

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: FONTES DE LUZ BRANCA

SOUZA, Laura Grossi de Oliveira¹
Centro Universitário Academia – Uniacademia
ABRITTA, Camila do Carmo Almeida²
Centro Universitário Academia – Uniacademia
Fernando José Nogueira³
Centro Universitário Academia – Uniacademia

Linha de pesquisa: Eficiência Energética.

RESUMO

Diversas técnicas são utilizadas no intuito de se reduzir o consumo de energia, por exemplo, a substituição das lâmpadas ineficientes (lâmpadas incandescentes) por lâmpadas eficientes. A grande demanda por eletricidade vem incentivando diversos estudos tanto para a ampliação da capacidade de geração de usinas quanto para o uso racional dessa relevante forma de energia. Desperdício de energia e eficiência energética são assuntos muito importantes no cenário mundial. É sabido que os sistemas de iluminação são muito importantes para as atividades humanas: o homem é totalmente dependente da iluminação artificial. Com a evolução tecnológica na área de iluminação a eficiência energética, por exemplo, pode ser alcançada substituindo componentes ultrapassados por fontes de luz modernas e mais eficientes. Diante do exposto, este trabalho de conclusão de curso propõe uma revisão bibliográfica ampla sobre fontes de luz branca contemplando os conceitos luminotécnicos mais relevantes, como qualidade de energia, eficiência energética, conforto visual, entre outros com o intuito de produzir um material para pesquisas científicas na área.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Eletricidade. Iluminação.

¹ Graduanda em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia – Uniacademia.

² Professora do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia – Uniacademia.

³ Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia – Uniacademia.

1 INTRODUÇÃO

Eficiência energética e o desperdício de energia são assuntos de bastante relevância no cenário mundial. A busca constante por métodos e tecnologias mais eficientes tem sido incentivada por questões de natureza econômica e ambiental, aspirando, cada vez mais, um desenvolvimento sustentável.

De acordo com Souza Eloi *et al.* (2019), eficiência energética é determinada como a obtenção de um mesmo serviço energético, utilizando menos energia durante algum processo. Nessa situação, é possível proporcionar o uso racional e eficiente da energia em todas as fases do processo, a contar da obtenção em forma primária até o consumo final.

A eficiência energética apresenta-se como um instrumento de importante impacto e baixo custo para redução dos gastos com energia, podendo atingir aproximadamente 20% de economia quando confrontado à aquisição de novas fontes de geração. Dessa maneira, um sistema de gestão energética implementa, continuamente, maneiras técnico-organizacionais que buscam oportunidades de conservação e utilização eficiente nas instalações, tendo como propósito a redução dos custos (COSTA; ANDRADE JÚNIOR, 2021).

No decorrer dos últimos dez anos a utilização de energia elétrica tem aumentado demasiadamente, conforme Balanço Energético Nacional de 2019. Sendo que, da energia distribuída no Brasil, 64,9% são provenientes das hidrelétricas, tornando fundamental a utilização de água para geração de eletricidade. No entanto, a utilização dessa fonte de energia está cada vez mais comprometida, aguçado pela delimitação do nível dos reservatórios hídricos do país nos últimos anos (SANTOS *et al.*, 2015).

O uso de iluminação em edificações industriais, comerciais ou residências é uma das causas da dependência da energia elétrica. Todavia, muito desses projetos luminotécnicos não estão de acordo com as normas técnicas vigentes, conduzindo a uma maior carga instalada e, por consequência, em um maior consumo (VARGAS; MAESTRIA, 2015). É notório que em muitas edificações, é usado a iluminação artificial de maneira errônea, além de não se fazer uso da iluminação natural. Esse uso de luminárias impróprias e lâmpadas ineficientes acarreta uma baixa eficiência.

Observa-se, historicamente, uma evolução no desenvolvimento e na utilização de fontes de iluminação artificiais mais eficientes e que, além disso, seja uma tecnologia com intuito de deixar o ambiente mais coerente e confortável à cada situação. Além do mais, fica claro a crescente preocupação com soluções tecnológicas que, além de oferecer uma iluminação de qualidade, sejam eficientes na conversão de energia elétrica em luz e tenham vida útil conveniente, a fim de se reduzir gastos com manutenção (NOGUEIRA, 2013).

Os LEDs, também conhecidos como diodos emissores de luz, são componentes semicondutores que conseguem transformar energia elétrica em luz, diferencialmente das lâmpadas convencionais. Inicialmente esses eram utilizados apenas para sinalização, posteriormente tiveram um rápido desenvolvimento com os de potência de luz branca, proporcionando sua utilização para iluminar ambientes externos e internos (VARGAS; MAESTRIA, 2015).

É importante destacar que o presente trabalho tem como objetivo fornecer uma visão ampla sobre os tipos de luz branca. Ressaltando as características e conceitos luminotécnicos primordiais para implementação de projetos de iluminação modernos, economicamente viáveis e mais eficientes.

No tópico 2 será apresentado os conceitos luminotécnicos, como por exemplo, intensidade luminosa, fluxo luminoso, iluminância, luminância, eficácia luminosa, refletância, índice de reprodução de cor e temperatura de cor correlata. No tópico 3 serão apresentadas as fontes de luz branca e suas características mais importantes e, por fim, no tópico 4 será apresentada a conclusão.

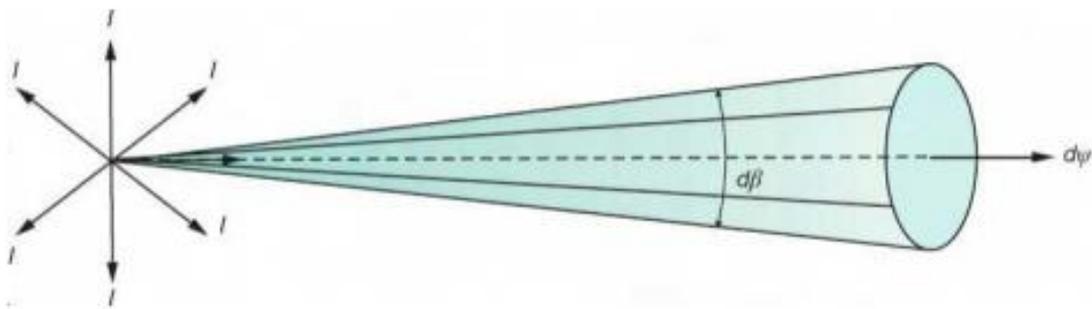
2 CONCEITOS LUMINOTÉCNICOS

Esta seção tem como finalidade apresentar, sucintamente, os conceitos da fotometria clássica para que o leitor fique mais familiarizado com o assunto que será abordado neste trabalho. É muito importante o entendimento destas considerações, uma vez que elas serão aplicadas em diversas comparações entre fontes luminosas ao longo do trabalho.

2.1 INTENSIDADE LUMINOSA (I)

A intensidade luminosa é uma grandeza vetorial que representa a energia luminosa projetada na direção radial (Figura 1). A unidade de medida é dada em candelas (cd) e a sua medição pressupõe que a fonte de luz seja puntiforme. Apesar de na prática as fontes de luz não serem puntiformes, podem ser consideradas assim quando observadas a uma determinada distância (PEREIRA, 2021).

Figura 1 – Representação esquemática da intensidade luminosa



Fonte: SIMPLÍCIO, 2021.

