

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

DANIEL DELGADO BOUTS

**Economia de Energia Decorrente da Inserção da Tecnologia
LED na Iluminação Residencial**

**Itajubá
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

DANIEL DELGADO BOUTS

**Economia de Energia Decorrente da Inserção da Tecnologia
LED na Iluminação Residencial**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Engenharia de Energia

Orientador: Prof^o. Dr. Jamil Haddad.

Co-Orientador: Prof^o. Dr. Roberto Akira Yamachita.

**Itajubá
2016**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial desta dissertação, por qualquer meio convencional ou digital para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Daniel Delgado Bouts

Graduou-se em Arquitetura e Urbanismo na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) em 1995. Obteve o título de MBA em Gerência de Projetos pela FGV (Fundação Getúlio Vargas) em 2008.



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
 Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Título da Dissertação: "Economia de energia decorrente da inserção da tecnologia LED na iluminação residencial"

Autor: Daniel Delgado Bouts

JULGAMENTO

| Examinadores | Conceito A = Aprovado - R = Reprovado | Rubrica |
|--------------|--|---------|
| 1º | A | |
| 2º | A | |
| 3º | A | |
| 4º | A | |

Resultado Final: Conceito final: A, ou seja, aprovado

Observações: _____

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado (A) se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado (R) se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado no Conceito final como Insuficiente (I) se for atribuído um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Itajubá, 20 de Julho de 2016.

Prof. Dr. Roberto de Mattos
 1º Examinador – Fundação ROGE

Prof. Dr. Luiz Augusto Korta Nogueira
 2º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Roberto Akira Yamachita
 3º Examinador (Co-orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Jamil Haddad
 4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

Aos meus pais, esposa, filhas e demais familiares e colegas.

Agradecimentos

Em primeiro a Deus que sempre esteve comigo em todas as decisões da minha vida.

Ao meu orientador, Professor Dr. Jamil Haddad, aos professores da Unifei, ao meu Co-Orientador Professor Dr. Roberto Akira Yamachita e Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira pelo incentivo e apoio dado na elaboração desta dissertação.

Aos gerentes da Eletrobras Luiz Eduardo Menandro e Rafael Meirelles David pela oportunidade oferecida em coordenar “Programa do Selo Procel para lâmpadas LED”, sem a qual não seria possível desenvolver este estudo acadêmico, bem como aos colegas George Camargo dos Santos, Marcelo dos Santos e Moises Antônio dos Santos pelo auxílio na formatação da Dissertação.

Por fim aos familiares, em especial minha esposa Andréa, minhas filhas e meus pais.

Resumo

BOUTS, Daniel Delgado. **Economia de Energia Decorrente da Inserção da Tecnologia LED na Iluminação Residencial**. Dissertação de Mestrado. Ciências em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, julho de 2016. Orientador: Prof. Jamil Haddad, Dr.

Nos últimos dez anos, o mercado brasileiro de iluminação vem passando por progressivas transformações em função da introdução da tecnologia dos diodos emissores de luz, ou LEDs (*light emitting diodes*), nos mais diversos sistemas de iluminação, suscitando a necessidade da realização de estudos para avaliar os impactos que essa tecnologia pode trazer para o país. Com esse intuito, estimou-se o potencial técnico de economia de energia com a substituição integral das lâmpadas fluorescentes (compactas e tubulares) por lâmpadas LED nas residências brasileiras. O estudo tem como premissa básica que as lâmpadas incandescentes já teriam sido integralmente substituídas por lâmpadas fluorescentes compactas em função da entrada em vigor da Portaria Interministerial N° 1.007, de 31 de dezembro de 2010. Além do potencial técnico, o estudo contempla uma avaliação econômica baseada na posse média estimada de uma residência típica brasileira proposta para este trabalho. Com base no estudo realizado concluiu-se que o potencial técnico de economia de energia com a substituição das lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED, no ano de 2018, é de aproximadamente de 3,24 TWh/ano, o que equivaleria a aproximadamente 2,45% do consumo residencial em 2014, resultando em um potencial técnico de redução da emissão de 252,9MtCO₂/ano. A avaliação econômica proposta demonstrou que a partir de aproximadamente 315h anuais de operação, um sistema de iluminação com lâmpadas LED já se mostraria mais vantajoso que o de lâmpadas fluorescentes.

Palavras-Chaves: (1) Eficiência energética; (2) Potencial técnico; (3) Lâmpadas fluorescentes; (4) Lâmpada LED.

Abstract

BOUTS, Daniel Delgado. **Energy saving due to the insertion of LED technology in the residential lighting**. Dissertation (Master of Science in Energy Engineering), Department of Energy Engineering, Federal University of Itajubá. July 2016. Advisor: PhD. Professor Jamil Haddad.

In the last ten years, the Brazilian lighting market has experienced progressive transformations due to the introduction of the light emitting diodes (LED) technology, in a variety of lighting systems, indicating the need for studies to assess the impact this technology may bring to the country. In order to evaluate such impact, the energy saving technical potential was estimated with the total replacement of fluorescent lamps (compact and tubular) by LED ones in Brazilian households. The present study has as a basic assumption that the incandescent lamps would already be replaced by compact fluorescent ones, thanks to the entry into force of the Interministerial Ordinance No. 1007 of 31 December 2010. Besides the technical potential, this study includes an economic assessment based on the average estimated ownership of a typical Brazilian household, proposed for this work. Based on the study carried out, it can be concluded that the technical potential for energy savings, with the replacement of fluorescent lamps by LED lamps, in the year 2018, is of approximately 3.24 TWh/year, which would be equivalent to about 2.45% of the residential consumption in 2014, and which would result in a technical potential of emission reduction of 252.9 MtCO₂/year. The proposed economic evaluation demonstrated that from about 315 hours/year of operation, a lighting system with LED lamps would prove more advantageous than the fluorescent lamp system.

Keywords: (1) Energy efficiency; (2) Technical potential; (3) Fluorescent lamps; (4) LED lamps.

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Evolução do consumo de energia mundial por fonte | 19 |
| Figura 2 – Gráfico da evolução do volume de vendas de lâmpadas fluorescentes importadas no Brasil | 25 |
| Figura 3 – Consulta site AliceWeb | 25 |
| Figura 4 - Abordagem do modelo de avaliação do impacto energético..... | 29 |
| Figura 5 - Visão esquemática do modelo de avaliação do impacto energético | 30 |
| Figura 6 - Espectro eletromagnético da luz visível..... | 35 |
| Figura 7 - Espectro da radiação solar..... | 36 |
| Figura 8 - Decomposição da luz branca..... | 37 |
| Figura 9 – Fluxo luminoso emitido pela lâmpada..... | 39 |
| Figura 10 – Iluminância | 39 |
| Figura 11 – Luminância | 40 |
| Figura 12 – Evolução da eficiência das fontes de luz..... | 40 |
| Figura 13 – Aparência de diferentes temperaturas de cor..... | 41 |
| Figura 14 - Efeito Kruithof | 42 |
| Figura 15 - Padrão de cores IRC | 43 |
| Figura 16 - Localização do espermacete..... | 45 |
| Figura 17 – Lâmpada a óleo..... | 46 |
| Figura 18 – Lâmpada de Argand..... | 46 |
| Figura 19 – Lâmpada a gás | 47 |
| Figura 20 – Lâmpada incandescente | 49 |
| Figura 21 – Lâmpada fluorescente..... | 50 |
| Figura 22 - Lâmpada fluorescente compacta | 50 |
| Figura 23 – Lâmpada halógena | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 24 – Lâmpada halógena | 51 |
| Figura 25 – LED MV1 da Monsanto (1968)..... | 52 |
| Figura 26 – LED DIP desenvolvido em 1962 por Nick Holonyak..... | 53 |
| Figura 27 – Lâmpada LED azul | 54 |
| Figura 28 – Formação das bandas de energia eletrônica | 56 |
| Figura 29 - Estruturas de bandas de energia eletrônica | 56 |
| Figura 30 – Bandas de energia possíveis | 57 |
| Figura 31 – Camada de depleção | 59 |
| Figura 32 – Emissão de radiação de uma junção semicondutora | 59 |
| Figura 33 - LED DIP..... | 61 |
| Figura 34 – LED SMD..... | 62 |
| Figura 35 – LED COB | 63 |
| Figura 36 – Logo do Programa <i>Energy Star</i> | 67 |
| Figura 37 – Etiqueta FTC <i>Lighting Facts</i> | 68 |
| Figura 38 – Etiqueta LED <i>Lighting Facts</i> | 70 |
| Figura 39 – Etiquetas comparativas para lâmpadas e luminárias da EU | 71 |
| Figura 40 – Selo <i>Ecolabel</i> | 72 |
| Figura 41 – Equipamentos regulamentados pelo CGIEE (2002 à 2014)..... | 75 |
| Figura 42 - Ence para coletores solares | 76 |
| Figura 43 - Ence para lâmpada LED tipo bulbo e tubular | 77 |
| Figura 44 – Classificação quanto à distribuição do fluxo luminoso | 78 |
| Figura 45 – Lâmpada filamento LED decorativa..... | 79 |
| Figura 46 – Lâmpada tubular LED | 79 |
| Figura 47 – Selo Procel..... | 80 |
| Figura 48 – Lâmpada LED tipo bulbo e tubular | 82 |
| Figura 49 - Relação entre a renda domiciliar e o consumo de energia elétrica | 96 |

| | |
|---|-----|
| Figura 50 - Cenários de entrada da lâmpada LED no mercado | 103 |
| Figura 51 – Fluxo de caixa das lâmpadas fluorescentes | 108 |
| Figura 52 – Fluxo de caixa das lâmpadas LED | 108 |
| Figura 53 - Fluxo de caixa da análise | 108 |
| Figura 54 – Custo anual de operação LED X LF..... | 110 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Economia de Energia em iluminação..... | 28 |
| Tabela 2 – Potencial técnico de redução no consumo de energia elétrica com a política no Brasil em 2012..... | 31 |
| Tabela 3 – Eficiência luminosas das lâmpadas | 41 |
| Tabela 4 – Uso de materiais semicondutores para gerar luz LED | 60 |
| Tabela 5 – Ensaio de tipo | 79 |
| Tabela 6 – Categorias de equipamentos contemplados com o Selo Procel | 81 |
| Tabela 7 – Valores mínimos de eficiência para lâmpadas tubulares | 83 |
| Tabela 8 – Estimativa do consumo regional de energia elétrica da iluminação residencial em 2005 | 86 |
| Tabela 9 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Norte em 2005..... | 86 |
| Tabela 10 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Nordeste em 2005. | 87 |
| Tabela 11 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Sudeste em 2005. | 87 |
| Tabela 12 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Sul em 2005. | 88 |
| Tabela 13 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Centro-Oeste em 2005. | 88 |
| Tabela 14 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada do Brasil em 2005..... | 89 |
| Tabela 15 – Equivalência entre LIs, LFCs e lâmpadas LED | 89 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 16 – Fluxo luminoso para equivalência de potência | 90 |
| Tabela 17 – Potencial técnico de conservação de energia elétrica | 91 |
| Tabela 18 – Variação número total de domicílios permanentes ocupados Brasil, 2005-2030 | 92 |
| Tabela 19 – Bandeiras tarifárias..... | 95 |
| Tabela 20 – Percentual das amostras de lâmpada de uso habitual por tipo e por faixa de consumo . | 97 |
| Tabela 21 – Percentual de amostras de lâmpada de uso habitual por tipo e por faixa de consumo .. | 97 |
| Tabela 22 – Percentual de lâmpadas por potência e faixa de consumo | 98 |
| Tabela 23 – Cálculo do cenário 1..... | 99 |
| Tabela 24 – Cálculo do cenário 2..... | 100 |
| Tabela 25 – Cálculo do cenário 3..... | 100 |
| Tabela 26 – Cálculo do cenário 4..... | 101 |
| Tabela 27 – Cálculo do cenário 5..... | 101 |
| Tabela 28 – Posse média por tipo de lâmpada no setor residencial brasileiro em 2005 | 104 |
| Tabela 29 – Posse média por tipo de lâmpada fluorescente | 105 |
| Tabela 30 – Posse média da residência típica brasileira proposta | 105 |
| Tabela 31 – Dados utilizados na análise | 107 |
| Tabela 32 – Resultados encontrados | 109 |
| Tabela 33 – Fatores de Emissão de CO ₂ do SIN para inventários de 2010 à 2015 | 111 |
| Tabela 34 – Potencial técnico de redução na emissão de carbono (tCO ₂ e) | 112 |
| Tabela 35 – Cenários propostos | 113 |

Lista de siglas e abreviações

| | |
|---------|--|
| Abilux | Associação Brasileira da Indústria de Iluminação |
| Abib | Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável |
| Aneel | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| BEN | Balanco Energético Nacional |
| CE | Comissão Europeia |
| CEE | Comunidade Econômica Europeia |
| cf. | Conforme |
| CGIEE | Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética |
| DOE | <i>The U.S Department of Energy</i> |
| EIA | <i>U.S. Energy Information Administration</i> |
| Ence | Etiqueta Nacional de Conservação de Energia |
| EPA | <i>Environmental Protection Agency</i> |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| GEF | Fundo Global para o Meio Ambiente |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IESNA | <i>Illuminating Engineering Society of North America</i> |
| iNDC | <i>Intended Nationally Determined Contribution</i> |
| Inmetro | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| IPCC | Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas |
| LED | <i>Light Emitting Diode</i> |
| LF | Lâmpada fluorescente |
| LFC | Lâmpada fluorescente compacta |
| LFT | Lâmpada fluorescente tubular |
| LI | Lâmpada Incandescente |
| MCTI | Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações |
| MDL | Mecanismo de Desenvolvimento Limpo |

| | |
|--------|---|
| MME | Ministério de Minas em Energia |
| PBE | Programa Brasileiro de Etiquetagem |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PNE | Plano Nacional de Energia |
| PNUD | Programa das Nações Unidas para Desenvolvimento |
| PNUMA | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente |
| PPH | Pesquisa de Posse de equipamentos e Hábitos de consumo de energia elétrica |
| PROCEL | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica |
| s/d | Sem Data |
| s/l | Sem Local |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| SINPHA | Simulador Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos |
| UE | União Europeia |
| UNFCCC | <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> |

