução de cor por tipos de lâmpadas x temperaturas de cor

FONTE: EMPALUX (2014)

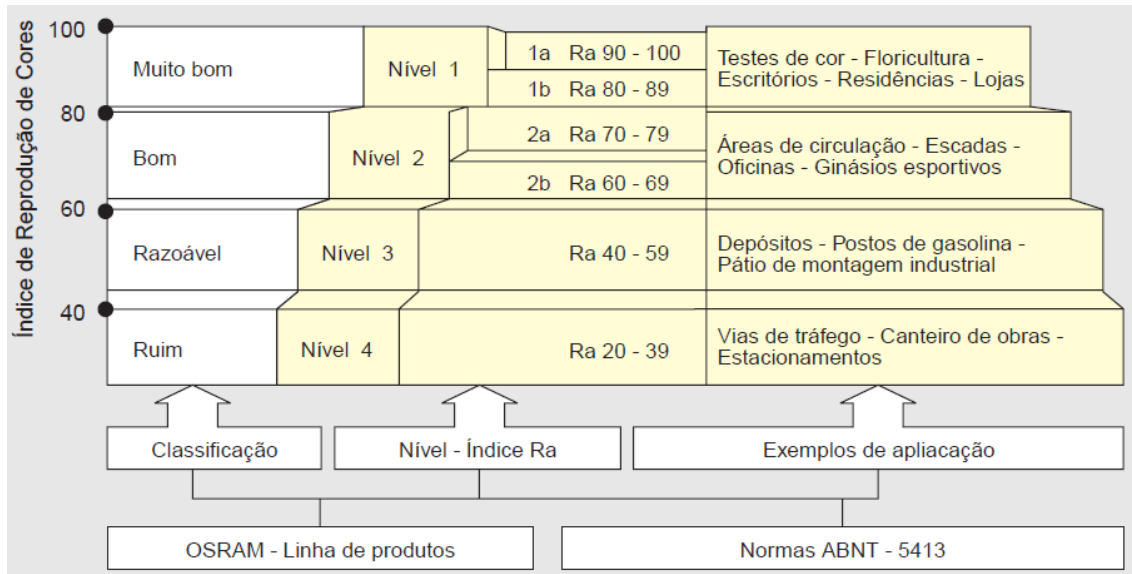


FIGURA 7: Índices de reprodução de cor para atividades normatizadas pela ABNT 5413

FONTE: (OSRAM, 2014a)

Na figura 7, é utilizado o símbolo Ra (do inglês *Rendering Index Average*) para Índice de reprodução de cor (IRC), em inglês *Color Rendering Index* (CRI). A “Iluminação de passagem” como a de túneis e ruas, que geralmente utiliza lâmpadas de descarga de vapor de sódio por sua eficiência luminosa, possui baixo índice de reprodução de cor, cerca de 25 Ra pois não são importantes para essa atividade. No entanto há certas atividades que demandam elevados IRC, como em consultórios de próteses dentárias, por exemplo, onde deve-se ter a maior fidelidade na representação de cor para se comparar com a cor natural dos dentes por exemplo; ou ainda em um comércio de roupas, maquiagem e acessórios, onde é importante que esse índice seja elevado tanto como estratégia de marketing, valorizando o produto, quanto para garantir satisfação do consumidor - a cor do produto deve se manter inalterada sob luz do dia, que reproduz a cor real do objeto (ARQBRASIL, 2014).

E) INTENSIDADE LUMINOSA

Intensidade luminosa é o fluxo luminoso irradiado na direção de um determinado ponto. Designada pelo símbolo I e unidade em candela (cd) (OSRAM, 2014a).

F) FLUXO LUMINOSO

O fluxo luminoso é a quantidade de luz que uma fonte luminosa emite. É medido em lúmens (lm) (Figura 9).



FIGURA 8: Fluxo luminoso

FONTE: OSRAM (2014a)

É representado pela letra grega Φ (FI). A sensibilidade do olho humano é máxima para 1/680 W emitidos a 555 nm. Pode ser medido em laboratório com um aparelho chamado esfera integradora de Ulbricht (FAU, 2014).

G) ILUMINÂNCIA

Iluminância, iluminamento, ou nível de iluminação é a luz irradiada por uma fonte de luz, relacionada à superfície na qual ela incide a uma certa distância. É a quantidade de luz de um ambiente. É medida por meio de um luxímetro, em uma unidade denominada lux (lx), símbolo “E”, no entanto não pode ser vista. Existem níveis médios de iluminâncias adequados para determinadas atividades, gerando conforto visual e até aumento de produtividade, de acordo com a tabela 1.

TABELA 1: Iluminâncias adequadas por atividade

Descrição da Atividade Em (lx)	
Depósito	200
Circulação/corredor/escadas	150
Garagem	150
Residências (cômodos gerais)	150
Sala de leitura (biblioteca)	500
Sala de aula (escola)	300
Sala de espera (foyer)	100
Escritórios	500
Sala de desenhos (arquit. e eng.)	1000
Editoras (impressoras)	1000
Lojas (vitrines)	1000
Lojas (sala de vendas)	500
Padarias (sala de preparação)	200
Lavanderias	200
Restaurantes (geral)	150
Laboratórios	500
Museus (geral)	100
Indústria/montagem (ativ. visual de precisão média)	500
Indústria/inspeção (ativ. de controle de qualidade)	1000
Indústria (geral)	200
Indústria/soldagem (ativ. de muita precisão)	2000

FONTE: ABNT - NBR 5413 *apud* OSRAM (2014a)

H) LUMINÂNCIA

É a luz refletida pelas superfícies em direção aos olhos do observador. Depende tanto da iluminância quanto das propriedades reflexivas das superfícies. (ELEKTRO,2014). A figura 9 ilustra a diferença entre luminância e iluminância.

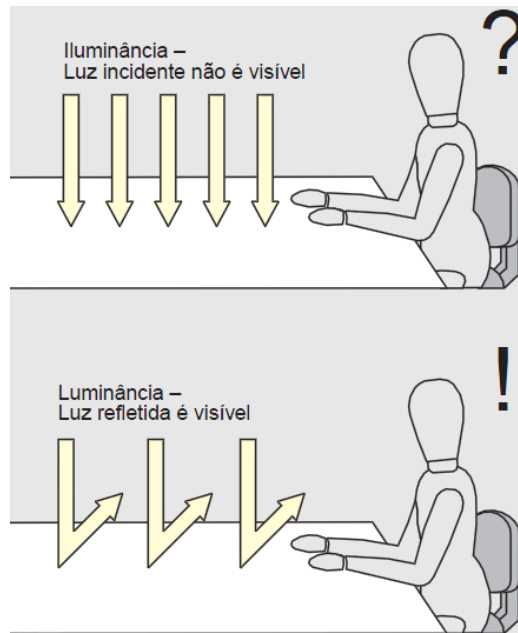


FIGURA 9: Diferença entre luminância e Iluminância

FONTE: (OSRAM,2014a)

I) OFUSCAMENTO

O Ofuscamento é um desconforto visual causado por uma distribuição inadequada de luz, brilhos, e contrastes excessivos, reduzindo a capacidade de distinguir objetos. Pode ser direto, por meio de uma fonte de luz direcionada diretamente ao campo visual, ou reflexivo, quando as superfícies de trabalho refletem a luz no campo visual. A partir de 200cd/m^2 , a luminância é considerada incômoda. (OSRAM, 2014a)

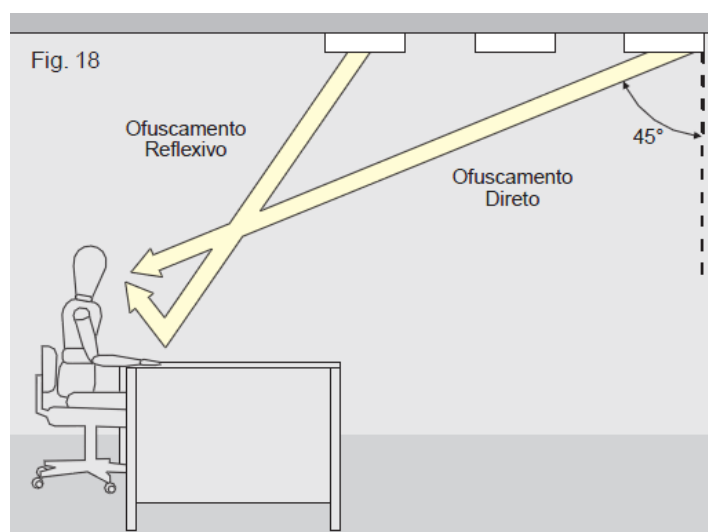


FIGURA 10: Tipos de ofuscamento

FONTE: (OSRAM, 2014a)

J) PROJETOS DE ILUMINAÇÃO

Segundo a IESNA (2014) (sigla em inglês para *Illuminating Engineering Society of North America*), as bases para um projeto de iluminação de qualidade devem ser dadas pelas relações entre: a distribuição de luz com a visibilidade, integração com a luz natural e a poluição visual; a relação entre o ambiente e o local da tarefa, considerando luminárias, cor, ofuscamento, tremulação e luminância por exemplo; e a relação entre a iluminação e as pessoas ou os objetos através de modelagens, pontos de destaque, distribuídos dentro de três aspectos: arquitetura, aspectos econômicos e ambientais e as necessidades humanas.

Desde o advento da lâmpada elétrica de Thomas Edson, houve prevalência de aspectos mais quantitativos de normas para projetos de iluminação. Apenas mais recentemente, aspectos mais qualitativos, além de sua influência da saúde humana e meio ambiente têm estado presente em fóruns e publicações especializadas (NEVES, G.; SCARAZZATO, P. S.; GRANJA, A.D, 2012).

2.2.2 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS LÂMPADAS

Será apresentada em sequência cronológica a evolução das lâmpadas, bem como suas definições, características e particularidades de cada uma.

K) LÂMPADAS INCANDESCENTES

Por séculos, a principal fonte de iluminação artificial foi o fogo, sendo utilizado em tochas, lucernas, velas e candelabros, tanto na iluminação pública quanto nas casas.

Em 1783, foi inventada a lâmpada de dupla corrente de ar, a lâmpada de Argand (Figura 11), do suíço Pierre Argand. Era uma lâmpada que ainda utilizava o fogo, produzindo pouca fumaça e chama estável, através da inserção de um pavio dentro de uma chaminé de vidro, por onde passava uma corrente de ar ascendente, o que auxiliava na combustão. Em 1792, Willian Murdoch, um engenheiro escocês, iluminou sua casa e sua fábrica com o auxílio do gás obtido na destilação do carvão fóssil, sendo a partir de então utilizada na iluminação pública (MUSEU DA LÂMPADA, 2014).