Matematicamente, a intensidade luminosa é dada pela razão do fluxo luminoso elementar, $d\phi$, que parte de uma fonte luminosa e se propaga no elemento de ângulo, $d\beta$.

$$I = \frac{d\phi}{d\beta} \quad (1)$$

2.2 FLUXO LUMINOSO (ϕ)

O fluxo luminoso é uma das unidades fundamentais para os cálculos luminotécnicos e é dado como a quantidade total de luz emitida por uma determinada fonte, em todas as direções do espaço. Em outras palavras é a potência de energia luminosa de uma fonte percebida pelo olho humano, ou seja, toda radiação que pode produzir um estímulo visual por uma fonte de luz (CAMPOS, 2017).

A unidade utilizada para a medição do fluxo luminoso é o lúmen (lm) e sua sua definição é dada pela equação (2)

$$\phi = k_n \int_{380}^{780} V_n(\lambda) \cdot J(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

A constante k_n e a distribuição, $V_n(\lambda)$ são dependentes do regime de operação do sistema visual. Para o regime fotópico, k_n equivale a 683 lm/W, enquanto para o regime escotópico, k_n equivale a 1.699 lm/W. A função $J(\lambda)$, dada em W/nm é a distribuição espectral de potência da fonte luminosa e só depende desta. Os limites da integração consistem pela limitação de sensibilidade da visão humana, sendo assim, de 380 a 780 nm (NOGUEIRA, 2013).

2. 3 ILUMINÂNCIA (E)

A iluminância (E) é a relação entre o limite do fluxo luminoso ($d\phi$) incidente na superfície, pela área deste elemento, quando essa tende para zero (dA). Sua definição matemática é dada pela equação (3) (NOGUEIRA, 2013).

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta A} = \frac{d\phi}{dA} \quad (3)$$

Onde:

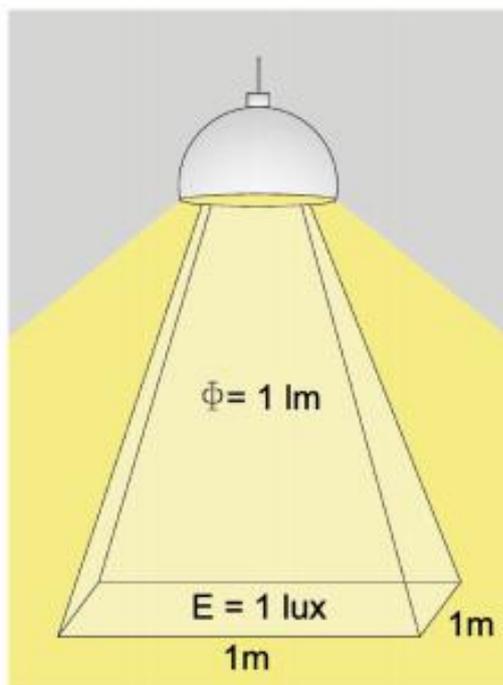
ϕ é o fluxo luminoso;

A é a área;

E é a iluminância, dada em lm/m² ou lux. Em outras palavras, é a quantidade de luz dentro de um ambiente.

Na Figura 2 têm-se a representação visual do que é a iluminância:

Figura 2 – Representação esquemática do conceito de iluminância

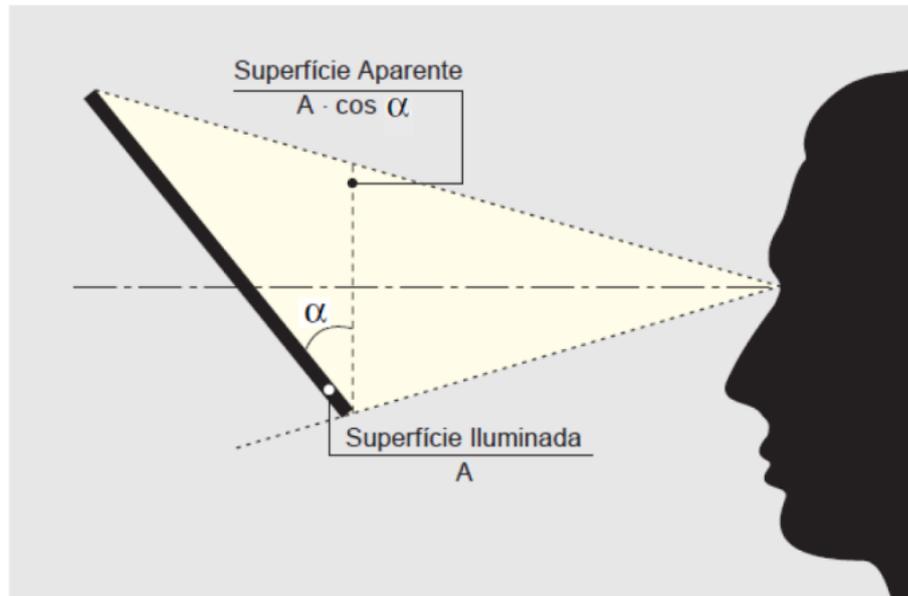


Fonte: SIMPLÍCIO, 2021.

2.4 LUMINÂNCIA (L)

A luminância é a razão entre a intensidade luminosa e a área perpendicular, ou seja, área aparente vista pelo observador, sendo que irradia, antes de alcançar os olhos do observador. É por meio da luminância que o homem enxerga (FREITAS, 2015). Esta situação é apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Área aparente vista de um observador



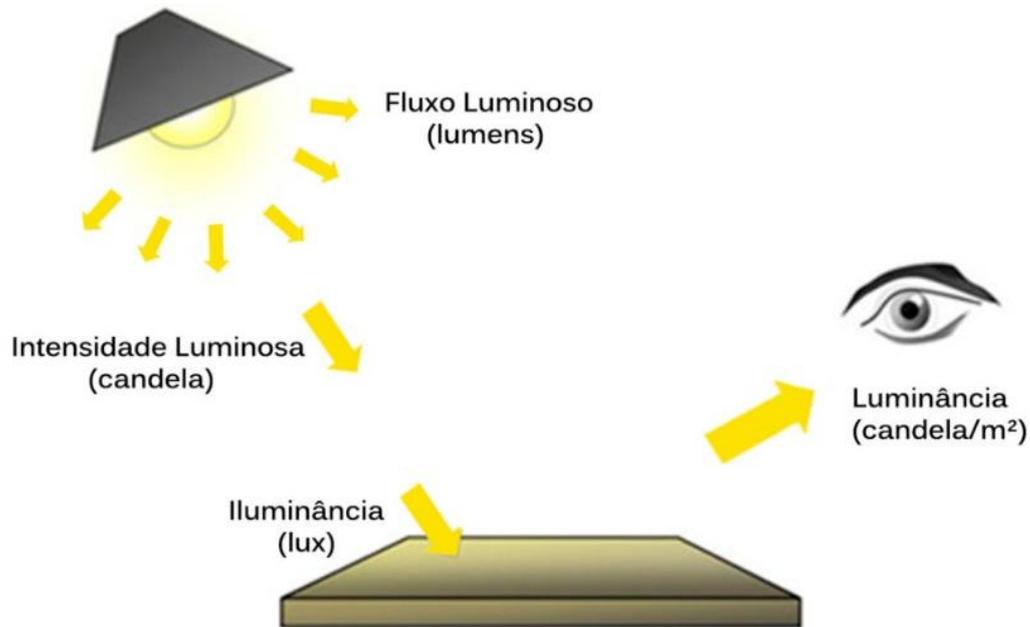
Fonte: SIMPLÍCIO, 2021.