Sumário

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | Introdução..... | 19 |
| 1.1 | Objetivo..... | 26 |
| 1.2 | Estrutura da dissertação..... | 27 |
| 2 | Revisão bibliográfica..... | 28 |
| 3 | Conceitos de iluminação e luminotécnica..... | 35 |
| 3.1 | A luz..... | 35 |
| 3.2 | Cor..... | 38 |
| 3.3 | Fluxo luminoso..... | 38 |
| 3.4 | Iluminância..... | 39 |
| 3.5 | Luminância..... | 39 |
| 3.6 | Eficiência luminosa (lm/W)..... | 40 |
| 3.7 | Temperatura de cor correlata – TCC..... | 41 |
| 3.8 | Índice de reprodução de cor..... | 42 |
| 3.9 | Vida útil..... | 43 |
| 4 | Evolução da iluminação..... | 44 |
| 4.1 | Fogo..... | 44 |
| 4.2 | Tochas..... | 44 |
| 4.3 | Vela..... | 45 |
| 4.4 | Lâmpada a óleo..... | 46 |
| 4.5 | Lâmpada a Gás..... | 47 |
| 4.6 | Lâmpada a querosene..... | 48 |
| 4.7 | Lâmpada incandescente..... | 48 |
| 4.8 | Lâmpada fluorescente..... | 49 |
| 4.9 | Lâmpada halógena..... | 50 |
| 4.10 | Diodo emissor de luz..... | 51 |
| 4.10.1 | Histórico..... | 51 |
| 4.10.2 | Funcionamento dos LEDs..... | 55 |
| 4.10.3 | Tecnologia dos LEDs..... | 60 |
| 4.10.3.1 | Primeira geração: LED DIP “Dual In-line Package”..... | 60 |
| 4.10.3.2 | Segunda geração: LED SMD “Surface Mounted Device”..... | 61 |
| 4.10.3.3 | Terceira geração: LED COB “Chip On Board”..... | 62 |
| 5 | Programas de eficiência energética em equipamentos..... | 64 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1 | Padrões de eficiência energética | 64 |
| 5.2 | Etiquetagem de eficiência energética | 65 |
| 5.3 | Programas de eficiência energética em equipamentos pelo mundo | 66 |
| 5.3.1 | <i>Energy Star</i> | 66 |
| 5.3.2 | <i>FTC Lighting Facts</i> | 67 |
| 5.3.3 | <i>LED Lighting Facts</i> | 68 |
| 5.3.4 | Etiquetagem europeia | 70 |
| 5.3.5 | Ecolabel | 71 |
| 5.4 | Programas de eficiência energética em equipamentos no Brasil | 73 |
| 5.4.1 | Lei de eficiência energética (Lei 10.295/2001) | 74 |
| 5.4.2 | Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) | 75 |
| 5.4.3 | Selo Procel de Economia de Energia | 80 |
| 6 | Economia de energia devido à inserção da tecnologia LED | 84 |
| 6.1 | Metodologia para cálculo do potencial técnico de economia de energia devido à inserção da tecnologia LED | 84 |
| 6.2 | Cálculo do potencial técnico de economia de energia elétrica | 91 |
| 6.3 | Cenários de entrada da lâmpada LED no mercado | 94 |
| 6.3.1 | Relação do preço da lâmpada LED com a LFC | 94 |
| 6.3.2 | Bandeiras tarifárias | 95 |
| 6.3.3 | Distribuição de uso de lâmpadas por faixa de consumo | 96 |
| 6.3.4 | Cenários estabelecidos | 98 |
| 6.4 | Análise econômica da substituição de LFs por lâmpadas LED | 104 |
| 6.5 | Impactos ambientais devido à inserção da tecnologia LED | 111 |
| 7 | Conclusões e recomendações para trabalhos futuros | 113 |
| 8 | Referências bibliográficas | 116 |

“Luz do sol
Que a folha traga e traduz
Em verde novo
Em folha, em graça
Em vida, em força, em luz...”.

(Caetano Veloso)

1 Introdução

O impacto do modelo econômico-social predominante vem sendo apontado como um dos principais fatores para um possível colapso das condições de sobrevivência no nosso planeta.

Nesse contexto, o conceito de sustentabilidade vem ganhando cada vez mais espaço e impulsionando, entre outras ações, o desenvolvimento de novas tecnologias que possam ajudar a minimizar os impactos negativos da intervenção do homem no nosso planeta. Um dos principais vetores de atuação seria a promoção da eficiência energética de equipamentos utilizados nas diversas atividades humanas, seja industrial, comercial ou residencial.

Os ciclos de desenvolvimento da humanidade sempre estiveram associados, entre outros aspectos, à descoberta de novas tecnologias e novas fontes de energia, principalmente a partir do final do século XIX, impulsionada pela Segunda Revolução Industrial e os desafios impostos pelas duas guerras mundiais; e na sequência do pós-guerra, em consequência do crescimento populacional associado ao consumo de massa (Figura 1).

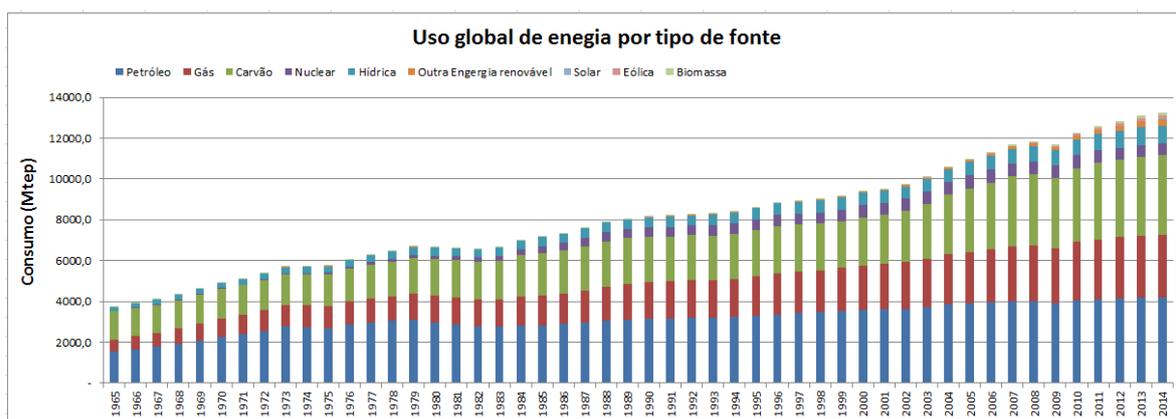


Figura 1 – Evolução do Consumo de energia mundial por fonte
Fonte: British Petroleum (2015)

De acordo com Nogueira (2007):

Um dos marcos da vertiginosa evolução tecnológica da sociedade moderna é o notável incremento na demanda de energia, em todas as suas formas, determinando uma crescente complexidade dos sistemas energéticos, entendidos como a cadeia de processos de conversão e armazenamento que conecta os recursos naturais aos usuários finais de energia. Enquanto nas sociedades primitivas a fonte exógena básica de energia, não-muscular, era essencialmente a lenha, obtida na proximidade do local de uso, complementada eventualmente pelo vento ou pela força de uma queda d'água, atualmente é quase impossível para um usuário de energia conhecer com clareza de onde veio e por quais processos passou a eletricidade que utiliza em sua residência ou o combustível que abastece seu carro, vetores energéticos produzidos em fontes múltiplas e que circulam por sistemas de transporte interconectados, antes de serem convertidos finalmente em calor útil, trabalho e iluminação, para mencionar alguns usos mais significativos da energia.

Segundo o Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC, 2014), a influência humana sobre o sistema climático é clara. As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa vêm aumentando consideravelmente desde a era pré-industrial, impulsionadas principalmente pelo crescimento econômico e populacional, fazendo com que as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso estejam em um nível sem precedentes, sendo essa a provável causa determinante do aquecimento observado desde meados do século XX.

Na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Cnumad), realizada em 1992, na cidade do Rio de Janeiro, também denominada por “Cúpula da Terra”, “Cimeira da Terra”, “Rio 92” ou “Eco-92”, representantes de 172 países consolidaram uma agenda global para minimizar os problemas ambientais mundiais. Entre as propostas geradas (Declaração do Rio, Agenda 21, Declaração de Princípio sobre as Florestas, Convenção sobre a Diversidade Biológica, etc.), destaca-se a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), cujo documento o Brasil foi o primeiro país a assinar, passando a vigorar em 29 de maio de 1994 (MMA, 2008).

O órgão supremo da UNFCCC é a Conferência das Partes (COP), realizada anualmente, sendo que sua primeira edição foi sediada em Berlim (1995) e a última (21^a) em Paris (2015). A próxima edição será em Marrakech, no Marrocos. Nessas reuniões são discutidas medidas relacionadas à governança climática global, responsáveis por expressivos resultados como o Protocolo de Kyoto em 1997, que, entre outros compromissos, estabeleceu metas de redução de emissões para países desenvolvidos e a transferência de recursos tecnológicos e financeiros para países em desenvolvimento. Para isso, a Convenção estabeleceu mecanismos operacionais, como o Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), estabelecido pelo Banco Mundial, pelo Programa das Nações Unidas para Desenvolvimento (PNUD) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

Na última Conferência das Partes (COP-21) de Paris, foi assinado o Acordo de Paris, no qual o Brasil, através da “Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada” (iNDC), se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025 e apresentou o indicativo de redução de 43%, até 2030. Ambos são comparados aos níveis de 2005. Para isso, o país se compromete a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030 (MMA, 2015). Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável (ABIB), nesse acordo, a eficiência energética foi reconhecida como uma ferramenta eficaz para a redução das emissões de gases de efeito estufa, representando cerca de 40% das reduções de emissões até 2050 necessárias para limitar o aumento da temperatura global. Relativamente ao Brasil, as conclusões da COP-21 apontam que o investimento em eficiência energética pode reduzir os custos líquidos com descarbonização em 13 bilhões de dólares, o que corresponde a 0,32% do PIB do país em 2030.

Considerada durante muitos anos como uma opção para os países desenvolvidos reduzirem a sua dependência do petróleo e conter as emissões de dióxido de carbono, a eficiência energética se

consolidou pelos especialistas e políticos de todo o mundo como um meio de alcançar a necessária transição para sistemas energéticos sustentáveis.

Especialmente nos últimos anos, a eficiência energética tem recebido grande atenção de governos, com destaque nas edificações, tendo em vista o seu potencial de conservação de energia. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2010), os edifícios representam atualmente 40% do consumo de energia na maioria dos países, o que posiciona esse setor como um dos mais rentáveis para redução de consumo de energia, com potencial de economia estimado em 1509 milhões de toneladas de petróleo equivalentes (Mtep) até 2050. Do ponto de vista ambiental, a redução da demanda global de energia, através da melhoria da eficiência energética em edifícios, pode traduzir-se em uma possível mitigação de 12,6 gigatoneladas (Gt) de emissões de CO₂ em 2050.

Com o objetivo de reduzir as suas emissões de CO₂, criar novos empregos e diminuir a sua dependência das importações de energia, a eficiência energética figura entre as grandes ferramentas para que o consumo total de energia da UE no ano de 2020 sofra uma redução correspondente a 20% do nível de consumo em 1990, o que equivaleria a desligar mais de 400 centrais elétricas (COMISSÃO EUROPEIA, 2014). Os edifícios também constituem um setor fundamental, dado que consomem 40% da energia, sobretudo sob a forma de calor (que representa oito décimos desse consumo), e são responsáveis por 36% dos gases com efeito de estufa emitidos na UE. (COMISSÃO EUROPEIA, s/d).

No Brasil, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2015), as edificações foram responsáveis por cerca de 50% de toda a energia elétrica consumida no País, as quais se distribuem entre os setores residencial (25%), comercial (17%) e público (8%).

O consumo de energia do setor residencial é fortemente impactado pelo número de domicílios, pelo perfil de posse dos equipamentos e pela evolução dos índices de eficiência energética. Segundo estimativas do Plano Nacional de Energia 2030 (EPE 2007), o número de domicílios particulares permanentes com energia elétrica passará de aproximadamente 63 milhões em 2012 para cerca de 76 milhões de unidades em 2021. Outro fator impactante no consumo de energia é o aumento da renda per capita, que, segundo estimativas do Estudo de Demanda de Energia para 2050 (EPE 2014), será de

aproximadamente R\$ 78,5 mil ao ano, representando 3,5 vezes a renda per capita atual. Como resultado desse contexto, estima-se que o setor residencial brasileiro passe a consumir aproximadamente 212 TWh adicionais em relação a 2013, representando aproximadamente 65% do consumo total de energia elétrica brasileira nesse ano.

Se essas estimativas se confirmarem, mesmo que parcialmente, para que se possa garantir a segurança energética do país, novas usinas térmicas serão necessárias para garantir a operação do sistema, tendo em vista a impossibilidade de contruir novas usinas hidrelétricas com reservatórios de grande porte. Essa tendência faz com que haja uma matriz mais poluente, especialmente com o avanço das usinas a carvão. Uma das alternativas para minimizar os impactos ambientais seria um melhor aproveitamento da capacidade geradora instalada, como exemplo, através mercado de produtos mais eficientes das lâmpadas a base de diodos emissores de luz ou simplesmente lâmpadas LED.

Desde a década de 60, a tecnologia dos LEDs já vem sendo empregada no mercado de equipamentos eletrônicos, principalmente em luzes indicativas do estado de funcionamento de produtos eletroeletrônicos, entretanto, apenas na última década, a sua aplicação nos produtos de iluminação tornou-se viável, como por exemplo: semáforos, lanternas de automóveis e equipamentos para iluminação pública, residencial e comercial, etc. A utilização da tecnologia LED não só resulta em uma considerável economia no uso de energia elétrica, mas, além disso, reduz custos de manutenção (HELD, 2009).

Assim como as lâmpadas fluorescentes compactas, praticamente toda a produção de lâmpadas LED se concentra na China, sendo exportados para o mundo em um processo extremamente globalizado. Nos últimos anos, grandes esforços nacionais e internacionais foram direcionados para promover o desenvolvimento e a adoção de produtos de iluminação energeticamente mais eficientes, com foco na tecnologia LED (CLASP, 2012).

Nos EUA, a Lei de Independência e Segurança Energética (EISA) de 2007 estabeleceu uma política de energia destinada a fazer melhor uso dos recursos e assim ajudar os EUA a tornar-se independente em energia, prevendo benefícios importantes para o país e o meio ambiente (EPA, 2011).

Parte desta lei estabelece níveis mínimos de eficiência energética, válidos para todos os tipos de lâmpadas, fazendo com que, na prática, todas as lâmpadas incandescentes de uso comum fossem gradualmente banidas do mercado, sendo que a primeira fase entrou em vigor a partir de janeiro de 2012.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) emitiu um relatório que apresenta as principais aplicações onde as lâmpadas LED já se tornaram competitivas com as fontes de luz tradicionais. Entre elas, destacam-se as lâmpadas LED em substituição às LIs e LFCs, representando uma das maiores oportunidades para a indústria de Iluminação a LED em termos de economia de energia e amplamente disponível nos EUA para os consumidores residenciais a partir do final de 2009 (DOE, 2015).

Segundo o DOE, o uso generalizado da iluminação a LED representa o maior potencial de impacto em termos de economia de energia nos EUA. A ampla implantação da iluminação a LED pode reduzir o consumo anual de energia de iluminação em cerca de 46%, até 2030, gerando, aproximadamente, uma economia de energia 300 TWh, suficiente para atender a quase 24 milhões de lares em 2012. Em suas conclusões, o potencial de economia de energia acumulada da penetração do LED no mercado previsto para o período de 2010-2030 é 2.700 TWh, representando, no ano de 2012, uma economia de US\$250 bilhões, e uma redução de 1,8 bilhões de toneladas de carbono equivalente (DOE, 2012).

No Brasil, segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Iluminação (Abilux), o consumo de LED no Brasil tende a crescer cerca de 100% ao ano nos próximos anos, tendo em vista as suas vantagens técnicas e os investimentos em infraestrutura.

Em consulta ao volume de lâmpadas fluorescentes no sistema AliceWeb¹ (Código NCM²: 85393100 - Lâmpadas/tubos descarga, fluorescente, de catodo quente), pode-se verificar o início de

¹ O Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior, denominado AliceWeb, da Secretaria de Comércio Exterior, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MIDC, foi desenvolvido visando disseminar as estatísticas brasileiras de exportações e importações com a base nos dados do Sistema Integrado de Comércio Exterior (SISCOMEX), que administra o comércio exterior brasileiro (MIDC, 2016).

uma tendência de queda nas importações das lâmpadas fluorescentes no país a partir de 2013, com destaque para o ano de 2015 que apresentou uma queda de aproximadamente 34,5% em relação ao ano de 2014, conforme pode ser visualizada na Figura 2.

