

Há várias maneiras de contar a história da humanidade. Uma delas é por meio das tecnologias desenvolvidas, ao longo de milhares de anos, para criar e aperfeiçoar a iluminação artificial e, assim, poder enxergar à noite ou em locais onde a luz solar é pouca ou não chega.

Essa saga – que deve muito ao conhecimento científico e à criatividade de inventores – começou com o domínio do fogo e, neste momento, tem como sua principal protagonista as lâmpadas LED.

Apesar de todos os avanços, a busca por fontes de luz artificiais mais eficientes e similares à luz do Sol continua em vários laboratórios acadêmicos e industriais do mundo.

**Eduardo Ribeiro de Azevedo**  
**Luiz Antonio de Oliveira Nunes**  
*Instituto de Física de São Carlos,  
Universidade de São Paulo*



2015 - ANO  
INTERNACIONAL  
DA LUZ

# ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

## Do fogo às lâmpadas LED

**A**o longo de nossa evolução, desenvolvemos uma forma muito eficiente de detectar a luz: nosso olho. Esse órgão nos permite enxergar formas e cores de maneira ímpar. O que denominamos luz no cotidiano é, de fato, uma onda eletromagnética que não é muito diferente, por exemplo, das ondas de rádio ou micro-ondas, usadas em comunicação via celular, ou dos raios X, empregados em exames médicos.

O que distingue os tipos de onda eletromagnética é a quantidade de energia que elas transportam, usualmente especificada pela grandeza chamada comprimento de onda. Nosso olho se desenvolveu para ser sensível à luz solar na superfície terrestre, e, por isso, enxergamos a luz visível, que é uma diminuta fração do chamado espectro das ondas eletromagnéticas (ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama). A luz visível tem comprimento de onda na casa de centenas de nanômetros (nm, ou seja, bilionésimos de metro). Mais especificamente, entre algo em torno de 400 a 700 nm.

Outro aspecto fundamental da evolução: o desenvolvimento da percepção de cores. Embora o comprimento de onda da luz possa ser associado a cores – 400 nm (azul), 500 nm (verde) e 650 nm (vermelho) –, vale dizer que ‘cor’ é uma interpretação de nosso cérebro. Por exemplo, a combinação de luz azul, verde e vermelha é interpretada por nosso cérebro como sendo a cor branca. Mas esta é diferente da luz branca solar, que contém todos os comprimentos de onda na faixa visível.

A necessidade de enxergar à noite ou em locais escuros (caça, moradia, afugentar animais etc.) levou ao desenvolvimento de fontes de iluminação artificial. Os primeiros humanos recolhiam restos de queimadas naturais, mantendo as chamas em fogueiras. Posteriormente,

descobriu-se que o fogo poderia ser produzido ao se atritar pedras ou esfregar madeiras, dando o primeiro passo rumo à tecnologia de iluminação artificial.

A necessidade de transporte e manutenção do fogo levou ao desenvolvimento de dispositivos de iluminação mais compactos e de maior durabilidade. Assim, há cerca de 50 mil anos, surgiram as primeiras lâmpadas a óleo, feitas a partir de rochas e conchas, tendo, como pavio, fibras vegetais que queimavam em óleo animal ou vegetal. Mais tarde, a eficiência desses dispositivos foi aumentada, com o uso de óleo de tecidos gordurosos de animais marinhos, como baleias e focas.

As lâmpadas a óleo têm eficiência de aproximadamente 0,1 lúmen/watt (0,1 lm/W). Lúmen é a unidade de fluxo de energia luminosa, e watt, a unidade de energia por unidade de tempo (potência). Portanto, 0,1 lm/W significa que, para cada watt produzido (no caso, pela queima do óleo), é gerado 0,1 lúmen de fluxo luminoso (no caso, de luz visível).

**Gás e eletricidade** As lâmpadas a óleo não eram adequadas para iluminação de áreas maiores (ruas, praças etc.), o que motivou o surgimento das lâmpadas a gás. A iluminação a gás foi desenvolvida pelo engenheiro escocês William Murdoch (1754-1839), que, em 1792, iniciou experimentos para a produção de gás obtido por meio da destilação do carvão mineral. Esse gás poderia ser transportado por tubulações ao local de consumo e inflamado para produzir luz. Em 1794, Murdock iluminou sua casa com lâmpadas a gás, o que é considerado o primeiro uso prático dessas lâmpadas para iluminação (ver ‘Gaseificação, o retorno’ em *CH* 325).