A iluminância é expressa matematicamente pela equação (4), onde:
 A é a área da superfície iluminada;
 α o ângulo da direção de observação;
 I é a intensidade luminosa irradiada pela superfície;
 L é a luminância, sendo que a unidade é em cd/m^2 .

$$L = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A \cdot \cos \alpha} = \frac{dI}{dA \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

Na Figura 4 é representado todos esses conceitos que foram apresentados anteriormente, para a maior compreensão na prática de como se comportam em um ambiente.

Figura 4 – Representação esquemática de fluxo luminoso, intensidade luminosa, iluminância e luminância



Fonte: GRADO ILUMINAÇÃO, 2021.

2.5 EFICÁCIA LUMINOSA (η)

A eficácia luminosa dá-se pela relação entre o fluxo luminoso total (ϕ) e a potência elétrica (P) por ela consumida. É expressa matematicamente pela equação (5).

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (5)$$

É expressa em lm/W, sendo uma grandeza muito importante, que indica as fontes mais eficientes na conversão de energia elétrica em luz. Na Tabela 1, é representada a eficácia luminosa das fontes de luz que serão analisadas nesse trabalho.

Tabela 1 – Eficácia luminosa

Tipos de iluminação	Eficácia luminosa (lm/W)
Lâmpadas Fluorescentes	30 a 75
Lâmpadas de vapor de mercúrio	45 a 58
Lâmpadas de multivapores metálicos	69 a 115
LEDs	100 a 150

Fonte dos dados: FREITAS, 2015.

2.6 REFLETÂNCIA (ρ)

A refletância é a razão entre o fluxo luminoso (ϕ), que é refletido de uma superfície iluminada, pelo fluxo luminoso incidente ϕ_I sobre ela. É definido, matematicamente, pela equação 6 e é dado em porcentagem:

$$\rho = \frac{\phi_R}{\phi_I} \cdot 100\% \quad (6)$$

A refletância é uma característica intrínseca da superfície, sendo dependente da cor, da textura etc., existindo independentemente se existe presença ou não da luz. Quanto maior for a refletância, melhor será o fluxo luminoso e, por conseguinte, maior será a iluminância no local (SIMPLÍCIO, 2021).

2.7 ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR (IRC)

É a medida de correspondência entre a cor real de um objeto e sua aparência, variando de 0% a 100%. O IRC da luz do sol é igual a 100%, pelo fato de conseguir reproduzir perfeitamente as cores dos objetos que ilumina. Quanto mais próximo de 100% for o IRC, mais perfeito será reproduzido as cores do objeto iluminado por esta fonte luminosa.

A Tabela 2 apresenta fontes luminosas como fluorescente e compacta e seus respectivos índices de reprodução de cores.

Tabela 2 – Fontes luminosas e porcentagem do índice de reprodução de cores (IRC)

Fonte de Luz	IRC (%)
Florescente Compacta	80
Vapor Metálico	70
Mercúrio	40
LED	70 a 90

Fonte: NOGUEIRA, 2013.

A Figura 5 representa uma demonstração do IRC.

Figura 5 – Imagem demonstrativa do índice de reprodução de cor (IRC)



Fonte: FERREIRA, 2022.

2.8 TEMPERATURA DE COR CORRELATA (TCC)

O TCC representa qual seria a temperatura de um corpo negro que emitiria uma luz de cor similar à fonte analisada. A temperatura de cor correlata não tem nenhuma relação com a temperatura física da fonte luminosa, embora seja medida em kelvin (K).

Por padrão uma baixa temperatura de cor (3.000k ou menos) emitem uma luz de cor amarelada, chamada de luz quente. As cores neutras situam-se na faixa de 3.000K e 4.000k, já uma alta temperatura (6.000k ou mais), apresenta uma luz branca ou azulada, denominada luz fria. São características muito importantes na escolha do tipo de lâmpada, em função da sensação psicológica que se deseja criar no ambiente em questão (SIMPLÍCIO, 2021).

A Figura 6 mostra a escala da temperatura de cor.

Figura 6 – Escala da temperatura da cor



Fonte: AALOK, 2019.

3 TIPOS DE LÂMPADAS

Nesse tópico será abordado o princípio de funcionamento dos principais tipos de lâmpadas de luz branca utilizadas atualmente, que são àquelas que, possuem TCC variando aproximadamente desde o branco quente até o branco frio (3.300K a 6.000K) (BLOG DECOR WATTS, 2022). Serão discutidas algumas características para os tipos mais comuns de luz branca, de forma que, obtenha-se um fundamento técnico na escolha do tipo de lâmpada mais adequada a cada situação. Basicamente, lâmpadas com tonalidade mais quente são mais relaxantes e confortáveis, enquanto as mais frias são mais energizantes, o que pode nos deixar mais atentos.

A Figura 7 representa as diferentes tonalidades de cada temperatura de cor.

Figura 7 – Diferentes temperaturas de cor



Fonte: BLOG DECOR WATTS, 2022.

3.1 LEDS

Os LEDs ou diodos emissores de luz são componentes eletrônicos semicondutores que emitem luz por meio da eletroluminescência, que transforma energia elétrica em luz. Esse dispositivo era apenas utilizado para sinalização, devido ao seu baixo fluxo luminoso (emissão de luz), restrita gama de cores e baixa potência. A partir de várias pesquisas e investimentos, foi inventado o LED azul com alto fluxo luminoso que, juntamente com uma camada de fósforo, gera luz branca (NOGUEIRA, 2013). Esses LEDs, de luz branca, têm evoluído rapidamente, tanto em potência, quanto em restituição cromática, de tal forma que, hoje em dia, já conseguem ser uma possibilidade para a iluminação convencional em todas as suas vertentes. Na Figura 8 têm-se uma representação para iluminação de exteriores e na Figura 9 uma representação de lâmpadas LEDs para iluminação de interiores.

Os LEDs, são materiais semicondutores que são constituídos por dois materiais diferentes que, juntamente, formam uma junção PN, permitindo o fluxo de corrente em apenas uma direção. Se essa junção PN for polarizada diretamente, as lacunas da camada P e os elétrons da camada N são movidos em direção à região de depleção, que é a área de transição entres os materiais P e N. Próximo a essa região, a recombinação de elétrons e lacunas gera energia que é liberada sob a forma de fótons de luz.

Figura 8 – Diodos emissores de luz (LEDs)



Fonte: ALMEIDA, 2014.

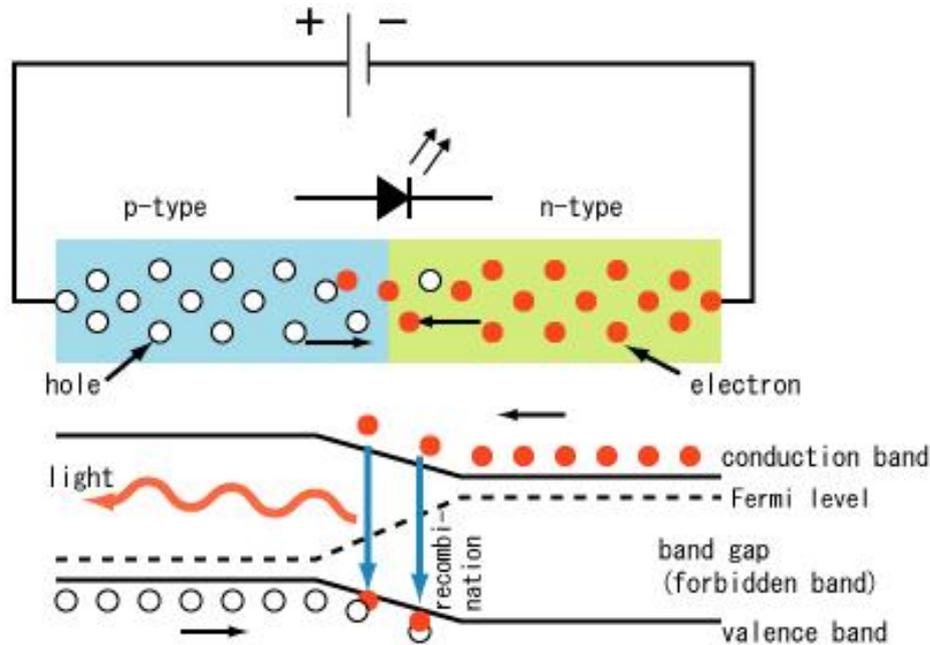
Figura 9 – Lâmpadas diversas LED



Fonte: CONKANSEI, 2021.

