



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



CB3E

centro brasileiro de eficiência
energética em edificações

cb3e.ufsc.br

Relatório Técnico: Eficiência luminosa de produtos LED encontrados no mercado brasileiro

[Versão 2: revisada e ampliada]

**João Loreço Novaes Pessoa
EneDir Ghisi**

Florianópolis, julho de 2014





RESUMO EXECUTIVO

A demanda por energia no Brasil está em crescimento constante. Uma boa parte da energia elétrica consumida em edificações é destinada à iluminação. Para suprir a crescente demanda por energia, é necessária a substituição de produtos ineficientes por produtos cada vez mais eficientes. Espera-se que a tecnologia LED se torne, em pouco tempo, a mais eficiente disponível no mercado, apresentando eficiências luminosas superiores às das lâmpadas fluorescentes.

Para averiguar a eficiência luminosa dos produtos LED no mercado brasileiro, realizou-se uma pesquisa em catálogos em endereços eletrônicos. Dentre os produtos LED disponíveis, considerando-se apenas lâmpadas tipo bulbo e tubulares que são utilizadas para iluminação geral em edificações, é possível encontrar eficiências luminosas semelhantes às encontradas em lâmpadas fluorescentes. Portanto, não é possível afirmar que o LED é sempre mais eficiente que a lâmpada fluorescente. Lâmpadas fluorescentes tubulares apresentam valores médios de eficiência luminosa na faixa de 75 a 95 lm/W. O maior valor de eficiência luminosa para LED, encontrado nesta pesquisa, foi de 113,7 lm/W. No entanto, valores baixos também foram encontrados, inclusive abaixo da eficiência média encontrada para lâmpadas fluorescentes. O menor valor encontrado foi 30 lm/W. Os relatórios publicados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos reforçam estes dados, pois atualmente a eficiência luminosa do LED é equivalente à das fluorescentes. Para 2025, pode-se esperar produtos com mais de 200 lm/W, vida útil de 40 mil horas e preços equivalentes aos de outras fontes de iluminação.

A qualidade da iluminação destes produtos é aceitável para os padrões de conforto luminoso humano. A desvantagem do LED em comparação com lâmpadas fluorescentes compactas é o baixo fluxo luminoso emitido, que é de cerca da metade do fluxo luminoso emitido normalmente por lâmpadas fluorescentes. Isso dificulta a substituição de um produto pelo outro. Alguns poucos produtos LED destinados à substituição de lâmpadas incandescentes e fluorescentes apresentam fluxos luminosos elevados. As vantagens do LED são o baixo impacto ambiental e a longa vida útil.

Devem ser estabelecidos requisitos mínimos para a qualidade de iluminação do LED, pois apesar do fato de que os melhores produtos atendem às necessidades visuais humanas, isto não é observado no mercado como um todo. Deve ser estabelecido o controle sobre o índice de reprodução de cores, a temperatura de cor, a dimerização, vida útil e direcionalidade do fecho luminoso. Para que a inserção do LED não repita os mesmos erros cometidos pela inserção das lâmpadas fluorescentes, recomenda-se que, neste momento inicial, os produtos sejam destinados a mercados de nicho, em que os benefícios são claros para o consumidor. Os problemas relativos à qualidade da iluminação devem ser priorizados e resolvidos antes da sua comercialização e antes da implementação de programas de eficiência energética. Recomenda-se ainda que a regulamentação seja feita de forma harmônica entre países exportadores e importadores, para que não existam conflitos que impossibilitem o atendimento de diferentes demandas.



NOTA TÉCNICA

EFICIÊNCIA LUMINOSA DE PRODUTOS LED ENCONTRADOS NO MERCADO BRASILEIRO

Segundo a Agência Internacional de Energia (2006), o consumo de energia com iluminação é responsável por uma fatia de 19% de toda a energia elétrica gerada no mundo. Estima-se que a demanda por energia elétrica no Brasil deverá crescer 55% até 2020 (BRASIL, 2011). A última Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso, realizada entre os anos de 2004 e 2006 pelo Procel (ELETROBRÁS, 2007), indica que, para o setor residencial, a iluminação representa cerca de 14% do consumo total de energia elétrica nos domicílios brasileiros. No setor comercial, a iluminação responde por 22% do consumo e no setor público por 23%. Analisando os dados do consumo de energia do Balanço Energético de 2013 (BRASIL, 2013) e assumindo o percentual de consumo direcionado à iluminação em cada setor (ELETROBRÁS, 2007), pode-se afirmar que o consumo de energia para iluminação é de 16,38 TWh no setor residencial, 17,38 TWh no setor comercial e 8,97 TWh no público. No total, são 43,15 TWh de energia elétrica consumida com iluminação nos três setores.

Estes dados revelam a importância de que o crescimento do consumo de energia seja acompanhado pela eficiência energética dos produtos destinados à iluminação. O Programa Ambiental das Nações Unidas (2011) aponta a tecnologia LED como a alternativa para iluminação que será mais eficiente energeticamente no curto e médio prazo. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012a) também considera a tecnologia LED como a alternativa mais viável para a substituição das fluorescentes compactas e investe em desenvolvimento e inserção do produto no mercado. Nos Estados Unidos, a redução do consumo de energia prevista com a introdução de iluminação LED é de 67% do consumo com iluminação em 2025, o que permitiria uma economia de 21,7 bilhões de dólares por ano. Esta energia não consumida é equivalente à geração de toda a energia eólica projetada para 2025 naquele país, ou doze vezes a geração de energia solar projetada para o mesmo ano (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2014b).

Segundo o Programa Ambiental das Nações Unidas (2011), a principal fonte de iluminação utilizada em edificações em todo o mundo ainda é a lâmpada incandescente. Estas lâmpadas apresentam baixas eficiências luminosas e curto período de vida. Se faz necessário, para suprir a demanda crescente por energia, a substituição das fontes de iluminação ineficientes por fontes cada vez mais eficientes. A tecnologia LED está em fase de desenvolvimento e espera-se que no curto prazo alcançará as maiores eficiências luminosas disponíveis no mercado.

Já é possível encontrar no mercado brasileiro, uma variedade de produtos LED que podem substituir lâmpadas incandescentes e fluorescentes. A pesquisa em catálogos dos principais fabricantes de LED no mercado brasileiro demonstra eficiências luminosas, em sua grande maioria, na faixa de 50 a 110 lm/W. Os produtos pesquisados são dos fabricantes Philips, Osram, LG e Samsung. Os produtos selecionados para esta análise se restringiram às lâmpadas tipo bulbo e tubulares, usadas para iluminação geral em



edificações. Produtos destinados à iluminação para exposição de produtos comerciais, iluminação pública, iluminação de fachadas, iluminação industrial, entre outros, não são contemplados neste trabalho. As Tabelas 1 a 4 apresentam os fluxos luminosos, potências e eficiências luminosas de cada produto selecionado. A amostra contém os produtos LED considerados mais significativos para a substituição de lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas, o que, no entanto, não representa todos os produtos disponíveis no mercado brasileiro.

Tabela 1. Fluxo luminoso, potência e eficiência luminosa dos LEDs do fabricante Philips.

Nome do Produto	Eficiência Luminosa (lm/W)	Fluxo Luminoso (lm)	Potência (W)
Philips TL-D Standard Colours	58,3	1050	18,0
Philips LED Candle	62,5	250	4,0
Philips LED Luster	62,5	250	4,0
Philips Master LED Lamp	64,0	800	12,5
Philips Essential LEDtube 1200mm	75,0	1500	20,0
Philips Master LED Spot PAR	78,9	750	9,5
Philips Essential LEDtube 600mm	80,0	800	10,0
Philips CorePRO LEDtube 1500mm	80,0	2000	25,0
Philips Master LED Bulb	81,0	1055	13,0
Philips Master LEDtube 1200mm	86,8	1650	19,0
Philips Master TL5 High Output Eco	95,7	7000	73,1
Philips Master TL5 High Efficiency Xtra Eco	98,0	2450	25,0
Philips Master TL5 High Output Eco Plus	107,3	4400	41,0
Philips Master TL5 High Efficiency Eco	108,0	1350	12,5
Philips Master TL5 High Efficiency Xtra Eco	113,7	3650	32,1

Fonte: Koninklijke Philips (2013).



Tabela 2. Fluxo luminoso, potência e eficiência luminosa dos LEDs do fabricante Samsung.

Nome do Produto	Eficiência Luminosa (lm/W)	Fluxo Luminoso (lm)	Potência (W)
Samsung B12 Candle LED Bulb	50,0	160	3,2
Samsung A19 LED Light Bulb	55,0	550	10,0
Samsung PAR20 LED Light Bulb	57,1	400	7,0
Samsung B12 Candle LED Bulb	57,6	300	5,2
Samsung PAR30 LED Light Bulb	64,0	960	15,0
Samsung A19 LED Light Bulb	75,0	810	10,8

Fonte: Samsung (2013).

Tabela 3. Fluxo luminoso, potência e eficiência luminosa dos LEDs do fabricante Osram.