Alguns inventores tiveram sua contribuição para o invento da primeira lâmpada comercializável do mundo, a incandescente de Thomas Alva Edison. A base que sustenta o funcionamento de uma lâmpada foi criada por Hamphry Davy, em 1809, quando colocou uma fina tira de carbono entre os dois polos de uma bateria. Mais tarde em 1840, Warren de la Rue, passou eletricidade dentro de um tubo vazio contendo um filamento de platina, emitindo luz e

calor. No entanto o invento era comercialmente inviável. Algumas variações dessa lâmpada foram testadas utilizando vácuo e outros tipos de filamentos, porém sem muito sucesso.

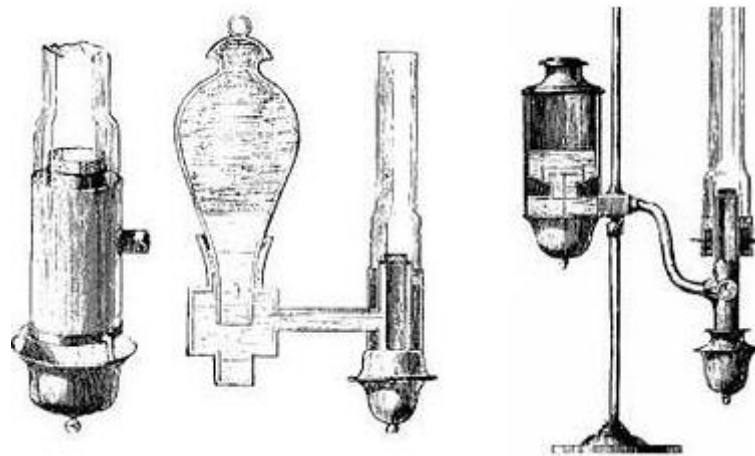


FIGURA 11: Lâmpada de Argand
 FONTE: (MUSEU DA LÂMPADA, 2014)

Thomas Edison, em 1879, comprou a patente de Woodward e Evans e desenvolveu o primeiro projeto de lâmpada elétrica comercializável, composta por uma base metálica e um filamento de carbono no vácuo dentro de um bulbo de vidro.

Atualmente, os filamentos são feitos de tungstênio (que produz luz ao atingir cerca de 3mil graus durante a passagem de corrente elétrica) e o bulbo é preenchido com a mistura de gases inertes, como o nitrogênio, argônio ou criptônio, para evitar que os filamentos se queimem muito rapidamente.

Em 2012, a União Europeia decidiu abolir o uso desse tipo de lâmpada por seu alto consumo energético e baixo rendimento: apenas 5% da energia elétrica consumida é transformada em luz, o restante é transformado em calor. No Brasil as incandescentes não serão mais fabricadas a partir de 2016, e as incandescentes com mais de 100W já não estão sendo mais comercializadas.

L) LÂMPADAS INCANDESCENTES HALÓGENAS

As lâmpadas incandescentes halógenas (Figura 12) possuem o mesmo princípio das incandescentes comuns, no entanto, dentro do bulbo foram adicionados gases inertes e pequena quantidade de halogênio, que se combinam com partículas de tungstênio (desprendidas do filamento durante a passagem de corrente) fazendo com que as partículas se depositem de volta no filamento. Assim, a durabilidade média do filamento é aumentada, e o escurecimento do

bulbo é reduzido. Possui maior eficiência luminosa, luz mais brilhante, branca e uniforme, o que permite realçar cores e objetos com maior eficiência que das lâmpadas incandescentes comuns. São muito utilizadas em projetos de interiores, comerciais e residenciais, museus, teatros e até em faróis de automóveis.

Apresentam-se como boa solução para iluminação direcionada sem provocar ofuscamento, promovendo uma atmosfera agradável e sofisticada aos ambientes (ELEKTRO, 2014).



FIGURA 12: Tipos de lâmpadas halógenas
 FONTE: (MUSEU DA LÂMPADA, 2014)

A figura 12 ilustra os tipos de lâmpadas halógenas comercializadas atualmente: AR111, AR70 com ângulo de abertura menor, fecho fechado, para iluminação de destaque sem causar ofuscamento; dicroica para iluminação de destaque, muito utilizada direcionada a painéis; as do tipo halopar (par) PAR20 e PAR30 para iluminação mais difusa e cênica; halógena palito (possui fluxo luminoso mais intenso) e halopim (a menor lâmpada halógena), muito utilizada em balizadores e arandelas de efeito cênico. Alguns cuidados com as lâmpadas halógenas devem ser tomados: como elas emitem raios ultra violetas, deve-se evitar utilizá-las sobre obras de arte e tecidos por causar desbotamento, e evitar permanecer por longos períodos sob elas por poder causar manchas na pele (CLIQUE ARQUITETURA, 2014).

M) LÂMPADAS DE VAPOR OU DE DESCARGA

As lâmpadas de vapores possuem elevado fluxo luminoso, grande durabilidade e baixa manutenção, sendo muito utilizadas em espaços amplos como na iluminação pública, viária, comercial, e industrial. São lâmpadas de descarga, ou seja, obtidas por meio de uma descarga elétrica contínua em um gás que transforma energia elétrica em energia luminosa. Os gases

mais usados são o argônio, neônio, xenônio, hélio, criptônio, e os vapores de mercúrio e de sódio com aditivos. Necessitam de reatores e, em alguns casos um ignitor, ligados ao circuito elétrico (ELEKTRO, 2014).

As lâmpadas de vapores, são lâmpadas de alta potência luminosa. Atualmente existem diversos reagentes e tipos de lâmpadas de vapores (Figura 13). São classificadas em dois tipos:

- De baixa pressão: com gases de mercúrio fluorescente e sódio
- De alta pressão: mercúrio, sódio, mista e vapores metálicos



FIGURA 13: Tipos de lâmpadas de vapor ou de descarga
 FONTE: MUNDICENTER (2014)

A lâmpada de vapor de sódio a baixa pressão foi criada por volta de 1930. Seu princípio de funcionamento é a descarga em um tubo de vidro especial em forma de U contendo 99% de neônio, 1% de argônio, além do sódio. Seu funcionamento de assemelha ao de uma lâmpada fluorescente, por possuir um circuito constituído de reator e starter, e por aquecer os cátodos.

A lâmpada de vapor de sódio a alta pressão foi criada em 1962. A ignição da lâmpada utiliza uma mistura de sódio, mercúrio e gases nobres. Seu desenvolvimento só foi possível com o desenvolvimento da alumina (um tipo de cerâmica translúcida) utilizada no tubo de descarga, que suporta o sódio sob altas temperaturas e pressões (ELEKTRO, 2014).

A Lâmpada de vapor de mercúrio a alta pressão funciona a partir de uma descarga entre dois eletrodos imersos em uma atmosfera de argônio, com uma pequena quantidade de mercúrio. Um reator deve limitar a corrente de tensão para que possa funcionar com segurança.

A lâmpada de vapor metálico, ou de vapor de mercúrio com iodetos metálicos é uma variação aperfeiçoada da lâmpada de vapor de mercúrio, pela presença dos iodetos metálicos que aumentam seu desempenho e possibilitam escolher a coloração da lâmpada (ELEKTRO, 2014).

N) LÂMPADAS FLUORESCENTES

Nikola Tesla, um inventor sérvio nascido em 1856, criou a lâmpada fluorescente, que foi introduzida no mercado consumidor em 1938.

As lâmpadas fluorescentes são lâmpadas de descarga com vapores de mercúrio, compostas de um filamento, um tubo de vidro cilíndrico preenchido com um gás nobre, (na maior parte das vezes o argônio) e superfície interna coberta de pó fluorescente (fósforo) (Figura 14).

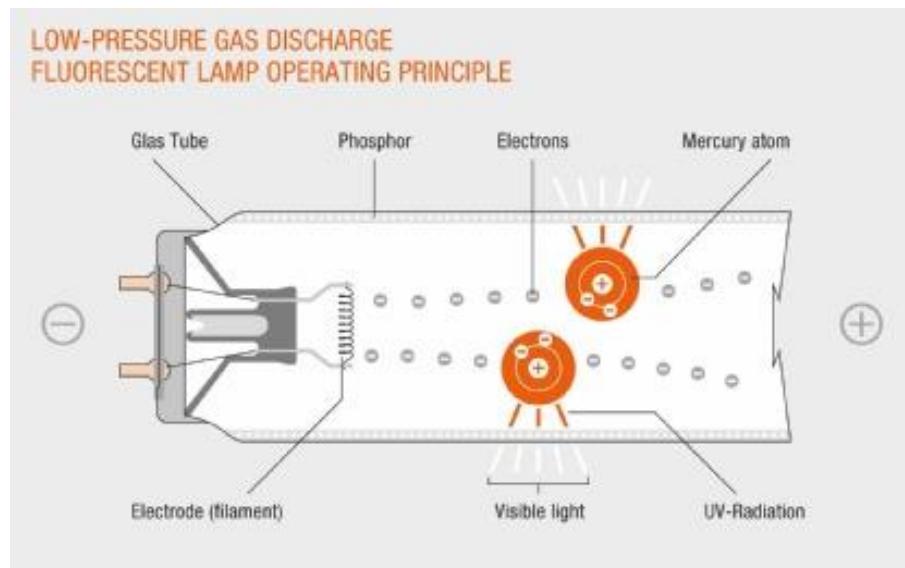


FIGURA 14: Princípio operacional das lâmpadas fluorescentes (lâmpadas de descarga de baixa pressão)
 FONTE: (OSRAM, 2014b)

O processo de descarga entre dois eletrodos e o gás faz com que o vapor de mercúrio emita raios UV, que em contato com o fluorescência emite luz visível. A cor da luz pode variar conforme o tipo de fluorescência utilizada, o que garante grande flexibilidade de usos (OSRAM, 2014b).

As vantagens em se utilizar esse tipo de lâmpada estão em seu baixo consumo energético, (cerca de 80% a menos que das incandescentes comuns), alta eficiência energética, por converterem mais energia em luz do que em calor, e maior durabilidade. Podem ser aplicadas em diversas situações, desde o uso doméstico até o industrial como iluminação geral (ELEKTRO, 2014). Há vários tamanhos e formatos disponíveis no mercado (Figura 15).