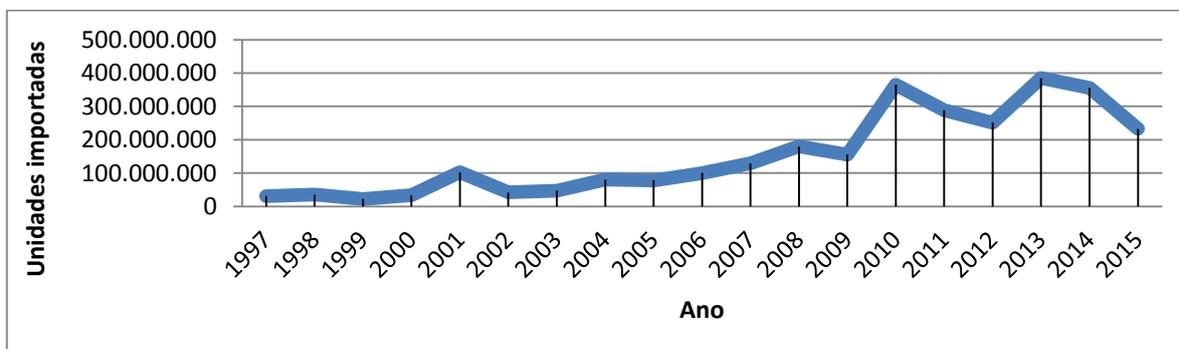


Figura 2 – Gráfico da evolução do volume de vendas de lâmpadas fluorescentes importadas no Brasil
Fonte: MDIC, 2016

Comparando-se apenas os dados referentes ao primeiro bimestre do ano 2016 com o do ano de 2015, verificou-se que o volume de importações das lâmpadas fluorescentes caiu de aproximadamente 62,7 milhões de unidades para 27,2 milhões de unidades, representando uma queda de 56,54% (Figura 3).

NCM 8 dígitos: 85393100 - Lâmpadas/tubos descarga, fluorescente, de catodo quente
Período P1: 01/2015 até 02/2015
Período P2: 01/2016 até 02/2016

| Total da Consulta | | | |
|---------------------|------------|-------------------|------------|
| Período | US\$ FOB | Peso Líquido (kg) | Quantidade |
| 01/2015 até 02/2015 | 54.230.933 | 6.348.804 | 62.662.045 |
| 01/2016 até 02/2016 | 19.313.184 | 2.527.643 | 27.230.405 |

Páginas: 1/1 Total: 2

Figura 3 – Consulta site AliceWeb
Fonte: MDIC, 2016

Levando-se em consideração que as LIs se encontram em um processo adiantado de desmobilização no país, esta tendência de queda nas importações das lâmpadas fluorescentes pode ser

² A partir de 1997, o Brasil passou a utilizar, para efeito de classificação de mercadorias, a Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM), utilizada igualmente pelos demais países partícipes (Argentina, Paraguai e Uruguai). Este critério de classificação é baseado no Sistema Harmonizado de Designação e de Codificação de Mercadorias (SH), metodologia adotada pela quase totalidade dos países. (MDIC, 2016)

um indicativo, de forma inversa, do aumento das importações das lâmpadas LED³ em substituição às lâmpadas incandescentes e fluorescentes.

Nessa linha, a tecnologia LED vem sendo apontada como uma das grandes revoluções tecnológicas em termos de eficiência e durabilidade no setor de iluminação. Este estudo busca apresentar o estado da arte desta tecnologia e estimar o impacto de sua utilização no setor residencial brasileiro em substituição às tecnologias tradicionais.

1.1 Objetivo

O objetivo geral desta dissertação é apresentar uma estimativa da economia de energia elétrica decorrente da introdução da iluminação a LED nas residências brasileiras em 2018. Tendo em vista que as lâmpadas incandescentes já estão em processo de desmobilização através da Portaria Interministerial nº 1.007 de 2010, foi considerada a premissa de que, nesse ano, todas as lâmpadas incandescentes já teriam sido substituídas por lâmpadas fluorescentes com fluxo luminoso equivalente. Além do potencial técnico, o estudo contempla uma avaliação econômica baseada na posse média estimada de uma residência típica brasileira proposta para este trabalho. Para tanto, foram definidos os objetivos específicos, a saber:

- apresentar uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos explorados na dissertação para determinação dos parâmetros que direcionarão os estudos;
- adaptar e aplicar o método desenvolvido por Bastos (2011) para estimar o potencial técnico de economia de energia decorrente da substituição do parque de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED nas residências brasileiras para diversos cenários;

³ Segundo informado pelo Inmetro, é difícil estabelecer uma estimativa de importações de Lâmpadas LED, pois essas não possuem um NCM próprio. As mesmas podem ser importadas utilizando-se os seguintes números de classificação: 85.394.900 (Lâmpadas/tubos de raios ultravioleta ou infravermelhos); 85.399.090 (Outras partes para lâmpadas/tubos elétricos incandescência, etc); 85.414.022 (Outros diodos emissores de luz (led) exceto diodos "laser"); 85.437.099 (Outras máquinas e aparelhos elétricos com função própria).

- apresentar e aplicar o método desenvolvido para definir a posse média estimada de uma residência típica brasileira para este estudo e realizar a análise econômica; e
- apresentar as conclusões e futuros desdobramentos desta dissertação.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta de oito capítulos, incluindo este, de introdução. O desenvolvimento da dissertação tem início no Capítulo 2, onde é apresentada uma revisão bibliográfica referente a trabalhos, artigos e teses dedicados aos resultados energéticos e econômicos advindos da implementação de tecnologias que promovam mais eficiência em sistemas de iluminação.

No Capítulo 3 são abordados alguns conceitos básicos relacionados à iluminação e luminotécnica, que irão subsidiar o desenvolvimento da dissertação.

Na sequência, o Capítulo 4 é dedicado à evolução tecnológica da iluminação residencial até o surgimento da tecnologia LED. Neste capítulo são apresentados os principais marcos tecnológicos que revolucionaram a iluminação artificial com mais eficiência e novas possibilidades para o usuário.

O Capítulo 5 tem como objetivo traçar um breve panorama de alguns dos programas de etiquetagem em eficiência para lâmpada LED no Brasil e no mundo e descrever os seus principais critérios de avaliação e classificação dos equipamentos.

O Capítulo 6 aborda o desenvolvimento e aplicação da metodologia para estimar, em diferentes cenários, o potencial técnico de economia de energia pela substituição do parque de LFs por lâmpadas LED e uma análise econômica dessa substituição pra uma residência típica no Brasil.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões, limitações e recomendações do estudo.

2 Revisão bibliográfica

Nesta seção será apresentada uma revisão da literatura referente a trabalhos, artigos e teses dedicados aos resultados energéticos e econômicos advindos da implementação de tecnologias que promovam mais eficiência em sistemas de iluminação.

Nos últimos 20 anos, as maiores oportunidades para a redução do consumo de eletricidade para iluminação nos domicílios estiveram, mais do que na mudança de hábito, na substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas. A maior vantagem dos modelos mais eficientes está no fato de apresentarem o mesmo fluxo luminoso com potências menores, o que, no caso das LFCs, resulta em uma economia de energia de até 80%, além possuírem uma vida útil maior e uma boa definição de cores (FUPAI, 2006).

Na Tabela 1 é apresentado um exemplo da economia estimada com a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes (EPE, 2007a). Verifica-se que é possível obter reduções significativas no consumo de eletricidade com retornos econômicos importantes para o consumidor residencial sem que haja perda no nível de iluminamento.

Tabela 1 - Economia de Energia em iluminação

| Configuração atual | | Alternativa proposta | | Investimento inicial R\$ | Economia obtida | | Retorno Anos |
|--------------------|-------|----------------------|------|--------------------------|-----------------|------|--------------|
| | | | | | kWh/ano | R\$ | |
| Incandescente | 60 W | Florescente compacta | 15 W | 7,22 | 82 | 24,2 | 0,3 |
| Incandescente | 100 W | Florescente compacta | 20 W | 7,65 | 146 | 43,1 | 0,2 |

Fonte: EPE, 2007a

Cardoso e Nogueira (2008) realizaram uma avaliação do impacto energético, em termos de energia e demanda, da substituição das LIs por LFCs no setor residencial brasileiro após o racionamento de energia elétrica de 2001.

Para a realização desse estudo utilizou-se o conceito de linha de base (Figura 4) representando um mercado fictício onde o parque de lâmpadas seria formado por 82% de lâmpadas incandescentes e 12% fluorescentes tubulares e sem LFCs. A diferença de consumo de energia entre o mercado com

produtos da linha de base e o mercado real estimado, formado por LIs, LFTs e LFCs, corresponde ao valor de economia de energia atribuível às LFCs. Por este mesmo modelo, também foi possível estimar a economia que ainda seria possível pela diferença de consumo de energia entre o mercado real estimado e um mercado com 100% de lâmpadas de LFCs.

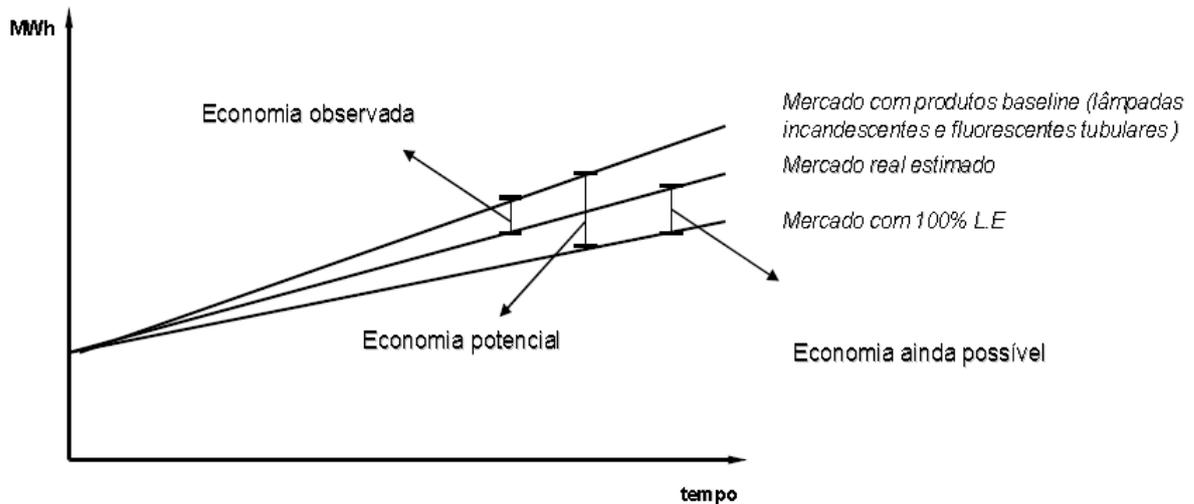


Figura 4 - Abordagem do modelo de avaliação do impacto energético
Fonte: Cardoso, Haddad e Nogueira (2008).

A estimativa do consumo setorial do parque de lâmpadas no Brasil foi obtida a partir de um modelo de formação do parque de lâmpadas no setor residencial brasileiro (Figura 5), baseado no número de domicílios, número de lâmpadas por residência e venda de lâmpadas eficientes, juntamente com estimativas da potência média das lâmpadas instaladas nos lares com seus respectivos tempos de utilização, desagregados nos dois períodos do ano, segundo a classificação da Aneel (seco (maio a novembro) e úmido (dezembro a abril))⁴.

⁴ A Aneel, por meio dos Procedimentos de Regulação Tarifária – PRORET, eliminou o sinal sazonal para a tarifa de energia – período seco e úmido – e estabeleceu o sistema de bandeiras tarifárias, o qual permite uma sinalização que reflete os custos de compra de energia sem um grande lapso de tempo entre o acionamento das usinas e a correspondente repercussão tarifária (ANEEL, 2016a).

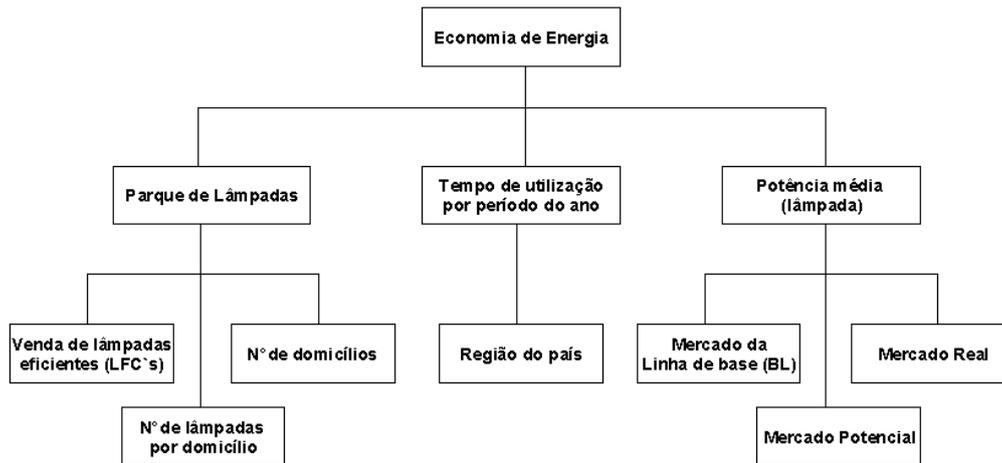


Figura 5 - Visão esquemática do modelo de avaliação do impacto energético
 Fonte: Cardoso, Haddad e Nogueira (2008)

Segundo a avaliação realizada, que tomou o parque de lâmpadas instaladas no setor residencial, sendo 38% de LFCs, e um tempo médio de utilização de 1.000 horas por ano, resultou em uma redução na demanda de ponta de 4.800 MW e uma economia de 6.858 GWh, com um potencial para economizar até 17.152 GWh, se todo o parque de lâmpadas do Brasil fosse composto somente por LFCs.

Bastos (2011) realizou uma análise da política energética de banir gradativamente lâmpadas incandescentes do mercado por faixa de potência, regulamentada, no Brasil, através da Portaria Interministerial nº 1.007 de 2010.

A estimativa foi realizada a partir dos dados de distribuição do consumo de energia elétrica médio em valores percentuais para cada tipo de lâmpada na iluminação do setor residencial das diferentes regiões do país da Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de uso de Energia Elétrica – ano base 2005 (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a); do consumo residencial de energia elétrica por região do Brasil, cujos dados foram apresentados no Balanço Energético Nacional 2010 – ano base 2009; e segundo projeção da evolução percentual do número total de domicílios permanentes ocupados no Brasil, segundo o Plano Nacional de Energia – PNE 2030 (EPE, 2007).

Por meio desse estudo, foi possível estimar que o potencial técnico de redução do consumo de energia elétrica no setor residencial do Brasil no ano de 2012, através da substituição de todas as

lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas, seria de 7.424,1 GWh. Estes e demais resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Potencial técnico de redução no consumo de energia elétrica com a política no Brasil em 2012

| | | |
|--------------------------|---|-------------------------|
| Potencial técnico | Conservação de energia em 2012 | 7.424 GWh |
| | Conservação de energia de 2012 a 2030 | 167 TWh |
| | Usina hidrelétrica equivalente de 2012 | 1.780,4 MW |
| | Redução no horário de ponta (21 ^ª hora) em 2012 | 3.102 MW |
| | Redução na emissão de gases causadores do efeito estufa em 2012 | 0,66 MtCO _{2e} |

Fonte: Bastos, 2011

Importantes ganhos energéticos também podem ser obtidos por meio de sistemas inteligentes de controle da intensidade luminosa. Sistemas tradicionais se baseiam principalmente em desligar/ligar ou dimerizar os níveis de iluminação em função da movimentação dos usuários e dos níveis de brilho do entorno; tornando-se de difícil aplicação em ambientes onde a variedade de usos e de satisfação do usuário - como no caso de casas e escritórios - é um fator crucial em detrimento dos custos com a economia de energia. Nesse sentido, Byun; Hong; Lee (2013) propuseram um sistema inteligente de controle com uso de sensores e da tecnologia de comunicação wireless que, de forma autônoma, ajusta o fluxo luminoso a níveis mínimos que promovam a eficiência energética e a satisfação do usuário. O sistema foi testado em um campo de prova com 44 luminárias LED, totalizando 42W de potência instalada, durante 14 dias. O sistema de controle da iluminação proposto reduziu o consumo com iluminação em 21,9%.