Nome do Produto	Eficiência Luminosa (lm/W)	Fluxo Luminoso (lm)	Potência (W)
Osram LEDtron PAR	33,3	350	10,5
LED Superstar Classic P Advanced	55,5	250	4,5
Osram LED Superstar Classic B Advanced	65,7	250	3,8
Osram Ledtron Classic A	67,5	810	12,0
Osram LED Star Classic A	68,0	136	2,0
Osram LED Superstar Classic A Advanced	78,3	470	6,0
Osram substiTUBE Basic-3000K	88,8	800	9,0
Osram substiTUBE Advanced – 3000K	100,0	1000	10,0
Osram substiTUBE Basic-6500K	100,0	900	9,0
Osram substiTUBE Basic-4000K	100,0	900	9,0
Osram substiTUBE Advanced – 4000K	110,0	1100	10,0

Fonte: Osram (2013).



Tabela 4. Fluxo luminoso, potência e eficiência luminosa dos LEDs do fabricante LG.

Nome do Produto	Eficiência Luminosa (lm/W)	Fluxo Luminoso (lm)	Potência (W)
LED Bulb 7,5W	60,0	450	7,5
LG LED Bulb 14W	60,7	850	14,0
LG LED Bulb 12,8W	63,2	810	12,8
LG LED Tube 4000K	79,5	1750	22,0
LG LED TUBE 5,000K	81,8	1800	22,0

Fonte: LG (2013).

A pesquisa em catálogos permite a análise da relação entre fluxo luminoso e eficiência luminosa representada nas Figuras 1 a 3. A partir do gráfico de dispersão representado na Figura 1 é possível aferir que as eficiências luminosas tendem a aumentar em produtos que emitem maior fluxo luminoso. As Figuras 2 e 3 apresentam as eficiências luminosas, respectivamente, das lâmpadas LED tubulares e bulbo. As maiores eficiências são encontradas nas lâmpadas LED tubulares, geralmente destinadas à substituição de fluorescentes compactas tubulares. Estes modelos emitem um alto fluxo luminoso. A maior eficiência encontrada foi de 113,7 lm/W. No caso das lâmpadas LED tipo bulbo, a maior eficiência encontrada foi de 81,0 lm/W.

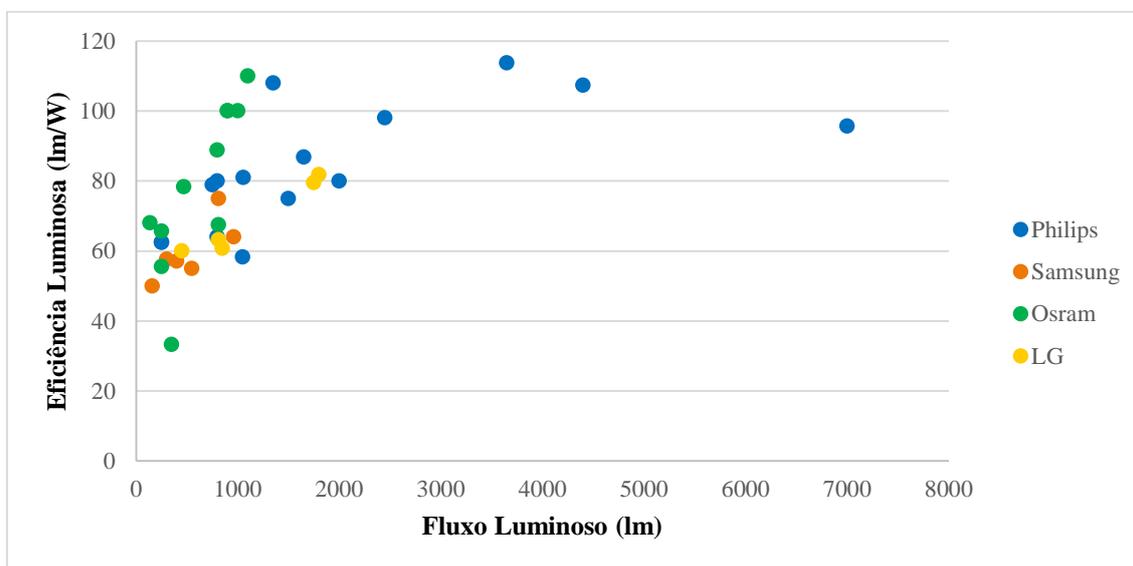


Figura 1. Relação entre fluxo luminoso e eficiência luminosa dos produtos LED (bulbo e tubulares) encontrados no mercado brasileiro.

Fontes: Samsung (2013), Koninklijke Philips (2013), LG (2013), Osram (2013).



Tabela 5. Temperatura de cor dos LEDs do fabricante Samsung.

Nome do Produto	Índice de reprodução de cores (adimensional)	Temperatura de cor (K)
Samsung B12 Candle LED Bulb	-	2725
Samsung B12 Candle LED Bulb	-	2725
Samsung A19 LED Light Bulb	-	3000
Samsung A19 LED Light Bulb	-	2725
Samsung PAR20 LED Light Bulb	-	3045
Samsung PAR30 LED Light Bulb	-	3000

Fonte: Samsung (2013).

Tabela 6. Índice de reprodução de cores e temperatura de cor dos LEDs do fabricante Philips.

Nome do Produto	Índice de reprodução de cores (adimensional)	Temperatura de cor (K)
Philips TL-D Standard Colours 600mm	72	6200
Philips Master LED Spot PAR	80	4000
Philips LED Candle	80	2700
Philips Master LED Bulb	80	2700
Philips LED Lustre	80	2700
Philips Master LED Lamp	80	2700
Philips LEDtube 600mm	80	4000
Philips LEDtube 1500mm	80	4000
Philips Essential LEDtube 1200mm	80	3000
Philips Master TL5 High Output Eco Plus	82	3000
Philips Master LEDtube 1200mm	83	6500
Philips Master TL5 High Efficiency Eco	84	3000
Philips Master TL5 High Efficiency Xtra Eco	85	3000
Philips Master TL5 High Output Eco	85	3000
Philips Master TL5 High Efficiency Xtra Eco	85	3000

Fonte: Koninklijke Philips (2013).



Tabela 7. Índice de reprodução de cores e temperatura de cor dos LEDs do fabricante Osram.

Nome do Produto	Índice de reprodução de cores (adimensional)	Temperatura de cor (K)
Osram LED Superstar Classic A Advanced	80	2700
Osram LED Superstar Classic B Advanced	80	2700
LED Superstar Classic P Advanced	80	2700
Osram Ledtron Classic A	80	2700
Osram LEDtron PAR	80	2700
Osram substiTUBE Advanced – 4000K	80	4000
Osram substiTUBE Advanced – 3000K	80	3000
Osram LED Star Classic A	82	2700

Fonte: Osram (2013).

Tabela 8. Índice de reprodução de cores e temperatura de cor dos LEDs do fabricante LG.

Nome do Produto	Índice de reprodução de cores (adimensional)	Temperatura de cor (K)
LED Bulb 7,5W	81	2700
LG LED Bulb 14W	83	2700
LG LED Bulb 12,8W	83	2700
LG LED Tube 4000K	83	4000
LG LED Tube 5000K	83	5000

Fonte: LG (2013).

Um estudo feito por um laboratório independente (RYCKAERT et al., 2012) aponta alguns obstáculos para a substituição de lâmpadas fluorescentes compactas tubulares por LED tubulares. O primeiro obstáculo encontrado é o fluxo luminoso: lâmpadas LED tubulares apresentam aproximadamente a metade do fluxo luminoso emitido por lâmpadas fluorescentes tubulares com as mesmas dimensões. Outra observação feita pelo estudo é de que as eficiências luminosas de LED tubulares com drivers integrados são próximas às de fluorescentes tubulares T8 com reatores integrados:

Dependendo do consumo de energia do reator (eletromagnético), a eficiência do conjunto lâmpada-reator de uma lâmpada fluorescente tubular T8 comum varia entre 75 lm/W e 95 lm/W. A eficiência luminosa dos tubos LED (com drivers integrados) é, em média, de 73 lm/W, com 5 lâmpadas tendo uma eficiência maior que 80 lm/W (RYCKAERT et al., 2012, v.49, p.430, tradução nossa).

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013b) apresenta a relação entre fluxo luminoso e eficiência luminosa para mais de sete mil produtos LED, incluindo luminárias LED, além de lâmpadas. Esta relação pode ser observada na Figura 4. Confrontando a Figura 4 com a Figura 1, nota-se que são poucos os produtos que apresentam eficiências luminosas acima de 100 lm/W. Isso confirma o fato de que a tecnologia LED comercialmente disponível não é sempre mais eficiente que a lâmpada fluorescente. Os produtos que emitem os maiores fluxos luminosos são luminárias LED, como observado na Figura 4, podendo ser comparados aos fluxos luminosos emitidos por lâmpadas fluorescentes. As luminárias LED são geralmente compostas de LED integrados com drivers e dissipadores de calor embutidos em uma peça única. Para as lâmpadas LED, especialmente do tipo bulbo, é comum encontrar baixos índices de fluxo luminoso.

