

NANOELETRÔNICA: DISPOSITIVOS ELETROLUMINESCENTES PARA ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

Por Elvo Calixto Burini Junior e Emerson Roberto Santos

RESUMO

Progresso tem sido relatado no âmbito da eletrônica dos dispositivos eletroluminescentes, sobre eficiência de conversão energética elevada e a emissão de luz branca. São os semicondutores para a iluminação (do inglês: Solid State Lighting – SSL). Esse tipo de fonte de luz, com base na nanoeletrônica, tem sido indicado como a alternativa para substituir as fontes convencionais. Sob o ponto de vista do usuário, a valorização visual do ambiente, basicamente, devido à cor da luz, é fundamental nas aplicações de iluminação geral.

Nesse contexto, o parâmetro índice de reprodução de cor (IRC) necessita ser considerado adequadamente. Outras barreiras identificadas também estão pontuadas e serão abordadas neste trabalho, tendo o foco em uma possível migração tecnológica para o dispositivo tipo SSL. O objetivo é oferecer ao leitor mais informações sobre dispositivos eletroluminescentes, tanto inorgânicos (LEDi) quanto com base em material orgânico/híbridos, a “lâmpada plástica” (LP).

Dados foram coligidos e serão apresentados. A maioria das referências é de trabalhos técnicos e do governo norte-americano. Em termos de eficiência energética, a tecnologia SSL apresenta potencial para difusão, em particular, no setor residencial. No caso do LEDi, estimativa indica que o fator de ganho relativo da eficiência, em relação à lâmpada incandescente, é superior ao dobro. Para a tecnologia fluorescente, a melhoria relativa não supera 2%, segundo estimativas feitas a partir do conceito de eficiência luminosa de radiação (Er).

A vida útil do LEDi tem forte dependência em relação à temperatura de trabalho e a durabilidade pode ficar bastante alterada conforme aplicação e condições do ambiente. A tecnologia dos dispositivos orgânicos (OLED/PLED), inicialmente preconizada para monitores de vídeo (displays), também tem evoluído rapidamente. Dado referente a dispositivo orgânico para luz branca (WOLED), a lâmpada plástica, no ano 2011, possuía características declarada tão elevada quanto 66lm/W, que com outros atributos, permitem inferência sobre a tecnologia de luz artificial definitiva para interiores. O interesse tecnológico crescente sobre dispositivo SSL tem colaborado no questionamento e refinamento de metodologias

(IRC, Er) para a avaliação de qualidades da fonte de luz branca.

INTRODUÇÃO

A iluminação artificial é uso final importante para a energia elétrica. Alguns setores, como o residencial, comércio e de serviços, podem demandar quantidade significativa de energia para iluminar ambientes e planos de trabalho. Assim, esses setores deverão ser alvo de atenção, em particular, sob o ponto de vista de incremento da eficiência energética, em um cenário onde a lâmpada fluorescente poderá dar lugar aos dispositivos semicondutores (optoeletrônica) inorgânicos ou orgânicos.

A produção de luz passará por processos que são usuais em nano/microeletrônica (do inglês: Solid State Lighting – SSL). Um breve contexto histórico é apresentado a seguir, visando instrumentar o leitor para melhor posicionamento em relação à provável mudança na natureza das fontes de luz elétrica, seja, para iluminação ou monitores de vídeo (displays), cuja fonte de luz primária dominante atualmente é do tipo fluorescente. Ela contém alguns miligramas de Mercúrio (Hg).

Estamos deixando de fazer uso das fontes incandescentes, por força de lei, e tanto a produção quanto a comercialização estão sendo paralisadas. Em seu lugar, passamos a instalar e utilizar lâmpadas fluorescentes de base única (LFBU ou compactas: CFL), cuja potência nominal estimada é de aproximadamente 30W.

Ao término da vida útil desse tipo de lâmpada, também das fluorescentes tubulares (melhor lineares) e HID (utilizadas na iluminação pública), elas não podem ser descartadas no lixo comum. O motivo principal é que o Hg nelas contido é um contaminante em potencial, e também a existência de uma lei brasileira sobre a disposição dos resíduos sólidos. Em breve, as fluorescentes, provavelmente, terão igual destino que hoje têm as incandescentes, na produção e oferta ao mercado, caso estas venham a dar lugar às fontes de luz montadas com base em materiais semicondutores, eletrônica do estado sólido, eletroluminescência e processos de nanoeletrônica (SSL).

A luz branca ou acromática pode ser produzida a partir da tecnologia LED pela combinação de componentes primários,

Tabela periódica de elementos químicos com os grupos III e V destacados. Os elementos B, Al, Ga, In e Tl do grupo III e N, P, As, Sb e Bi do grupo V estão circunscritos em círculos vermelhos. Arrows apontam para os grupos III e V no topo da tabela.