Dubois e Blomsterberg (2011) exploraram o potencial de conservação de energia elétrica nos sistemas de iluminação em edifícios de escritórios do norte europeu segundo algumas estratégias:

- 1) Estratégias diretamente relacionados com a instalação da iluminação elétrica:
 - Melhoria na tecnologia das lâmpadas;
 - Melhoria na tecnologia do reator;

- Melhoria na tecnologia luminária;
- Uso de iluminação de tarefa e ambiente;
- Melhoria na manutenção do sistema;
- Melhoria no fator de utilização;
- Redução dos níveis de iluminância;
- Redução do tempo de uso;
- Uso de sensores de presença e dimerização manual e automática.

2) Estratégias relacionadas com o aproveitamento da luz natural:

- Efeito da latitude e da orientação;
- Efeito das características da janela;
- Efeito de dispositivos de sombreamento;
- Efeito de refletância de superfícies internas;
- Efeito da altura do teto;
- Efeito do pé direito.

Seguindo os autores, a substituição de sistemas antigos com lâmpadas fluorescentes T12 por T5 com reatores eletrônicos, poderia fornecer uma economia de energia de até 40%. Uma economia adicional de energia de 40% poderia ser obtida utilizando uma combinação de luminárias mais eficientes em termos energéticos, iluminação de tarefa, sensores de presença e da dimerização em função do aproveitamento da luz natural.

Por meio de cálculos teóricos, medições em salas e simulações em grande escala com programas de iluminação validados, o estudo indicou que uma densidade energética de cerca de 10 kWh/m² ano é uma meta realista para a iluminação de escritórios em futuros edifícios de baixo consumo. Essa meta produziria uma significativa redução de 50% na densidade energética em comparação com a média real com iluminação (21 kWh/m² ano na Suécia), apenas fazendo uso de tecnologias já disponíveis, configurando uma das formas mais rentáveis para reduzir as emissões de CO².

Finalmente, os autores destacam que, para que essas estratégias de economia de energia possam ser atingidas em um contexto real, algumas questões devem ser avaliadas, como: horas extras de trabalho ou horários flexíveis, adaptação dos usuários a níveis mais baixos de iluminância, ou a sensores de presença e sistemas de dimerização associados à luz natural. Além disso, destaca-se também a dificuldade de se aproveitar a iluminação natural em áreas centrais ou mais profundas da edificação e problemas de brilho relacionados com a exposição excessiva à luz do dia em função de um percentual excessivo de abertura na fachada.

Aman, Jasmon e Mokhlis (2013) apresentaram um estudo comparativo entre as principais lâmpadas utilizadas nas residências, incluídas as LIs, FLs, FLCs e lâmpadas LED. Foi realizado um experimento para comparar o consumo e o impacto das lâmpadas na qualidade da energia em termos de distorção harmônica. A partir da análise, pode-se concluir os seguintes pontos-chave:

1. A substituição de LIs por LFs e LFCs é vantajosa tanto para o consumidor, bem como para a concessionária. As LFs e LFCs são uma boa escolha devido à sua maior eficiência e vida útil;
2. A substituição de LFs por LFCs não é vantajosa para o consumidor nem para a concessionária. Isto resultaria em um aumento da distorção harmônica e um aumento do consumo de energia para o mesmo nível de iluminação;
3. O desenvolvimento atual mostra uma enorme melhoria no desempenho das lâmpadas LED e ao mesmo tempo uma redução nos custos de desenvolvimento. Por isso, espera-se que a maior parte do sistema de iluminação seja fornecida por lâmpadas LED no futuro próximo. Para garantir que apenas as lâmpadas de boa qualidade cheguem ao consumidor, surge a necessidade de se adotarem normas mais rigorosas e programas de etiquetagem energética.

Ferreira (2014) avaliou a viabilidade econômica da substituição das lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas por lâmpadas de LED.

Para a análise econômica, o autor considerou como base as lâmpadas de LED com uma durabilidade de 25.000 horas, e estabeleceu um comparativo com as lâmpadas incandescentes e fluorescentes cuja durabilidade é de 750 horas e 8.000 horas, respectivamente, por um período de uso

de 10 horas diárias, com uma tarifa de energia elétrica de R\$ 0,3866 (base da distribuidora Eletropaulo do estado de São Paulo no ano de 2013).

O autor conclui que, com a utilização das lâmpadas de LED, pode-se atingir uma economia no consumo de energia elétrica de até 80% e um tempo de retorno do investimento de 2700 horas, quando comparada à lâmpada incandescente, e de 27,3% e 15000 horas, se comparada à LFC. Analisando o custo total do produto, a lâmpada de LED obteve uma redução de 81,7%, quando comparado com a lâmpada LI, e de 46%, quando comparado com a LFC.

3 Conceitos de iluminação e luminotécnica

Este capítulo traz a definição de conceitos relacionados à iluminação e luminotécnica, e uma abordagem das principais tecnologias disponíveis no mercado para iluminação residencial.

3.1 A luz

A maneira mais simples de se obter luz é pelo aquecimento, portanto a emissão de radiação eletromagnética. Aquecendo um corpo, seus átomos vibram em todas as frequências possíveis emitindo luz de todas as cores que se misturam.

A luz visível é uma radiação eletromagnética cuja gama de comprimentos de onda – situada na faixa de 380nm até 780nm – é capaz de produzir sensação visual segundo a curva de sensibilidade do olho humano. As três grandezas físicas básicas da luz são: intensidade (ou amplitude), frequência e polarização (ângulo de vibração). No caso específico da luz, a intensidade se identifica com o brilho e a frequência com a cor (CERVELIN, CAVALIN, AMORIM, 2014).

Na Figura 6 está destacada a faixa visível, ou seja, das frequências que nossos olhos podem ver, no espectro eletromagnético:

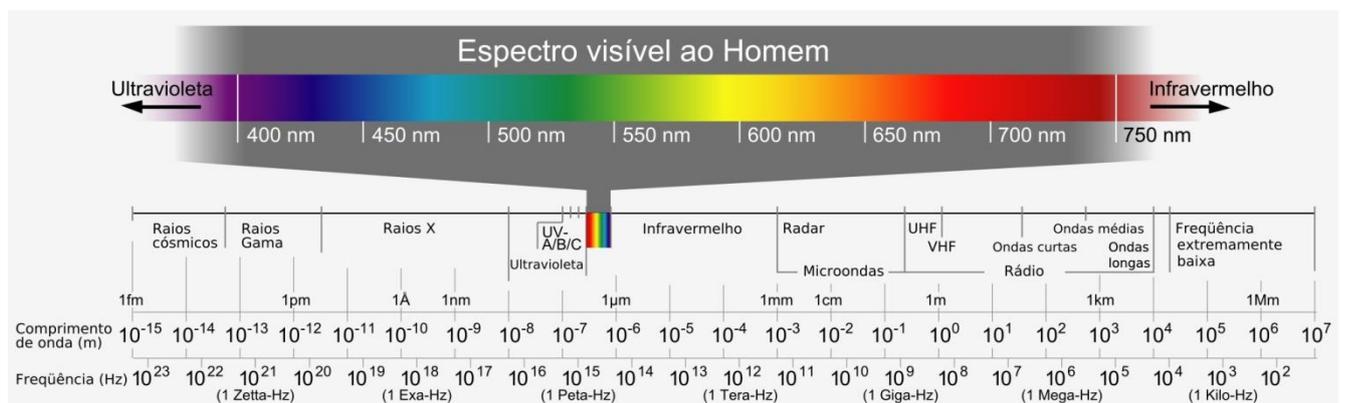


Figura 6 - Espectro eletromagnético da luz visível

Fonte: <http://fisicasemmisterios.webnode.com.br/products/ondas-eletromagneticas/>

A fonte mais familiar de luz visível é o Sol. Sua superfície emite radiação através de todo o espectro eletromagnético. A Figura 7 mostra o espectro da radiação solar fora da atmosfera da terra (linha vermelha) e ao nível do mar (linha amarela), evidenciando, assim, a atenuação que a radiação solar sofre ao atravessar a atmosfera terrestre. Esse gráfico mostra ainda os principais elementos constituintes da atmosfera, responsáveis pela absorção de determinados comprimentos de onda. É importante notar, também, como a curva espectral do Sol coincide com a de um corpo negro⁵ a 5900K, sendo esse valor bastante próximo ao de sua temperatura efetiva. Outro ponto a se destacar é que praticamente toda a radiação emitida pelo Sol encontra-se na faixa de comprimentos de onda entre 0,1 μ m a 3,0 μ m, conhecida como banda solar, mas sua radiação mais intensa está na região que definimos como visível, cerca de 0,55 μ m. Do total dessa energia, 7% se encontram na região do ultravioleta, 46,8% no visível e o restante na banda de infravermelho (ELETROBRAS /PROCEL; UNA, 2014).

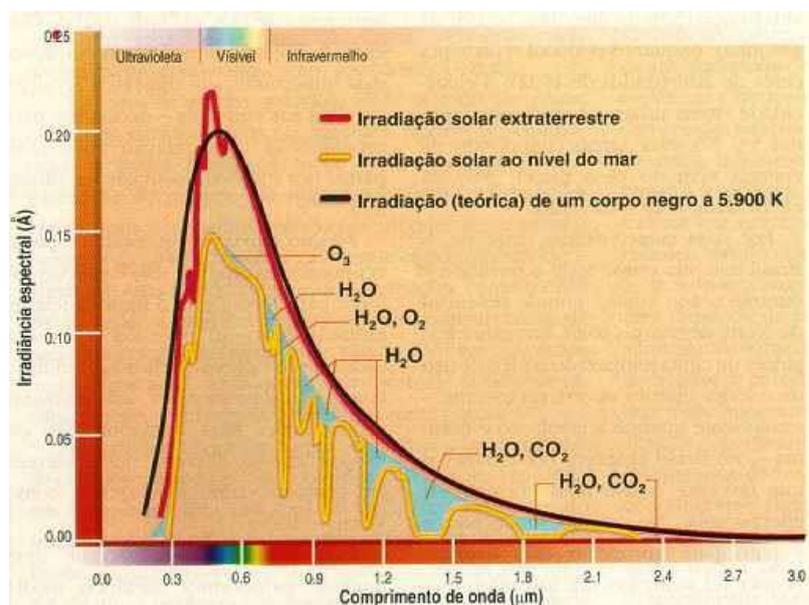


Figura 7 - Espectro da radiação solar
 Fonte: http://www.geocities.ws/kawakami_enc/caract.html

⁵ O corpo negro é uma superfície ideal, utilizada como referência para avaliação das propriedades radiantes de superfícies reais. Um corpo negro possui as seguintes características: absorve 100% da radiação incidente sobre ele, é um emissor difuso e nenhuma superfície pode emitir mais energia que um corpo negro (EKOS BRASILE; VITAE CIVILIS, 2010).

A luz pode ser emitida de objetos frios; esse fenômeno é chamado luminescência. Quando a energia que excita os átomos se origina de uma reação química, é denominada quimioluminescência. Quando ocorre em seres vivos, tais como vagalumes e organismos marinhos, é chamado de bioluminescência. A eletroluminescência é um processo de emissão gerado através de excitação eletrônica, pela passagem de uma corrente elétrica através do material, como por exemplo as lâmpadas fluorescentes, relâmpagos, mostradores luminosos, e lâmpadas LED.

Da antiguidade origina-se a ideia da luz como matéria, contudo, somente no século XVII, essa teoria foi consolidada pelo filósofo natural inglês Sir Isaac Newton (1643-1727). Ele foi o primeiro a formular a teoria corpuscular da luz. Segundo Newton, os corpos irradiam energia luminosa em partículas ou corpúsculos, e estas partículas são ejetadas em linhas retas. Em 1666, Newton, realizou seu famoso experimento com um prisma, através do qual ele percebeu e registrou que a luz solar é a luz branca que contém todas as cores do espectro (Figura 8).

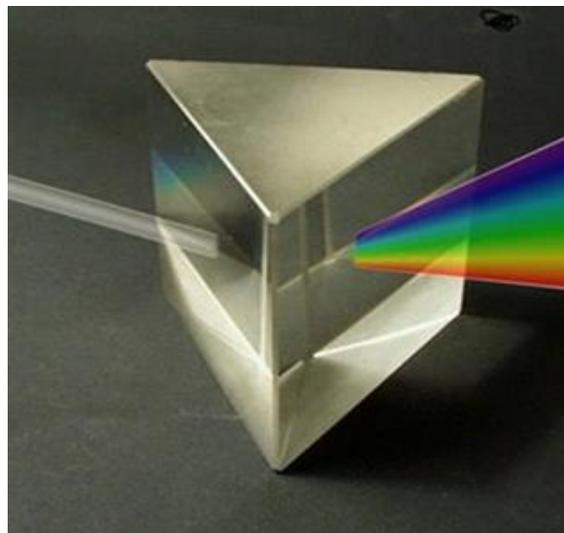


Figura 8 - Decomposição da luz branca

Fonte: <http://www.mundoeducacao.com/fisica/decomposicao-luz-branca.htm>

No início do século XIX, as experiências de Thomas Young e Augustin Fresnel sobre interferência e difração demonstraram a existência de fenômenos ópticos, para os quais a teoria corpuscular da luz seria inadequada, sendo apenas possíveis se a luz correspondesse a um movimento ondulatório.

James Clerk Maxwell, ainda no século XIX, propôs a teoria segundo a qual a luz seria constituída por ondas eletromagnéticas muito curtas e provou que a velocidade de propagação dessa onda no espaço equivalia à velocidade de propagação da luz de aproximadamente 300.000 km/s. (COSTA, 2006).

Em 1900, Max Planck descobriu a lei da radiação térmica, chamada Lei de Planck da Radiação, base da teoria quântica, que surgiu dez anos depois com a colaboração de Albert Einstein e Niels Bohr. Albert Einstein, usando a ideia de Planck de que um feixe de luz é composto de pequenos pacotes de energia chamados de fótons, explicou o fenômeno da emissão fotoelétrica.

Atualmente definiu-se o comportamento dual da luz, dualidade onda-partícula, que caracteriza a luz como um fenômeno físico, que em determinadas situações se comporta como radiação (onda) e em determinadas situações como partícula, sendo ambos os modelos considerados válidos.

3.2 Cor

Se a distribuição da energia emitida, ou seja, a quantidade de fótons for mais ou menos uniforme no setor do espectro visível, a mistura nos dará a sensação de uma luz branca. Os objetos que vemos na natureza, quando iluminados pela luz do sol ou de uma lâmpada elétrica, aparecem nas cores que têm porque refletem as frequências que determinam essas cores.