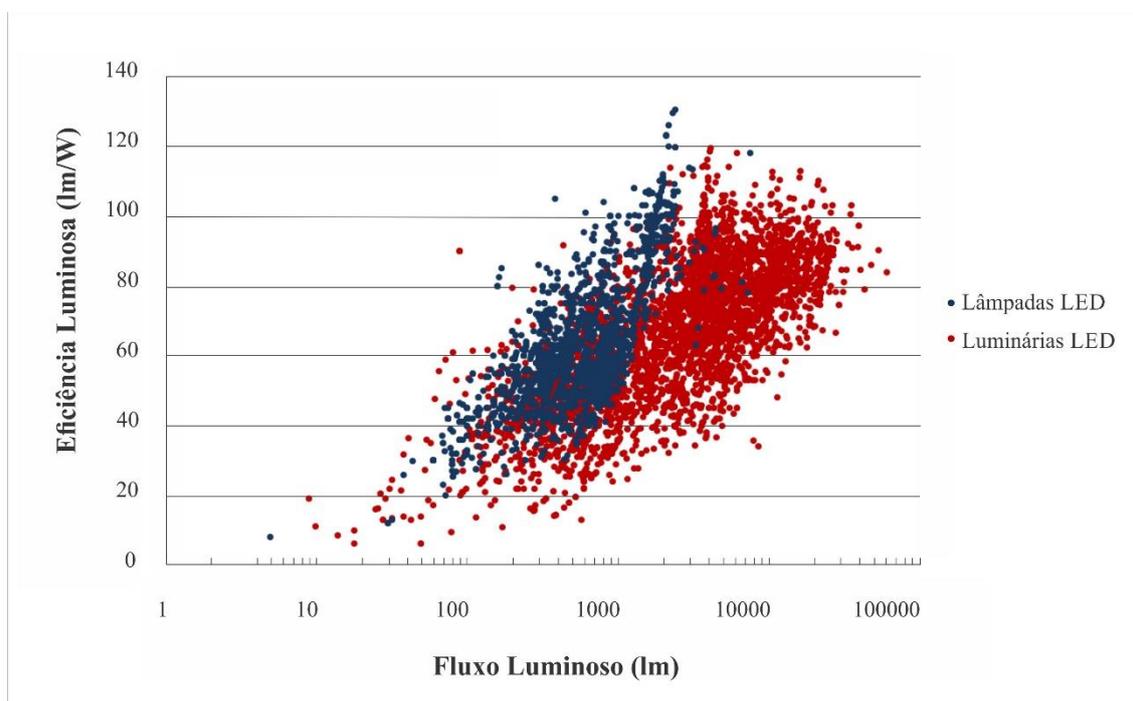


Figura 4. Relação entre fluxo luminoso e eficiência luminosa de produtos LED catalogados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013b).

O desenvolvimento da tecnologia LED é rápido, e as eficiências aumentam a cada ano. Na Figura 5 é possível observar o aumento das eficiências luminosas dos produtos LED mais eficientes nos últimos anos. Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013b, p.01, tradução nossa), “existem dois métodos para gerar luz branca com LED: através da conversão com fósforo e através da combinação de outras cores”. Estas possibilidades interferem na eficiência luminosa dos produtos, bem como na temperatura de cor e em outros diversos fatores. Na Figura 5, observa-se como a obtenção da luz branca através da combinação de cores (CC) ou conversão com fósforo (F), e a temperatura de cor diferenciam os produtos em relação às suas eficiências. São

ditas temperaturas quentes aquelas abaixo de 3000K, e temperaturas frias, acima de 5000K. Espera-se que as diferenças entre eficiências luminosas devidas à temperatura de cor diminuam progressivamente e que luminárias LED alcancem eficiências luminosas maiores que 200 lm/W até 2020 (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2013b).

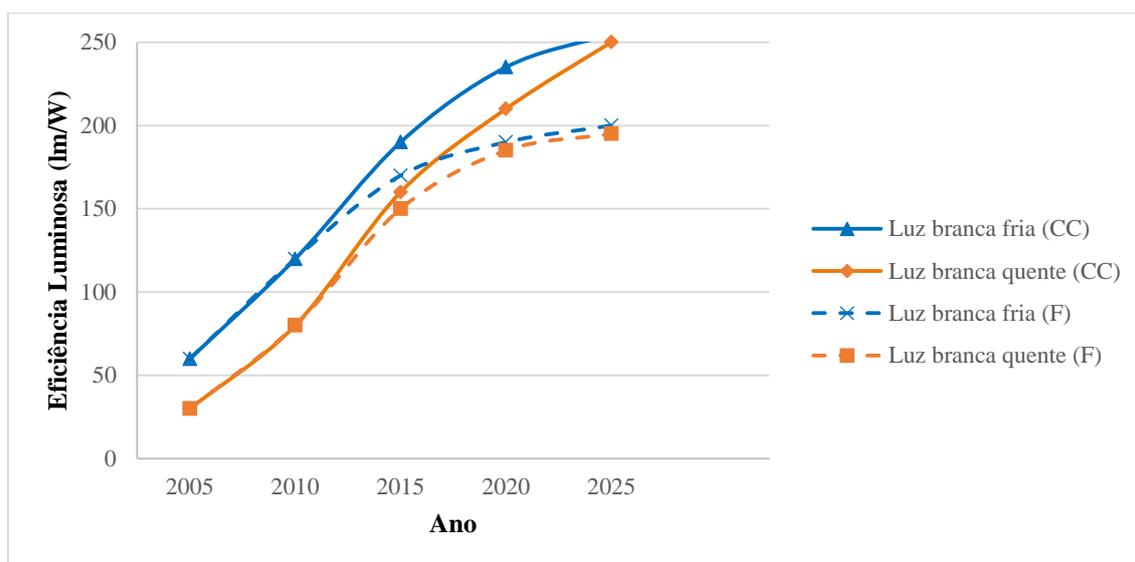


Figura 5. Eficiências atuais e projetadas para os produtos LED mais eficientes.

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013b).

A eficiência da iluminação LED pode ser alavancada com a integração com controles de automação. Companhias como Philips, Marvell e Bridgelux estão desenvolvendo produtos com drivers wi-fi, que permitem que as luminárias LED sejam controladas remotamente. Produtos como este já existem no mercado, mas ainda têm altos custos para os consumidores. A expectativa é de que esta tecnologia seja adotada primeiramente no setor comercial, em que a possibilidade de reduzir o consumo de energia em grande escala é atrativa. Estas luminárias têm a vantagem de permitirem o controle da cor, intensidade da iluminação e a medição do consumo de energia (LAMONICA, 2013).

Lâmpadas e luminárias LED são desenvolvidas para substituir diversos segmentos de produtos no mercado, como lâmpadas tipo bulbo, tubulares, *spotlight*, entre outros. Isto significa que para cada tipo de lâmpada ou luminária a ser substituída, uma versão equivalente em LED é produzida, quando possível e viável. Desta forma, o LED compete em diferentes segmentos de iluminação no mercado. A comparação entre diferentes segmentos de produtos LED permite concluir que o avanço da tecnologia LED se dá de forma heterogênea (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2014a).

A Figura 6 mostra a evolução da eficiência luminosa média de todos os produtos LED em comparação com segmentos isolados, como por exemplo lâmpadas tipo bulbo e lâmpadas tubulares. A Figura 7 mostra a comparação da evolução do fluxo luminoso de

todos os produtos LED em comparação com segmentos isolados. Para os tipos *downlight* e tubulares não é fornecida a informação da evolução do fluxo luminoso ao longo dos anos. Ressalta-se que as eficiências médias encontradas são resultado de eficiências luminosas bastante diferentes quando analisados produtos isoladamente, isto é, apresentam um grande desvio padrão. É possível encontrar, por exemplo, produtos com eficiências que variam de 60 lm/W a quase 90 lm/W para uma mesma categoria de lâmpada tipo bulbo. O mesmo pode ser observado para o fluxo luminoso, em que para uma mesma categoria de produtos podem ser encontrados valores de 100 a 600 lúmens (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2014a).