Tabela 1 – Tabela periódica de elementos químicos: grupos III e V.

e também pela excitação de pó fosforoso com radiação óptica adequada. Devido aos avanços que têm sido detectados no desenvolvimento e aplicação dos LEDs, disponibilizar ao público leitor aspectos relevantes, status atual e avanços tecnológicos é uma necessidade que foi identificada, ao menos para que as oportunidades possam ser examinadas sob um prisma de conhecimento mais amplo, sobre as tecnologias e dispositivos semicondutores, como aqueles que têm ocorrido para os LEDs inorgânicos (LEDi) e orgânicos (OLEDs/PLEDs).

Este artigo considera temas e dados sobre: energia elétrica para iluminação e LEDs inorgânicos e orgânicos. Como foco central, busca estabelecer uma linha de base para consulta àqueles que atuam junto ao setor de iluminação. A lâmpada plástica (LP) – dispositivo montado com base na eletrônica orgânica –, é considerada por dois motivos principais. O material bibliográfico acessado durante a elaboração desse artigo, quando analisado, revelou dois grandes grupos: metade (53%), contendo trabalhos sobre os LEDs inorgânicos (a partir do ano 2010) e a outra metade sobre LEDs da eletrônica orgânica.

A pesquisa bibliográfica referida focou temas como tecnologias: de eletrônica em estado sólido para a iluminação (SSL), produção de luz branca por dispositivos eletroluminescentes (LEDs, OLEDs, PLEDs; todas as siglas são do inglês); comparação entre parâmetros de desempenho da tecnologia SSL na produção de luz, inclusive o ponto de vista do usuário, em particular, sobre a eficiência de conversão de eletricidade em luz visível.

Os documentos coligidos, na grande maioria, são norte-americanos. Alguns dados têm sido disponibilizados a partir de programa governamental norte-americano, denominado CALiPER, o qual considera novas tecnologias, principalmente, para a área das edificações. Outra fonte de informação importante utilizada tem origem europeia, volume (n. 17) e é pertencente a uma coleção que aborda temas variados. Trata-se de obra setorial alemã (licht. wissen), que foi publicada no ano de 2010.

TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES

A eletroluminescência é conhecida e utilizada há muito tem-

po (ano 1907). A tecnologia do LED inorgânico já completou 50 anos, mas bem mais recente é a emissão de luz branca por LEDs, comercialmente no ano 1996, e consequente início da aplicação do LED em iluminação. O dispositivo denominado “lâmpada plástica” (LP), baseado na eletrônica orgânica, está disponível comercialmente, ainda que a preço muito elevado.

A LP é fonte de luz branca com potencial para alterar o cenário que está sendo desenhado e possui como elemento central o LEDi. Os dispositivos eletroluminescentes a estado sólido e base na eletrônica orgânica (OLEDs e PLEDs), teoricamente, têm potencial para superar os LEDs, seja em termos da eficiência na conversão eletro-óptica, no processo de produção em escala, e principalmente, por emitir luz difusa ou como fonte lambertiana (ofuscamento reduzido).

Essas lâmpadas plásticas são apresentadas normalmente em placas planas rígidas ou flexíveis, com espessura bastante reduzida (poucos milímetros, mesmo depois de encapsuladas), podendo ficar justapostas ao teto ou outra superfície mais conveniente. Em um cenário imaginado, provavelmente, deverá ser este o aspecto das novas fontes de luz em interiores, talvez em um futuro mais próximo do que possamos agora imaginar.

Atualmente, é possível acessar características para OLEDs em catálogos de tradicionais fabricantes de fontes de luz, tendo sido verificado fluxo luminoso por dispositivo relativamente baixo, na ordem de uma centena de lumens, custo ainda muito elevado e eficiência luminosa em uma faixa relativamente ampla. No momento, a aplicação da LP não pode ser indicada além de projetos especiais.

Cabe pontuar ao leitor duas definições básicas, como ponto de partida. A primeira, eletroluminescência, que conforme a terminologia brasileira vigente, está definida como: “Luminescência causada pela ação de um campo elétrico sobre um gás ou um material sólido (... tal como em um diodo emissor de luz)” [1]; e a definição de diodo emissor de luz (“Diodo LED”), “Dispositivo de estado sólido”, que compreende uma junção PN, e que emite radiação óptica quando excitado por corrente elétrica” [2].