3.3 Fluxo luminoso

O fluxo luminoso (Figura 9) é a radiação total emitida pela fonte luminosa, entre os limites de comprimento de onda 380 e 780 nm, medida em lumens, na tensão nominal de funcionamento (OSRAM, s/d). Em uma analogia com a hidráulica, seria como um chafariz esférico, dotado de inúmeros furos na sua superfície. Os raios luminosos corresponderiam aos esguichos de água dirigidos a todas as direções e decorrentes desses furos (BASTOS, 2011).



Figura 9 – Fluxo luminoso emitido pela lâmpada

Fonte: <http://www.lighting.philips.com/main/education/lighting-university/lighting-university-browser/video/luminous-flux-and-efficacy.html>

3.4 Iluminância

É a quantidade de luz ou fluxo luminoso que atinge uma unidade de área de uma superfície por segundo (Figura 10). A unidade de medida é o lux, representada pelo símbolo E. Um lux equivale a 1 lúmen por metro quadrado (lm/m^2) (OSRAM, s/d).

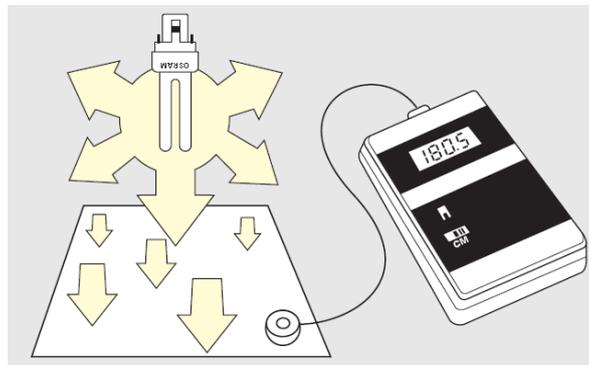


Figura 10 – Iluminância

Fonte: OSRAM, s/d

3.5 Luminância

É a definição para a intensidade luminosa (cd) refletida por unidade de área (m^2) de uma superfície numa dada direção (Figura 11). Ela é representada pelo símbolo L e a unidade é a candela por metro quadrado (cd/m^2) (OSRAM, s/d).

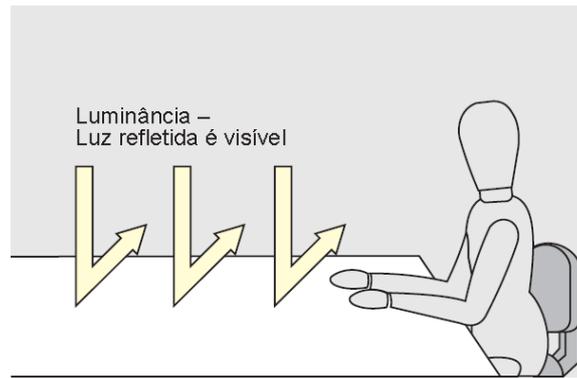


Figura 11 – Luminância
Fonte: OSRAM, s/d

3.6 Eficiência luminosa (lm/W)

É o quociente entre o fluxo luminoso emitido em lumens, pela potência consumida em watts.

Enquanto que as fontes tradicionais de luz como as incandescentes, fluorescentes e HID evoluíram para os seus níveis atuais de desempenho ao longo dos últimos 70 anos, as fontes de luz de LED branco atingiram em menos de 10 anos níveis superiores às demais (Figura 12).

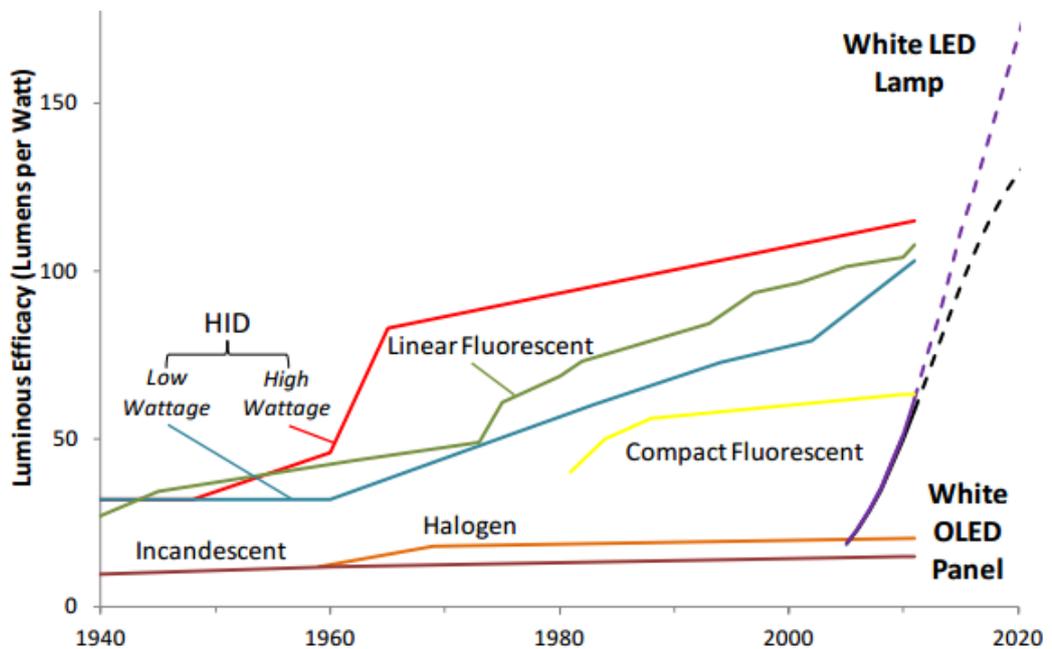


Figura 12 – Evolução da eficiência das fontes de luz.⁶
Fonte: DOE, 2012c

⁶ É oportuno registrar que a figura 26 tem caráter apenas ilustrativo, pois sabe-se que a conversão energética apresenta limites termodinâmicos.

A Tabela 3 apresenta a eficiência luminosa de diferentes tecnologias de lâmpadas comercializadas no país:

Tabela 3 - Eficiência luminosas das lâmpadas

| Tipo de lâmpada | Eficiência Luminosa |
|---------------------------------|----------------------------|
| Incandescentes | 10 a 15 lm/W |
| Halógenas | 15 a 25 lm/W |
| Mista | 20 a 35 lm/W |
| Vapor de mercúrio | 45 a 55 lm/W |
| Fluorescente tubular T10 | 55 a 75 lm/W |
| Fluorescente compacta | 50 a 85 lm/W |
| Vapor Metálico | 65 a 90 lm/W |
| Fluorescente tubular T5 | 75 a 115 lm/W |
| Vapor de sódio | 80 a 140 lm/W |
| LED | 37 a 105 lm/W |

Fonte: Bastos, 2011

3.7 Temperatura de cor correlata – TCC

A temperatura de cor correlata expressa a aparência da cor da luz, sendo medida em Kelvin (K). Essa definição está baseada na relação entre a distribuição de energia da radiação de comprimentos de onda diferentes que constituem o espectro de emissão da fonte de luz e a temperatura de um material hipotético e padronizado, conhecido como corpo negro, e à medida que a temperatura do corpo negro é elevada a partir do zero absoluto.

De uma maneira geral as lâmpadas podem ser divididas basicamente em 3 faixas (Figura 13):

1. Branco morno ou quente (BM): $TC < 3300K$ (Tonalidade Amarela)
2. Branco neutro (BN): $3300 K \leq TC < 5000 K$ (Tonalidade Branca)
3. Branco frio (BF): $TC \geq 5000 K$ (Tonalidade Azul)



Figura 13 – Aparência de diferentes temperaturas de cor

Fonte: <http://www.ledplanet.com.br/iluminacao-ideal-para-cada-tipo-de-ambiente/>

Em 1941, um pesquisador holandês, A. A. Kruithof, desenvolveu um gráfico (Figura 14) que relaciona a temperatura de cor com o nível de iluminância, e assim define um sistema de iluminação "agradável". A área branca central define as combinações preferidas para o observador, na qual as temperaturas de cor mais elevadas estão relacionadas a níveis de iluminância superiores. As demais áreas do gráfico produzem ambientes monótonos e frios, na parte inferior, e ambientes excessivamente coloridos e antinaturais, na parte superior (Li; Chen; Song; Yuming Chen; 2009).

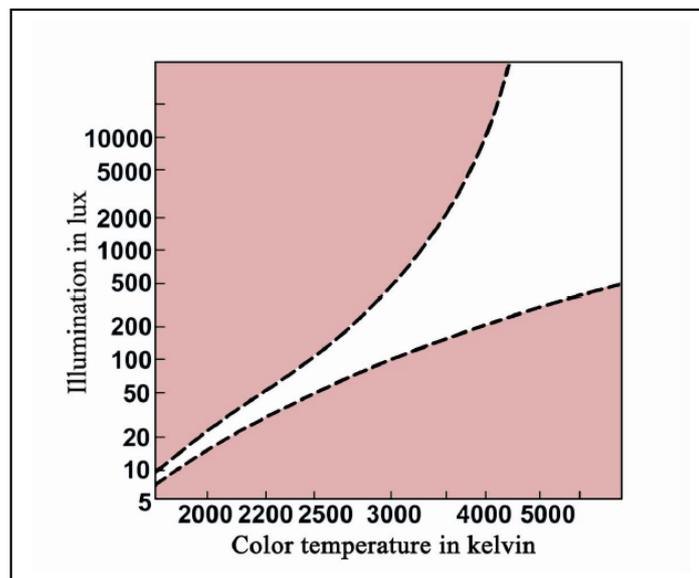


Figura 14 - Efeito Kruithof
Fonte: Li; Chen; Song (2009)

3.8 Índice de reprodução de cor

O índice de reprodução de cor (IRC) mede a capacidade de uma fonte de luz de reproduzir fielmente as cores, comparando-se a luz artificial com a luz natural do Sol por meio da curva espectral, medido em uma escala de 0 a 100. A luz natural tem um IRC de 100.

O valor do IRC é determinado pela medição do efeito cromático da fonte de luz sobre uma escala de 14 cores (R1-R14) padrão (Figura 15), sendo que o valor do IRC é derivado de uma média dos valores atribuídos a R1-R8. Embora os valores R9-R14 sejam medidos, eles não têm impacto na classificação IRC de um produto.

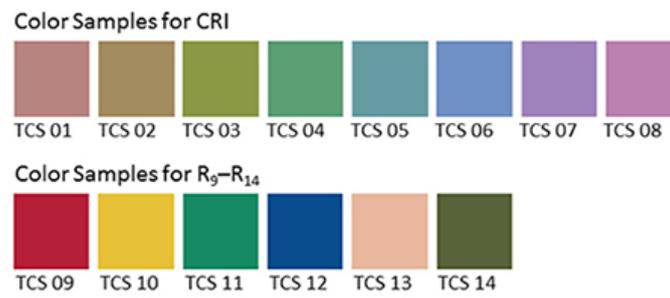


Figura 15 - Padrão de cores IRC
Fonte: DOE

3.9 Vida útil

A vida útil é definida como o tempo em horas após a depreciação de uma porcentagem de seu fluxo luminoso inicial. Esta depreciação é definida em função do tipo de lâmpada e geralmente varia de 10% a 30%.

4 Evolução da iluminação

Este capítulo apresenta a evolução tecnológica da iluminação artificial até os tempos atuais. Assim como para as tecnologias que a precederam, a iluminação a LED apresentou um forte avanço em função da contribuição de alguns cientistas obstinados, que permitiu que uma tecnologia já consolidada atingisse patamares muito mais elevados de eficiência e aplicabilidade.

4.1 Fogo

A história da iluminação artificial remonta à pré-história, com a descoberta do fogo produzido por meio das faíscas geradas ao bater duas pedras de sílex. O domínio do fogo representa o primeiro grande avanço tecnológico da humanidade, permitindo iluminar e se aquecer nas noites escuras, trazendo mais conforto e novos meios de sobrevivência. Até o século XIX, o fogo era a principal fonte de aquecimento e iluminação noturna, seja por meio de fogueiras, tochas, lanternas, velas e lamparinas.

4.2 Tochas

Ao acender o fogo para assar um animal, o homem de Neandertal percebe que a gordura que pingava na brasa fazia aumentar a chama. Com base nesta observação, e com o intuito de manter o fogo aceso por mais tempo, foram concebidas as primitivas tochas para iluminar o interior das cavernas, alimentadas com óleos animais e vegetais junto com fibras naturais. Essas tochas foram pouco a pouco aperfeiçoadas por povos como os fenícios, babilonenses e egípcios, que construíram suas tochas com madeira resinada, cipó, espargidas com enxofre, nitrato de potássio, piches e resinas.

4.3 Vela

A descoberta mais antiga de velas em forma de bastão remonta ao Egito, por volta do ano 3.000 A.C.. Na Idade Média a fabricação de velas se tornou uma atividade comercial com o uso da gordura animal (sebo), mais barata, e a da cera de abelha, mais cara, reservada aos mais afortunados. A indústria baleeira também produziu ceras para as velas através do espermacete (Figura 16), substância cerosa e de cor âmbar encontrada na cabeça do cachalote que, em função da sua temperatura, altera a sua densidade e assim permite ao animal afundar ou voltar à superfície.

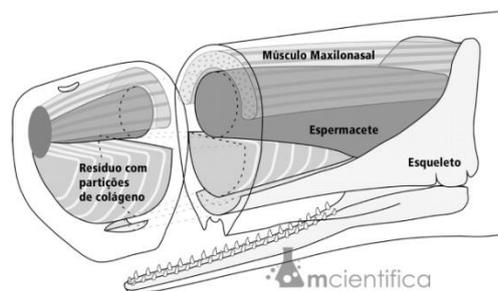


Figura 16 - Localização do espermacete
 Fonte: <http://www.blog.mcientifica.com.br/cachalote/>

Em 1823, no decorrer dos seus estudos sobre os ácidos graxos, o químico francês Michel-Eugène Chevreul descobriu que, para formar o sabão, o sebo, ao reagir com o elemento alcalino, se decompõe em vários ácidos graxos e glicerina. Um dos ácidos graxos identificados por ele foi a estearina (ácido esteárico). Em 1825, Chevreul e o físico e químico Joseph Gay Lussac patentearam um processo para fazer vela de esteárico bruto, substituindo permanentemente a vela de sebo, gerando muito menos fumaça e odores.

Em 1830, o químico alemão Karl Von Reichenbach descobre a parafina, um subproduto do petróleo. Em 1854, a parafina e a estearina foram combinadas para fazer velas que são usadas até hoje, proporcionando uma combustão mais limpa, brilhante, sem odor e mais barata.

4.4 Lâmpada a óleo

No período Neolítico começam a surgir as primeiras lâmpadas a óleo utilizadas com fins de iluminação de ambientes. Essas eram as primeiras velas construídas por uma mecha de fibras vegetais que são alimentadas por capilaridade com combustível de gordura animal ou vegetal, armazenado em um recipiente propício, inicialmente construído em pedra (Figura 17).



Figura 17 – Lâmpada a óleo
Fonte: https://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_%C3%A0_huile

No ano de 1780, o químico suíço Aimé Argand, inspirado nos estudos para o melhoramento dos queimadores para balões de ar quente, desenvolveu a primeira grande evolução da tecnologia das lâmpadas a óleo após milhares de anos. A ideia consistia de um pavio circular oco, transpassando um cilindro de metal, rodeado por outro de diâmetro superior, criando, desta forma, uma dupla corrente de ar ascendente que potencializava a combustão do óleo (Figura 18). O resultado era uma chama estável, de forte intensidade, sem muita fumaça, produzindo uma luz muito mais brilhante, e mais barata do que as velas convencionais.