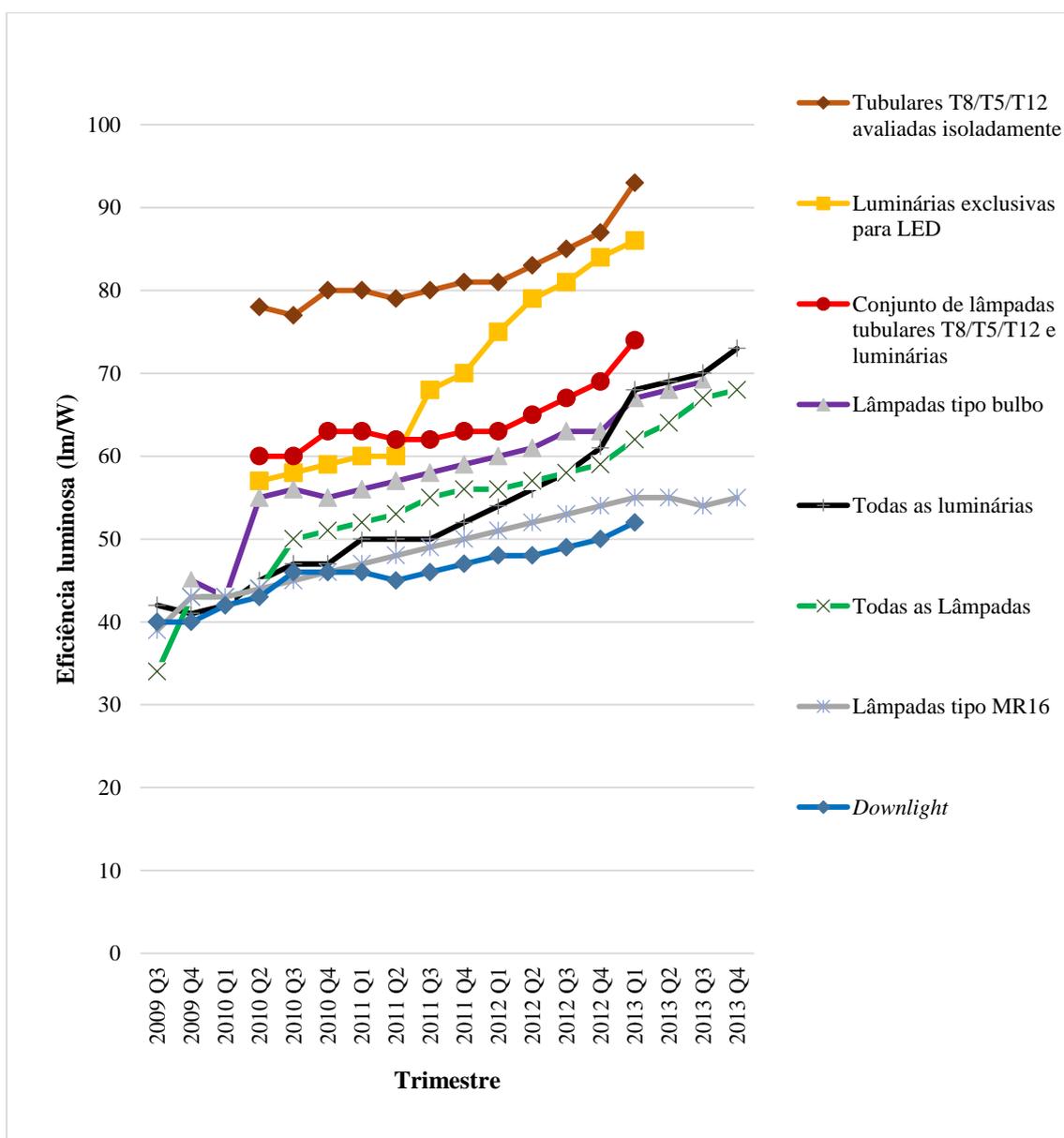


Figura 6. Média de eficiências luminosas de lâmpadas LED registradas no programa LED Lighting Facts ao longo dos anos, por trimestre.

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013c, 2013d, 2014a).

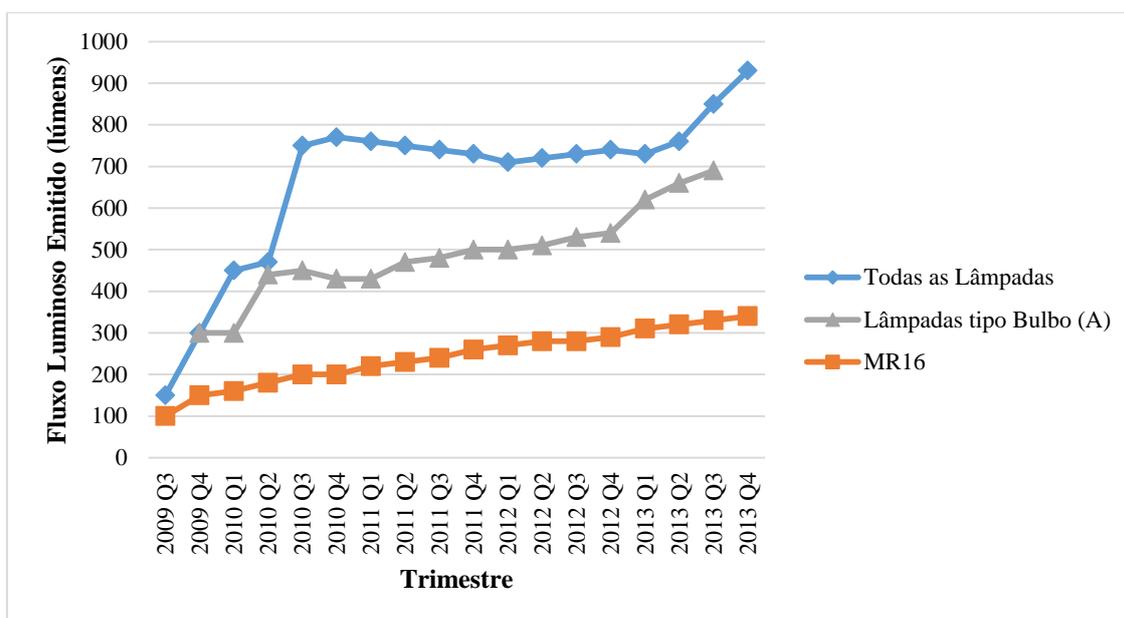


Figura 7. Média de fluxo luminoso emitido por lâmpadas LED registradas no programa LED *Lighting Facts* ao longo dos anos, por trimestre.

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2014a, 2013c).

Como exposto pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013c), o avanço mais acelerado na eficiência luminosa pode ser observado nas lâmpadas LED tubulares T8/T5/T12 e em luminárias exclusivas para LED. As luminárias exclusivas para LED são chamadas pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013c, p.1) de “*recessed and surface-mounted dedicated LED troffers*” e são responsáveis por mais de 50% das luminárias do setor comercial. Estes produtos têm tido ganhos de eficiência luminosa acima da média dos novos produtos LED lançados no mercado ao longo dos anos. Nota-se que as luminárias exclusivas para LED apresentam melhores eficiências luminosas e índice de reprodução de cores que lâmpadas tubulares LED T8/T5/T12 instaladas em luminárias. As luminárias exclusivas têm o LED integrado diretamente e constituem um único produto. Já as lâmpadas tubulares T8/T5/T12 são produzidas separadamente das respectivas luminárias. Um grande número de lâmpadas T8/T5/T12 LED falhou em atingir valores mínimos de eficiência luminosa e índice de reprodução de cores nos Estados Unidos, enquanto as luminárias exclusivas se mantiveram em geral acima dos requisitos mínimos. Apesar de lâmpadas LED tubulares apresentarem qualidade de cor e eficiências luminosas equivalentes ou maiores que fluorescentes, todas apresentam fluxo luminoso e distribuição luminosa diferentes das lâmpadas fluorescentes. Luminárias exclusivas para LED, em geral, apresentam um melhor desempenho que lâmpadas LED tubulares, mas sua vida útil pode ser menor se a dissipação de calor não for eficiente (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2013c, 2014b).

Os produtos do tipo *downlight*, por sua vez, têm eficiências luminosas menores, mas semelhantes aos seus similares halógenos. Estes produtos apresentam iluminação



direcionada e são usados principalmente para aplicações específicas no setor comercial. No ano de 2013, os produtos LED *downlight* apresentaram um grande crescimento de vendas no setor comercial de varejo (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2013c, 2014b).

As lâmpadas LED do tipo bulbo, também conhecidas por “LED A”, ou lâmpadas omnidirecionais, têm demonstrado um grande avanço em relação ao fluxo luminoso, eficiência luminosa e índice de reprodução de cores. Estas lâmpadas são destinadas a substituir as incandescentes e fluorescentes compactas que representam uma grande parte do mercado. Dos produtos LED tipo bulbo ativos no mercado em 2013, 4,48% apresentaram fluxo luminoso equivalente ao emitido por lâmpadas incandescentes de 100W (1600 lúmens). Ao mesmo tempo, 5,76% apresentaram fluxo luminoso equivalente ao emitido por lâmpadas incandescentes de 75W (entre 1100 e 1599 lúmens). Este alto valor de fluxo luminoso representa uma conquista recente para os produtos LED tipo bulbo. A maioria das lâmpadas LED tipo bulbo já emitem fluxo luminoso equivalente a lâmpadas incandescentes de 60W (800 lúmens) (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2013d).

Analisando todos os segmentos de LED, a eficiência luminosa tem aumentado em cerca de 9,5 lm/W a cada ano. No entanto, este avanço se dá de forma muito lenta entre os produtos LED destinados a substituir lâmpadas halógenas MR16, como exposto pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (2014a). As lâmpadas MR16 são usadas principalmente no setor comercial para exposição de produtos.

Estes produtos LED são em geral mais eficientes ou equivalentes às similares halógenas MR16 e atendem aos mesmos requisitos de qualidade de iluminação. O que têm se mantido estagnado é o aprimoramento da eficiência luminosa. Outro dado importante é que alguns destes produtos LED emitem um baixo fluxo luminoso quando comparados às similares halógenas MR16, principalmente para faixas de 12V e 50W, e o preço do produto para o consumidor é mais elevado. Isto tem levado os fabricantes de LED a saírem do segmento que compete com as halógenas MR16 (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2014a).

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013c), para todos os segmentos de LED avaliados, a maior parte dos produtos pode ser considerada equivalente aos semelhantes fluorescentes em termos de eficiência luminosa atualmente. Isto também é observado para aqueles produtos destinados a substituir lâmpadas halógenas. Apenas uma parte dos produtos LED pode ser considerada realmente mais eficiente que as tecnologias correntes no mercado no momento. Espera-se que a eficiência do LED aumente de forma mais significativa nos próximos anos, tornando-o majoritariamente mais vantajoso.

A eficiência luminosa máxima que se espera comercializar é de 250 lm/W. A eficiência ideal do LED, considerando que a conversão da eletricidade para luz seja perfeita, está na faixa de 350 lm/W a 450 lm/W. Ela varia de acordo com fatores como: a forma como o LED converte cores monocromáticas em luz branca (seja por conversão com fósforos, por combinação de cores, ou um modelo híbrido destas duas formas); a temperatura e corrente elétrica de operação; a temperatura de cor e índice de reprodução de cores que se pretende emitir; entre outros. Em paralelo ao desenvolvimento do LED, a tecnologia OLED evoluiu consideravelmente nos últimos anos, mas a expectativa de



comercialização é apenas para longo prazo (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2014b).