Como apresentada, a definição de LED poderá parecer um

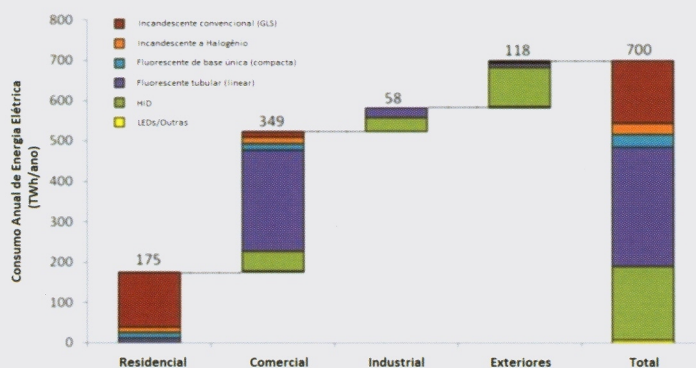


Figura 1 – Consumo anual de eletricidade (EUA) conforme setor/finalidade e o tipo da fonte de luz. Fonte: [6].

tanto abstrata a alguns dos leitores. Talvez possa ser aclarada e ampliada como: dispositivo semiconductor que emite luz incoerente (não é Laser) em uma banda espectral relativamente estreita (digamos $\sim 30\text{nm}$) quando polarizado eletricamente no sentido denominado direto.

O efeito (emissão) observado é referido como uma forma de eletroluminescência. A luz emitida possui cor aparente que depende da composição química do material semiconductor utilizado na região denominada junção. A base do LEDi é elaborada a partir de dois conjuntos de elementos químicos dos grupos III e V (ver indicações, na cor vermelha, Tabela 1).

A seguir, estão citadas algumas siglas que identificam compostos (materiais) utilizados na montagem de LEDs inorgânicos. A sigla está acompanhada da cor típica predominante da emissão ou banda/tipo de radiação óptica: GaAs, AlGaAs - vermelha e infravermelha (IR); AlGaP - verde; AlGaInP - (alto brilho) vermelho-laranja, laranja, amarela e verde; GaAsP - vermelha, vermelho-laranja, laranja e amarela; GaN - verde e azul; InGaN - UV próximo, verde-azulado e azul; AlN, AlGaIn - UV próximo e distante.

A luz branca pode ser formada a partir de composição adequada de fontes (ou “cores”) primárias (sistema aditivo: R, G, B) ou fotoluminescência (luminescência causada pela absorção de radiação óptica, geralmente, azul ou UV). A fluorescência é outro tipo de luminescência, cuja emissão geralmente ocorre após a radiação de excitação, período típico da ordem de 10ns .

Embora a origem do LEDi possa estar referida ao início do século 20, o interesse pelo estudo dos LEDs foi intensificado no início dos anos 1950, coincidindo com os desenvolvimentos ocorridos em microeletrônica. Ao alterar a composição química do composto GaAs para GaAsP, no ano de 1962, observou-se que o comprimento de onda da radiação óptica emitida podia ser deslocado da região infravermelha para a banda visível do espectro.

O primeiro LEDi comercial é referido ao final dos anos 1960 [3]. Comparativamente com as fontes convencionais de luz visível, como as lâmpadas incandescentes, a vapor de mercúrio e a vapor de sódio e multivapores metálicos, o LEDi tem sido utilizado devido à emissão luminosa, ainda que em bandas estreitas.

A resistência à vibração costuma ser elevada. Caso o limite prescrito para a corrente elétrica seja observado, o LEDi possuirá manutenção reduzida e a expectativa de vida poderá ser longa. O LED orgânico (OLED) ou LP poderá tornar-se uma surpresa positiva, talvez no médio prazo. Eles podem ser montados em substratos transparentes e flexíveis e produzidos em massa a partir de técnicas do tipo impressão (gráfica). O interesse sobre os OLEDs teve início atribuído ao ano 1987, quando TANG, W. C. et al. demonstrou a viabilidade de dispositivo montado com camadas de semiconductor orgânico [4].

A origem do dispositivo eletroluminescente orgânico, base em polímero (PLED), é posterior, no ano 1990. Acredita-se que a LP será a opção dominante para as novas gerações de monitores (displays) em painéis planos e flexíveis. A estabilidade, a degradação na luminância desse dispositivo e o funcionamento sob tensões elétricas elevadas são os principais aspectos técnicos sob investigação, inclusive por diversos grupos de pesquisas no Brasil. Também deve ser observada a necessidade para a síntese de melhores materiais e o desenvolvimento de procedimento para otimizar o encapsulamento. Isso possibilitará aumento no tempo de vida útil e maior confiabilidade dos dispositivos.