Com o apagão de 2001, as lâmpadas fluorescentes ganharam o mercado brasileiro por serem mais econômicas que as incandescentes (MUSEU DA LÂMPADA, 2014).

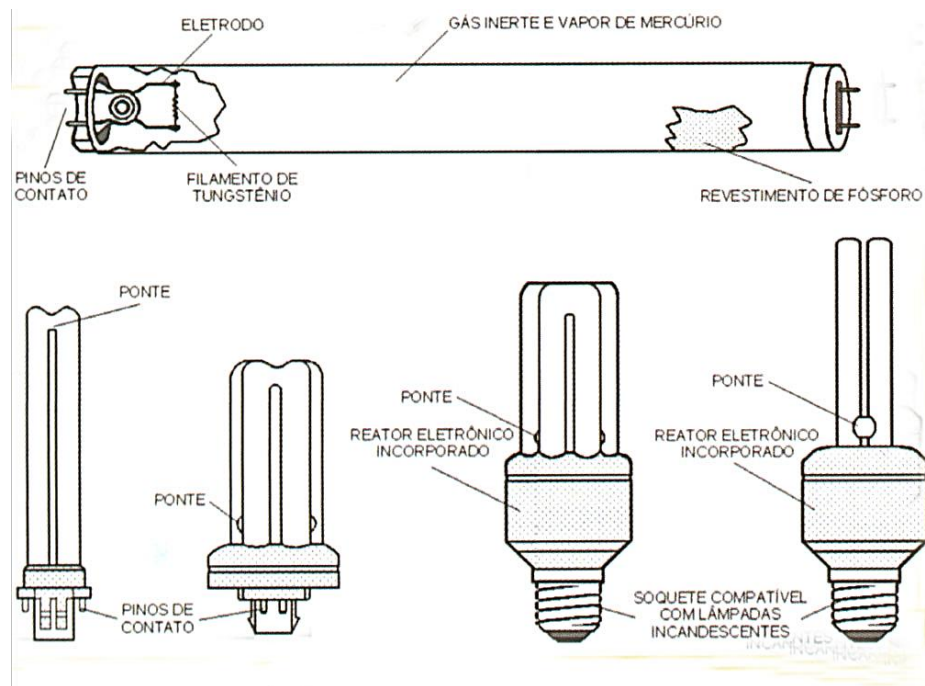


FIGURA 15: Tipos de lâmpadas fluorescentes e partes que as compõem
 FONTE: (ALESSANDROAZUOS, 2014)

As desvantagens dessas lâmpadas estão em não se poder trabalhar com iluminação de destaque, pois sua angulação é mais aberta, própria para iluminação geral; alguns tipos de fluorescentes geram grande quantidade de raios ultravioletas (UV), que podem alterar a pigmentação de obras de arte e causar manchas na pele, por exemplo - nesse caso pode-se utilizar um filtro de raios UV (IAR UNICAMP, 2014); além de que seu descarte deve seguir normas por conter um metal pesado tóxico, o mercúrio, que além de contaminar o meio ambiente, em temperatura ambiente é líquido e evapora lentamente, podendo entrar nas vias respiratórias causando danos à saúde. Em caso de quebra de uma lâmpada fluorescente, o ambiente deve ser ventilado imediatamente e não se deve tocar no mercúrio sem luvas emborrachadas. Se quebrar sobre roupas, as roupas se tornam inutilizáveis, devendo ser descartadas (ECYCLE,2014).

O) LÂMPADAS LED

LED é uma sigla do inglês para *Light Emitting Diode*, nada mais é que um Diodo Emissor de Luz. Um diodo é um material semicondutor. Um semicondutor é a base de qualquer dispositivo eletrônico. Tem sua condutividade controlada através do processo de dopagem, que é a adição de outros materiais em camadas do cristal semicondutor.

Um diodo semiconductor consiste na junção de duas camadas de semicondutores, uma tipo n e outra tipo p . A primeira, tipo n , possui majoritariamente elétrons livres, partículas portadoras de carga negativa que participam da condução elétrica; a segunda, tipo p , possui partículas portadoras de carga positiva, composta de lacunas livres (ou buracos livres).

Na união dos dois semicondutores, os elétrons próximos da área de junção se difundem partindo do semiconductor n (cátodo) para o semiconductor p (ânodo), e as lacunas no sentido contrário (Figura 16). As lacunas e os elétrons se recombinam e surge uma região desprovida de portadores de carga, a região de depleção, que contém os íons positivos e os íons negativos dos elementos dopantes. Esses íons criam um campo elétrico, que age como uma “barreira” que impede a continuidade da difusão dos elétrons e dos buracos (UFMG,2014).

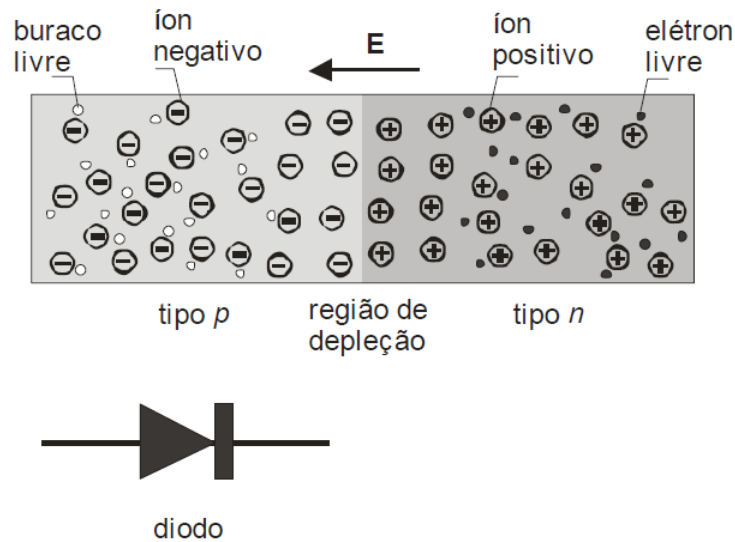


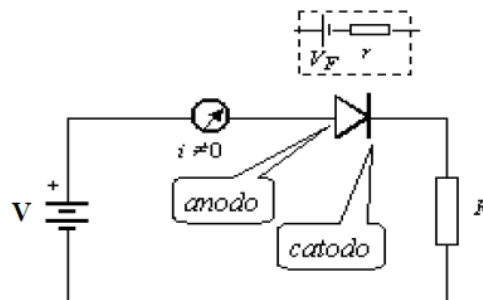
FIGURA 16: Princípio de funcionamento dos LEDs e símbolo de diodo
FONTE: UFMG (2014)

A junção $p-n$ permite o fluxo de corrente apenas no sentido da região p para a região n , quando conectada a uma fonte de força eletromotriz. Existem dois tipos de polarização, direta e reversa (Figura 17). Na primeira, a fonte injeta elétrons continuamente na região n (aquela que já possuía elétrons livres inicialmente), ou buracos na região p , o que estreita a região de depleção, diminuindo a “espessura da barreira” o que facilita o fluxo de cargas; na segunda, a polarização reversa ocorre quando se aplica mais elétrons na região p (fazendo com que se combinem com os buracos) e mais buracos na região n (fazendo com que se combinem com os elétrons), ou seja, se aplica tensão negativa no ânodo e positiva no cátodo, o oposto da polarização direta. Isso aumenta a região de depleção, dificultando a passagem de corrente.

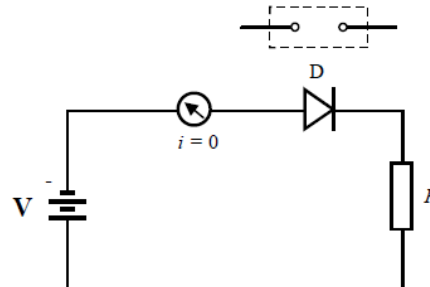
Em junções de arseneto de gálio (GaAs) ou nitreto de gálio (GaN), os elétrons e buracos devem “pular a barreira” da região de depleção para se combinarem, causando a emissão de

radiação eletromagnética visível, ou seja, luz. Efeito denominado eletroluminescência (UFMG,2014).

As diferentes cores emitidas pelo LED dependem da composição dos semicondutores e da tensão aplicada (Figura 19). Para cores mais frias (verde, azul e branco) deve-se aplicar tensões maiores que para cores mais quentes (vermelho, âmbar e amarelo). O vermelho é composto de fosforeto de Gálio (GaP), ou Fosforeto de gálio e Arsénico (GaAsP); o amarelo e o verde de Fosforeto de Gálio, fosforeto de Índio, gálio e alumínio (InGaAlP); o infra vermelho de Arseneto de Gálio (GaAs) e Arseneto de Fosforeto de Alumínio e gálio (GaAlAs) (ELETRONICA, 2014).



(a) Polarização direta



(b) Polarização reversa

FIGURA 17: Polarização direta e reversa
FONTE: UFMG (2014)

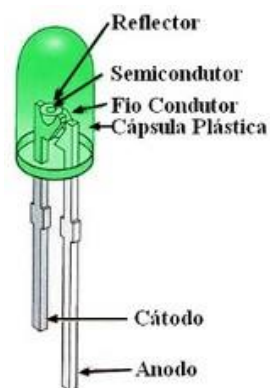


FIGURA 18: Led convencional (cc – contra-cônico) e sua constituição
FONTE: ELETRONICA (2014)

Comp. Onda (nm)	Cor	Tensão Fwd (Vf@20ma)	Intensidade 5mm LEDs	Ang°	LED Material
940	Infravermelho	1.5	16mW @50mA	15°	GaAlAs/GaAs
880	Infravermelho	1.7	18mW @50mA	15°	GaAlAs/GaAs
850	Infravermelho	1.7	26mW @50mA	15°	GaAlAs/GaAs
660	Ultra Red	1.8	2000mcd @50mA	15°	GaAlAs/GaAs
635	High Efficiency Red	2.0	200mcd @20mA	15°	GaAsP/GaP
633	Super Red	2.2	3500mcd @20mA	15°	InGaAlP
620	Super Orange	2.2	4500mcd @20mA	15°	InGaAlP
612	Super Orange	2.2	6500mcd @20mA	15°	InGaAlP
605	Orange	2.1	160mcd @20mA	15°	GaAsP/GaP
595	Super Yellow	2.2	5500mcd @20mA	15°	InGaAlP
592	Super Pure Yellow	2.1	7000mcd @20mA	15°	InGaAlP
585	Yellow	2.1	100mcd @20mA	15°	GaAsP/GaP
4500K	"Incandescent" White	3.6	2000mcd @20mA	20°	SiC/GaN
6500K	Pale White	3.6	4000mcd @20mA	20°	SiC/GaN
8000K	Cool White	3.6	6000mcd @20mA	20°	SiC/GaN
574	Super Lime Yellow	2.4	1000mcd @20mA	15°	InGaAlP
570	Super Lime Green	2.0	1000mcd @20mA	15°	InGaAlP
565	High Efficiency Green	2.1	200mcd @20mA	15°	GaP/GaP
560	Super Pure Green	2.1	350mcd @20mA	15°	InGaAlP
555	Pure Green	2.1	80mcd @20mA	15°	GaP/GaP
525	Aqua Green	3.5	10,000mcd @20mA	15°	SiC/GaN
505	Blue Green	3.5	2000mcd @20mA	45°	SiC/GaN
470	Super Blue	3.6	3000mcd @20mA	15°	SiC/GaN
430	Ultra Blue	3.8	100mcd @20mA	15°	SiC/GaN

FIGURA 19: Cores de luz de LED e suas composições
 FONTE: ELETRONICA (2014)

Além do tipo convencional de LED (Figura 18), existe o LED SMD (Figura 20), cuja diferença é ser fabricado para montagem em superfície. É um diodo montado e soldado sobre a placa de circuito, com dimensões bastante reduzidas.