Muitos fatores reduzem a eficiência ideal teórica de um diodo LED para a eficiência prática de uma luminária ou lâmpada que constituem o produto comercializado. Soluções deverão ser propostas de acordo com o aprofundamento das pesquisas. De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2014b), dentre os fatores que prejudicam a eficiência, pode-se destacar:

- a) Altas temperaturas reduzem a eficiência do LED, pois reduzem o fluxo luminoso emitido. Reduzir a sensibilidade do LED às variações na temperatura permitiria que ele operasse com maior eficiência. Reduzir a corrente elétrica de operação do LED por outro lado, reduziria a temperatura de operação e conseqüentemente aumentaria a eficiência. Para propor soluções para estes problemas é necessário estudar detalhadamente o processo de conversão de energia em luz pelo LED, e as propriedades dos materiais envolvidos.
- b) O LED converte eletricidade em radiação que não é visível. Para aumentar a eficiência luminosa é necessário calibrar o espectro luminoso emitido pelo LED para que mais energia seja convertida em radiação no espectro visível. Isto pode ser feito através do uso de novos materiais, como fósforos de conversão mais eficientes, ou novos designs, como hibridizar as formas de conversão da radiação (por fósforo e por combinação de cores). Os fósforos de conversão utilizados para a cor verde e âmbar são os que mais prejudicam a eficiência atualmente e necessitam de melhoramentos.
- c) Perdas de eficiência na luminária em diversos estágios, como: perdas causadas por dissipação de calor ineficiente; perdas no driver responsável pela conversão da corrente elétrica da rede para a corrente elétrica de operação; perdas na reflexão e distribuição da luz no interior na luminária até o plano de trabalho, entre outros.

Ressalta-se que os valores de eficiência luminosa em lm/W e o preço em dólares/klm são resultantes de métodos de medição normatizados, que são realizados a uma corrente elétrica e a temperatura de operação específicas. Na prática, a depender da aplicação do produto e dos seus componentes, a temperatura e a corrente elétrica de operação são diferentes daqueles supostos pelo método de medição normatizado. Isto significa que os valores de eficiência luminosa obtidos de acordo com o método, a uma temperatura e corrente elétrica específicas, podem não corresponder à realidade, pois o produto não opera nestas condições. É necessário que novos métodos de medição sejam desenvolvidos, considerando as diversas novas formas de fabricação e de operação de produtos LED, para que as medições sejam feitas de acordo com condições específicas de operação (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2014b).

Segundo Khan e Abas (2011), outros fatores determinantes para o consumo de energia de uma lâmpada ou luminária são o fator de potência e o total de distorção harmônica. O fator de potência determina a potência aparente que o sistema elétrico deverá fornecer para o equipamento, o que influi diretamente no dimensionamento do sistema elétrico. O total de distorção harmônica, quando alto, causa interferências na rede elétrica que deverão ser corrigidas com transformadores, corretores de pulso, entre outros equipamentos. Um sistema de iluminação com produtos de boa qualidade tem idealmente um alto fator de potência e um baixo total de distorção harmônica. Assim, o sistema de distribuição de energia não necessita ser superdimensionado, com maiores



geradores e linhas de transmissão. O fator de potência e o total de distorção harmônica dependem da qualidade de cada produto, mas Khan e Abas (2011) afirmam que, de modo geral, produtos LED têm melhores fatores de potência e total de distorção harmônica do que lâmpadas fluorescentes. Estes problemas podem ser resolvidos individualmente em cada equipamento ou no sistema de distribuição de energia:

Os consumidores podem evitar baixos fatores de potência e altos totais de distorção harmônica comprando produtos com filtros harmônicos e capacitores de correção de fator de potência embutidos. É mais fácil resolver o problema no local do que no sistema de distribuição de energia (KHAN; ABAS, p. 306, 2011, tradução nossa).

Naturalmente, produtos de melhor qualidade têm custos mais elevados. Estes fatores, em produtos de má qualidade, podem determinar que a companhia elétrica forneça potências aparentes de 1,5 a 2 vezes maiores que a potência real, o que significa que a companhia de energia tenha que manter até o dobro da capacidade de geração (KHAN; ABAS, 2011). Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013c), apenas 36% dos produtos listados no programa LED *Lighting Facts* especificaram os respectivos fatores de potência, o que não permite concluir definitivamente se a maioria dos produtos do mercado têm altos fatores de potência. Porém, dentre os produtos que especificaram o fator de potência, a maior parte apresenta valores acima de 0,95, o que é considerado ótimo.

Apesar da boa qualidade de iluminação apresentada por alguns produtos, que representam os principais fabricantes de LED do mercado, a qualidade da iluminação varia muito quando analisados todos os produtos do mercado. O Centro de Tecnologia da Iluminação da Califórnia (CLTC) está, atualmente, à frente do debate sobre a regulamentação de requisitos mínimos para a qualidade de iluminação LED nos Estados Unidos. Procura-se evitar a combinação entre uma regulamentação que exija apenas eficiência energética com o esforço do mercado para reduzir custos, produzindo produtos incapazes de satisfazer a função primordial de iluminar o ambiente com qualidade. Neste caso, os consumidores poderiam perder a confiança no LED neste momento crucial de inserção no mercado (CRELLY; KERLIN, 2013).

A Universidade da Califórnia (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2012), elaborou recentemente uma proposta de regulamentação para a qualidade da iluminação para LED, que teria efeito na Califórnia apenas, bem como recomendações para a inserção do produto no mercado. O objetivo é incitar o debate e a tomada de ação visando não repetir os mesmos erros cometidos quando da substituição de incandescentes por fluorescentes. As lâmpadas fluorescentes tiveram problemas de aceitação na sua fase de inserção no mercado por problemas de qualidade da cor e vida útil. As recomendações foram feitas a partir de um estudo elaborado pelo *Pacific Northwest National Laboratory*. Com base na experiência com a inserção das fluorescentes, recomenda-se:



Introduzir o produto primeiramente no mercado de nicho, em que os benefícios são claros e consistentes com as necessidades do consumidor [...]

Evitar programas de distribuição gratuita que mascarem o preço de mercado, causando espanto no consumidor quando ele tiver que comprar novamente [...]

Incentivos são mais efetivos quando direcionados aos fabricantes [...]

Os requisitos de desempenho e qualidade devem ser precisos. Os produtos não devem ser lançados antes que problemas de desempenho sejam resolvidos [...]

Programas de eficiência energética devem ser implementados quando o produto estiver disponível, mas não devem ser iniciados antes que os produtos estejam preparados (PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY, 2006, p.5-6, tradução nossa).

A Universidade da Califórnia propõe requisitos para controlar a qualidade de iluminação do LED e garantir que sejam dimerizáveis e tenham longa vida-útil. As formas de medir a qualidade da iluminação, propostas pela regulamentação voluntária são a temperatura de cor, o índice de reprodução de cores (IRC) e a direcionalidade do fecho luminoso. Fontes de luz com temperaturas de cor acima de 5000 K emitem luz branca azulada, enquanto fontes de luz com temperaturas abaixo de 4000 K emitem luz amarelada, semelhante às lâmpadas incandescentes. Não existe uma temperatura de cor ideal, mas diferentes temperaturas apropriadas para diferentes funções. O uso predominante de baixas temperaturas de cor no setor residencial é influenciado por séculos de uso de outras fontes luminosas com esta característica (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2012).

O IRC é medido em uma escala de 0 a 100, em que 100 corresponde à iluminação de uma fonte de referência. Fontes típicas de referência são a luz do dia e lâmpadas incandescentes. A medição do IRC é feita por observadores humanos e, portanto, subjetiva. Valores baixos de índice de reprodução de cores podem significar que as cores estão pouco saturadas (com aspecto pálido) ou muito saturadas (com aspecto vívido). Valores próximos de 100 indicam que mesmo cores próximas uma da outra no espectro luminoso (como o vermelho e laranja) possam ser distinguidas. O código voluntário em questão estabelece um IRC mínimo de 90 para o LED. Por fim, a especificação quanto à direcionalidade das lâmpadas deve ser clara. Sabe-se que muitas lâmpadas LED emitem fechos de luz em um ângulo reduzido e ainda assim são vendidas como omnidirecionais, isto é, que emitem luz em todas as direções. O código voluntário em questão estabelece que os produtos LED sejam classificados como omnidirecionais, projetores (*floodlight*) ou *spotlight*, e nestes dois últimos casos tenham o ângulo de iluminação especificado (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2012).

Por outro lado, existe a pressão exercida pelos financiadores para que o produto seja comercializado e traga retornos para o investidor. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012a) é um grande investidor na pesquisa, desenvolvimento e inserção no mercado da tecnologia LED, financiando os trabalhos através das leis de reinvestimento sobre a arrecadação das distribuidoras de energia. Ele estima que até



2030 as lâmpadas e luminárias LED corresponderão a 70% do estoque americano, em lúmens-hora consumidos. Isto possibilitaria 67% de economia de energia no setor de iluminação, em comparação a um cenário sem LED.