O domínio da tecnologia de geração de energia elétrica e o entendimento de efeitos associados à passagem de corrente elétrica em materiais viabilizaram o desen-

>>>



volvimento de novas tecnologias de iluminação. As primeiras lâmpadas elétricas foram as lâmpadas de arco voltaico, cujo princípio foi demonstrado pelo químico britânico Humphry Davy (1778-1829). Nelas, uma faísca (ou arco elétrico) entre duas hastes de carbono (eletrodos) faz com que haja a liberação de gases. A corrente elétrica estabelecida através do gás provoca a ionização do mesmo, gerando um plasma (gás ionizado), que emite luz. No entanto, a contínua evaporação dos eletrodos limita a durabilidade desse tipo de lâmpada.

Em 1802, Davy construiu a primeira fonte luminosa incandescente, na qual a corrente elétrica atravessava um filamento de platina, aquecendo-o até emitir luz visível. A partir daí, outros inventores construíram lâmpadas semelhantes, mas todas apresentavam durabilidade reduzida, devido à evaporação do filamento.

A primeira patente de lâmpada incandescente de maior vida útil foi depositada, na Inglaterra, pelo físico e químico britânico Joseph Swan (1828-1914), em 1878. As lâmpadas de Swan – contendo um filamento de celulose carbonizada, acondicionado em um bulbo de vidro evacuado – chegaram a ser instaladas em residências e pontos de referência na Inglaterra. No ano seguinte, o inventor e empresário norte-americano Thomas Edison (1847-1931) construiu e patenteou, nos EUA, uma lâmpada similar à de Swan (figura 1), cuja duração média chegava a 13,5 horas. Logo depois, Edison propôs o uso de filamentos de bambu carbonizado, garantindo durabilidade de cerca de 1,2 mil horas à sua lâmpada.

Os filamentos de carbono começaram a ser substituídos por metálicos no início do século 19, culminando no uso de tungstênio flexível, desenvolvido pelo físico norte-americano William Coolidge (1873-1975), em 1910. Esses filamentos, além de serem bem mais baratos que os de platina, eram muito mais resistentes que os de fibra de celulose e podiam atingir temperaturas de até 3 mil graus Celsius, produzindo luz com características mais próximas às da luz solar.

As lâmpadas de tungstênio modernas podem durar até 2 mil horas, mas têm baixa eficiência (cerca de 15 lm/W) e baixo rendimento (5%) – só 5% da energia elétrica fornecida à lâmpada é transformada em luz visível. Por causa do baixo rendimento, desde 2012, a União Europeia decidiu abolir as lâmpadas incandescentes. No Brasil, essa medida passa a vigorar a partir deste ano, sendo que, desde 2013, tem sido proibido fabricar ou importar lâmpadas incandescentes de 100 W e 150 W.

As lâmpadas halógenas (variação das de tungstênio) têm o bulbo preenchido com gás halogênio (geralmente, iodo ou bromo). Na concentração, pressão e nas temperaturas adequadas, o gás reage com o tungstênio evaporado do filamento e provoca a reprecipitação desse metal, o que aumenta a vida útil da lâmpada. Esse processo também permite aumentar a corrente elétrica através do filamento, produzindo luz com maior intensidade e mais parecida com a luz solar.

**Descarga elétrica** As lâmpadas de descarga são também populares. Elas funcionam com base na ionização de gás por meio de uma descarga elétrica. Mas, diferentemente das lâmpadas de arco voltaico, os eletrodos nesse caso são metálicos, e diferentes compostos químicos são inseridos no bulbo – esses compostos estão na forma gasosa ou são gaseificados pelo aquecimento devido à descarga elétrica.

Os gases mais usados em lâmpadas de descarga para iluminação são xenônio, mercúrio e sódio. A luz emitida por gases rarefeitos é composta por comprimentos de ondas (cores) bem específicos.

Uma maneira de produzir lâmpadas cuja luz é mais próxima do branco solar é usando gás sob alta pressão. Isso é muito eficiente nas lâmpadas de xenônio, nas quais é possível produzir luz quase semelhante à solar, ou seja, branca. Por produzirem pouco calor e alta luminosidade, são muito usadas em centros cirúrgicos e automóveis.