A Figura 10 mostra a representação simplificada da estrutura física e do processo de emissão de luz em um LED.

Figura 10 – Representação esquemática simplificada da estrutura física e do processo de emissão de luz em um LED



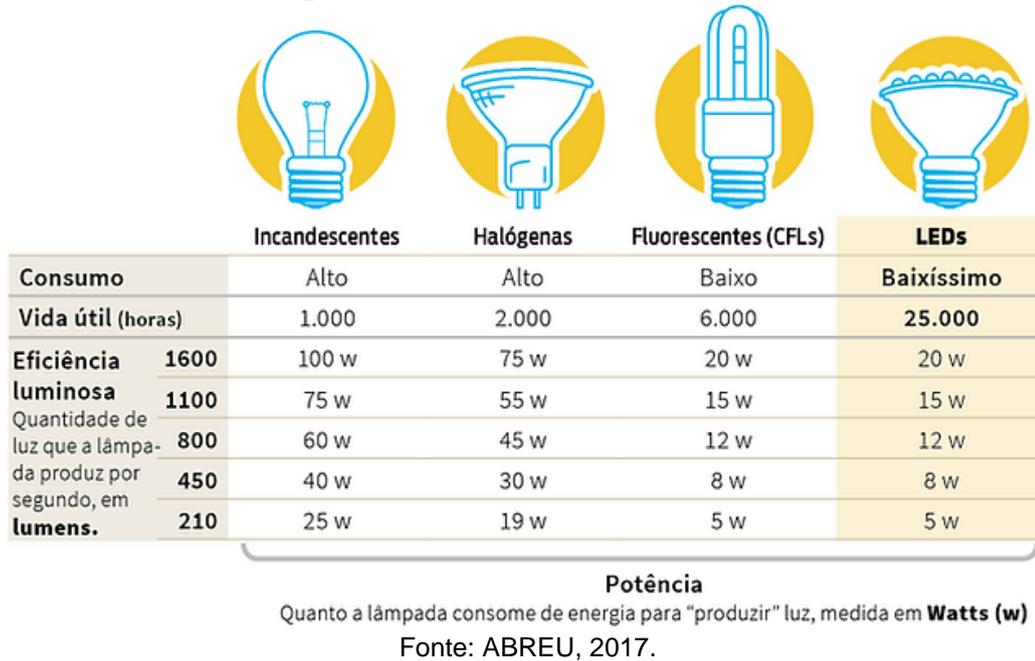
Fonte: ELETRICAL E-LIBRARY, 2018.

Os LEDs têm como característica uma alta resistência mecânica, pois são componentes de estado sólido, além de não possuir vidro nem filamento, assim são mais resistentes a impactos do que as outras lâmpadas.

Outra característica importante dos LEDs é a sua operação com baixos níveis de tensão e corrente, eliminando a necessidade do uso de um ignitor para o seu acionamento como no caso das lâmpadas de descarga. No caso dos LEDs a alimentação é feita por meio de um circuito eletrônico de acionamento (ou *driver*), que é um circuito responsável por ajustar os valores de tensão e corrente da rede elétrica alternada, para os níveis contínuos dos arranjos de LEDs. Além disso, é responsável por manter a corrente no LED de forma constante, a fim de evitar variações no fluxo luminoso emitido e diminuição da vida útil da lâmpada (NOGUEIRA, 2013).

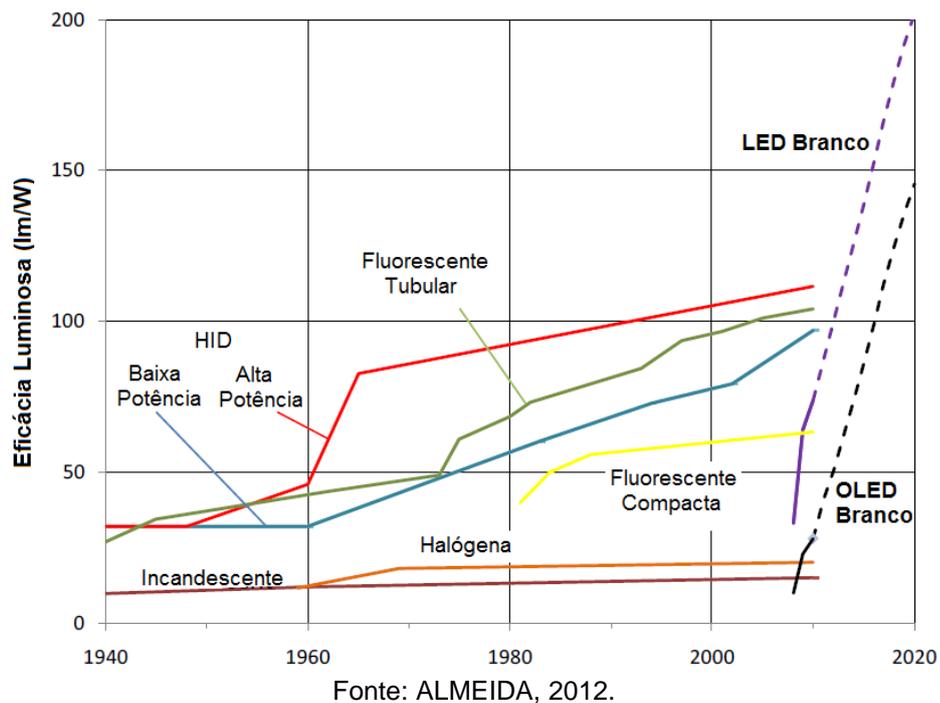
A eficácia luminosa do LED, outra característica importante, é uma propriedade para se destacar nas aplicações de iluminação em geral. Sabe-se que quanto mais lúmens produzidos para cada watt consumido mais eficiente é a lâmpada. Esta relação pode ser comparada na Figura 11, onde pode-se perceber que o LED é muito mais eficiente que as incandescentes, halógenas e algumas fluorescentes.

Figura 11 – Eficiência luminosa dos LEDs



Na Figura 12 é apresentada a evolução da eficácia luminosa dos LEDs em comparação com outras fontes de luz.