O código voluntário elaborado pela Universidade da Califórnia dialoga com o programa *Energy Star*, vigente em todo o país, o que demonstra a harmonização dos requisitos de qualidade ao menos no território dos Estados Unidos. O Programa Ambiental das Nações Unidas (2011) atenta para o fato de que a regulamentação da qualidade e da eficiência dos produtos deva ser feita de forma harmônica internacionalmente. Ele incentiva que os países adotem requisitos mínimos de qualidade para os produtos, mas recomenda que os escopos e critérios de qualidade sejam discutidos entre países fabricantes e importadores internacionalmente, para que tenham sintonia. Para lâmpadas fluorescentes, existem atualmente 48 normatizações de qualidade com efeito nacional em diversos países, cada qual com escopos e limitações diferentes e frequentemente entrando em conflito. Apesar disso, mais de 80% das lâmpadas fluorescentes são produzidas na China, país em que a legislação não é acompanhada por uma fiscalização eficiente.

Logo, a legislação em cada país importador tem apenas efeito indireto sobre os produtos. Como estas legislações são conflitantes, tornam muito mais complicado para os fabricantes atenderem aos diferentes requisitos. Para atender a diferentes regulamentos, os fabricantes teriam mais despesas sobre os custos de produção sobre volume, que poderiam chegar a 5% do custo total. Ainda assim, até hoje não existe uma regulamentação global para lâmpadas fluorescentes amplamente aceita. Iniciativas como a *Asia Lighting Compact, International CFL Harmonization Initiative, US/EC Cooperation, 4E SSL Research* e SEAD têm por objetivo encontrar consenso e harmonização entre os requisitos de qualidade e desempenho em diferentes países, mas até o momento isto não é realidade. Verifica-se que ao menos os procedimentos para teste em laboratório são harmônicos entre a maioria das regulamentações para lâmpadas fluorescentes, baseando-se em grande medida no *International Electrotechnical Commission* (PROGRAMA AMBIENTAL DAS NAÇÕES UNIDAS, 2011).

Apesar de apresentarem eficiências luminosas semelhantes às das fluorescentes atualmente, o uso de LED ainda pode ser vantajoso se forem considerados todos os impactos ambientais e a vida útil do produto. A Figura 8 mostra os resultados obtidos pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012c) comparando quinze tipos de impactos ambientais entre incandescentes, fluorescentes e LED. Estes resultados foram obtidos a partir de um método validado pela *International Organization of Standards* (ISO). Foram feitas estimativas para um produto LED com tecnologias de fabricação disponíveis em 2017, que causariam os menores impactos ambientais.

Como as lâmpadas incandescentes apresentaram os maiores impactos ambientais em todos os quesitos, os respectivos valores para outros produtos foram normalizados em relação aos apresentados pelas incandescentes. Assim, na Figura 8, para o quesito “aquecimento global”, por exemplo, o impacto causado pelo LED 2012 é de aproximadamente 25% do impacto causado por incandescentes. A comparação é feita normalizando-se os produtos para a mesma quantidade de lúmens-hora emitidos. Isto significa que uma lâmpada incandescente individualmente pode causar um menor impacto ambiental, porém como o LED tem uma vida útil muito maior são necessárias várias incandescentes para cobrir o mesmo tempo de serviço e emitir a mesma

quantidade de lumens. Os produtos LED apresentam a vantagem de não usarem materiais tóxicos em sua composição, como o mercúrio usado em lâmpadas fluorescentes.

A vida útil de uma lâmpada incandescente é de aproximadamente mil horas, enquanto a vida útil de uma fluorescente e de um LED é de 8500 e 25.000 horas, respectivamente. Para 2015, é previsto que o LED alcançará até 40.000 horas de vida útil. Durante a vida útil destes produtos, o LED é a opção mais eficiente, consumindo a menor quantidade de energia por lúmen-horas (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2012b). A Tabela 9 expõe estas relações.

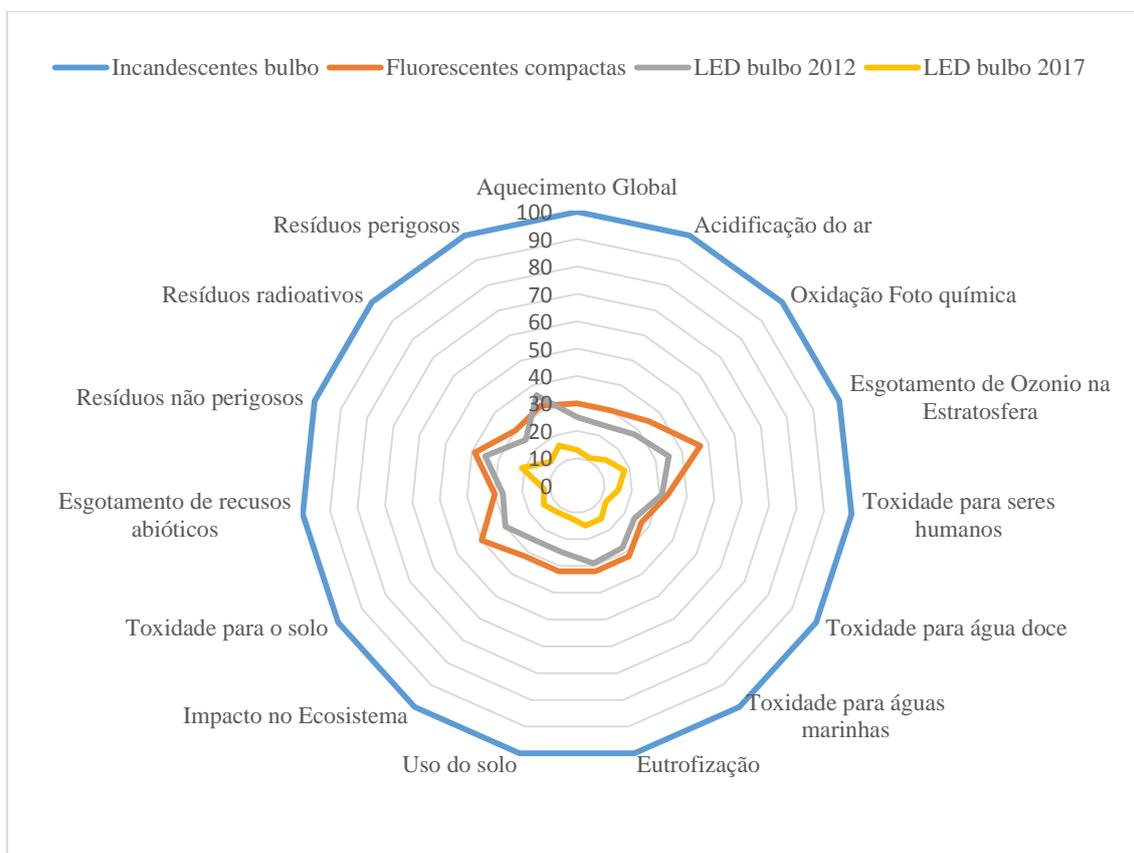


Figura 8. Comparação dos impactos ambientais entre lâmpadas bulbo (tipo A) incandescentes, fluorescentes compactas e LED bulbo.

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012c).

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012b, 2012c, 2013a) conclui que o maior impacto ambiental é causado durante a fase de uso (para todos os produtos e todos os quinze quesitos analisados), por ser a fase que consome maior quantidade de energia. O impacto ambiental durante a fase de uso representa valores de aproximadamente 90% para incandescentes e fluorescentes e de aproximadamente 80% para LED, quando comparado com o impacto em outras fases do ciclo de vida. O impacto ambiental após o descarte constitui apenas 0,1% de todo o impacto ambiental

causado por uma lâmpada fluorescente. Este valor é ainda menor para o LED (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2012c). A Figura 9 mostra as relações entre os impactos ambientais causados durante cada uma das fases de extração de matéria prima, industrialização, transporte, uso e descarte do LED.

Tabela 9. Comparação da vida útil e consumo de energia entre lâmpadas incandescentes tipo bulbo, halógenas tipo bulbo, fluorescentes compactas e LED tipo bulbo.

Tipo de lâmpada	Potência (W)	Fluxo luminoso (lm)	Vida útil (h)	Consumo de energia (MJ/20 milhões de lúmens-hora)
Incandescente	60	900	1000	15100
Halógena	43	750	1000	13000
Fluorescente Compacta	15	900	8500	3780
LED bulbo 2012	12,5	800	25000	3540
LED bulbo 2015	5,8	800	40000	1630

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012b).