Estes tópicos e o preço são barreiras que ainda impedem a comercialização mais ampla da LP. Outras utilizações, além da iluminação, estão sendo sugeridas para a aplicação de LEDi. As fontes compactas para radiação UV a estado sólido têm aplicações potenciais na esterilização de água, instrumentação analítica, entre outras.

Em um trabalho de revisão bibliográfica Shur et al., 2010 discute esse tema, considerando LEDi com emissão em comprimentos de onda na faixa do UV (210 a 365) nm [5].

ELETRICIDADE PARA A ILUMINAÇÃO (EUA)

A caracterização detalhada do mercado de iluminação, a partir de um inventário nacional dos diferentes tipos de lâmpadas instaladas, é fundamental (ver Fig. 1).

O Departamento de Energia dos EUA (DOE) publicou documento

Tabela 2 – Meta projetada para parâmetros selecionados, tecnologia emergente (SSL-LED) e convencional (incandescente e fluorescente) para iluminação. Fonte: [7].

PARÂMETRO / TECNOLOGIA	SSL-LED 2002	SSL-LED 2007	SSL-LED 2012	SSL-LED 2020	INCANDESCENTE	FLUORESCENTE
Eficiência luminosa (lm/W)	25	75	150	200	16	85
Vida útil (kh)	20	>20	>100	>100	1	10
Fluxo luminoso (lm/lâmpada)	25	200	1000	1500	1200	3400
Potência nominal (W/lâmpada)	1	2,7	6,7	7,5	75	40
Custo do pacote de lumens (\$/klm)	200	20	<5	<2	0,4	1,5
Custo da lâmpada (\$/lâmpada)	5	4	<5	<3	0,5	5
Índice de reprodução de cor (IRC)	75	80	>80	>80	95	75
Nicho para penetração nos mercados de iluminação	Fluxo reduzido	Incandescente	Fluorescente	Todos		

Notas: A Temperatura de cor correlata – T_{cp} (ou TCC) é métrica indicativa sobre a qualidade da reprodução de cores (juntamente com o desvio em relação ao locus do radiador de Plank ou corpo negro), que ainda não havia sido alcançada para os SSL – LEDs no ano 2002. Devido a esse motivo, o IRC foi considerado como meta intermediária; os lumens por lâmpada e os custos são valores do mercado varejista, talvez cerca de duas vezes superior aos custos praticados na porta da fábrica.

que facilita o entendimento sobre as características do mercado de iluminação nos EUA, no ano de 2010, está estratificado conforme tecnologia e setor [6]. O documento referido também contém características de desempenho, uso de energia e produção de luz. Na Figura 1, existe separação do consumo e tecnologia em quatro setores/áreas: edifícios residenciais, edifícios comerciais, edifícios industriais e em exteriores.

Assumindo existir suficiente similaridade, em termos relativos, entre o mercado dos EUA e brasileiro, e analisando a Figura 1, é possível inferir elevado potencial para difusão de nova tecnologia setor residencial, onde existe predominância da tecnologia de lâmpada incandescente convencional. Este tipo de fonte (de calor) converte entre 8-10% da eletricidade utilizada em luz visível.

Ainda com base na Figura 1, é possível constatar que cerca da metade da eletricidade utilizada para prover iluminação é utilizada no setor de comércio e serviços, onde as lâmpadas fluorescentes tubulares (ou lineares) são maioria absoluta. A potência média por lâmpada nesses dois setores considerados não difere significativamente. A maior diferença foi atribuída ao período médio de utilização: 46W (1,8h/dia) para o setor residencial e 42W (11,2h/dia) para o setor comercial [6].

O documento DOE considerado atualizou posição de in-

ventário anterior, realizado no ano 2001 para a iluminação, permitindo identificar um deslocamento na eficiência média dos equipamentos, ao longo da década. Tendo sido atribuído às tecnologias mais eficientes, em termos energéticos; regulamentos federais e estaduais de iluminação, e campanhas de conscientização. A eficiência média de 45lm/W (em 2001) passou para 58lm/W (ano 2010), principalmente, devido à troca das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas no setor residencial e lâmpadas fluorescentes T12 para T8 e T5 no setor comercial e industrial.

O número total de lâmpadas instaladas para aplicações estacionárias nos EUA cresceu de pouco menos de sete bilhões em 2001 para mais de oito bilhões em 2010. A maior parte deste crescimento ocorreu no setor residencial, principalmente, devido ao aumento no número de famílias (de pouco menos de 107 milhões no ano 2001 para mais de 113 milhões no ano 2010) e do aumento (+ 18 %) do número de pontos de luz por domicílio (ultrapassando a marca dos 50 pontos!).