FIGURA 20: LED SMD
 FONTE: ELETRONICA (2014)

Um LED não deve ser ligado diretamente na corrente elétrica. Deve haver uma resistência em série para que a corrente não exceda o máximo permitido

Uma vez que o LED funciona com corrente contínua, a ligação diretamente na rede elétrica (em corrente alternada 110VAC ou 220VAC) não é possível. Deve-se retificar a corrente alternada e reduzir a tensão.

O surgimento do LED, deu-se em 1961, quando Robert Biard e Gary Pittman, pesquisadores da *Texas Instruments*, descobriram que, quando percorrido por uma corrente elétrica, o Arseneto de Galio emitia radiação infravermelha, não visível. Somente em 1962, Nick Holonyak Jr., da General Electric, obteve luz visível na cor vermelha a partir de um LED. A patente ficou com Robert Biard e Gary Pittman, mas Holonyak que é considerado o “pai do LED”. Em 1989 surgiram os primeiros LED’s azuis comerciais, o que permitiu expandir o uso do led para TV’s e painéis RGB por exemplo (MUSEU DA LÂMPADA, 2014).

São muitas as vantagens em se utilizar o LED, tais como:

1. Redução do consumo de energia elétrica, por trabalharem com baixas potências e grande eficiência luminosa;
2. Ausência de metais pesados, o que o torna mais vantajoso por não possuir elementos tóxicos ao meio ambiente e à saúde humana;
3. Maior durabilidade do que de todas as lâmpadas até então utilizadas, estimada em até 100.000 horas (se ligadas durante 12 horas/dia, duram cerca de 22 anos);
4. Baixo custo de manutenção;
5. Ambientalmente correto por seu ciclo de vida necessitar de menos energia e menos matéria prima em todas as etapas, de fabricação, uso e descarte;
6. Não emite calor, o que proporciona redução no uso de ar-condicionado e lhe proporciona maior eficiência (converte mais de 80% da energia em luz);
7. Não emite raios IV e UV, o que os torna adequados para iluminação de obras de arte e não agride a pele;
8. Não atrai insetos;
9. Já existem LED’s comercializáveis com elevado IRC, de até 90, o que aumenta ainda mais a variedade de aplicações desse tipo de lâmpada;
10. Com o uso de lentes seu fecho pode ser direcionado;
11. Possibilidade de dimerização;
12. Controle dinâmico de cores;
13. Resistente a vibrações e impactos;

14. O número de vezes e a frequência em que é ligado e desligado não altera sua vida útil
15. Acendimento imediato;
16. Flexibilidade de usos, formas, tamanhos e design;

No entanto existem algumas questões que devem ser observadas:

1. A falta de normas e padronização da fabricação dificulta o controle de qualidade das lâmpadas encontradas no mercado;
2. A falta de uma padrão tributário para produtos de LED gera diferenças discrepantes no preço e confunde o consumidor final;
3. Ainda possui um preço elevado, em média R\$70,00 por lâmpada mas que tende a diminuir rapidamente e se equiparar ao das lâmpadas comuns;
4. São desconhecidos os efeitos da “poluição eletromagnética” que emite;
5. Desconhecimento técnico e falta de disseminação de informação ao consumidor e a profissionais;
6. Índices de reprodução de cor duvidosos;

Alguns fabricantes afirmam que a cada 3,5W de energia reduzida se obtém uma economia de 1 W no consumo do ar condicionado e/ou refrigeração (SOLELUX, 2014).

Quanto mais tempo uma lâmpada de LED ficar ligada, mais rápido será o retorno do investimento inicial (*payback*).

Alguns dados comparativos demonstram a viabilidade em substituir lâmpadas convencionais por LEDS, segundo o fabricante SOLELUX (2014):

- 01 Lâmpada incandescente 60 W = 01 lâmpada a LED de 4,5 W (com economia de 55,5 W/hora)
- 01 Lâmpada fluorescente tubular de 40 W = 01 luminária LED de 12 W (com economia de 28 W/hora)
- 01 Lâmpada dicroica 50 W = 01 luminária LED de 3 W (economia de 47 W/hora)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a análise de viabilidade da substituição de lâmpadas fluorescentes tubulares por tubulares de LED a metodologia foi dividida em três etapas: Na primeira, observaram-se as especificações dos fabricantes quanto à potência, fluxo luminoso, vida útil esperada, consumo

energético e taxa de manutenção dos produtos e assim, obtive-se o *payback* do investimento em LED. Na segunda, foi realizada uma simulação no software DIALux, quanto a eficiência luminosa, ou seja, o rendimento da conversão da energia em luz, e gráfico de iluminância obtido com cada uma das lâmpadas. Por fim, foi realizado um ensaio fotométrico, utilizando um luxímetro em uma pequena cozinha da UTFPR, do campus Ecoville, para verificar se os dados dos fabricantes e do software são compatíveis com os dados obtidos durante seu uso. Ao final do processo, os dados foram confrontados para analisar se a substituição é ou não viável.

3.1 CÁLCULO DO *PAYBACK* A PARTIR DE DADOS DE FÁBRICA

Os fabricantes dos dois tipos de lâmpadas oferecem alguns dados que foram comparados em uma tabela utilizando o software Excel. Foram considerados fatores como potência, fluxo luminoso, custo unitário das lâmpadas e dos reatores, consumo energético em R\$/kWh, vida útil em horas, e fator de manutenção. Nas tabelas, foram consideradas 8h e 12h acesas, em 365 dias por ano.

Para comparação dos gastos das duas lâmpadas, e obtenção do *payback*, são relevantes os valores de investimento inicial somados aos gastos mensais em R\$/kWh de energia elétrica e possíveis substituições das lâmpadas devido à queima.

A fórmula utilizada para esse cálculo segue abaixo:

$$I_{\text{FLUORESCENTE}} + G_{\text{FLUORESCENTE}} = I_{\text{LED}} + G_{\text{LED}}$$

em que: $I = (N \times C_1 \times N_2) + (C_2 \times N_3)$ e $G = (E \times N \times t) + (S \times C_1 \times t)$

$$(N \times C_1 \times N_2)_{\text{FLUOR}} + (C_2 \times N_3)_{\text{FLUOR}} + (E \times N \times t)_{\text{FLUOR}} + (S \times C_1 \times t)_{\text{FLUOR}} = \\ (N \times C_1 \times N_2)_{\text{LED}} + (C_2 \times N_3)_{\text{LED}} + (E \times N \times t)_{\text{LED}} + (S \times C_1 \times t)_{\text{LED}}$$

em que:

I = investimento inicial em R\$

G = gastos em R\$ por ano

N = número de lâmpadas utilizada na luminária

N₂ = número de luminárias (no caso apenas uma luminária)

N₃ = número de reatores

C₁ = custo em reais por unidade da lâmpada em questão

C₂ = custo em reais por unidade do reator (para fluorescente)

E = consumo energético em R\$/kWh

t = tempo em anos

S= fator de substituição/manutenção das lâmpadas considerando vida útil fornecida pelo fabricante

3.2 SIMULAÇÃO NO SOFTWARE DIALux

O DIALUX é um software gratuito de cálculo e simulação computacional para projetos de iluminação produzido pela dinamarquesa DIAL GmbH. Oferece um catálogo de luminárias e lâmpadas dos principais fabricantes de todo o mundo. Permite verificar a iluminância que determinada luminária e lâmpada terão no ambiente projetado em modelo tridimensional, em tabelas e gráficos. Importa e exporta arquivos nos formatos .dxf e .dwg de todos os softwares CAD disponíveis. É uma ferramenta para profissionais da área de construção civil otimizarem seus projetos luminotécnicos (DIAL, 2014).

Foram feitas simulações em ambiente virtual equivalentes às medições fotométricas realizadas, em seis pontos a distâncias e alturas diferentes. A primeira simulação foi feita com duas lâmpadas de LED, novas, em uma luminária, a segunda com duas lâmpadas tubulares fluorescentes na mesma luminária. Outros estudos foram realizados no *software*, no entanto com menor relevância para a pesquisa.

3.3 ENSAIO FOTOMÉTRICO

Muitos fabricantes de lâmpadas tubulares de LED afirmam que é possível substituir diretamente as fluorescentes tubulares pelas tubulares de LED, devendo ser considerado apenas que o LED não necessita de reator, o qual deve ser removido. O levantamento fotométrico foi realizado para verificar se a premissa é verdadeira ou se há alguma ressalva quanto ao encaixe e fluxo luminoso com a substituição direta das lâmpadas.

Dessa forma, a medição foi realizada utilizando a mesma luminária retangular já instalada na pequena cozinha (Figura 21), para lâmpadas tubulares de 1,20 m, com refletor em alumínio, pendente a 25 cm do teto, tanto para as lâmpadas fluorescentes tubulares (Figura 22), quanto para as tubulares de LED (Figura 23).

No espaço já existiam duas luminárias para duas lâmpadas tubulares cada uma, porém como o orçamento e o prazo do projeto previam apenas a compra de duas tubulares de LED, uma das luminárias foi desativada e as medições se deram com uma luminária e duas unidades de lâmpadas,

na mesma posição em que se encontrava. Assim, os estudos se dão com a luminária deslocada do centro da cozinha (Figuras 25 a 28).