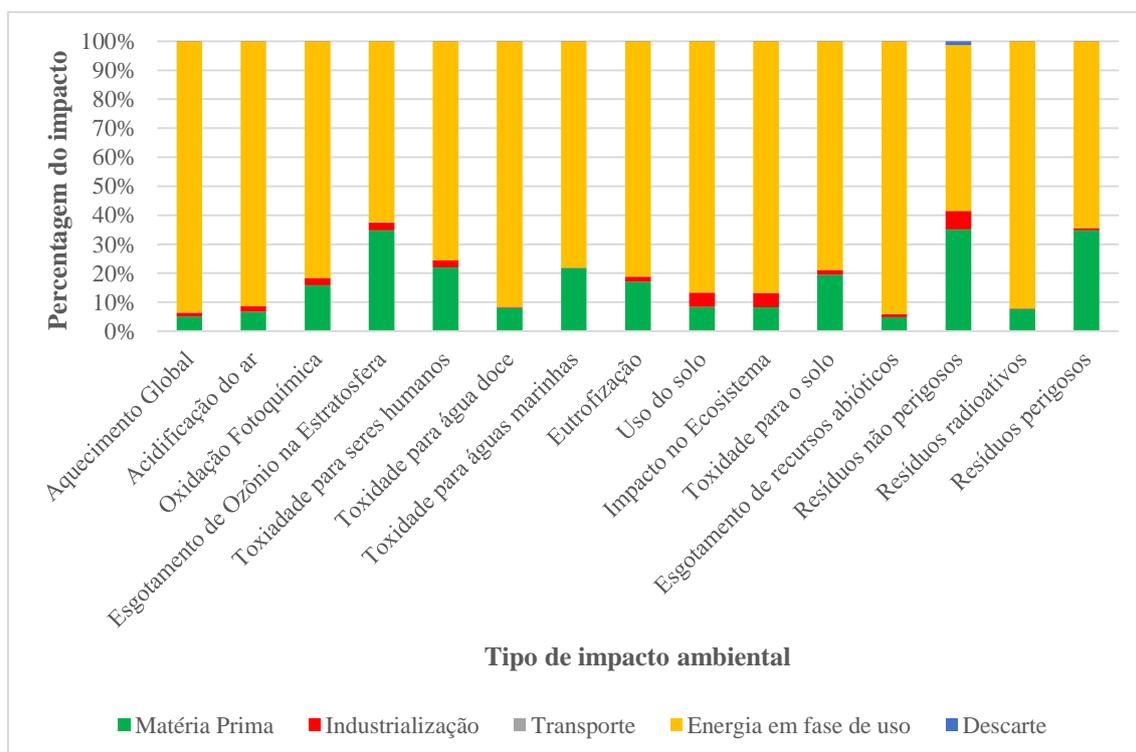


Figura 9. Percentagem do impacto ambiental em cada fase do ciclo de vida do LED.

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012c).



Ressalta-se que a análise realizada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012c) abrange o impacto durante as fases de fabricação, transporte, uso e o impacto após o descarte dos produtos. Outro estudo, realizado por Lim et al. (2013), analisa o impacto ambiental causado por cada uma das tecnologias de iluminação, mas apenas após o descarte. Quando analisado apenas o impacto ambiental após a fase de descarte do produto, as lâmpadas incandescentes são as causadoras dos menores impactos entre as três tecnologias analisadas. As fluorescentes são responsáveis pelos maiores impactos ambientais após o descarte (cerca de 3 a 26 vezes maiores que incandescentes), seguidos por LED (cerca de 2 a 3 vezes maiores que incandescentes). Estes valores também foram normalizados de acordo com a vida útil de cada lâmpada (LIM et al., 2013). O Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013a) comparou os próprios resultados com os de Lim et al. (2013) e os valores encontrados são semelhantes.

Estudos recentes sobre os efeitos da luz na saúde humana despertaram dúvidas sobre a adoção de LEDs. Estes estudos analisam os efeitos da iluminação sobre foto receptores não visuais, relacionando exposição a certos espectros luminosos a distúrbios como obesidade e insônia (CZEISLER, 2013; FONKEN et al., 2010; GOOLEY et al., 2010). O Departamento de Energia dos Estados Unidos (2014c) lembra que estes estudos não abordam especificamente a iluminação LED, mas os efeitos da iluminação em geral. Apesar de o espectro de luz do LED ser diferente de outras fontes de iluminação artificial conhecidas, não existem evidências de que ele cause danos à saúde. O espectro luminoso do LED permite flexibilidade na sua manipulação, mas para que ele seja adaptado às necessidades biológicas humanas é necessário que o conhecimento na área se aprofunde e que sejam determinadas quais características trarão benefícios aos usuários.

Analisando a trajetória dos preços de produtos LED historicamente e tendo em vista as metas de redução de custos, espera-se que em breve as lâmpadas LED já terão custos comparáveis aos produtos de iluminação tradicionais. Os preços variam muito entre cada segmento de lâmpadas e luminárias. A Tabela 10 apresenta a comparação de preços típicos para diferentes fontes de iluminação em 2013. A Tabela 11 apresenta os preços projetados para lâmpadas e luminárias LED, assumindo-se que as metas de pesquisa e desenvolvimento serão alcançadas.

Tabela 10. Preços típicos para diferentes fontes de iluminação, em 2013.

Fonte de Iluminação	Preço (US\$/klm)
Fluorescente compacta (13W, 800 lúmens)	2,00
Lâmpada Halógena (A19 43W, 750 lúmens)	2,50
Fluorescente com reator integrado	4,00
Fluorescente compacta (13W, 800 lúmens, dimerizável)	10,00
Fluorescente 6" <i>Downlight</i> (13W, T4, 500 lúmens)	10,00
Lâmpada LED (A19, 12W, 800 lúmens, dimerizável)	16,00
LED 6" <i>Downlight</i> (11,5W; 625 lúmens)	43,00
Painel OLED	500,00
Luminária OLED	1400,00

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2014b).



Tabela 11. Preços projetados para lâmpadas e luminárias LED.

Produto LED	Preço (US\$/klm)				
	2010	2015	2020	2025	2030
Lâmpada	55,16	11,25	6,28	4,36	3,34
Luminária	180,88	41,81	23,69	16,55	12,73

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2012a).

Pode-se concluir que as eficiências luminosas apresentadas pelos LEDs são próximas às encontradas para lâmpadas fluorescentes compactas e tubulares atualmente. A substituição de um produto por outro ainda é complicada, sendo necessária a análise caso a caso. É possível encontrar eficiências para LED abaixo dos valores médios encontrados para fluorescentes, o que não permite que se afirme que o LED é necessariamente sempre mais eficiente. O fluxo luminoso emitido do LED é normalmente baixo se comparado ao fluxo luminoso emitido por fluorescentes, especialmente quando se trata de lâmpadas tipo bulbo. Isso implica que em uma substituição de um produto por outro seja necessária a instalação de mais pontos de luz para se obter o mesmo fluxo luminoso. Alguns produtos novos do tipo bulbo já alcançam o fluxo luminoso das similares incandescentes, cerca de 5% dos produtos encontrados no mercado.

Espera-se que nos próximos anos o LED ultrapasse as eficiências das fontes de iluminação artificial conhecidas. As metas de pesquisa e desenvolvimento para 2025 são de produtos com eficiências luminosas maiores que 200 lm/W, vida útil de cerca de 40 mil horas e preços equivalentes aos de outras fontes de iluminação. Isto possibilitaria economias de aproximadamente 67% da energia usada para iluminação nos Estados Unidos, considerando-se que aproximadamente 65% (em lumes-hora) dos produtos de iluminação instalados naquele país serão LED.

Observa-se que o avanço na eficiência luminosa do LED se dá de forma heterogênea. Enquanto em alguns segmentos o LED tem a eficiência luminosa aprimorada rapidamente, como é o exemplo das luminárias exclusivas para LED, em outros segmentos nota-se um crescimento tímido ao longo dos anos, como é o caso do segmento que compete com halógenas MR16. Isto influencia os fabricantes a investir mais em certos segmentos e cessar a fabricação de outros. Foi notado que luminárias exclusivas para LED (*troffers*) apresentam maiores eficiências luminosas e índice de reprodução de cores que lâmpadas tubulares LED T8/T5/T12 produzidas separadamente das luminárias.

A qualidade de iluminação do LED é adequada aos parâmetros de conforto humano e comparável à qualidade das fluorescentes compactas, quando analisados os produtos de melhor qualidade. Isto indica que é possível que o LED satisfaça as necessidades visuais humanas, mas não significa que todos os produtos do mercado alcancem esta qualidade. Portanto, se faz necessária a regulamentação de requisitos mínimos de qualidade da iluminação, notavelmente o controle do IRC, temperatura de cor, vida útil, dimerização e direcionalidade do fecho de luz.

Para que não sejam cometidos os mesmos erros cometidos quando da inserção das lâmpadas fluorescentes no mercado, que atrasaram sua aceitação pelos consumidores,



são feitas recomendações. Dentre diversas medidas, recomenda-se que neste momento os produtos LED sejam direcionados a mercados de nicho e que não sejam implementados programas de eficiência energética antes que problemas de qualidade estejam resolvidos. Além disso, recomenda-se a harmonização dos requisitos de qualidade entre países exportadores e importadores a nível internacional. Isso evita que a diversidade de requisitos impossibilite a fabricação de produtos, que teriam que atender a todas as diferentes demandas. Por fim, o LED apresenta os menores impactos ambientais quando comparado com fontes de iluminação convencionais, cerca de 70% menores quando comparado com incandescentes. Não existe nenhum estudo comprovado de que o LED apresente risco à saúde humana.



REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Light's Labour's Lost. Policies for Energy-efficient Lighting**. France, 2006. Disponível em:

<<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/light2006.pdf>>. Acesso em 30 out. 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2011-2020)**. Série Estudos de energia. Nota técnica DEA 03/11. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Série%20Estudos%20de%20Energia/2010222_1.pdf>. Acesso em 30 out. 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2013**. Empresa de Pesquisa Energética. 2013. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em 12 set. 2013.

CRELLY, A.; KERLIN, K. UC Davis lighting experts push for national quality standard for LEDs. **UC Davis**. Fevereiro, 2013. Disponível em: <http://www.news.ucdavis.edu/search/news_detail.lasso?id=10483>. Acesso em 5 dez. 2013.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **Voluntary California Quality Light-Emitting Diode (LED) Lamp Specification**. A Voluntary Minimum Specification for “California Quality” LED Lamps. Dezembro, 2012. Disponível em: <<http://www.energy.ca.gov/2012publications/CEC-400-2012-016/CEC-400-2012-016-SF.pdf>>. Acesso em 05 dez. 2013.