Lâmpadas de descarga usadas em larga escala empregam gases com baixa tensão de ionização, ou seja, gases que se tornam facilmente condutores de energia elétrica. Isso faz das lâmpadas de vapor de mercúrio, de longe, as mais comuns para a iluminação pública, por exemplo. Porém, a emissão de maior intensidade do mercúrio ocorre em comprimentos de onda na região do ultravioleta. Por isso, essas lâmpadas revestidas internamente por uma camada de um pó de materiais em que os átomos absorvem a radiação azul e ultravioleta e, depois, as reemitem em forma de luz visível em uma ampla faixa de cores. Esse fenômeno é chamado de fluorescência. O pó de revestimento é chamado ‘fósforo’ – embora, nem sempre contenha o elemento químico com esse nome em sua composição.

A composição do ‘fósforo’ pode ser alterada, para mudar a tonalidade da luz emitida. As lâmpadas de vapor de



Figura 1. Versões das lâmpadas desenvolvidas por Swan (à esquerda) e Edison



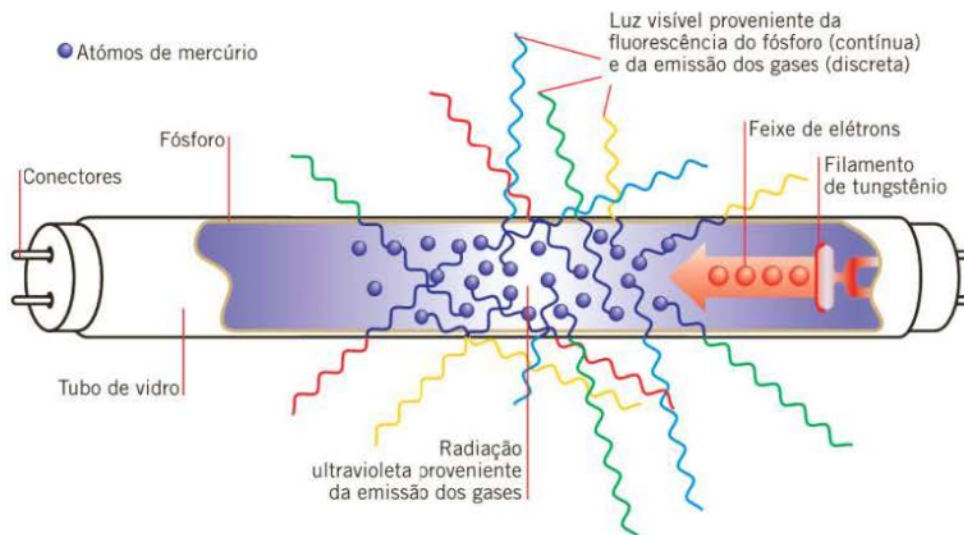


Figura 2. Esquema de uma lâmpada fluorescente tubular convencional (gás mercúrio) – as mais atuais usam uma mistura de gases, mas o gás mercúrio ainda está presente em menor quantidade

sódio não precisam desse revestimento, pois a emissão do gás ocorre predominantemente na região visível correspondente à cor amarela. Outra forma eficiente de obter lâmpadas de descarga com emissão de luz predominante de cor branca é por meio da mistura de diferentes gases – as chamadas lâmpadas de vapores metálicos.

As lâmpadas fluorescentes tubulares modernas – lâmpadas de descarga com gás a baixa pressão – usam vapor de mercúrio. Foram inventadas em 1934 pelo químico norte-americano George Inman (1895-1972) e colaboradores. Elas passaram por inúmeras mudanças, tanto para garantir sua posição de liderança – como a lâmpada que oferecia o menor custo na produção de luz de cor branca – quanto para reduzir o impacto ambiental com o uso de mistura de diferentes gases, visando diminuir a quantidade de mercúrio (figura 2).

As lâmpadas fluorescentes tubulares têm eficiência na casa dos 70 lm/W, rendimento de aproximadamente 40% e durabilidade em torno de 20 mil horas. Em 1976, o engenheiro norte-americano Edward Hammer (1931-2012) inventou as lâmpadas fluorescentes compactas, nas quais o reator eletrônico está acoplado à base. Embora tenham rendimento ligeiramente menor que o das tubulares, o uso delas se tornou muito popular, pois podem substituir as lâmpadas incandescentes sem alteração da instalação elétrica. Estima-se que 80% da luz artificial no mundo hoje seja produzida por lâmpadas fluorescentes.