SSL – LEDI – LP: OLED / PLED

A iluminação com base em nanoeletrônica ou eletrônica em estado sólido (SSL) é uma tecnologia emergente que poderá

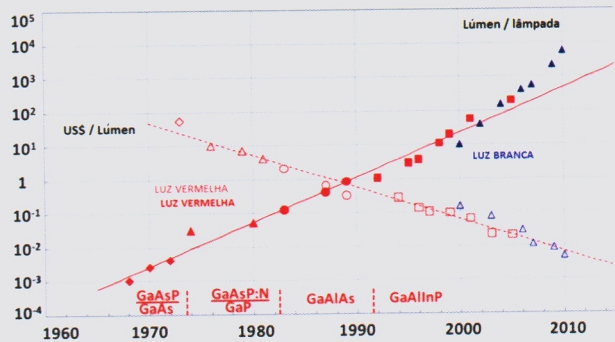


Figura 2 – Registros sobre a evolução na emissão de luz e custo para LED inorgânico (luz vermelha e branca). Anualmente, enquanto a emissão de luz duplica, o preço fica reduzido à metade. Fonte: [8].

Product Type	Luminous Efficacy	Wattage	Color Rendering Index	Lifetime	Cost per kilolumen
60W Incandescent bulb	17 lm/W	60	100	1k hours	\$0.5
CFL	71 lm/W	15	82	12k hours	\$2
HID	120 lm/W	341	90	12k hours	\$60
Cool White LED	130 lm/W	18	70	50k hours	\$50
Warm White LED	60 lm/W	20	88	50k hours	\$50

Tabela 3 – Parâmetros para fontes de luz com diferentes tecnologias (convencional e SSL). Fonte: [9].

agregar novos atributos aos equipamentos de iluminação. Estes incluem facilidade de automação, maior imunidade às vibrações, e uma esperada maior eficiência na conversão de eletricidade em luz. Tais atributos poderão aumentar a competitividade do LED / SSL em relação à tecnologia de iluminação tradicional (incandescente, fluorescente).

A penetração do LEDi na sinalização semafórica pode ser justificada a partir de atributo pouco aparente, como a maior imunidade às vibrações, e em relação a outro, como a redução na potência elétrica instalada. Tratando-se da utilização de LEDs para iluminação, em substituição às tecnologias incandescente e fluorescente, uma comparação pode ser feita a partir de parâmetros que são normalmente utilizados setorialmente.

Alguns parâmetros foram fixados em um plano norte-americano (SSL-LED, 2002) [7]. Os dados de base são para o ano 2002 e as metas projetadas sobre a evolução esperada nos anos 2007, 2012 e 2020. Os parâmetros fixados que são comuns às demais tecnologias de iluminação são: eficiência luminosa, vida útil, fluxo luminoso por lâmpada, custo para aquisição e índice de reprodução de cor (IRC). Um resumo das metas para estes parâmetros é apresentado pela Tabela 2.

PACOTE DE LUZ E CUSTO ASSOCIADO

O desenvolvimento do LED inorgânico, nos últimos 40 anos, tem avançado rapidamente. Esse avanço foi descrito por relação logarítmica (denominada lei de Haitz): a emissão de luz por dispositivo LED praticamente dobrou a cada dois anos, enquanto o custo era reduzido pela metade. Na Figura 2, estão apresentados dados sobre a emissão de luz por LED, a partir do final dos anos 1960, e o custo por unidade de fluxo luminoso (US\$/lm) para

LEDs que emitem luz vermelha (a partir do início dos anos 1970). Também junto do eixo das abscissas estão apresentadas as siglas dos compostos típicos mais utilizados no período (ver Figura 2).

A partir do século 20, observam-se dados para LEDs que emitem luz branca (ver Figura 2), e que nesse caso, a quantidade de fluxo luminoso por dispositivo aumenta em taxa um pouco superior, em relação ao LED que emite luz vermelha. Ainda que os cinco tipos de fontes de luz (produtos contidos na Tabela 3) sejam do mercado norte-americano, comparativamente, os quatro parâmetros nominais apresentados (eficiência luminosa, potência, IRC e vida útil) permitem comparações entre as tecnologias, além do custo por mil lumens, e possíveis inferências sobre o desempenho dessas fontes de luz visível (ver Tabela 3).

Baseado nos dados da Tabela 3 e considerando que a tarefa visual de interesse não ficará prejudicada por alteração no IRC, a comparação entre uma lâmpada incandescente 60W e uma CFL deixa clara a vantagem da CFL, em termos da redução (para apenas um quarto) da potência instalada, mesmo na situação de o custo do lúmen ser o quádruplo (e não estar considerada depreciação luminosa, nem o custo do descarte, algo como R\$0,60/unidade).