CZEISLER, C. Perspective: Casting light on sleep deficiency. **Nature**, v. 497, n. 13, 2013.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications**. Janeiro, 2012a.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part I: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps**. Fevereiro 2012b. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012_LED_Lifecycle_Report.pdf>. Acesso em 15 jun. 2014.



DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part 2: LED Manufacturing and Performance.** Junho, 2012c. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012_led_lca-pt2.pdf>. Acesso em 15 jun. 2014.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part 3: LED Environmental Testing.** Março 2013a. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2013_led_lca-pt3.pdf>. Acesso em 15 jun. 2014.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Building Technologies Program. Solid-State lighting technology fact sheet.** Março, 2013b. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/led_energy_efficiency.pdf>. Acesso em 23 nov. 2013.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **CALiPER Snapshot Indoor Ambient Light.** Abril 2013c. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lf-snapshot_ambient-lighting.pdf>. Acesso em 04 abr. 2014.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **CALiPER Snapshot Ligh Bulbs.** Outubro 2013d. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/snapshot2013_a-lamp.pdf>. Acesso em 04 abr. 2014.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **CALiPER Snapshot MR16 Lamps.** Janeiro 2014a. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/snapshot2014_mr16.pdf>. Acesso em 04 abr. 2014.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Solid State Lighting Research and Development Multi Year Program Plan.** Abril 2014b. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2014_web.pdf>. Acesso em 18 mai. 2014.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Lighting for Health: LEDs in the New Age of Illumination.** Abril 2014c. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/light_and_health_fs.pdf>. Acesso em 18 mai. 2014.

ELETROBRÁS. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso. Ano Base 2005. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil.** Julho 2007.

FONKEN, L.; WORKMAN, J.; WALTON, J.; WEIL, Z.; MORRIS, J.; HAIMC, A.; NELSONA, R. Light at night increases body mass by shifting the time of food intake. **Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America**, v. 107, n. 43, p. 18664-18669, 2010.



GOOLEY, J.; RAJARATNAM, S; BRAINARD5,G.; KRONAUER1 R.; CZEISLER, C.; LOCKLEY, S. Spectral Responses of the Human Circadian System Depend on the Irradiance and Duration of Exposure to Light. **Science Translational Medicine**, v.2, n. 31, p. 31-33, 2010.

KHAN, N.; ABAS, N. Comparative study of energy saving light sources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, p. 296–309, 2011.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. **MASTER LEDspot D 9.5-75W 840 PAR30S 25D.**

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000259002_eu/929000259002_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em: 29 out. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. **MASTER LEDbulb D 13-75W E27 827 A67.**

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000242802_eu/929000242802_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 29 out. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. **MASTER LEDcandle D 4-25W E14 WW B35 FR.**

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000214402_eu/929000214402_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 29. out 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. **MASTER LEDluster D 4-25W E14 WW P45 FR.**

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000214602_eu/929000214602_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 29 out. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. **MASTER LED 12.5W 2700K 110-130V A19 Dimm.**

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000188502_eu/929000188502_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 29 out. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. **ESSENTIAL LEDtube 600mm 10W740 T8 AP I.**

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000296808_eu/929000296808_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 29 out. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. **CorePro LEDtube 1500mm 25W 840 I.**

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000280102_eu/929000280102_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 29 out. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. **ESSENTIAL LEDtube 1200mm 20W830 T8 AP I.**

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000298008_eu/929000298008_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 22 nov. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. **Master LEDtube Internal Standard 1200mm.**

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000296008_eu/929000296008_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 22 nov. 2013.



KONINKLIJKE PHILIPS N.V. Master LEDtube Internal Standard 1500mm.

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/929000296108_eu/929000296108_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 22 nov. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. Master TL5 High Output Eco. Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/927991884031_eu/927991884031_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 22 nov. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. Master TL5 High Efficiency Eco. Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/927989883031_eu/927989883031_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 22 nov. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. Master TL-D Standard Colours. Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/928048005440_eu/928048005440_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 22 nov. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. Master TL5 High Outoput Eco Plus. Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/927995583031_eu/927995583031_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 22 nov. 2013.

KONINKLIJKE PHILIPS N.V. Master TL5 High Efficiency Xtra Eco.

Especificações técnicas. 2013. Disponível em:

<http://download.p4c.philips.com/14b/9/927994583055_eu/927994583055_eu_pss_brpb_r.pdf>. Acesso em 22 nov. 2013.

LAMONICA, M. Already efficient, LED lights get smarter. **MIT Technology Review**.

Abril, 2013. Disponível em: <<http://www.technologyreview.com/view/513786/already-efficient-led-lights-get-smarter/>>. Acesso em 05 dez. 2013.

LG. LED BULB 14W A1914GC0GG1.C0AAWAA. Especificações técnicas. 2013.

Disponível em: <<http://www.lge.com/br/iluminacao/lg-A1914GC0GG1.C0AAWAA>>. Acesso em 29 out. 2013.

LG. LED BULB 12.8W A1912GD0GEB.C0AASAA. Especificações técnicas. 2013.

Disponível em: <<http://www.lge.com/br/iluminacao/lg-A1912GD0GEB.C0AASAA>>. Acesso em 29 out. 2013.

LG. LED BULB 7.5W LB08E827L0A.E20JWE0. Especificações técnicas. 2013.

Disponível em: <<http://www.lge.com/br/iluminacao/lg-LB08E827L0A.E20JWE0>>. Acesso em 29 out. 2013.

LG. LED TUBE 4,000K T4B22BD3FEA.C0AAWAA. Especificações técnicas. 2013.

Disponível em: <<http://www.lge.com/br/iluminacao/lg-T4B22BD3FEA.C0AAWAA>>. Acesso em 29 out. 2013.



LG. LED TUBE 5,000K T4B22BD5FEA.C0AAWAA. Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.lge.com/br/iluminacao/lg-T4B22BD5FEA.C0AAWAA>>. Acesso em 29 out. 2013.

LIM, S.; KANG, D.; OGUNSEITAN, O.; SCHOENUNG, J. Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs. **Environmental Science & Technology**, v. 47, p. 1040-1047, 2013.

OSRAM. **LEDOTRON Product Description.** Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.osram.com.br/media/resource/hires/345921/ledotron-gb.pdf>>. Acesso em 29 out. 2013.

OSRAM. **Product Information. LED STAR CLASSIC A15/B15/P15 clear.** Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.osram.com.br/media/resource/hires/350626/ti-sheet-led-star-classic-a15b15p15.pdf>>. Acesso em 29 out. 2013.

OSRAM. **SubstiTUBE® Advanced - ST8-HA2. Datasheet.** Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.osram.com.br/media/resource/hires/383484/substitube-advanced---st8-ha2.pdf>>. Acesso em 29 out. 2013.

OSRAM. **SubstiTUBE® Basic - ST8-HB2. Datasheet.** Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.osram.com.br/media/resource/hires/349682/substitube-basic-st8-hb2-datasheet-gb.pdf>>. Acesso em 29 out. 2013.

PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY. **Compact Fluorescent Lighting in America: Lessons Learned on the Way to the Market.** Washington, Junho, 2006. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/cfl_lessons_learned_web.pdf>. Acesso em 06 dez. 2013.

PROGRAMA AMBIENTAL DAS NAÇÕES UNIDAS. **Assessment of Opportunities for Global Harmonization of Minimum Energy Performance Standards and Test Standards for Lighting Products.** Collaborative Labelling and Appliance Standards Program, 2011. Disponível em: <http://www.enlighten-initiative.org/portals/0/documents/Newsletter/newsletter3/062011_CLAS%20report.pdf>. Acesso em 30 out. 2013.

RYCKAERT, W.R.; SMET, K.A.G.; ROELANDTS, I.A.A.; VAN GILS, M.; HANSELAER, P. Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation. **Energy and Buildings**, v. 49, p.429-436, 2012.

SAMSUNG. **B12 Candle LED Bulb (25W).** Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.samsung.com/us/appliances/led-lighting/SI-A8W031180US-specs>>. Acesso em 29 out. 2013.

SAMSUNG. **B12 Candle LED Bulb (40W).** Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.samsung.com/us/appliances/led-lighting/SI-A8W051180US-specs>>. Acesso em 29 out. 2013.



SAMSUNG. A19 LED Light Bulb (40W). Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.samsung.com/us/appliances/led-lighting/SI-I8V101180US-specs>>. Acesso em 29 out. 2013.

SAMSUNG. A19 LED Light Bulb (40W). Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.samsung.com/us/appliances/led-lighting/SI-I8V101180US-specs>>. Acesso em 29 out. 2013.

SAMSUNG. A19 LED Light Bulb (60W). Especificações técnicas. 2013. Disponível em: <<http://www.samsung.com/us/appliances/led-lighting/SI-I8W121140US-specs>>. Acesso em 29 out. 2013.

SAMSUNG. PAR20 LED Light Bulb (50W). Especificações técnicas. 2013. Disponível em:
<<http://www.samsung.com/us/appliances/led-lighting/SI-P8V072AB0US-specs>>. Acesso em 29 out. 2013.

SAMSUNG. PAR30 LED Light Bulb (15W). Especificações técnicas. 2013. Disponível em:
<<http://www.samsung.com/us/appliances/led-lighting/SI-P8V152BB0US-specs>>. Acesso em 29 out. 2013.