Para a medição da iluminância de cada tipo de lâmpada, foi utilizado um luxímetro (Minipa modelo MLM – 1332), conforme apresentado na Figura 24.



FIGURA 21: Luminária para duas fluorescentes tubulares com refletor
FONTE: LUMINARIAS PREMIERE (2014)



FIGURA 22: Lâmpadas fluorescentes tubulares T8
FONTE: EMPALUX (2014)



FIGURA 23: LED tubular tipo SMD utilizado
FONTE: A autora



FIGURA 24: Luxímetro Minipa modelo MLM – 1332
FONTE: A autora



FIGURAS 25, 26, 27 e 28: Fotografias da pequena cozinha da UTFPR onde foi realizado o estudo fotométrico.
FONTE: A autora

No primeiro momento, o reator foi desativado, as tubulares fluorescentes foram removidas e substituídas por tubulares de LED. Na sequência, os LEDs foram removidos, recolocado o reator, e instaladas as fluorescentes tubulares T8.

Foram escolhidos seis pontos para medição (Figura 29):

- 1- A 1,73m de altura sob o eixo da luminária

- 2- A 0,77m de altura (altura média de um plano de trabalho)
- 3- No nível do piso sob o eixo da luminária
- 4- A 1,73m de altura, próximo à porta, a 1m do eixo longitudinal da luminária
- 5- A 0,77m de altura (altura média de um plano de trabalho), próximo à porta, a 1m do eixo longitudinal da luminária
- 6- No nível do piso, próximo à porta, a 1m do eixo longitudinal da luminária



FIGURA 29: Pontos da medição fotométrica em alturas e distâncias diferentes.

FONTE: Software DIALux

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CÁLCULO DO PAYBACK A PARTIR DE DADOS DA FÁBRICA

A Tabela 2 a seguir visa comparar os dados dos fabricantes para as tubulares fluorescentes tipo T8 e para as tubulares de LED, tanto a vida útil, quanto o fluxo luminoso considerados, com 8 horas acesas por dia.

Tabela 2 - Dados das lâmpadas fornecidos pelos fabricantes, para 8 horas acesas.

	TUBULAR FLUORESCENTE - T8	TUBULAR LED - TIPO T8
FABRICANTE	EMPALUX	JUJIALED
ORIGEM	PARANÁ - BRASIL	CHINA
MODELO	FT32214	JU-L18RGAB (LED TIPO SMD)
TAMANHO (mm)	1210x25	1200x30
BASE ENCAIXE	G13	G13
POTÊNCIA	32 W	15 W
TENSÃO	127V	127V
TEMPERATURA DE COR	4200K	6000K
FLUXO LUMINOSO (lm)	2340 lm	1500 lm
VIDA ÚTIL (horas)	8.000	50.000
PREÇO UNITÁRIO LÂMPADA	R\$ 10,00	R\$ 100,00
NÚMERO DE HORAS ACESAS/DIA	8	8
NÚMERO DE HORAS ACESAS/ANO	2920	2920
EXPECTATIVA VIDA ÚTIL (anos) vida útil/(número horas acesas/ano)	2,739726027	17,12328767
TARIFA ENERGÉTICA (COM IMPOSTOS ICMS e PIS/COFINS EM CURITIBA EM R\$/KWh)	0,39631	0,39631
GASTO ELETRICIDADE R\$/Dia	0,10145536	0,0475572
GASTO ELETRICIDADE R\$/Mês	3,0436608	1,426716
GASTO ELETRICIDADE R\$/Ano	36,5239296	17,120592
NUMERO LÂMPADAS/luminária	2	2
PREÇO REATOR	R\$18,00	NÃO SE APLICA*
NÚMERO DE TROCAS / ANO	0,365	0,0584

Para 8 horas acesa durante 365 dias =
2920h

*Reatores de LED embutidos nas
lâmpadas

FONTE: A autora

Tabela 3 - *Payback* lâmpadas LED

Para 8 horas acesa durante 365 dias = 2920h

TEMPO (ANOS)	Investimento + gasto mensal energia elétrica da FLUORESCENTE (R\$)	Investimento + gasto mensal energia elétrica do LED (R\$)
1	114,7108629	240,0823055
2	191,4217257	280,164611
3	268,1325886	320,2469165
4	344,8434515	360,329222
5	421,5543143	400,4115275

FONTE: A autora

Na Tabela 3 foi inserida a fórmula apresentada no capítulo anterior considerando os dados da Tabela 2. Foram incluídos os custos iniciais de investimento e os gastos anuais com cada tipo de lâmpada. Para a fluorescente, foram avaliados os preços das lâmpadas e dos reatores, o consumo energético diário, mensal e anual, (o gasto em reais para cada kWh consumido) e o gasto com a compra de novas lâmpadas após o fim do ciclo de vida fornecido pelo fabricante. Para as tubulares de LED foram considerados todos os fatores da fluorescente, com exceção do preço do reator, pois esse tipo de lâmpada dispensa seu uso. Os resultados apresentam-se na Tabela 3. Comparando os gastos das duas lâmpadas ao final de um período de 5 anos, observa-se no grifo em vermelho, que a lâmpada de LED tubular já valeria mais a pena que a fluorescente tubular, pois seus menores gastos em consumo energético e manutenção geram economia de R\$ 21,55.

As tabelas 4 e 5, a seguir, contém os mesmos dados das tabelas 2 e 3 respectivamente, no entanto foram consideradas lâmpadas acesas por 12 horas diárias.

Ao comparar os resultados da tabela 2 de 8 horas diárias, com a tabela 5, de 12 horas diárias, é percebido que ao manter a luz acesa por mais tempo, a economia em energia e manutenção do LED já supera os gastos da fluorescente no fim do terceiro ano (grifo em vermelho na tabela 5), e é ainda maior nos anos subsequentes. Ou seja, quanto maior o tempo em que a lâmpada LED ficar acesa, mais rápido o *payback*. Assim como quanto maior o número de lâmpadas LED e de luminárias em um espaço, mais rápido será esse retorno.

TABELA 4: Dados das lâmpadas fornecidos pelos fabricantes, para 12 horas acesas.

	TUBULAR FLUORESCENTE - T8	TUBULAR LED - TIPO T8
FABRICANTE	EMPALUX	JUJIALED
ORIGEM	PARANÁ - BRASIL	CHINA
MODELO	FT32214	JU-L18RGAB (LED TIPO SMD)
TAMANHO (mm)	1210x25	1200x30
BASE ENCAIXA	G13	G13
POTÊNCIA	32 W	15 W
TENSÃO	127V	127V
TEMPERATURA DE COR	4200K	6000K
FLUXO LUMINOSO (lm)	2340 lm	1500 lm
VIDA ÚTIL (horas)	8.000	50.000
PREÇO	R\$ 10,00	R\$ 100,00
NÚMERO DE HORAS ACESAS/DIA	12	12
NÚMERO DE HORAS ACESAS/ANO	4380	4380
EXPECTATIVA VIDA ÚTIL (anos) vida útil/(número horas acesas/ano)	1,826484018	11,41552511
TARIFA ENERGÉTICA (COM IMPOSTOS ICMS e PIS/COFINS EM CURITIBA EM R\$/KWh)	0,39631	0,39631
GASTO ELETRICIDADE R\$/Dia	0,15218304	0,0713358
GASTO ELETRICIDADE R\$/Mês	4,5654912	2,140074
GASTO ELETRICIDADE R\$/Ano	54,7858944	25,680888
NUMERO LÂMPADAS/luminária	2	2
PREÇO REATOR	18	NÃO SE APLICA
NÚMERO DE TROCAS / ANO	0,5475	0,0876

Para 12 horas acesa durante 365 dias =
4380h

FONTE: A autora

TABELA 5: *Payback* lâmpadas LED

Para 12 horas acesa durante 365 dias
= 4380h

TEMPO (ANOS)	Investimento + gasto mensal energia elétrica da FLUORESCENTE (R\$)	Investimento + gasto mensal energia elétrica do LED (R\$)
1	153,0467888	260,121776
2	268,0935776	320,243552
3	383,1403664	380,365328
4	498,1871552	440,487104
5	613,233944	500,60888

FONTE: A autora

O que gera a diferença de gastos entre as duas lâmpadas são os menores números de trocas de lâmpadas queimadas (que nas fluorescentes é maior devido a uma menor vida útil) e o menor consumo energético das lâmpadas de LED, de menor potência (pouco mais da metade da potência das fluorescentes). Ao final do ciclo de vida esperado para o LED, de mais de 11 anos com 12 horas acesas, para cada luminária que utilize duas lâmpadas, terão economizado R\$ 442,17. Se em uma sala forem utilizadas 20 luminárias iguais a essa, a economia chega a R\$ 8.843,40. Se isso for aplicado em maior escala, em todo um edifício público por exemplo, o LED de 15 W apresenta-se como alternativa muito mais econômica que as tubulares T8 de 32 W.

Se fosse realizado um estudo comparativo entre um outro tipo de lâmpada fluorescente mais econômica, de menor potência e as mesmas lâmpadas de LED do presente estudo, o retorno do investimento em LED seria mais demorado - como é o caso das lâmpadas T5, com cerca de 14W, fluxo luminoso de 1200 lm. Um fator importante para uma comparação mais justa entre as lâmpadas, além da potência, é se o fluxo luminoso da tubular fluorescente em questão é semelhante ao da LED que se pretende utilizar.

Se na tabela 5 fosse considerado o tempo de vida útil das lâmpadas fluorescentes fornecido por um eletricitista da UTFPR com uma experiência de cinco anos na instituição, as fluorescentes duram cerca de 4 meses, ou 1460 horas para 12 horas diárias acesa (valor muito inferior que as 8000 horas fornecidas pelo fabricante). Esse fato se deve à redução da vida útil de mais de 2h para cada acionamento do interruptor e à qualidade dos reatores. Assim o LED traria uma

economia de R\$76,35 ao final do terceiro ano para cada luminária utilizada, valor ainda maior que os R\$2,78 do terceiro ano da tabela 5 que utiliza o tempo de vida do fabricante.

4.2 SIMULAÇÃO NO SOFTWARE DIALux

As simulações no software DIALux visam comparar os resultados reais fotométricos com os dados utilizados pelo programa fornecidos pelos fabricantes, e dessa forma, analisar se os dados que os fabricantes fornecem são confiáveis e se o software é eficiente no auxílio de projetos que utilizem lâmpadas de LED.