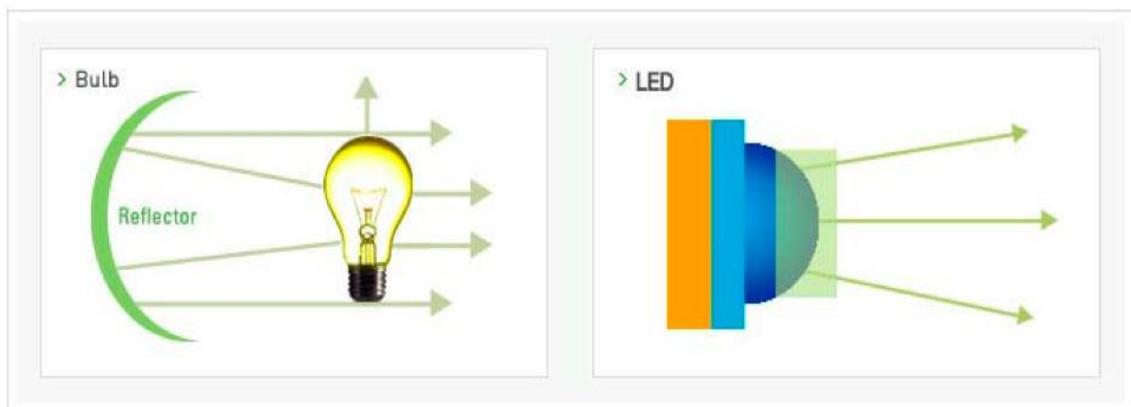
Figura 12 – Evolução paralela da eficácia luminosa de diversas tecnologias de iluminação



A vida útil do LED, também é uma característica importante, sendo medida em horas. Segundo Bley (2012) a determinação da vida útil da lâmpada LED é feita com base no tempo em que seu fluxo luminoso atinge 70% do fluxo inicial, a vida mediana corresponde ao tempo em que 50% das lâmpadas ensaiadas ainda permanecem acesas e a vida média, corresponde a média aritmética do tempo de duração das lâmpadas ensaiadas. Esses elementos, correspondem à durabilidade da lâmpada.

Outra particularidade dos LEDs é o seu fluxo luminoso, sendo ele direcional, ou seja, não sendo irradiado em todas as direções como ocorre no caso das lâmpadas convencionais como é mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxo luminoso no LED



Fonte: NOGUEIRA, 2013.

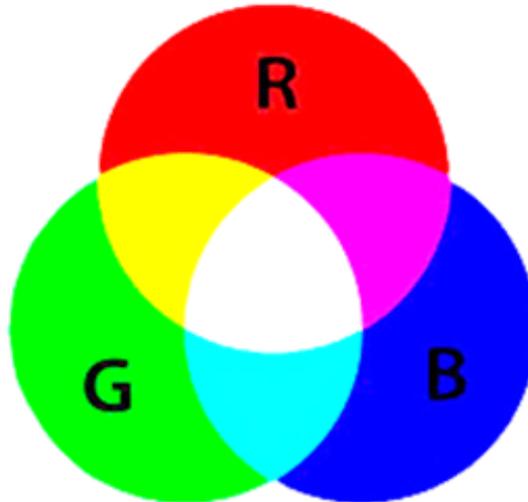
Isso se deve, pelo fato de apresentarem um ângulo de abertura estreito para a emissão do fluxo luminoso. Com um ângulo mais estreito, os LEDs oferecem um melhor aproveitamento do fluxo luminoso, assim, as perdas e a poluição luminosa são reduzidas. Posto isso, a lâmpada LED concentra melhor a luz no fecho, do que, por exemplo, uma lâmpada halógena.

Além do mais, os LEDs se destacam quando é a respeito do conceito de IRC (índice de reprodução de cores), já que esse tipo de lâmpada possui um IRC próximo ao ideal, aproximadamente 70% a 90% (NOGUEIRA, 2013).

É feito de duas formas para obtenção de luz branca nos LEDs: através da combinação das cores primárias (LEDs RGB) ou por meio de LEDs azuis revestidos com uma camada de fósforo amarelo (PC-LEDs).

Na Figura 14 é apresentada a primeira forma de se obter luz branca nos LEDs. Corresponde em utilizar um LED individual que emita as três cores primárias (verde, vermelho e azul) e através dessa mistura de cores, produzir luz branca. São dispositivos conhecidos como LEDs RGB (a sigla RGB vem do inglês *Red, Green and Blue*). Além de servirem para produção de luz branca, os LEDs RGB podem ser utilizados para gerar luz de várias cores. Porém, apresentam uma série de dificuldades técnicas que devem ser resolvidos para que encontrem uma boa aceitação no mercado (PEREIRA, 2021).

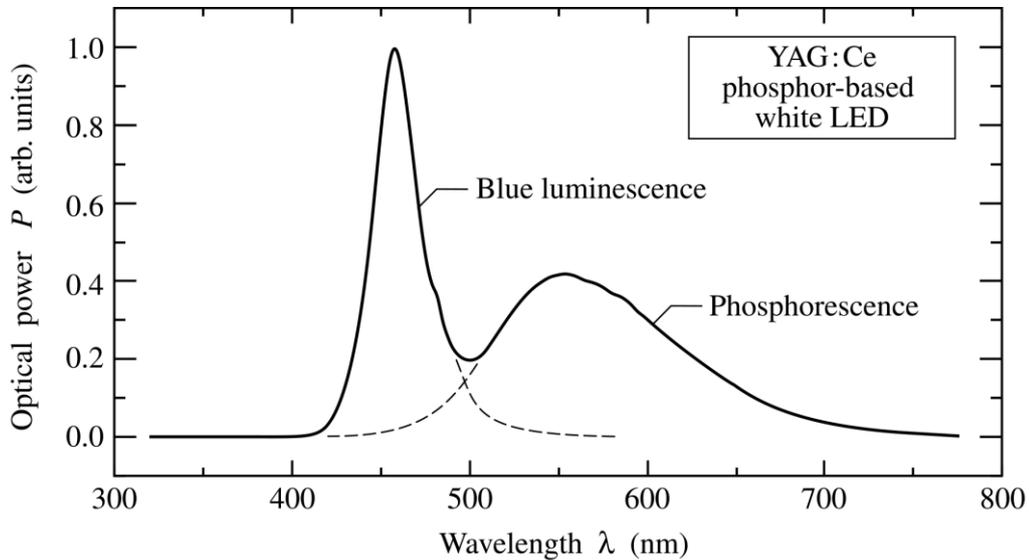
Figura 14 – Formação da luz branca através da combinação RGB



Fonte: BLOG DA ROBÓTICA, 2020.

Já na Figura 15, é apresentada a segunda maneira de se obter luz branca nos LEDs. Essa forma consiste na utilização de LEDs monocromáticos azuis recobertos com camadas de fósforo amarelo, o que provoca a emissão de luz branca. São os PC-LEDs (do inglês *Phosphor Converter LEDs*). Nesse caso, os LEDs são formados por pastilhas semicondutores que emitem luz azul, em torno de 220nm, e possuem uma cobertura de um fósforo especial, que possui pico de excitação próximo ao pico de emissão do semicondutor LED azul, e envia parte da radiação em comprimentos de onda maiores (deslocamento de Stokes), em torno de 550 nm (NOGUEIRA, 2013).

Figura 15 – Método de produção de luz branca por PC-LEDs, usando fenômenos de eletroluminescência do semiconductor InGaN e de fosforescência do fósforo YAG:Ce



Fonte: SCHUBERT, 2006.

Os LEDs brancos atuais convertem entre 15% e 25% da sua potência em luz visível, emitindo baixos níveis de infravermelho e de ultravioleta (ou não emitem). Esses raios não são visíveis a olho nu, sendo os IR percebidos na forma de calor e os UV responsáveis pelo desbotamento de cores e prejudiciais ao ser humano. Dentre as lâmpadas que serão apresentadas nesse trabalho, as incandescentes são as que mais emitem IR e as fluorescentes são as que mais emitem UV, mesmo sendo em pequena quantidade. Contudo, os LEDs não emitem IR nem UV no fecho luminoso, assegurando assim a qualidade dos objetos iluminados e não contribuindo com a elevação da temperatura ambiente.