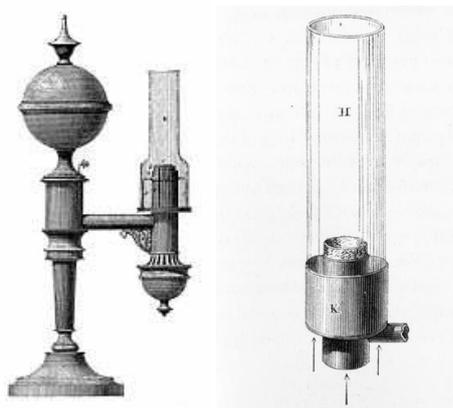


Figura 18 – Lâmpada de Argand
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/L%C3%A2mpada_de_Argand

4.5 Lâmpada a Gás

A lâmpada a gás era conhecida na China antes da era cristã, entretanto, no ocidente, foi o engenheiro francês, Phillipe Lebon, o primeiro a desenvolver um sistema para produzir luz e calor a partir do gás proveniente da destilação da madeira. Em 1799, ele patenteou uma lâmpada chamada de a "*thermolampe*" em função do calor e da luz que esta emitia.

No início dos anos 1790, concorrentemente aos trabalhos desenvolvidos por Lebon, o engenheiro William Murdoch, enquanto engenheiro chefe da empresa Boulton&Watt – precursora das locomotivas a vapor – desenvolveu um sistema comercialmente viável de distribuição de gás de carvão. Entretanto, foi do Inventor alemão Freidrich Winzer (Winsor) a primeira patente de iluminação a gás de carvão de 1804.

A lâmpada a gás (Figura 19) se destacava pela sua eficiência: um único manto gás emitia doze vezes mais luz que uma vela ou uma lâmpada a óleo, a um custo 75% inferior.

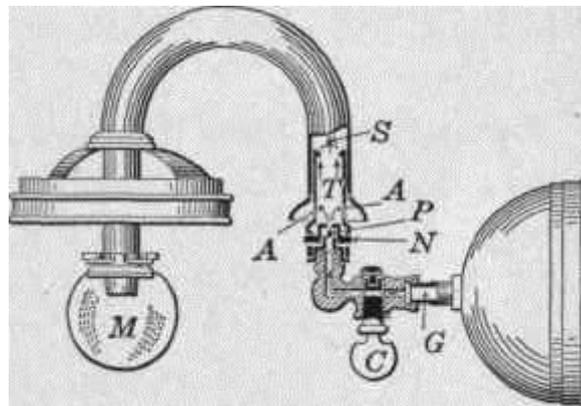


Figura 19 – Lâmpada a gás

Fonte: <http://chestofbooks.com/home-improvement/repairs/Mechanics-Household/Mantle-Gas-Lamps.html#.Vk4FYdKrSM8>

4.6 Lâmpada a querosene

Em 1851, o pesquisador e geólogo canadense Abraham Gesner descobriu um método para extrair um óleo de alta qualidade a partir da destilação do asfalto e do carvão, nomeado por ele de *keroselain* - do grego “Keros” (cera) e “elain” (óleo) – para finalmente se tornar *Kerosene*. Frequentemente chamado de óleo de carvão queimado, comparando com o óleo de baleia e os demais óleos vegetais utilizados na época, o querosene era mais barato e tem a vantagem de subir muito mais facilmente pelo pavio por capilariedade. Em 1854 o pesquisador se instala no EUA, registra o nome *kerosene* e cria a *Kerosene Gas Light Company*.

Com a descoberta dos primeiros campos de petróleo nos EUA por Edwin Drake e as pesquisas para a sua destilação, surge o querosene à base de petróleo. A lâmpada a querosene se tornou a lâmpada perfeita devido à sua simplicidade e custo baixo, sendo reduzida a três elementos: o reservatório, o pavio e cúpula de vidro.

4.7 Lâmpada incandescente

Em 1854, o mecânico alemão Heinrich Göbel construiu a primeira lâmpada incandescente usando fios de bambu carbonizados como filamento, que foram inseridos em um bulbo de vidro após a retirada do o ar interno. Esta lâmpada foi conectada a uma bateria e usada para iluminar sua loja em Nova Iorque (BASTOS, 2011).

Mas foi o inventor Thomas Edison que em 1879 construiu a primeira lâmpada incandescente utilizando uma haste de carvão (carbono) muito fina que, aquecida até próximo ao ponto de fusão, passa a emitir luz. A haste era inserida numa ampola de vidro a vácuo.

Atualmente a lâmpada incandescente comum (Figura 20) é construída com um filamento de tungstênio, cuja temperatura de trabalho chega a 3000°C, vida mediana de 750 a 1.000 horas, sendo que, apenas 10% da eletricidade consumida é convertida em luz, e o restante se transforma em calor, tornando a lâmpada hoje uma das menos eficientes do mercado.



Figura 20 – Lâmpada incandescente
 Fonte: www.lighting.philips.com

Todas essas desvantagens, principalmente a baixa eficiência energética, têm feito com que a incandescente seja banida em muitos países, como na União Europeia (2009 – 2011), Cuba (2005), Austrália (2010), Argentina (2011) e nos EUA, no início de 2014 (BASTOS, 2011). Nos mesmos moldes da União Europeia, o Brasil vem gradualmente restringindo a comercialização das lâmpadas incandescentes por meio da Portaria Interministerial nº1007, que estabelece índices mínimos que na prática são impossíveis de serem atingidos. O processo foi iniciado em 2012 com a potências de 200W, e desde 1º de julho de 2015 as tradicionais lâmpadas de 60W tiveram sua comercialização proibida no país.

4.8 Lâmpada fluorescente

Friedrich Meyer, Hans Spanner e Edmund Germer patentearam uma lâmpada fluorescente em 1927, sendo que a sua comercialização só teve início em 1938 pela General Electric, que havia comprado a patente. Ligada a um reator, o seu funcionamento consiste em uma descarga elétrica em dois filamentos que lançam elétrons que, ao se chocarem, vaporizam o mercúrio contido no bulbo, produzindo radiação ultravioleta, que ao entrar em contato com a tinta de fósforo que reveste o bulbo, se transforma em luz visível (Figura 21). As linhas mais modernas utilizam a tecnologia trifósforo produzida com um pó fluorescente composto por terras raras, que proporcionam um IRC de 85, enquanto que as lâmpadas fluorescentes comuns flutuam na faixa de 50 a 70 (PHILIPS, 2014).

Desenvolvida no final dos anos 1980, a lâmpada fluorescente compacta revolucionou a indústria de iluminação com um reator montado na base da lâmpada (Figura 22) em substituição às lâmpadas incandescentes.

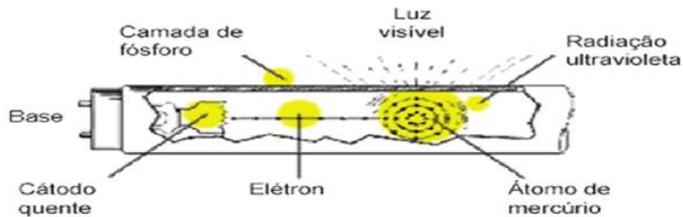


Figura 21 – Lâmpada fluorescente
Fonte: <http://quipibid.blogspot.com.br/2014/07/lampadas-fluorescentes-e-os-efeitos.html>

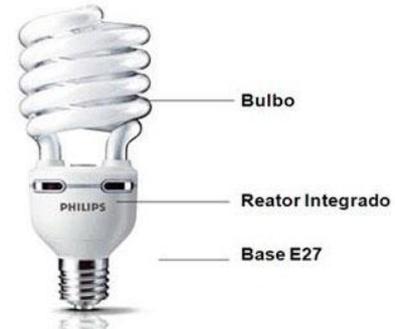


Figura 22 - Lâmpada fluorescente compacta
Fonte: www.lighting.philips.com

4.9 Lâmpada halógena

As lâmpadas halógenas (Figura 23) foram criadas logo após a incandescente, no início do século XX, com o “ciclo do halogênio”, no qual partes do filamento composto de tungstênio que evaporam durante o processo são capturadas por gases inertes e o halogênio contido no bulbo é reconduzido ao filamento quando a lâmpada é desligada. Isso evita que a lâmpada escureça e que haja uma menor depreciação da sua vida útil e do fluxo luminoso, como ocorre na incandescente.

O “ciclo do halogênio” também permite que o filamento da lâmpada trabalhe com temperatura mais alta que as incandescentes, produzindo mais luz, com uma temperatura de cor alcançando cerca de 3.000 K, contra 2.700 K da incandescente comum. Para suportar a temperatura de funcionamento elevada, o tubo que envolve o filamento é feito de quartzo, enquanto as incandescentes utilizam vidro comum.

A halógena possui IRC de 100 e sua vida mediana varia entre 2.000 a 5.000 horas. Com o banimento da incandescente tradicional do mercado mundial, os fabricantes desenvolveram uma lâmpada halógena inserida em um bulbo de incandescente (Figura 24).



Figura 23 – Lâmpada halógena
Fonte: www.osram.com.br



Figura 24 – Lâmpada halógena
Fonte: www.philips.com.br

4.10 Diodo emissor de luz

Neste capítulo é apresentado o histórico da evolução da tecnologia LED, com destaque para os principais marcos que balizaram o caminho que esta percorreu até conquistar o mercado dos equipamentos de iluminação. São destacados também alguns aspectos do seu funcionamento e os diversos tipos de LEDs empregados atualmente no mercado.

4.10.1 Histórico

Os primeiros registros do LED são de 1907, com o pesquisador inglês Henry J. Round, autor do primeiro relatório descrevendo a emissão de luz a partir de diferentes cristais semicondutores, entre eles o carbeto de silício (SiC) bruto, que vinha sendo utilizado no desenvolvimento de cristais detectores de sinal para sintonização de rádio. Na época, Henry era assistente de Guglielmo Marconi, engenheiro eletricitista e inventor italiano, conhecido pelo seu trabalho pioneiro sobre a transmissão de rádio de longa distância.

Entretanto, o primeiro trabalho publicado sobre eletroluminescência em semicondutores pertence ao cientista russo e técnico em laboratórios de rádio Oleg Vladimirovich Losev. Em 1927, ele publicou um relatório relatando a emissão de luz quando da construção dos primeiros retificadores de sinais de rádio. Ele continuou desenvolvendo e publicando os detalhes da sua descoberta em revistas inglesas e

alemãs até 1930, mas não conseguiu chamar a atenção da indústria luminotécnica e acabou morrendo de fome durante o cerco a Leningrado em 1942.

Em 1955, Rubin Braunstein da *Radio Corporation of America* relatou a emissão de infravermelho a partir do arsenieto de gálio (GaAs), entre outras ligas de semicondutores.

Os primeiros anos da década de 60 foram marcados pela corrida desenvolvimentista de semicondutores de arsenato de gálio (GaAs) e germânio para controle de energia e do laser. Os pesquisadores da *Texas Instruments*, Bob Biard e Gary Pittman, ao testarem um diodo túnel, detectaram uma queda na resistência, e por meio de um detector de infravermelho eles descobriram que os dispositivos brilhavam. Em função da relevância do trabalho, Gary recebeu a patente para o primeiro LED infravermelho, conhecido como o SNX - 100. Os LEDs infravermelhos foram utilizados pela primeira vez nos computadores da IBM para substituir as lâmpadas de tungstênio nos leitores controlados de cartões perfurados.

Em 1962, Dr. Nick Holonyak e sua equipe de pesquisadores do laboratório de semicondutores da General Electric demonstraram o primeiro espectro visível de LED vermelho. Ele usou Phosphide Arsenieto de Gálio (GaAsP) em um substrato de Arsenieto de Gálio (GaAs). Tendo em vista o seu alto custo, esse não foi bem sucedido do ponto de vista comercial e assim permaneceu mais como uma curiosidade de laboratório.

Esta situação mudou em 1968, quando a Monsanto, fabricante do material semicondutor Phosphide Arsenieto de Gálio (GaAsP), passou a produzir telas alfanuméricas e lâmpadas LED. O tipo MV1 apresentado na Figura 25 foi a primeira lâmpada LED da empresa, e é amplamente considerada como sendo a primeira luz visível comercial de LED do mundo.



Figura 25 – LED MV1 da Monsanto (1968)

Fonte: <http://www.lampotech.co.uk/Spec%20Sheets/LED%20Monsanto%20MV1.htm>

No início da década de 70, o pesquisador Roland Haitz do laboratório da Hewlett –Packard, desenvolveu um LED com um amplo ângulo de visão sem perda significativa de intensidade e mais fácil de ser montado em painéis luminosos. A ideia foi misturar vidro em pó no encapsulamento em epóxi. As partículas de vidro auxiliam na dispersão da luz de tal modo que a superfície superior do dispositivo apresenta uma distribuição de intensidade substancialmente uniforme e visível através de uma ampla gama de ângulos. Esta inovação continua a ser utilizada até hoje nos LEDs DIP (*Dual In-Line Package*) de 5mm (Figura 26).



Figura 26 – LED DIP desenvolvido em 1962 por Nick Holonyak
 Fonte: <http://www.lampstech.co.uk/Spec%20Sheets/LED%20HP%205082-4403.htm>

Em 1972 os pesquisadores Herbert Maruska e Jacques Pankove, dos laboratórios da RCA em New Jersey, desenvolveram o LED violeta usando filmes de Nitreto de Gálio (GaN) dopados com magnésio. No mesmo ano, um ex-aluno de Holonyak, Magnus Georges Craford, inventa o primeiro LED amarelo através de melhoramentos no brilho dos LEDs vermelhos e vermelho-alaranjados.

Em 1979, com base no LED violeta, o primeiro LED azul brilhante foi desenvolvido pelo pesquisador Shuji Nakamura, usando nitreto de gálio (GaN).

Mas somente em 1993, mais de 30 anos após o desenvolvimento do primeiro LED visível por Holonyak, é que o LED azul se tornaria comercialmente viável no mercado pela Nichia Corporation. Com o LED azul, foi possível obter a tão desejada cor branca através de duas maneiras:

- a) pela combinação das três cores básicas – vermelho, verde e azul (RGB – *red, green and blue*).

Essas cores quando misturadas em diferentes intensidades podem reproduzir diversas cores. Os LEDs RGB são utilizados em grandes painéis multimídia, e em aplicações onde efeitos com cores são necessários; e

- b) um LED azul com uma cobertura de material fosforescente composto por elementos de terras raras que segundo a sua composição obtém diferentes temperaturas de cor. Esse tipo de LED é empregado na maioria dos equipamentos de iluminação de cor branca, como por exemplo, em lâmpadas, luminárias e lanternas.

Em 15 de junho de 2006, Nakamura recebeu o Prêmio de Tecnologia do Milênio pelo desenvolvimento dos LEDs de alta luminosidade azuis e brancos utilizados na iluminação, monitores de computador e DVDs de nova geração.

Em 2010, a Philips lança a primeira lâmpada LED com equivalência de fluxo de uma incandescente de 60W (Figura 27). Com apenas 12,5W de potência dissipada e 806 lm de fluxo luminoso, este modelo produz luz branca por meio do emprego LEDs azuis e um invólucro fosforescente. O bulbo é dividido por meio de dissipadores de calor em alumínio.