Na tabela 6 foram considerados os coeficientes de reflexão das superfícies características de cada cor e cada material do espaço e apresentado o modelo de luminária do catálogo do software para a lâmpada tubular de LED. O mesmo foi realizado para a simulação com lâmpada fluorescente T8, na Tabela 7.

TABELA 6: Resumo de dados utilizados pelo software DIALux para duas lâmpadas tipo LED de 1500 lm, 15W.

Superfície	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m
Plano de uso	/	261	64	320	0.244
Solo	30	143	3.85	219	0.027
Teto	86	157	124	191	0.789
Paredes (4)	86	183	2.35	1689	/

Plano de uso:

Altura: 0.800 m
Grelha: 64 x 64 Pontos
Zona marginal: 0.100 m

Proporção de potência luminosa (segundo LG7): Paredes / Plano de uso: 0.829, Teto / Plano de uso: 0.602.

Lista de luminárias

Nº	Unid.	Denominação (Factor de correcção)	Φ (Luminária) [lm]	Φ (Lâmpadas) [lm]	P [W]
1	1	LUMICENTER CCN11-S232 (Tipo 1)* (1.000)	2694	3000	30.0

*Dados técnicos alterados

Total: 2694 Total: 3000 30.0

Potência específica: $4.70 \text{ W/m}^2 = 1.80 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Superfície básica: 6.38 m^2)

Sala 1 / Lista de luminárias

1 Unid. LUMICENTER CCN11-S232 (Tipo 1)
Nº do artigo:
Corrente luminosa (Luminária): 2694 lm
Corrente luminosa (Lâmpadas): 3000 lm
Potência luminosa: 30.0 W
Classificação de luminárias conforme CIE: 100
Código de Fluxo (CIE): 42 74 94 100 90
Lâmpada (s): 1 x Definido pelo usuário (Factor de correcção 1.000).

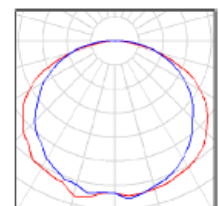


TABELA 7: Resumo de dados utilizados pelo software para duas lâmpadas tipo fluorescentes tubulares T8 de 2340 lm, 32W.

Altura da sala: 3.270 m, Altura de montagem: 2.970 m, Factor de manutenção: 0.90 Valores em Lux, Escala 1:30

Superfície	ρ [%]	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_m
Plano de uso	/	326	80	400	0.244
Solo	30	179	4.79	273	0.027
Teto	86	197	156	239	0.790
Paredes (4)	86	229	2.94	2109	/

Plano de uso:

Altura: 0.800 m
Grelha: 64 x 64 Pontos
Zona marginal: 0.100 m

Proporção de potência luminosa (segundo LG7): Paredes / Plano de uso: 0.829, Teto / Plano de uso: 0.603.

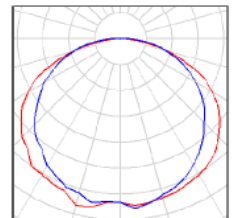
Lista de luminárias

Nº	Unid.	Denominação (Factor de correcção)	Φ (Luminária) [lm]	Φ (Lâmpadas) [lm]	P [W]
1	1	LUMICENTER CCN11-S232 (Tipo 1)* (0.800)	4202	4680	64.0
*Dados técnicos alterados			Total: 4202	Total: 4680	64.0

Potência específica: $10.03 \text{ W/m}^2 = 3.07 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Superfície básica: 6.38 m^2)

Sala 1 / Lista de luminárias

1 Unid. LUMICENTER CCN11-S232 (Tipo 1)
Nº do artigo:
Corrente luminosa (Luminária): 4202 lm
Corrente luminosa (Lâmpadas): 4680 lm
Potência luminosa: 64.0 W
Classificação de luminárias conforme CIE: 100
Código de Fluxo (CIE): 42 74 94 100 90
Lâmpada (s): 1 x Definido pelo usuário (Factor de correcção 0.800, Envelhecimento padrão das lâmpadas).



A partir dos dados inseridos no programa, demonstrados nas tabelas anteriores 6 e 7, foram gerados resultados de iluminâncias para os dois tipos de lâmpadas consideradas neste estudo. As tabelas 8 e 9 abordam os resultados de iluminâncias em lux para as lâmpadas tubulares de LED, e as tabelas 10 e 11 ilustram os resultados para as lâmpadas tubulares fluorescentes.

Na Tabela 9, na superfície de trabalho utilizando LED, a 0,77m do chão mediu-se 314 lux imediatamente sob a luminária, e 252 lux a 1m de afastamento da luminária a mesma altura, enquanto que na Tabela 11, as tubulares fluorescentes apresentaram 392 e 314 lux respectivamente.

TABELA 8: Resumo dos resultados de iluminâncias e luminâncias fornecidos pelo software para duas lâmpadas tipo LED de 1500 lm, 15W nas superfícies.

Sala 1 / Resultados Luminotécnicos					
Fluxo luminoso total:	2694 lm				
Potência total:	30.0 W				
Factor de manutenção:	0.90				
Zona marginal:	0.100 m				
Superfície	Iluminâncias médias [lx]			Grau de reflexão [%]	Luminância média [cd/m ²]
	directo	indirecto	total		
Plano de uso	102	159	261	/	/
Solo	47	96	143	30	14
Teto	0.26	157	157	86	43
Parede 1	52	142	195	86	53
Parede 2	97	131	227	86	62
Parede 3	43	111	153	86	42
Parede 4	31	130	161	86	44

Uniformidades no plano de uso

E_{\min} / E_m : 0.244 (1:4)

E_{\min} / E_{\max} : 0.199 (1:5)

Proporção de potência luminosa (segundo LG7): Paredes / Plano de uso: 0.829, Teto / Plano de uso: 0.602.

Potência específica: $4.70 \text{ W/m}^2 = 1.80 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Superfície básica: 6.38 m^2)

TABELA 9: Resultados de iluminâncias fornecidos pelo software para duas lâmpadas tipo LED de 1500 lm, 15W para os seis pontos de medição.

Lista de pontos de cálculo

N°	Denominação	Tipo	Posição [m]			Rotação [°]			Valor [lx]
			X	Y	Z	X	Y	Z	
1	Ponto de cálculo livre 1	livre, plano	2.100	1.140	1.730	0.0	0.0	0.0	629
2	Ponto de cálculo livre 2	livre, plano	2.100	1.140	0.770	0.0	0.0	0.0	314
3	Ponto de cálculo livre 3	livre, plano	2.100	1.140	0.010	0.0	0.0	0.0	214
4	Ponto de cálculo livre 4	livre, plano	2.100	0.140	1.730	0.0	0.0	0.0	368
5	Ponto de cálculo livre 5	livre, plano	2.100	0.140	0.770	0.0	0.0	0.0	252
6	Ponto de cálculo livre 6	livre, plano	2.100	0.140	0.010	0.0	0.0	0.0	186

Resumo dos resultados

Tipos de pontos de cálculo	Quantidade	Médio [lx]	Min [lx]	Máx [lx]	E_{\min} / E_m	E_{\min} / E_{\max}
Livre, plano	6	327	186	629	0.57	0.29

TABELA 10: Resumo dos resultados de iluminâncias e luminâncias fornecidos pelo software para duas lâmpadas tipo fluorescentes tubulares T8 de 2340 lm, 32W nas superfícies.

Sala 1 / Resultados Luminotécnicos

Fluxo luminoso total: 4202 lm
 Potência total: 64.0 W
 Factor de manutenção: 0.90
 Zona marginal: 0.100 m

Superfície	Iluminâncias médias [lx]			Grau de reflexão [%]	Luminância média [cd/m ²]
	directo	indirecto	total		
Plano de uso	127	199	326	/	/
Solo	58	120	179	30	17
Teto	0.32	197	197	86	54
Parede 1	65	178	243	86	67
Parede 2	121	163	284	86	78
Parede 3	53	139	192	86	52
Parede 4	38	163	201	86	55

Uniformidades no plano de uso

E_{\min} / E_m : 0.244 (1:4)

E_{\min} / E_{\max} : 0.199 (1:5)

Proporção de potência luminosa (segundo LG7): Paredes / Plano de uso: 0.829, Teto / Plano de uso: 0.603.

Potência específica: $10.03 \text{ W/m}^2 = 3.07 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Superfície básica: 6.38 m^2)

TABELA 11: Resultados de iluminâncias fornecidos pelo software para duas lâmpadas tipo fluorescentes tubulares T8 de 2340 lm, 32W para os seis pontos de medição.

Lista de pontos de cálculo

N°	Denominação	Tipo	Posição [m]			Rotação [°]			Valor [lx]
			X	Y	Z	X	Y	Z	
1	Ponto de cálculo livre 1	livre, plano	2.100	1.140	1.730	0.0	0.0	0.0	786
2	Ponto de cálculo livre 2	livre, plano	2.100	1.140	0.770	0.0	0.0	0.0	392
3	Ponto de cálculo livre 3	livre, plano	2.100	1.140	0.010	0.0	0.0	0.0	267
4	Ponto de cálculo livre 4	livre, plano	2.100	0.140	1.730	0.0	0.0	0.0	458
5	Ponto de cálculo livre 5	livre, plano	2.100	0.140	0.770	0.0	0.0	0.0	314
6	Ponto de cálculo livre 6	livre, plano	2.100	0.140	0.010	0.0	0.0	0.0	231

Resumo dos resultados

Tipos de pontos de cálculo	Quantidade	Médio [lx]	Min [lx]	Máx [lx]	E_{\min} / E_m	E_{\min} / E_{\max}
Livre, plano	6	408	231	786	0.57	0.29

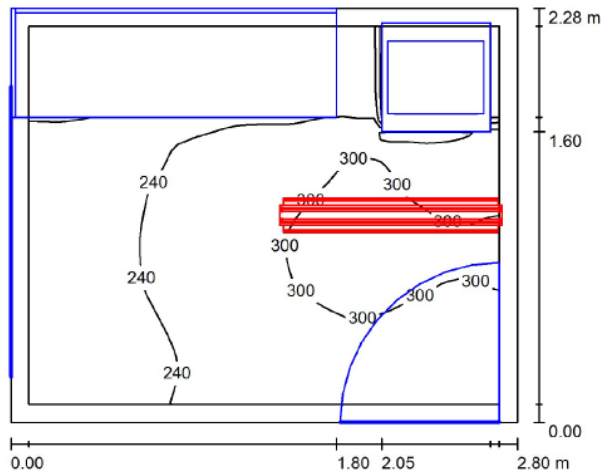


FIGURA 30: Planta com médias de iluminância no plano de trabalho com lâmpadas LED