Além de diferença expressiva entre vidas nominais, o motivo preponderante está na relação entre eficiências luminosas (CFL/Incandescente) ser superior a quatro. Isso não ocorrerá caso o consumidor realize a troca da CFL pelo LEDi (tipo Warm White). Considerando apenas o custo por 1.000 lumens (última coluna, à direita, Tabela 3). Ainda a tecnologia HID se apresenta como um nicho, em potencial, para a penetração do LEDi (tipo Cool White) ou conjunto desses LEDs quando montados em uma luminária adequadamente.

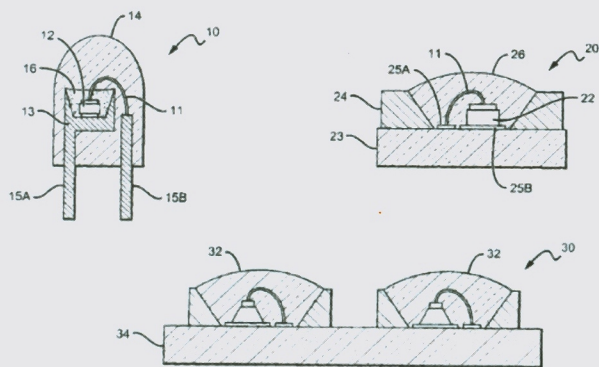


Figura 3 – Diferentes formatos (denominada arte prévia) e indicação de partes componentes de LEDs inorgânicos (vistas em corte). Fonte: [10].

BARREIRAS

A ausência de capacidade instalada, que pode ser identificada, para produzir LED no País, do ponto de vista da sociedade, pode ser considerada uma barreira relevante. Outra barreira importante são as patentes. Um número reduzido de empresas figura entre os proprietários de patentes no exterior. Na Figura 3, estão apresentadas três imagens (vistas em corte) de configurações típicas de dispositivos a estado sólido (LEDs inorgânicos), com partes componentes identificadas numericamente ou por código.

A Figura 3 é parte integrante da documentação de uma patente acessada [10], a qual considera já serem obsoletas, pela denominação atribuída, de arte prévia, as configurações apresentadas. Note que na parte superior esquerda (ver Figura 3) está apresentado um formato bastante conhecido, tradicional do LED (3/5/10) mm encapsulado. A patente referida registrou o dispositivo composto por múltiplas pastilhas (total de 26). Essa configuração (patenteada nos EUA, em 2012) de várias pastilhas interligadas (LEDs), possui potência nominal do conjunto de aproximadamente 13W, e está montada em invólucro ou encapsulamento único (ver Fig. 4).

Trata-se de uma estratégia para aumentar o fluxo luminoso por dispositivo (ver Figura 4). Dados de preço do mercado europeu, referido ao ano 2010, para a substituição de lâmpada de halogênio tipo spot por LED, que se mostrava vantajosa, em termos de custo. A partir de transcorridas 5kh de utilização e para a substituição similar de fonte tipo fluorescente, para igualar custos, o período de utilização efetiva é próximo a quatro anos [11]. No Brasil, para iluminação pública, considerada apenas a substituição (retrofit) da luminária VSAP 250W, instalação em altura de nove metros e distância entre postes de 35m, cálculos indicam períodos de retorno ainda maiores em uma comparação de custos em relação a equipamento LEDi (Maggi, T., 2013). Sem dúvida, o custo atual da tecnologia SSL: LEDi ou OLED é uma barreira (não técnica) relevante, que lança para muito distante o retorno do investimento.

A busca pela maximização da eficiência luminosa, a partir da tecnologia SSL, conduziu a concepção de fonte de luz branca tipo LEDi, cuja capacidade para restituir cores não se mostrou satisfatória. O olho humano é capaz de resolver diferença muito sutil, e aparentemente, ele supera a capacidade da métrica IRC.

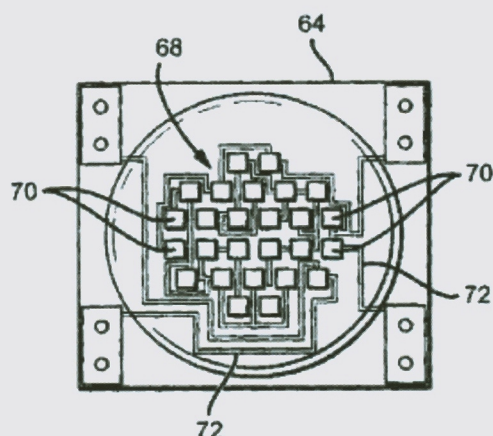


Figura 4 – “Estado da arte”, com indicação de partes componentes do dispositivo (LEDi). Fonte: [10].