Em resumo, de acordo com Nogueira (2015), pode-se reunir alguns aspectos que tornam os LEDs atrativos para aplicações em iluminação:

- Elevada resistência mecânica;
- Operação com baixos níveis de tensão e corrente;
- Elevada eficácia luminosa, em torno de 100-150 lm/W, podendo atingir valores ainda mais elevados;
- Elevada vida útil;
- Fluxo luminoso direcional;
- Alto índice de reprodução de cores, entre 70% a 90%, chegando próximo ao ideal;

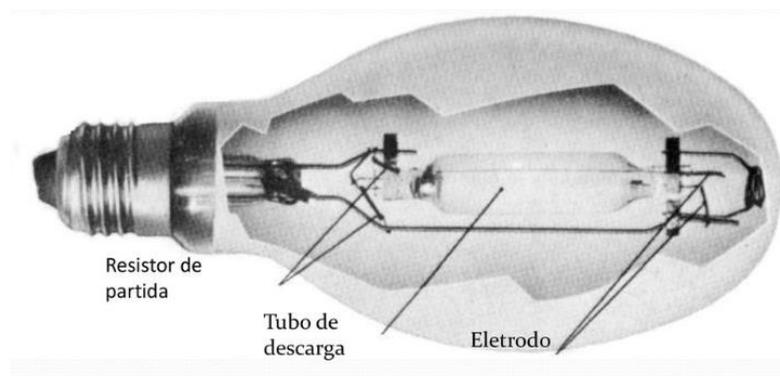
- Possui dimensões reduzidas, permitindo um design mais flexível das luminárias;
- Os LEDs permitem o retrofit (processo de modernização de um equipamento) das luminárias, já que existem lâmpadas de LED com o mesmo formato e bocal das lâmpadas convencionais.

Em contrapartida podemos descrever como desvantagens dos LEDs elevado custo, necessidade de um sistema de dissipação bem planejado e de um circuito eletrônico de acionamento para manter a corrente nos LEDs constante necessita de uma adequada dissipação de calor no sistema, pois os LEDs emitem calor, sem irradiá-los (SIMPLÍCIO, 2021).

3.2 LÂMPADA DE VAPOR DE MERCÚRIO EM ALTA PRESSÃO

A lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão, cuja representação é apresentada na Figura 16, é constituída por dois tubos, interno e externo. Sendo que o tubo interno é feito de quartzo, possuindo gás argônio e mercúrio. Já o externo é de vidro com a função de proteger e manter a temperatura do tubo interno (PEREIRA, 2021).

Figura 16 – Lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão



Fonte: SLIDEPLAYER, 2022.

O centro do tubo de vidro é preenchido com um gás inerte, nitrogênio, que possui a função de impedir a oxidação dos contatos internos. São bastante utilizadas como fontes de luz devido ao seu baixo custo de investimento e por possuírem uma longa vida útil, sendo aproximadamente de 11000 a 12000 horas. Necessitam de reator para serem ligadas em rede elétrica, dispensando o uso de ignitor. Por causa

de sua baixa eficiência, no máximo 60 lm/W as lâmpadas de vapor de mercúrio consomem muito mais energia elétrica do que, por exemplo, as lâmpadas de multivapores metálicos ou de vapor de sódio. Seu uso é indicado para a iluminação de ruas e fábricas. Têm a necessidade de reator para ser ligado em rede elétrica, dispensando o uso do ignitor. Devido sua baixa eficiência, chegando no máximo 60 lm/W, as lâmpadas de vapor de mercúrio utilizam muito mais energia elétrica do que, por exemplo, as lâmpadas de multivapores metálicos ou de vapor de sódio (MASCIA, 2011).

A função do eletrodo de partida é contribuir e prover a ignição da lâmpada de vapor de mercúrio por meio de valores de tensão consideravelmente baixos e típicos das concessionárias de energia (127 V a 220 V). Assim que a lâmpada é ligada, a tensão aparece nos eletrodos principais, mas devido à grande distância entre eles, a descarga não acontece de imediato. Todavia, a mesma tensão aparece no espaço pequeno entre o eletrodo de partida e o eletrodo principal adjunto, resultando numa descarga localizada inicial, limitada pela resistência de partida conectada em série. A descarga local se expande e, por fim, a descarga entre os eletrodos principais é estabelecida. Dessa forma, ao contrário das lâmpadas de sódio de alta pressão e lâmpadas de multivapores metálicos, a lâmpada de vapor de mercúrio em alta pressão não requer de um ignitor externo (NOGUEIRA, 2013).

Algumas características dessas lâmpadas são mostradas a seguir:

- Eficácia luminosa: 36 a 60 lm/W;
- Vida útil: 9.000 a 20.000 horas;
- IRC: 16% a 52%;
- TCC: 3.600K a 6.000 K.

O problema principal das lâmpadas de vapor de mercúrio é que seu fluxo luminoso possui uma alta queda com o tempo de utilização, chegando a uma desafeição de cerca de 20% com 2.000 horas de operação (MUNDO DA ELÉTRICA, 2022).

3.3 LÂMPADA DE MULTIVAPORES METÁLICOS

As lâmpadas de multivapores metálicos são altamente eficientes e são disponíveis em uma grande variedade de temperaturas de cores. Por outro lado, as lâmpadas de mercúrio são muito limitadas em cor e na qualidade de luz produzida. Esse tipo de luz pode ser fabricado para produzir quase todos os tipos de cores desejadas (2.700K – 20.000K) e também oferece um ótimo índice de reprodução de cores (IRC) de 65 a 85 (MASCIA, 2011).

Elas necessitam de reatores e ignitores como elementos auxiliares, já que é necessária uma elevada tensão para efetuar a partida da lâmpada (até 4,5kV) (NOGUEIRA, 2013).

A Figura 17 é uma representação de uma lâmpada de multivapores metálicos e a Figura 18 representa a iluminação de uma quadra esportiva com esse tipo de lâmpada.

Figura 17 – Representação de uma lâmpada de multivapores metálicos



Fonte: FERRAMENTAS GERAIS, 2022.

Figura 18 – Representação de uma quadra esportiva com lâmpada de multivapor metálico



Fonte: FERREIRA, 2022.

Essas, são lâmpadas similares às de vapor de mercúrio, nas quais se incluem, além do argônio e mercúrio, os iodetos metálicos, de forma que o arco elétrico se realize numa atmosfera mista de vários gases e vapores. Desta forma, consegue-se melhor eficácia luminosa, entre 70 lm/W e 110 lm/W, e também melhor composição espectral da luz emitida, que é extremamente branca (NOGUEIRA, 2013).

3.4 LÂMPADA FLUORESCENTE

As Lâmpadas fluorescentes, possui uma alta eficiência por possuir a capacidade de emitir mais energia eletromagnética em forma de luz do que calor. Elas possuem um par de eletrodos em cada extremo e um tubo de vidro que é coberto de gases, como o argônio ou outro gás inerte, e vapor de mercúrio, no qual estabelece um arco elétrico. Quando excitado com radiação ultravioleta gerada pela ionização dos gases, produz luz visível. Estão disponíveis em temperaturas de cor que variam de 2.700K a 10.000K e sua eficácia luminosa varia de 60 lm/W a 90 lm/W (ALMEIDA, 2014). Na Figura 19 temos a representação de lâmpadas fluorescentes tubulares.