Figura 27 – Lâmpada LED azul

Fonte: <http://lednews.com.br/por-dentro-da-philips-ambientled-desconstruindo-a-lampada/#>

Em 2014, novamente Shuji Nakamura e mais dois outros japoneses, Isamu Akasaki e Hiroshi Amano, foram agraciados com Prêmio Nobel de Física, reconhecendo o diodo emissor de luz azul produzido a partir de substratos de nitreto de gálio puro, como um avanço na Iluminação a LED, permitindo a geração de fontes de luz branca brilhante e que economizam energia.

Além do desempenho energético superior a todas as tecnologias anteriores, as lâmpadas LED apresentam as seguintes vantagens: acendimento instantâneo, em menos de meio segundo; não emite

radiação ultravioleta; não possui mercúrio na sua composição; permite um alto ciclo de comutações (ligar/desligar); tem duração acima de 15000h; permite o uso associado a sensores de presença; e são recicláveis.

4.10.2 Funcionamento dos LEDs

Os LEDs são dispositivos fabricados a partir de materiais semicondutores que possuem a propriedade de gerar luz monocromática por eletroluminescência com a passagem de corrente elétrica ou um campo elétrico.

A partir da mecânica ondulatória, todo elétron é caracterizado por quatro parâmetros, denominados números quânticos. O primeiro, denominado número quântico principal, “ n ”, representado por valores inteiros ($n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$), designa as camadas, que podem ser associadas ao conceito de orbitas do modelo simplificado de Bohr. O segundo número quântico, “ l ”, define as subcamadas ou subníveis ocupado pelo elétron, denotadas pelas letras minúsculas: “ s ”, “ p ”, “ d ”, ou “ f ”. O terceiro número quântico, “ ml ”, define o número de estados de energia possíveis para cada subcamada. Para a subcamada “ s ” existe um único estado de energia, enquanto que para subcamadas “ p ”, “ d ”, e “ f ”, existem 3, 5 e 7 estados, respectivamente. O quarto número quântico, “ m_s ”, associa a cada elétron um momento de spin, que deve estar orientado ou para cima ou para baixo, em função dos dois valores possíveis ($+ 1/2$ e $-1/2$), um para cada uma das orientações de spin. Na ausência de um campo magnético externo, os estados dentro de cada subcamada são idênticos. Entretanto, quando um campo magnético é aplicado estes estados de subcamadas se dividem, cada estado assumindo uma energia ligeiramente diferente (CALLISTER, 2007).

Um sólido é constituído de um grande número de átomos trazidos ao contato mútuo e ligados para formar um arranjo atômico ordenado. Em distâncias de separação relativamente grandes, cada átomo é independente dos outros e apresenta níveis de energia atômicos e configurações eletrônicas definidas. À medida que os átomos atingem estreita proximidade entre si, recebem ações ou são perturbados pelos elétrons e núcleos de átomos vizinhos. Esta influência é tal que cada estado atômico

distinto pode se dividir numa série de estados eletrônicos estreitamente espaçados no sólido (Figura 28), para formar o que é denominada uma banda de energia eletrônica (CALLISTER, 2007).

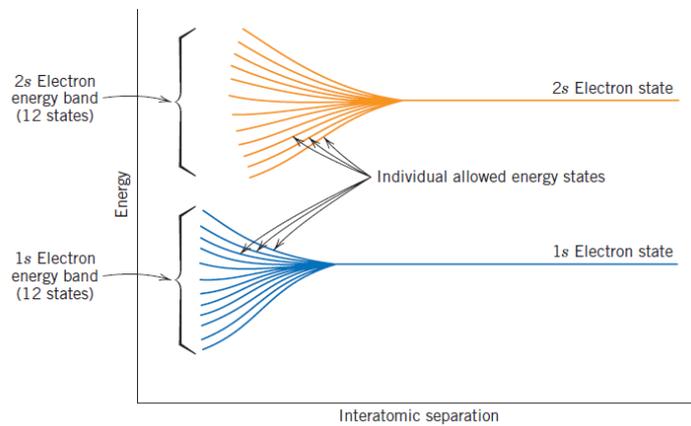


Figura 28 – Formação das bandas de energia eletrônica
Fonte: Callister, 2007

A extensão da divisão depende da distância interatômica e começa com as camadas eletrônicas mais externas, uma vez que essas são as primeiras a serem perturbadas à medida que os átomos se aproximam. Entre as bandas, podem existir brechas (lacunas) sendo que, normalmente, as energias que residem dentro dessas brechas não são disponíveis para ocupação de elétrons. O modo convencional de representação das estruturas de bandas de energia eletrônica em sólidos é mostrado na Figura 29 (CALLISTER, 2007).

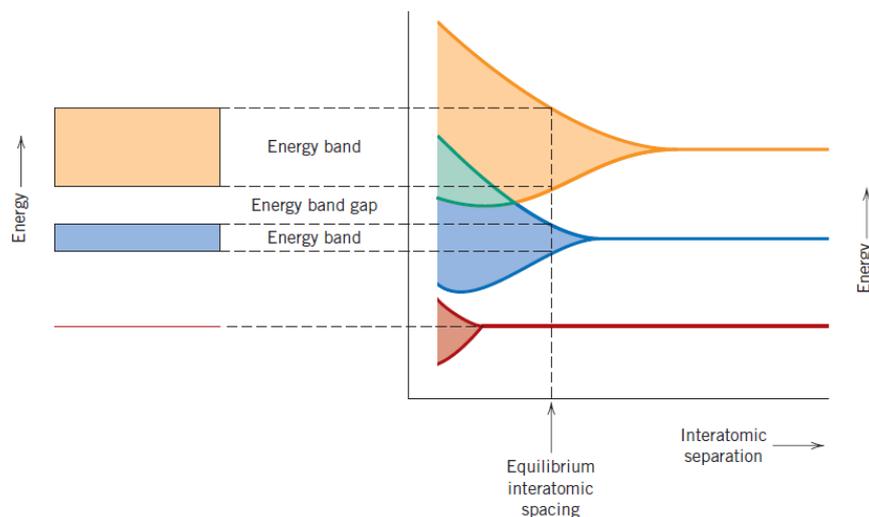


Figura 29 - Estruturas de bandas de energia eletrônica
Fonte: Callister, 2007

As propriedades elétricas de um material sólido são uma consequência de sua estrutura de banda eletrônica, isto é, do arranjo das bandas eletrônicas mais externas e da maneira na qual elas são preenchidas com elétrons. Neste sentido, a banda que contém os elétrons de mais alta energia, ou elétrons de valência, é denominada banda de valência. A banda de condução é a próxima banda de maior energia, que é, sob muitas circunstâncias, virtualmente desocupada por elétrons. Quatro diferentes tipos de estruturas de banda são possíveis a 0 K (Figura 30) (CALLISTER, 2007).

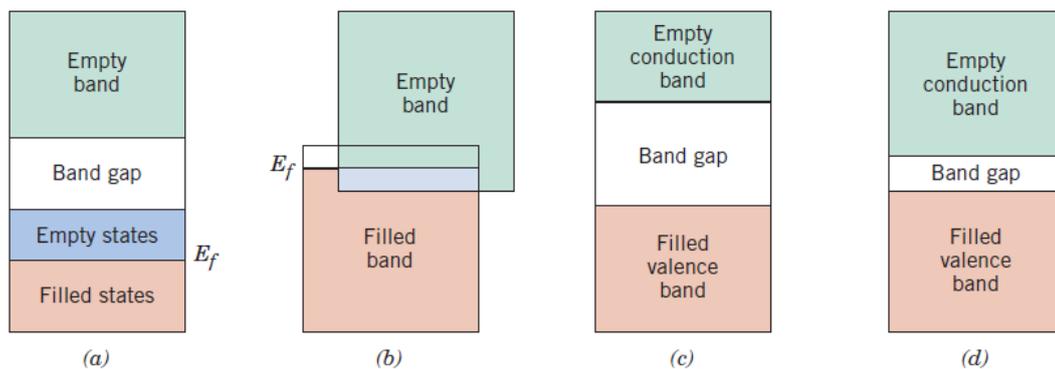


Figura 30 – Bandas de energia possíveis
Fonte: Callister, 2007

- (a) A estrutura de banda eletrônica encontrada em metais tais como cobre, na qual existem estados eletrônicos disponíveis acima e adjacentes aos estados preenchidos, na mesma banda;
- (b) A estrutura de banda eletrônica de metais tais como magnésio, onde existe uma superposição da banda de valência preenchida com uma banda de condução vazia;
- (c) Estrutura de banda eletrônica característica de isolantes; a banda de valência preenchida está separada da banda de condução vazia por uma relativamente grande brecha; e
- (d) A estrutura de banda eletrônica encontrada nos semicondutores, que é a mesma para um isolante exceto que a brecha de banda é relativamente estreita.

As estruturas de banda encontradas nos materiais isolantes (Figura 30c) e semicondutores (Figura 30d) são semelhantes: a banda de valência está completamente preenchida de elétrons, separada da

banda de condução (vazia de elétrons), por uma brecha de energia. A diferença entre as duas estruturas reside na magnitude da brecha de energia; para materiais isolantes, a brecha de energia é relativamente larga, enquanto que para semicondutores ela é estreita (CALLISTER, 2007).

Os semicondutores são classificados como intrínsecos ou extrínsecos. Os intrínsecos são aqueles encontrados em seu estado puro, sendo os mais comuns o silício e o germânio, com quatro elétrons na camada de valência (tetravalentes). Os semicondutores extrínsecos são semicondutores intrínsecos que sofrerão o tratamento de dopagem, ou seja, a introdução de átomos de outros materiais (impurezas) cujos átomos possuem características de valência diferentes, com o objetivo de tornar o material mais condutível. Em função do tipo de impureza adicionada, pode haver um acréscimo de elétrons livres na banda de condução do lado N, ou faltar elétrons na banda de valência do lado P, deixando buracos livres (sem ligação), ou lacunas (CALLISTER, 2007).

O material tipo N é formado pela adição, ao semicondutor intrínseco, de materiais com cinco elétrons na camada de valência (pentavalente), como por exemplo: o arsênio (As), o antimônio (Sb) e o fósforo (P). Com isso, o número de elétrons livres é maior do que o número de lacunas, fazendo com que os elétrons livres sejam maioria. Como os elétrons são carregados com carga negativa, esse semicondutor é chamado tipo N. Por outro lado, o material tipo P é formado pela adição de materiais com três elétrons na camada de valência (trivalentes), como por exemplo: o alumínio (Al), boro (B) e o gálio (Ga). Nesse processo, haverá a formação de buracos ou lacunas, que são carregados com carga positiva. Por isso esse semicondutor é chamado de tipo P (CALLISTER, 2007).

Um diodo é composto por uma junção de um semicondutor tipo N com um tipo P. Quando esta junção é criada, há uma repulsão mútua entre os elétrons livres no lado N que provocando a saída de elétrons para o lado P. À medida que as lacunas do lado P são preenchidas próximas à junção, formam-se camadas finas de íons positivos (falta de elétrons) no lado N, e de íons negativos (excesso de elétrons) no lado P em ambos os lados da junção P-N, gerando uma região denominada de camada de depleção, que impossibilita a condução da corrente (Figura 31) (HELD, 2009).

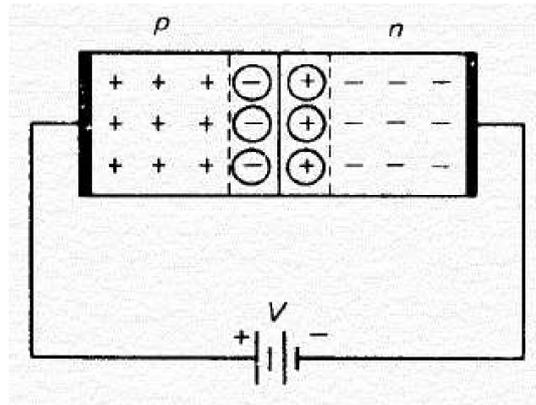


Figura 31 – Camada de depleção

Fonte: <http://tecinposts.blogspot.com.br/2012/05/introducao-aos-semicondutores-extrato.html#!/2012/05/introducao-aos-semicondutores-extrato.html>

Para que os elétrons possam vencer a camada de depleção, é necessário aplicar uma diferença de potencial no diodo, conectando o material tipo-N ao polo negativo e o tipo-P ao polo positivo da fonte de tensão. Quando a tensão aplicada é forte o suficiente, os elétrons livres, repelidos pelo polo negativo da tensão, caem de um nível mais alto de energia da banda de condução da região N para um nível energético mais baixo na banda de valência da região P, com isso, a zona de depleção desaparece e a corrente flui pelo diodo, liberando energia na forma de fótons (Figura 32).

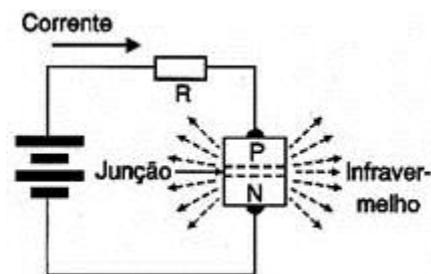


Figura 32 – Emissão de radiação de uma junção semicondutora
Fonte: BRAGA, 2014

Enquanto que no diodo de uso geral, a energia emitida está concentrada na faixa do infravermelho, nos LEDs são empregados materiais semicondutores que possuem níveis de energia diferentes ou alterados pela adição de impurezas (Tabela 4) (HELD, 2009).

Tabela 4 – Uso de materiais semicondutores para gerar luz LED

| Material Semicondutor | Cor emitida |
|---|--|
| Arseneto de alumínio e gálio (AlGaAs) | Vermelho e infravermelho |
| Fosfeto de alumínio e gálio (AlGaP) | Verde |
| Fosfeto de índio, gálio e alumínio (AlGaInP) | Laranja avermelhado brilhante, vermelho, laranja e amarelo |
| Nitreto de gálio e alumínio (AlGaN) | Ultravioleta |
| Nitreto de alumínio (AlN) | Ultravioleta |
| Diamante (C) | Ultravioleta |
| Fosfeto e arseneto de gálio (GaAsP) | Vermelho, laranja e amarelo |
| Fosfeto de gálio (GaP) | Vermelho, amarelo e verde |
| Nitreto de gálio (GaN) | Verde e verde esmeralda |
| Nitreto de gálio (GaN) com AlGaN | Azul e branco |
| Nitreto de gálio e índio (InGaN) | Verde azulado, azul e ultravioleta |
| Safira (Al ₂ O ₃) como substrato | Azul |
| Silicon (Si) como substrato | Azul |
| Selenieto de zinco (ZnSe) | Azul |

Fonte: Adaptado da tabela 1.1 pag.7 (HELD, 2009).

4.10.3 Tecnologia do LEDs

Nesta seção serão descritos os formatos básicos que a tecnologia LED pode apresentar no mercado com a descrição das suas principais características.

4.10.3.1 Primeira geração: LED DIP “Dual In-line Package”

Desenvolvido em 1962 por Nick Holonyak, os LEDs DIP são os mais tradicionais e amplamente utilizados em semáforos e grandes *displays*. Esses são caracterizados pela forma de "pílula" (≤ 5 mm de largura) com dois pinos de conexão que se estendem a partir do fundo do diodo e podem ser facilmente inseridos em uma placa PCBs (ing. *Printed Circuit Board*). O invólucro de epóxi ou plástico serve como uma lente que pode concentrar a luz proveniente do diodo. A forma do invólucro exterior inclui também uma parte plana de um lado que indica sempre o lado do cátodo. Apesar de apresentarem uma maior perda óptica, menor CRI, e menor eficiência se comparados às gerações

precedentes, ainda estão presentes em diversas aplicações, principalmente para as luzes indicadoras (Figura 33).