Uma estratégia para minimizar essa deficiência foi trabalhar a partir da eficiência luminosa da radiação, conceito baseado no computo da distribuição espectral de emissão da fonte luminosa [12].

AMOSTRAGENS DE MERCADO

Nesta seção, são discutidos dois impactos da tecnologia LED inorgânico. O primeiro é relativo a menor depreciação e maior vida útil preconizados para o LEDi, por exemplo, em relação à tecnologia incandescente. No caso da lâmpada incandescente (à direita), na Figura 5, o depósito escuro no interior do bulbo, aparentemente, é um sinal de problemas com a composição do gás de enchimento da lâmpada tipo a halogênio, cuja depreciação luminosa máxima ao final da vida útil é da ordem de 5% e não deveria apresentar depósito (tipo “negro de fumo”) - ver Figura 5.

A disponibilidade da lâmpada a LEDs, modelo H7, não possui frequência conhecida no país. Quando ela estiver instalada em farol de veículo automotor, uma dúvida surge: qual o comportamento e o desempenho do conjunto? Essa é uma questão que poderá ser respondida a partir de maior investimento por desenvolvimentos nesse País. Algum incremento nas parcerias entre empresas e instituições de pesquisa e ensino fica sugerido. A Figura 6 apresenta resultados sobre o comportamento da eficiência luminosa de amostras de lâmpadas LED (inclui equipamento auxiliar, driver) coletadas anualmente desde 2006 nos EUA [13].

O valor e marcas grafados em azul (ver Figura 6) representam o valor da média. O traço preto horizontal é a mediana; o retângulo na cor verde indica limites de 25% e superior 75%, e as extremidades da barra vertical trazem o valor mínimo e máximo de cada amostra. O mesmo documento norte-americano de referência [13] apresenta também outros ábacos semelhantes, contendo o comportamento de outros parâmetros de amostras de fonte tipo LED, como o IRC, o fluxo luminoso, a potência absorvida da rede e eficiência apenas para os LEDs (excluído equipamento auxiliar). A Figura 7 traz delimitações de regiões para dados amostrados nos EUA sobre diferentes tecnologias, onde a posição relativa no plano é definida pelo fluxo luminoso (ordenada) e eficiência luminosa da fonte (abscissa). Os dados (pontos) são de amostras conforme relatório denominado Caliper [14], o dado sobre a tecnologia OLED e as delimitação das regiões foram incluídos por TYAN, Y-S, 2011 [15] (ver Figura 7).

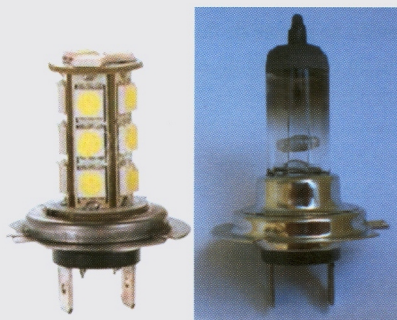


Figura 5 – Lâmpada automotiva tipo H7. Unidade incandescente removida do farol de veículo, à direita; e à esquerda, unidade com tipo de base semelhante e provida com vários LEDs.

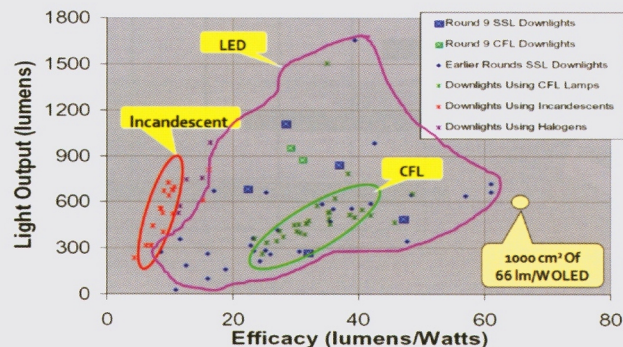


Figura 7 – Delimitação de regiões conforme as diferentes tecnologias em plano cartesiano do fluxo vs. eficiência luminosa, dados de amostras (relatório Caliper # 9) e por TYAN, Y-S, 2011. Fontes: [14, 15].