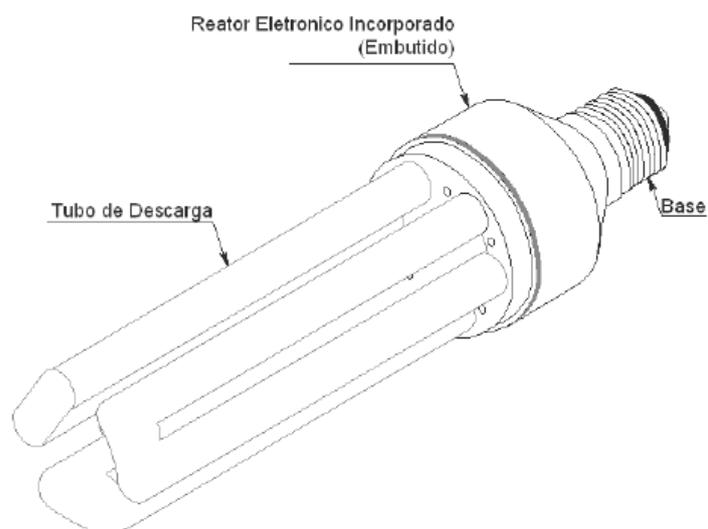
Figura 19 – Representação de lâmpadas fluorescentes tubulares



Fonte: ALMEIDA, 2014.

Em correlação, a lâmpada fluorescente compacta mostrada na Figura 20, possui o mesmo funcionamento de uma lâmpada fluorescente tubular, porém com dimensões reduzidas e reator integrado.

Figura 20 – Representação de uma lâmpada fluorescente compacta



Fonte: NOGUEIRA, 2013.

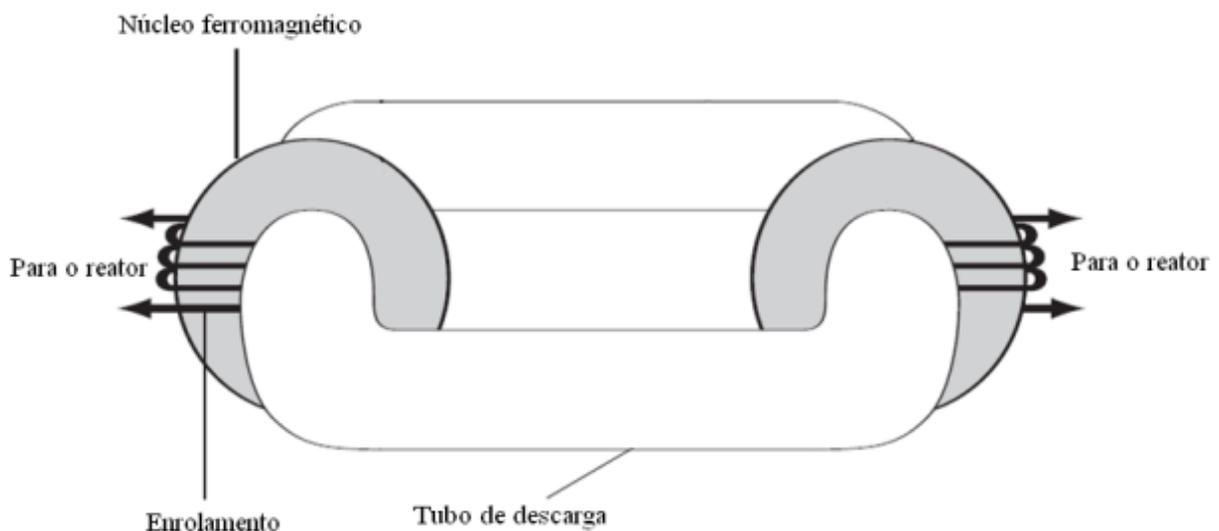
Para estabelecer o arco elétrico no interior da lâmpada, eletrodos são percorridos por uma corrente elétrica e passam a emitir elétrons livres, que

percorrerão o bulbo da lâmpada até o eletrodo oposto. Esses elétrons, no caminho ao longo do bulbo, chocam-se com átomos do vapor de mercúrio contido em seu interior, retirando elétrons desses átomos de órbitas mais internas para órbitas mais externas. Quando o elétron do átomo de mercúrio retorna à órbita original, ocorre a emissão de energia radiante (fóton), que proporcionará o fluxo luminoso (FERREIRA, 2014). Essas lâmpadas são representadas em diferentes temperaturas de cor, variando desde luz quente (amarelada) até a luz fria (branca).

3.5 LÂMPADA DE INDUÇÃO

A lâmpada de indução é uma lâmpada fluorescente, em que o tubo de descarga não possui eletrodos. A energia que é necessária para a descarga é fornecida para a lâmpada através da indução eletromagnética. A Figura 21 mostra a estrutura dessa lâmpada.

Figura 21 – Representação da estrutura de uma lâmpada de indução



Fonte: NOGUEIRA, 2013.

A descarga induzida pelas bobinas, forma um circuito fechado que provoca a aceleração de elétrons livres, que coincidem com os átomos de mercúrio e excitam seus elétrons. Quando os elétrons dos átomos de mercúrio vão voltando para seus níveis energéticos originais, eles emitem radiação ultravioleta, que será convertida em luz visível no momento que atravessar o revestimento de fósforo da superfície interna

do tubo. Esse processo assemelha-se ao que acontece com as lâmpadas fluorescentes. As lâmpadas de indução possuem características técnicas interessantes, entre elas elevada eficácia luminosa (aproximadamente 110 lm/W), alto índice de reprodução de cores (chegando a 90%) e uma longa vida útil (em torno de 100.000 horas). A ausência dos eletrodos, além de favorecer a vida útil da lâmpada de indução, também permite que esta trabalhe com maiores correntes e, conseqüentemente, maiores potências. Além disso, essas lâmpadas existem em diferentes temperaturas de cor, variando de 2700K a 6500K (ROBERTO; Schultz, 2017).

A principal desvantagem da lâmpada de indução é o alto custo do reator eletrônico, que é o responsável por seu acionamento. Além disso, sua forma e sua dimensão, dificulta o desempenho fotométrico da luminária, por ser uma forma geralmente compacta.

Por fim, na Tabela 3, têm-se um resumo das características de cada lâmpada obtidas por meio de estudos realizados durante o processo da execução desse trabalho.

Tabela 3 – Características das diferentes lâmpadas estudadas nesse trabalho

	LEDs	Vapor de mercúrio	Multivapor metálico	Fluorescente	Indução
Eficácia (lm/W)	100-150.000	36-60	70-110	60-90	75-85
Vida útil (H)	20.000-100.000	9.000-20.000	15.000	10.000-15.000	50.000-100.000
IRC (%)	70-90	16-52	70-95	65-85	80
TCC (K)	5.500-6.500	3.600-6.000	3.600 - 5.600	2.700-10.000	2.700-6.500

Fonte: Elaborada pela própria autora com base nos dados de Almeida e Mendes (2018) e Pereira (2021).

4 CONCLUSÃO

Com a construção deste trabalho foi possível observar as vantagens dos LEDs em relação às outras lâmpadas apresentadas e a importância da sua utilização. O uso desta tecnologia, como possibilidade de recurso energético no Brasil, proporcionará a economia de energia elétrica, colaborando para um consumo consciente deste recurso energético.