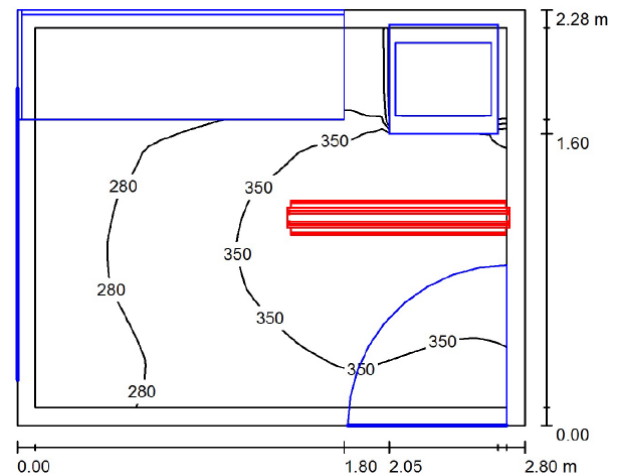


FIGURA 31: Planta com médias de iluminância no plano de trabalho para lâmpada fluorescente com índice envelhecimento 0.8

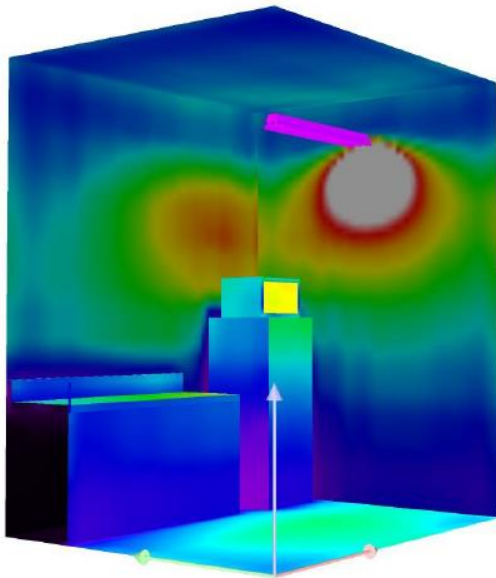


FIGURA 32: Representação de cores falsas para lâmpada tubular LED

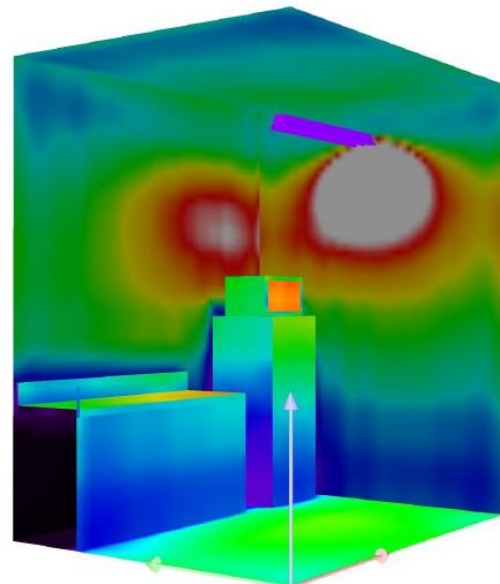
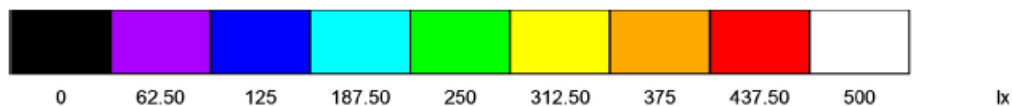


FIGURA 33: Representação de cores falsas para fluorescente com índice envelhecimento 0.8



De acordo com os dados fornecidos pelo software, plantas e os gráficos de representação de cores falsas para as duas lâmpadas (Figuras 30 a 33), pode-se afirmar que o fecho de luz da tubular de LED é mais fechado e que a fluorescente tubular difunde mais a luz no ambiente. O que já era esperado, considerando que o fluxo luminoso da lâmpada fluorescente, indicado pelo fabricante é cerca de 1,5 vezes maior que a de LED. No entanto, os valores de iluminâncias nas superfícies de

trabalho utilizando LED foram bastante satisfatórios, se aproximando bastante dos valores encontrados com as lâmpadas T8, mesmo em desvantagem, pois a luminária com refletor favorece a difusão da luz com lâmpadas fluorescentes que emitem luz em toda a sua superfície, e não possui efeito nas lâmpadas de LED, que emitem luz em apenas uma direção.

4.3 ENSAIO FOTOMÉTRICO

O ensaio fotométrico busca comparar os valores reais de iluminância encontrados para os dois tipos de lâmpada. Visa analisar a eficiência luminosa das duas lâmpadas e se os dados dos fabricantes são realmente confiáveis num sistema instalado.

Os resultados encontrados foram sintetizados na Tabela 12. Na tabela 13 os resultados da fotometria para as duas lâmpadas são comparados com os dados fornecidos pelo software DIALux.

TABELA 12: Valores de iluminâncias encontradas nos seis pontos de medição

PONTO	POSIÇÃO			VALOR lux PARA LED	VALOR lux PARA FLUORESC.
	X	Y	Z	FOTOMETRIA (lux)	FOTOMETRIA (lux)
1	2,1	1,14	1,73	773	762
2	2,1	1,14	0,77	380	355
3	2,1	1,14	0	232	222
4	2,1	0,14	1,73	311	370
5	2,1	0,14	0,77	217	258
6	2,1	0,14	0	162	179

TABELA 13: Comparação dos valores de iluminâncias encontradas no software e no ensaio fotométrico nos seis pontos de medição

PONTO	POSIÇÃO			VALOR lux PARA LED		VALOR lux PARA FLUORESC.	
	X	Y	Z	DIALux	FOTOMETRIA	DIALux	FOTOMETRIA
1	2,1	1,14	1,73	629	773	786	762
2	2,1	1,14	0,77	314	380	392	355
3	2,1	1,14	0	214	232	267	222
4	2,1	0,14	1,73	368	311	458	370
5	2,1	0,14	0,77	252	217	314	258
6	2,1	0,14	0	186	162	231	179

Os valores encontrados na fotometria se aproximam dos valores previstos pelo software DIALux. No entanto no levantamento no sistema instalado, o LED apresentou maior iluminância imediatamente abaixo da luminária do que a fluorescente (380 lux contra 355 lux

no plano de trabalho), superando os valores previstos pelo software (314 lux e 392 lux); enquanto que a 1m de afastamento da luminária a situação se inverte (217 lux contra 258 lux da T8) abaixo das expectativas do software (252 lux e 314 lux), mas apresenta valores bastante próximos para as duas lâmpadas. Ou seja, na prática o LED apresentou um fecho de luz mais fechado e menos difuso que na simulação do DIALux. Uma possível explicação para essas diferenças entre os dados encontrados na fotometria e os da simulação é que tanto a marca do modelo de luminária utilizada no software, quanto a marca da lâmpada de LED da JUJIALED não existiam no catálogo. Foram utilizados modelos bastante semelhantes e editados os níveis de fluxo luminoso e potências originais, para os níveis dos materiais reais utilizados na simulação. Outra hipótese para a diferença de iluminância da lâmpada fluorescente é o fato de ter sido utilizada uma lâmpada que permaneceu em estoque, o que pode ter reduzido a eficiência luminosa pelo envelhecimento dos gases e do pó fluorescente existentes em seu interior.

Outras experiências foram realizadas com o LED, como invertê-lo na luminária, jogando luz para cima para verificar se o refletor teria alguma vantagem nesse caso. Como era previsto, gerou uma sombra suave no plano de trabalho no formato da lâmpada e não contribuiu na difusão da luz no espaço. Dessa forma os dados encontrados nessa simulação foram desconsiderados. Também foram realizadas medições com apenas uma lâmpada de cada na luminária, e os valores ficaram muito próximos da metade dos encontrados para duas lâmpadas.

5. CONCLUSÃO

As lâmpadas tubulares de LED de 15W da JUJIALED possuem luminosidade muito semelhantes às fluorescentes tubulares tipo T8 de 32W da EMPALUX, apresentando-se suficientes para a função na superfície de trabalho (considerada a 0,77m do piso). É notável que o fecho de luz das tubulares de LED é mais fechado que das fluorescentes, até porque a luminária com o refletor que direciona os raios de luz não tem utilidade para o LED, que só emite luz para baixo, ao contrário da fluorescente que emite luz para todos os lados. Seria necessário adaptar a luminária com outro formato de refletor para difundir a luz no espaço utilizando lâmpadas tubulares de LED, ou modificar o desenho da posição das unidades de LED ao longo da superfície da lâmpada pelos fabricantes.

O DIALux apresenta-se como ferramenta viável de auxílio em projetos luminotécnicos, se aproximando muito dos níveis de iluminância reais do sistema instalado. No estudo em questão, o modelo da luminária antiga, existente, não foi o mesmo utilizado na simulação do

software. Foi utilizado um modelo bastante semelhante, mas que pode gerar pequenas alterações nos resultados encontrados, para mais ou para menos.

Para uma melhor comparação da eficiência luminosa das duas lâmpadas, deveria ter sido utilizada uma esfera integradora de Ulbricht que avalia o fluxo luminoso das fontes de luz. Devido às dificuldades para se conseguir e utilizar este equipamento disponível somente em laboratório no prazo estipulado, foi utilizado um luxímetro, que oferece valores de iluminância em Lux, com menor precisão, porém de grande praticidade e agilidade. Como o mesmo processo foi aplicado para os dois tipos de lâmpadas, a efeito de comparação de resultados, a experiência é válida.

Uma ressalva deve ser considerada quanto ao fluxo luminoso emitido pelas fluorescentes tubulares. No software, os valores considerados foram os da lâmpada com fator de envelhecimento de 0.8, e a lâmpada utilizada deveria ser nova. No entanto os dados reais da fluorescente nova se aproximaram muito dos dados simulados para a lâmpada com fator de envelhecimento. O que pode ter gerado essa diferença é o fato de a lâmpada ficar muito tempo em estoque, o que já pode alterar a eficiência do pó fosforescente e dos gases em seu interior.