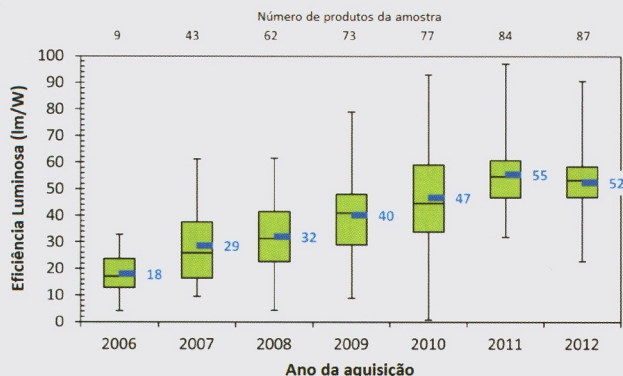


Figura 6 – Comportamento da eficiência luminosa de amostras coletadas anualmente para produtos de iluminação com LED inorgânico. Fonte: [13].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A vida útil para dispositivos com tecnologia SSL, base orgânica (LP: OLED/PLED), coligidos de especificação técnica (duas marcas/fabricantes) ainda mostra-se baixa: 5kh e 10kh (L50). Para o LED inorgânico, é comum ser encontrada a informação de períodos como 50kh ou 100kh para vida nominal, porém, na tecnologia de LEDi existe forte dependência da vida útil com a corrente elétrica, em relação à condição especificada como nominal e particularmente com a temperatura de funcionamento.

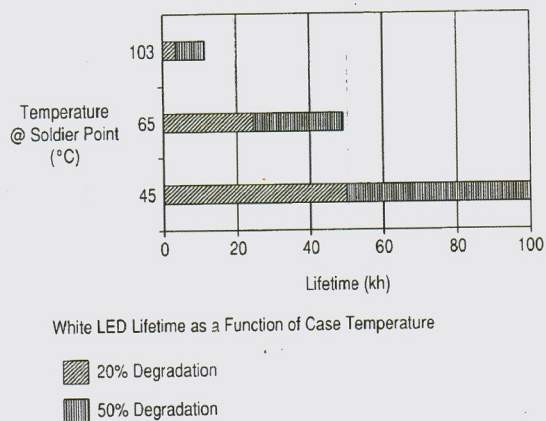


Figura 8 – Diferentes períodos de vida útil (WLEDi) devido à temperatura de funcionamento. Fonte: [16].

Na Figura 8 está apresentada variação da vida útil conforme a temperatura na região de engaste/ancoragem (“soldagem”) do dispositivo a estado sólido inorgânico para luz branca (WLEDi) [16] montado em estrutura, por exemplo, como de um dissipador de calor.

No caso do dispositivo inorgânico (WLEDi), conforme Figura 8, ele terá vida útil de 100kh apenas se a temperatura de funcionamento, na posição indicada, for mantida sob 45°C. Essa temperatura é baixa e está próxima daquela que pode ocorrer no interior de um invólucro ou luminária em região tropical do globo terrestre.

Para temperaturas de funcionamento maiores, a vida ficará comprometida e reduzida. Considerados o mercado e avaliações acessadas para os Estados Unidos, é possível identificar potencial de

penetração no setor de iluminação por equipamento com tecnologia SSL, tanto devido ao pacote de fluxo luminoso já alcançado, quanto pela eficiência de conversão da eletricidade em luz visível branca.

As métricas usuais de fontes convencionais para a reprodução de cor de objetos, em relação ao olho humano, não possibilitam avaliação satisfatória de fontes SSL de luz com emissão branca.

Utilizando dados de cálculos, a partir da eficiência luminosa de radiação, conceito baseado no computo da distribuição espectral de emissão, em termo relativo, foi possível estimar a eficiência média (amostral) de LEDi em relação a uma lâmpada incandescente (Tcp de 2,7 k K) na faixa de $(2,5 \pm 0,2)$ e desses mesmos LEDs em relação a uma lâmpada fluorescente (Tcp de 3,6 k K) na faixa de $(1,015 \pm 0,075)$.

Com base na eficiência luminosa exclusivamente, a iluminação por dispositivo orgânico (OLED), a LP já pode ser considerada competitiva (ver Fig. 6), ainda que valores de eficiência luminosa contidos em catálogos de fabricantes possam apontar para essa tecnologia um estágio atual não muito distante da fonte incandescente.

Cabe deixar convite ao leitor para que não perca de vista a possibilidade de a próxima geração de fontes para iluminação (SSL), definitiva, vir a ser implementada a partir da lâmpada plástica (LP).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT TB-23/1991 (NBR 5461) Iluminação – terminologia. p.20, item 3.4.24, 1991.
- [2] ABNT TB-23/1991 (NBR 5461) Iluminação – terminologia. p.21, item 3.4.40, 1991.
- [3] HELD, G Introduction to Light Emitting Diode Technology and applications. 192p., TAYLOR & FRANCIS LTD, Print ISBN: 978-