Além disso, a tecnologia dessa lâmpada é bem diferente das outras. O material utilizado para fabricação destas é semicondutor, mesma tecnologia utilizada em chips de computadores. Sendo assim, uma pequena corrente elétrica que transporta neste dispositivo faz com que o mesmo emita luz.

Têm-se como resultado um dispositivo com uma alta eficiência, atrelado a uma alta durabilidade, se comparado com as outras lâmpadas. Todavia, sua padronização no consumo ainda não se tornou real, uma vez que, seu elevado preço ainda é um problema enfrentado. Porém, o preço vem caindo anos após anos e o investimento feito na aquisição dessas, já é viável onde o uso da iluminação é intenso. Dessa forma é possível ter o retorno do investimento a curto prazo.

Por último, é possível conscientizar os usufruidores e profissionais da área de iluminação do real cenário de aquisição de lâmpadas de LED através das informações descritas neste trabalho; principalmente dando subsídios para que os profissionais possam especificar, com consciência e conhecimento, equipamentos com esta tecnologia. Contribuindo, assim, com atitudes mais comprometidas com o meio ambiente.

ABSTRACT

Several techniques are used in order to reduce energy consumption, for example, replacing inefficient light bulbs (incandescent light bulbs) with efficient light bulbs. The great demand for electricity has been encouraging several studies both for the expansion of the generation capacity of plants and for the rational use of this relevant form of energy. Energy waste and energy efficiency are very important issues on the world stage. It is known that lighting systems are very important for human activities: man is totally dependent on artificial lighting. With the technological evolution in the lighting area, energy efficiency, for example, can be achieved by replacing current components with modern and more efficient light sources. In view of the above, this

course conclusion work proposes a broad bibliographic review on White light sources contemplating the most relevant lighting concepts, such as energy quality, energy efficiency, visual comfort, among others in order to produce a material for scientific research in the area.

Keywords: Electricity. Energy Efficiency. Lighting.

REFERÊNCIAS

- AALOK. **Temperatura de cor:** por que ela é essencial para o seu projeto de iluminação industrial? 2019. Disponível em: <https://aalok.com.br/blog/temperatura-de-cor-por-que-ela-e-essencial-para-o-seu-projeto-de-iluminacao-industrial/> Acesso em: 20 de out. 2022.
- ABREU, H. **A eficiência dos diferentes tipos de lâmpadas e quanto cada uma impacta na conta de energia.** 2017. Disponível em: <https://www.retecjr.com/single-post/2017/12/06/a-efici%C3%A2ncia-dos-diferentes-tipos-de-l%C3%A2mpadas-e-quanto-cada-uma-impacta-na-conta-de-energ> Acesso em: 03 nov. 2022.
- ALMEIDA, C. C. **Sistema eletrônico baseado em diodos emissores de luz (LEDs) para aplicação em estudos de fisiologia vegetal.** 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Juiz de Fora, 2014.
- ALMEIDA, P. S. **Conversor integrado sepic buck-boost aplicado ao Acionamento de Leds de potência em iluminação pública.** 2012. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- BLEY, F. B. LEDs versus Lâmpadas Convencionais Viabilizando a troca. **Revista Especialize IPOG**, p.1-24, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/26255040/LEDs_versus_L%C3%A2mpadas_Convencionais_LEDs_versus_L%C3%A2mpadas_Convencionais_Viabilizando_a_troca. Acesso em: 15 set. 2022.
- BLOG DA ROBÓTICA. 2020. **Utilizando o LED RGB no Arduino.** Disponível em: <https://www.blogdarobotica.com/2020/10/09/utilizando-o-led-rgb-no-arduino/> Acesso em: 29 nov. 2022.
- BLOG DECOR WATTS. 2022. **Temperatura da lâmpada:** como escolher? Disponível em: <http://blogdecorwatts.com/lampadas/temperatura-da-lampada/> Acesso em: 29 nov. 2022.
- CAMPOS, E. T. S. **Luminosidade, cores e fotometria.** 2017. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Naturais). Universidade de Brasília, Faculdade UNB Planaltina, Brasília, 2017.

CONKANSEI. **Tipos de bombillas led para casa.** 2021. Disponível em: <https://conkansei.com/tipos-bombillas-led-para-casa/> Acesso em: 19 out. 2022.

COSTA, J. S.; ANDRADE JUNIOR, L. M. L. DE. Energy efficiency applied to electricity consumption: A bibliographic review study. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. e26210414085, 10 abr. 2021.

ELETRICAL E-LIBRARY. 2018. **Como funciona o LED?** Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2018/02/19/como-funciona-o-led/> Acesso em: 29 nov. 2022.

FERRAMENTAS GERAIS. 2022. Disponível em: <https://www.fg.com.br/lampada-vapor-metalico-tubo-400w-e40-5200k-irc90---osram/p> Acesso em: 30 nov. 2022.

FERREIRA, J. Z. **Estudo comparativo entre lâmpadas fluorescentes tubulares t8 e tubulares de LED.** 2014. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Construções Sustentáveis). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FERREIRA, J. T. **Proposta de retrofit de iluminação em patrimônio histórico edificado: aplicação no complexo Bernardo Mascarenhas, Juiz de Fora (MG).** 2022. 195 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2022.

FREITAS, P. C. F. **Luminotécnica e lâmpadas elétricas.** 2015. 60p. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/centro-universitario-jorge-amado/fundamentos-do-calculo/apostila-de-luminotecnica/8723577> Acesso em: 20 set. 2022

GRADO ILUMINAÇÃO. 2021. **Conceitos básicos de iluminação.** Disponível em: <https://www.gradoiluminacao.com.br/> Acesso em: 16 set. 2022.

MASCIA, A. R. **Estudo comparativo entre lâmpadas fluorescentes compactas e lâmpadas incandescentes, considerando a viabilidade econômica.** 2011. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2011.

MUNDO DA ELÉTRICA. 2022. **O que é lâmpada de vapor metálico e suas aplicações!** Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-lampada-de-vapor-metalico-e-suas-aplicacoes/> Acesso em: 30 nov. 2022.

NOGUEIRA, F. J. **Avaliação Experimental de Luminárias Empregando LEDs.** 2013. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Juiz de Fora, 2013.

PEREIRA, L. M. **Iluminação pública: efficientização das luminárias**. 2021. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2021.

ROBERTO, T. J.; LUIZ SCHULTZ, E. Estudo comparativo de sistemas de iluminação pública: lâmpadas LED, lâmpadas de indução e lâmpadas a vapor de sódio. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, p. 1–22, 2017.

SANTOS JÚNIOR, A. S.; LIMA, A. M. C.; SALVATERRA, G. F.; MORAES, R. M.; SILVA, R. H. O. **Eficiência energética residencial**. 2015. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Faculdade Pitágoras, Belo Horizonte, 2015.

SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**, Cambridge University Press, 2nd Edition, Cambridge, UK, 2006.

SIMPLÍCIO, R. F. **Projeto luminotécnico de uma academia de ginástica**. 2021. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

SLIDEPLAYER. **Lâmpada Vapor de Mercúrio**. 2022. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/13899196/> Acesso em: 14 out. 2022.

SOUZA ELOI, S.; SILVA, T. F. A.; GUEDES, F. N. J.; PAULA, B. G. Eficiência energética e realização de pré-diagnóstico em instituições de ensino de João Monlevade - MG. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 2, p.1-15, 2019.

VARGAS, M. C.; MAESTRIA, M. Eficiência energética em edificações residenciais: iluminação e refrigeração. In: XXXV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção, 2015, Fortaleza.