## Luz deste século

Uma fonte de luz que vem revolucionando a iluminação artificial são as lâmpadas LED, que produzem luz a partir da passagem de corrente elétrica por materiais semicondutores (meio termo entre um bom condutor de eletricidade e um material isolante). Esse tipo de emissão de luz ficou conhecido como eletroluminescência e foi descoberto, independentemente, pelo engenheiro britânico Henry Round (1881-1966) e o inventor russo Oleg Losev (1903-1942), em 1907.

Em 1961, os engenheiros norte-americanos James Biard e Gary Pittman observaram a emissão de luz infravermelha em materiais baseados em arseneto de gálio. Produziram, então, o primeiro diodo emissor de luz – hoje, popularmente conhecido por LED. No ano seguinte, outro engenheiro norte-americano, Nick Holonyack Jr., desenvolveu o primeiro LED que emitia luz visível (no caso, vermelha).

Iniciou-se, então, uma corrida tecnológica, para obter LEDs de diferentes cores, com maior potência luminosa e eficiência. Na década de 1980, já eram produzidos LEDs de alto brilho, com coloração vermelha, amarela e verde. Porém, foi só no início deste século que as lâmpadas brancas de LED para iluminação se tornaram economicamente viáveis.

Esse aparente atraso na tecnologia de iluminação a LED ocorreu porque, para a produção de luz branca, era fundamental a existência de LEDs emissores de luz azul, os quais surgiram apenas na década de 1990. Esse desenvolvimento foi tão importante que deu o Nobel de Física do ano passado aos japoneses Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura – este último, já havia recebido o prêmio Tecnologia do Milênio (versão finlandesa do prêmio Nobel) pela invenção do LED azul (ver 'Essência do LED: vencer barreiras').

Atualmente, a eficiência das lâmpadas LEDs está em torno de 300 lm/W. Devido à alta eficiência energética (cerca de 80%), os LEDs geram pouquíssimo calor, e, por isso, seu tempo de vida útil pode chegar a 100 mil horas.

A tecnologia atual de iluminação é fortemente baseada nas lâmpadas fluorescentes, que, ao que tudo indica, deverão ser substituídas pelas lâmpadas LED em um futuro próximo. A principal vantagem será a economia

ADAPTAÇÃO DE: [HTTP://WWW.HOZZ.COM](http://www.houzz.com)

>>>



## Essência do LED: vencer barreiras

Um LED é composto por dois tipos de materiais semicondutores: um com elétrons em excesso (tipo N) e outro com falta de elétrons (tipo P). Para produzir materiais com essas propriedades, impurezas (dopantes) são inseridas controladamente na estrutura do semicondutor.

Hoje, a tecnologia permite depositar camadas de material tipo P sobre as do tipo N, produzindo, na interface entre as duas, o que se denomina junção PN, onde praticamente não há nem elétrons, nem a ausência dessas partículas – essas ausências são denominadas ‘buracos’ e se comportam como partículas com carga positiva.

Por causa dessas características, a junção PN age como uma barreira – tecnicamente, barreira de potencial – que isola os elétrons do material tipo N dos buracos do material tipo P, interrompendo o fluxo dessas partículas entre os dois semicondutores.

No entanto, vez por outra, elétrons ou buracos atravessam a barreira de potencial, mediante o fornecimento de energia externa – por exemplo, proveniente da aplicação de voltagem (tensão elétrica) entre os materiais do tipo N e P.

Quando um elétron se encontra com um buraco (ou vice-versa), eles se combinam, liberando energia na forma de luz (figura 3A), cuja cor depende da diferença de energia entre essas duas partículas.

O LED fabricado com arseneto de gálio emite radiação infravermelha – são aqueles geralmente usados nos controles remotos. Dopando-se esse material com fósforo, a emissão pode variar do vermelho ao amarelo, dependendo da concentração da dopagem. Empregando-se fosfato de gálio, com dopagem de nitrogênio, a luz emitida pode ser verde.

Esse princípio de produção de LEDs é conhecido há mais de 50 anos. As barreiras tecnológicas para a produção do LED azul foram superadas apenas na década de 1990, com os trabalhos de Akasaki, Amano e Nakamura, que empregaram o nitreto de gálio.