Com relação ao custo da lâmpada de LED, consumo e *payback* pode-se notar que apresenta-se como alternativa viável principalmente em espaços onde devem ficar mais tempo acesas e onde houver maior número de luminárias, que é quando o investimento se iguala a economia em um menor prazo de tempo. No exemplo em questão, para a lâmpada tubular LED funcionando 8 horas por dia em 365 dias do ano, já há retorno com a economia energética e manutenção no quinto ano. Um fator que deve ser considerado é que na prática as fluorescentes tubulares apresentaram vida útil muito menor do que os fabricantes garantem, devido a um sistema elétrico deficiente, e/ou a reatores de baixa qualidade, e/ou aos inúmeros acionamentos do interruptor, que reduzem a durabilidade da lâmpada. Segundo relatos de eletricitistas da UTFPR, em média, uma lâmpada fluorescente é trocada a cada 4 meses, nesse caso o retorno do investimento em LED é muito mais rápido, pois sua vida útil não reduz com o acionamento dos interruptores.

Para o estudo em questão, a substituição das lâmpadas fluorescentes tubulares por tubulares de LED, é viável. No entanto, não se pode afirmar que a troca é válida para todos os fabricantes e modelos de fluorescentes e LEDs do mercado, pois há uma enorme variedade de potências, preços e durabilidade. Deve-se sempre observar, além do preço, se o fluxo luminoso se assemelha ao da lâmpada que se deseja substituir, se a potência do LED é realmente menor

(consequentemente, menor o consumo energético), se o tamanho da lâmpada e o encaixe são compatíveis, compatibilizar a temperatura de cor, os índices de reprodução de cor, e em um futuro muito próximo, se os LEDs possuem certificação de qualidade.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A) Interferências de níveis de iluminâncias inadequados e tremulação nos níveis produtividade;
- B) Satisfação dos usuários com relação ao fluxo luminoso de lâmpadas de LED no ambiente de trabalho;
- C) Comparações do fluxo luminoso de lâmpadas tubulares de LED e tubulares fluorescentes utilizando esfera integradora de Ulbricht, marcas existentes no software DIALux e luminária sem refletor;
- D) Estudo dos Índices de Reprodução de Cor de lâmpadas LED;
- E) Descarte das lâmpadas LED;
- F) Reavaliar o cálculo do *payback* incluindo os reajustes da taxa de energia elétrica e a projeção de queda dos preços do LED.

REFERÊNCIAS

ALESSANDRO AZUOS. **Cartilhas de Luz**. Disponível em:

<<http://alessandroazuos.blogspot.com.br/2010/08/equipamentos-lampadas-fluorescentes.html>> Acesso em 01/04/14

ALUMBRA. **Conceitos de iluminação**. Disponível em:

<<http://www.alumbra.com.br/iluminacao/conceitos.php>> Acesso em 30/03/14

ANTÔNIO GUILHERME. **Geração de Energia Elétrica**. Disponível em

<<http://antonioguilherme.web.br.com/>> Acesso em 20/02/14.

ARQBRASIL. **Como a luz reproduz as cores no nosso dia-a-dia**. Disponível em:

<http://www.arqbrasil.com.br/_docempresa/corporativos/corp119.htm> Acesso em 30/03/14

BARBOSA, A. C. **Estudo Fotométrico de Lâmpadas de LED – I Workshop de iluminação a LED**. Outubro de 2012. CEPTEL / ELETROBRÁS. Disponível em:

<<http://www2.cepel.br/iwil/dia2/Workshop%20LED%20-%20Alessandra%20Barbosa.pdf>>. Acesso em 23/02/2014

BLEY, F. B. **LED versus Lâmpadas convencionais. Viabilizando a Troca**. Artigo (Pós Graduação) IPOG. Revista OnLine Especialize. Disponível em

<<http://ipog.edu.br/uploads/arquivos/9892c8941ef4a84c8c47d8a8ccdfda57.pdf>> Acesso em 22/02/14

CAMBRIDGE IN COLOUR. **Compreendendo o balanço de branco**. Disponível em:

<<http://www.cambridgeincolour.com/pt-br/tutorials/color-black-white.htm>> Acesso em 04/03/14

CLIQUE ARQUITETURA. **Lâmpadas incandescentes e halógenas**. Disponível em:

<<http://www.cliquearquitetura.com.br/portal/dicas/view/lampadas-incandescentes-e-halogenas/144>> Acesso em 30/03/14

CORALIS. **IRC – Índice de Reprodução de cores**. Disponível em:

<http://www.coralis.com.br/cursos/Artigo_IRC_Coralis.pdf> Acesso em 30/03/14

DIAL. **DIALux**. Disponível em: <<http://www.dial.de/DIAL/de/dialux.html>> Acesso em 30/03/2014

DIPLÔ - **Petróleo, terceiro choque?** Disponível em: <<http://diplo.org.br/2000-03,a1669>>

Acesso em 24/02/2014

ECYCLE. **Reciclagem de lâmpadas fluorescentes**. Disponível em:

<<http://www.ecycle.com.br/postos/reciclagem.php>> Acesso em 05/04/14

EDUCAR. **Fundamentos Teóricos**. Programa Educar – USP SC. Disponível em:

<<http://educar.sc.usp.br/optica/luz.htm>> Acesso em 05/04/14

EFISICA. **Eletromagnetismo**. Disponível em:

<<http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/historico/eletromagnetismo/>> Acesso em 30/03/14

EIA. **International Energy Outlook 2013** - IEO 2013 – U.S. *Energy Information Administration*, 2013a. Disponível em: <www.eia.gov/ieo/> Acesso em 23/02/2014

_____. **Report Brazil 2013** – U. S. *Energy Information Administration*, 2013b. Disponível em: <<http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=br>> Acesso em 23/03/14

ELEKTRO. **Desempenho comercial**. Disponível em:

<<http://www.elektro.com.br/ra2010/desempenho-comercial.aspx>> Acesso em 27/03/14

ELETRONICA. **LED**. Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/led>> Acesso em 05/04/14

EMPALUX. Disponível em: <www.empalux.com.br> Acesso em 30/03/14

EPE. **Balanco Energético Nacional 2013 – ano base 2012** – Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em:

<https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf> Acesso em 23/02/14

FAU. **Conceitos fundamentais – Grandezas Luminosas**. Material de apoio (Graduação em Arquitetura e Urbanismo). FAU-USP. Disponível em:

<[http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0213/Material_de_Apoio/03_-_Ia._Conceito_Fundamentais_\(grandezas_Luminosas\).pdf](http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0213/Material_de_Apoio/03_-_Ia._Conceito_Fundamentais_(grandezas_Luminosas).pdf)> Acesso em 30/03/14

IAR UNICAMP. **Iluminação de museus e galerias**. Disponível em:

<<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/dicasemail/dica36.htm>> Acesso em 05/04/14

IESNA. Illuminating Engineering Society of North America. Disponível em:

<<http://www.iesna.org/>> Acesso em 27/03/14

INSTITUTO DE FÍSICA. **O espectro eletromagnético**. - UFRGS, 2014. Disponível em:

<<http://www.if.ufrgs.br/oei/cgu/espec/intro.htm>> Acesso em 30/03/14

INSTITUTO CARBONO BRASIL. **Aquecimento Global**. Disponível em:

<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/mudancas_climaticas/aquecimento_global> Acesso em 23/02/14)

LEDSOLUTIONS. **Dúvidas sobre LEDs**. Disponível em:

<<http://www.ledsolutions.com.br/duvidas.php>> Acesso em 30/03/14

LUMINARIAS PREMIERE. **Catálogo de luminárias**. Disponível em:

<http://www.luminariaspremiere.com.br/produtos/Especificas_de_Sobrepot/PIS_110_AL> Acesso em 05/04/14

MUNDICENTER. **Lâmpadas de descarga**. Disponível em
<<http://www.mundicenter.pt/sobre/ambiente/electrao.aspx>> Acesso em 01/04/14

MUSEU DA LÂMPADA. **História da lâmpada**. Disponível em:
<<http://www.museudalampada.com/#!o-fogo/c1fhw>> Acesso em 27/03/14

MODENA, B. R.; CAMPOS, D. P.; REIS F. A. B. **Viabilidade da transição fluorescente para LED no ambiente industrial**. Monografia (Graduação na Faculdade de Engenharia Elétrica e Computacional) UNICAMP. Campinas, 2011. Disponível em
<<http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/index.php/be310/article/viewFile/301/234>> Acesso em 22/02/14

NEVES, G.; SCARAZZATO, P. S.; GRANJA, A.D. **Estudo comparativo dentre dois tipos de lâmpadas de descarga de baixa pressão: análise de viabilidade econômica** - página 64, EDIÇÃO 171- ano 14, JULHO DE 2012 – EDITORA LUMIÈRE

OSRAM. **Manual Luminotécnico Prático**, 2014a, 28 p. Disponível em:
<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/manuais/manual_luminotecnico_pratico_osram.pdf> Acesso em 27/03/14

_____. **Lâmpadas fluorescentes**, 2014b. Disponível em:
<http://www.osram.com.br/osram_br/noticias-e-conhecimento/lampadas-fluorescentes/conhecimento-profissional/descarga-de-gas-de-baixa-pressao/index.jsp> Acesso em 12/02/14

PCN. **Sobre a OCDE**. Ponto de Contato Nacional das Diretrizes da OCDE - Ministério da Fazenda, Governo Federal. Disponível em: <<http://www.pcn.fazenda.gov.br/>> Acesso em 15/03/14

PREMIER LIGHTING. ***Should You Replace your T8 Fluorescent Lamps with T8 LED tubes?*** 2013. Disponível em <<http://www.premierltg.com/should-you-replace-your-t8-fluorescent-lamps-with-t8-led-tubes/>> Acesso em 23/02/14

SALES, R. P. - **LED, O Novo Paradigma da Iluminação Pública** – Dissertação (Mestrado em desenvolvimento de tecnologia) Instituto de Tecnologia do Parana – IEP. Curitiba, 2011 Disponível em
<<http://sistemas.lactec.org.br/mestrado/dissertacoes/arquivos/RobertoSales.pdf>> Acesso em 23/02/14

SÓ FÍSICA. **Óptica, fundamentos**. Disponível em:
<<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Otica/Fundamentos/luz.php>> Acesso em 30/03/14

SOLELUX. **Conceitos básicos**. Disponível em: <http://www.solelux.com.br/tecnologia-led/conceitos-basicos/> Acesso em 30/03/14

UFMG. **Diodo semiconductor.** Disponível em:

<http://www.fisica.ufmg.br/~labexp/roteirosPDF/Diodo_semicondutor.pdf> Acesso em 05/04/14