A tecnologia atual ainda não permite produzir uma junção PN que emita luz branca. Assim, lança-se mão de alguns artificios. Um deles é a combinação de três LEDs (vermelho, verde e azul) para produzir uma sensação de cor branca.

O outro artifício é usar um LED azul para excitar um ‘fósforo’ (figura 3B), à semelhança do processo usado nas lâmpadas de vapor de mercúrio. Nesse caso, usa-se um substrato de safira, posicionado entre o semicondutor tipo N e o ‘fósforo’, para que o semicondutor depositado tenha a estrutura molecular adequada necessária ao funcionamento do LED.

FOTO: NINO SARTINI/FREEMAN/ES

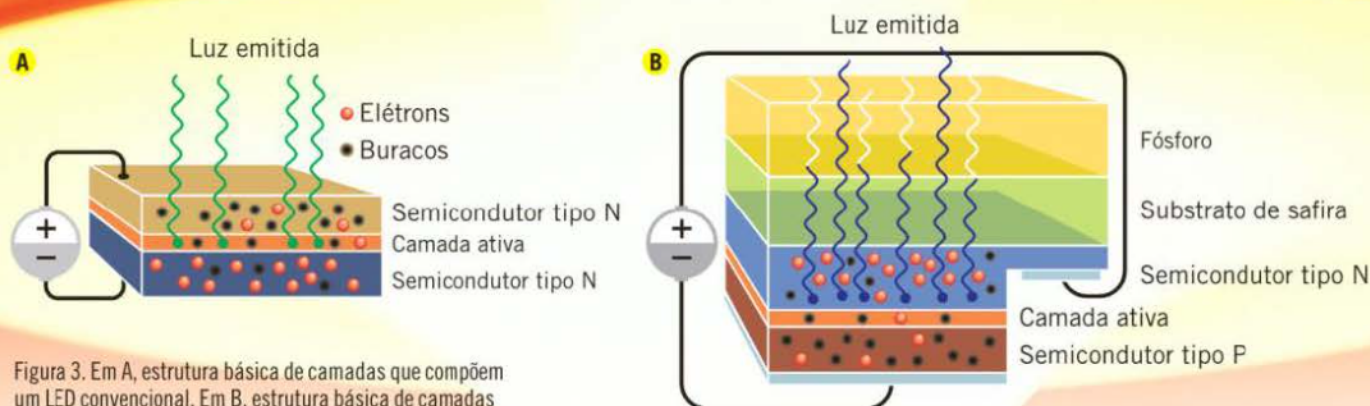


Figura 3. Em A, estrutura básica de camadas que compõem um LED convencional. Em B, estrutura básica de camadas que compõem um LED de cor branca, com uso de ‘fósforo’

de energia. Em entrevista à *CH*, Nakamura diz que, se todas as lâmpadas dos EUA forem substituídas por LEDs até 2020, 133 usinas com capacidade de 1 mil megawatt cada poderiam deixar de ser construídas.

Evoluímos sob a iluminação da luz solar, e estudos recentes indicam ser importante para nossa saúde que sejamos expostos a ela. No entanto, a vida moderna nos obriga a ficar cada vez mais horas expostos à iluminação artificial, tornando crucial que os sistemas de iluminação reproduzam com boa fidelidade as características da luz natural. Nesse sentido, tanto a tecnologia predominante hoje (lâmpadas fluorescentes) quanto os LEDs ainda deixam a desejar.

Desse modo, a diminuição do custo de produção e o desenvolvimento de novos ‘fósforos’ para geração de luz branca similar à luz solar parecem ser a tônica das novas tecnologias de iluminação artificial. **Et**

### Sugestões para leitura

*Ciência Hoje*. ‘O novo Edison’. v. 39, n. 229 (2006). Disponível em <http://bit.ly/1G1BAW>

GARCIA, M. ‘Luzes do novo século’. *CH on-line* (07/10/14). Disponível em: <http://bit.ly/1JVnDRX>

MUNIZ, C. ‘Quando dia e noite se confundem’. *CH on-line* (11/03/10). Disponível em: <http://bit.ly/1ciV9nA>

#### NA INTERNET

LEDs azuis: (em inglês): <http://bit.ly/15y9Tfu>

Edison Tech Center (em inglês): <http://www.edisontechcenter.org/>