Figura 33 - LED DIP

Fonte: <http://www.candleray.com/resources/led-lighting/led-chip-types-basics>

4.10.3.2 Segunda geração: LED SMD "*Surface Mounted Device*"

Os LEDs SMD são diretamente soldados na superfície da placa de circuito impresso, podendo apresentar 2, 4 ou 6 contatos, de acordo com o número de diodos no *chip*, sendo um circuito individual para cada diodo. Quando um chip inclui um diodo RGB, obtém-se um *chip* que pode criar qualquer cor ajustando o nível de saída de cada diodo individual no *chip*.

Os LEDs SMD tornaram-se muito populares devido à sua versatilidade, sendo utilizados em diversas aplicações, desde lâmpadas até mesmo em indicadores de chamadas em telefones celulares. Por serem muito menores - mais próximos ao formato de um chip de computador plano e retangular – são mais versáteis se comparados aos DIP (Figura 34).

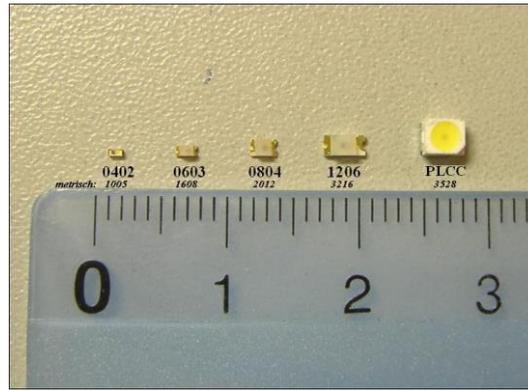


Figura 34 – LED SMD

Fonte: <http://bombillasled.com/2013/06/tipos-de-led-en-bombillas-led/>

Esses LEDs operam exatamente no mesmo princípio dos LEDs DIP convencionais, exceto que são miniaturizados ao extremo para caber em aplicações onde não há muito espaço; e tem uma baixa potência e emitem muito pouco calor.

Os LED SMD com potência acima de 1W são chamados “*High Power*”, ou de alta potência, e apresentam uma maior eficiência energética que os LED SMD de baixa potência. Em função da maior potência, maiores quantidades de calor devem ser conduzidas para fora do LED através dos contatos elétricos e do uso de dissipadores de calor.

4.10.3.3 Terceira geração: LED COB “*Chip On Board*”

A tecnologia COB “*Chip On Board*” e SMD são semelhantes, pois assim como o SMD, os *chips* COB podem ter vários diodos no mesmo *chip*, entretanto em maior quantidade: normalmente nove ou mais. A grande diferença entre as suas tecnologias reside no fato de que, enquanto o SMD requer um circuito para cada diodo, os dispositivos COB apresentam apenas um circuito e dois contatos, independentemente do número de diodos. Por outro lado, esta tecnologia é muito eficiente em aplicações de cor única, não podendo ser usada para criar lâmpadas de cor variável (Figura 35).



Figura 35 – LED COB

Fonte: <http://www.ledwv.com/en/3w-led-cob-p-631.html>

Esta característica de projeto de circuito único leva a simplicidade para o resto de qualquer dispositivo LED COB e melhores níveis de eficiência em lumen por watt (acima de 80 lm/W), em comparação com outras tecnologias de LED, como DIP ou SMD.

5 Programas de eficiência energética em equipamentos

Os programas de eficiência energética em equipamentos são uma das ferramentas mais eficazes de fomento para transformação do mercado em prol da eficiência energética, de novas tecnologias e das energias renováveis. Por meio de ações coordenadas de mercado para a remoção de barreiras, observa-se um efeito desinibidor na adoção de novas tecnologias, gerando, por sua vez, um incremento nas vendas e a consequente redução dos custos de produção. A abordagem de transformação de mercado é aderente ao conceito de curvas de aprendizado e de experiência tecnológica, na qual a redução no custo de produção ocorre a medida que o produtor ganha experiência (GELLER, 2003).

De acordo com Geller (2006):

Nos Estados Unidos, Canadá e México, os índices mínimos de eficiência energética (IMEE), procedimentos de ensaio, etiquetagem comparativa e etiquetagem de endosso constituem elementos-chave das políticas energéticas de cada país. Esses programas, implementados em diferentes formas, em meio a diferentes contextos institucionais, têm sido altamente efetivos em termos de economia de energia. Os índices e etiquetas exercem um efeito conjunto na transformação de mercados.

Os programas de eficiência energética podem ser divididos basicamente em: estabelecimento de padrões, desenvolvimento de etiquetas comparativas e selos de destaque (CLASP, 2005).

5.1 Padrões de eficiência energética

Os padrões de eficiência energética são estabelecidos por meio de regulamentos que especificam, geralmente de forma compulsória, o desempenho energético mínimo de equipamentos, fazendo com que produtos ineficientes não entrem no mercado. Existem três tipos de padrões de eficiência energética (CLASP, 2005):

- a) padrões mínimos de desempenho energético: prescrevem um índice mínimo de eficiência

- energética (rendimento mínimo) ou consumo máximo de energia permitido que o fabricante deve atingir em todos os modelos de cada categoria de produto aplicável;
- b) normas prescritivas: exigem que uma característica ou um dispositivo em particular deva ser instalado em todos os modelos de novos produtos indicados; e
 - c) padrões de classe-média: especificam a eficiência média necessária em todos os modelos de um produto fabricado, permitindo aos fabricantes selecionar o nível de eficiência de cada modelo de tal forma que é alcançada a média prescrita geral.

5.2 Etiquetagem de eficiência energética

Os programas de etiquetagem de eficiência energética visam induzir o mercado de produtos consumidores de energia em direção a uma maior eficiência energética. As etiquetas de eficiência energética são apostas em aparelhos e equipamentos para informar o desempenho energético de um produto. Desta forma, quando o consumidor é informado sobre quanta energia um produto consome, o quão eficiente ele é, ou quais os custos de energia esperados, este se torna um potencial agente transformador do mercado.

Existem duas principais categorias principais de etiquetas: as etiquetas de endosso e as etiquetas comparativas (CLASP, 2005):

- a) etiquetas de endosso: são, essencialmente, "selos de aprovação" atribuídos a modelos de produtos de acordo com critérios de eficiência energética especificados. Ao identificar o conjunto de produtos energeticamente mais eficientes para o consumidor, os selos de endosso se tornam um incentivo para os fabricantes criarem produtos que atendam aos critérios especificados; e
- b) etiquetas comparativas: permitem aos consumidores, ao fazer uma decisão de compra, compararem o desempenho energético entre os modelos de produtos similares e assim motivar os fabricantes a criarem produtos que são mais eficientes do que os produtos dos seus concorrentes. As etiquetas comparativas podem informar, entre outros parâmetros, dados de

consumo e de eficiência do modelo, podendo usar ou não uma escala gráfica contínua ou estratificada em categorias distintas de desempenho com critérios mínimos para cada nível.

Com o desenvolvimento do mercado mundial de iluminação a LED, mais países estão adotando programas de avaliação da conformidade, tanto voluntários como compulsórios, para estimular a adoção desses produtos no mercado. Para isso, destaca-se que é fundamental a necessidade do desenvolvimento de normas para medir o desempenho energético e a qualidade dos produtos.

5.3 Programas de eficiência energética em equipamentos pelo mundo

Com o objetivo de traçar um breve panorama dos principais programas de eficiência energética em lâmpada LED pelo mundo, foram levantadas as práticas dos programas *Energy Star* e *FTC Lighting Facts* e *Led Lighting Facts* dos EUA, e os programas de etiquetagem e Ecolabel da União Europeia.

5.3.1 Energy Star

O *Energy Star* é um programa voluntário lançado em 1992 pela *US Environmental Protection Agency* (EPA) que visa identificar e promover produtos e edifícios energeticamente eficientes, através de uma etiqueta de endosso voluntária (Figura 36) ou outras formas de comunicação aplicadas sobre os produtos e edifícios que atendam aos padrões de eficiência energética estabelecidos pelo programa. A sua missão é reduzir o consumo de energia, melhorar a segurança energética e mitigar os impactos ambientais. O selo *Energy Star* é concedido com base em ensaios de terceira parte em laboratórios reconhecidos pelo EPA (ENERGY STAR, 2015a).

Em 2010, o DOE estabeleceu critérios para concessão do Selo *Energy Star* para lâmpadas LED. A última atualização dos critérios entrou em vigor no dia 30 de setembro de 2014, unificando em um único documento as especificações para LFCs e lâmpadas LED (ENERGY STAR, 2015b).



Figura 36 – Logo do Programa *Energy Star*
Fonte: https://www.energystar.gov/about/why_energy_star

5.3.2 FTC Lighting Facts

O *FTC Lighting Facts* é um programa compulsório para diversas categorias de eletrodomésticos, cuja implementação cabe à *Federal Trade Commission* (FTC), uma agência federal de defesa do consumidor, com o objetivo de prevenir práticas comerciais fraudulentas e abusivas. Esse programa foi instituído a partir de 1º de janeiro de 2012 para todas as lâmpadas de base rosqueável, incluídas as LFs, LFCs, LIs, halógenas, iodetos metálicos e lâmpadas LED.

A etiqueta *FTC Lighting Facts* coloca em evidência os lumens emitidos de forma a ajudar os consumidores a escolherem a lâmpada certa para as suas necessidades de iluminação, procurando assim romper com um hábito antigo de selecionar a lâmpada pela potência. Este esforço se mostrou especialmente importante após a entrada em vigor da Lei de Independência e Segurança Energética, que entre outras providências, instituiu a retirada gradual de produção das lâmpadas incandescentes a partir de 2012.

A etiqueta também informa dados da quantidade de energia utilizada, do custo da energia com base em três horas de uso por dia, vida da lâmpada, a TCC, a potência e, no caso das lâmpadas fluorescentes compactas, a presença de mercúrio. Existem vários modelos de etiquetas, incluídas as

versões opcionais bilíngues e com referência ao programa *Energy Star*, conforme pode ser observado na Figura 37.

| Lighting Facts/Datos de Iluminación Per Bulb/Por Bombilla | |
|--|---------------------------|
| Brightness/Brillo | XXX lumens/lúmenes |
| Estimated Yearly Energy Cost/ Costo Estimado Anual de Energía | \$X.XX |
| Based on 3 hrs/day, 11¢/kWh. Cost depends on rates and use./Basado en 3 hrs/día, 11¢/kWh. Costo depende de la tarifa y el uso. | |
| Life/Duración | X.X years/años |
| Based on 3 hrs/day/Basado en 3 hrs/día | |
| Light Appearance/Apariencia de Iluminación | |
| Warm/Cálida Cool/Fría | |
|  XXXX K | |
| Energy Used/Usos de Energía | XX watts/vatios |
| Contains Mercury/Contiene Mercurio | |
| For more on clean up and safe disposal, visit epa.gov/cfl . | |
| Para más sobre limpieza y desecho seguro, visite epa.gov/cfl . | |

Figura 37 – Etiqueta FTC *Lighting Facts*
Fonte: Lighting Facts

5.3.3 LED Lighting Facts

O LED *Lighting Facts* é um programa voluntário de desempenho energético implementado pelo DOE. Por meio do Ato de Política Energética de 2005 (EPACT 2005) e de Independência e Segurança Energética de 2007 (EISA 2007), foram estabelecidas diretrizes para realização de atividades de suporte a pesquisa e desenvolvimento em iluminação a LED. Esse programa é voltado a um público mais técnico, compradores do varejo, especificadores e profissionais de iluminação, e seu foco principal é o combate a declarações de desempenho exageradas que muitas vezes são predominantes em novas tecnologias, e desta forma assegurar para os tomadores de decisão o real desempenho dos produtos de iluminação a LED.

Assim como a *Lighting Facts*, a etiqueta LED *Lighting Facts* (Figura 38) informa parâmetros de fluxo luminoso (lm), potência consumida (W), TCC, IRC, eficiência luminosa (lm/W), e de forma

voluntária, o percentual projetado de manutenção do fluxo luminoso inicial a 25.000 horas e o prazo de garantia do produto. Antes de serem aplicados no produto, os parâmetros declarados na etiqueta são verificados pelo DOE em laboratórios de terceira parte de acordo com os seguintes procedimentos de ensaios, publicados pela IESNA (*Illuminating Engineering Society North America*):

- a) IES LM-79-08 - Procedimentos de medição de parâmetros elétricos e fotométricos de equipamentos de LED integrados, aplicável a lâmpadas ou luminárias;
- b) IES LM-80-08 - Procedimento de teste para medição da depreciação do fluxo luminoso e alteração da cromaticidade de componentes de LEDs e módulos de LEDs, através de medições em pelo menos 6000 horas de vida, em intervalos de 1000 horas, em no mínimo três condições de temperatura (55°C, 85°C e outra especificada pelo fabricante do LED); e
- c) TM-21 - Método para projetar o percentual da manutenção do fluxo luminoso de fontes de luz LED a partir dos dados obtidos pelos ensaios baseados na IES LM-80-08.

Sensível aos contratempos que assolaram a adoção, por parte do consumidor, de outras novas tecnologias, como ocorreu com as LFCs, o DOE está empenhado em aproveitar todo o potencial de economia de energia que a iluminação de estado sólido pode prover. O DOE não exige o uso de seu selo nas embalagens uma vez que a etiqueta do FTC é compulsória, entretanto, as informações da etiqueta devem estar disponíveis no catálogo do fabricante ou no site do programa.

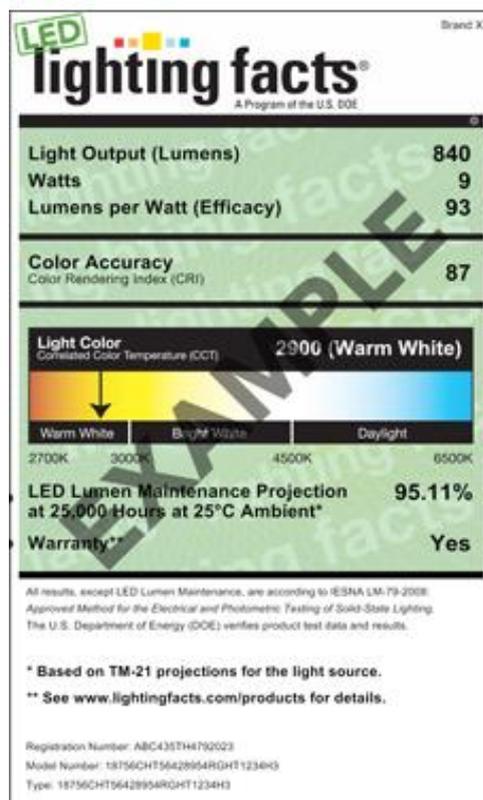


Figura 38 – Etiqueta LED *Lighting Facts*
Fonte:DOE

5.3.4 Etiquetagem europeia

O Departamento de Energia da União Europeia estabeleceu, por meio do Regulamento 874/2012, complementar a Diretiva 2010/30/UE, sobre os requisitos para a etiquetagem compulsória de lâmpadas elétricas, tais como: lâmpadas incandescentes; lâmpadas fluorescentes; lâmpadas de descarga de alta intensidade e lâmpadas e módulos de LED (Figura 39). O regulamento também estende o seu escopo para luminárias concebidas para funcionar com as lâmpadas citadas anteriormente e comercializadas no varejo, inclusive quando estão integradas em mobiliários. O regulamento da etiquetagem energética das lâmpadas elétricas e luminárias, que entrou em vigor em 15 de outubro 2012, revoga a Diretiva 98/11/CE.

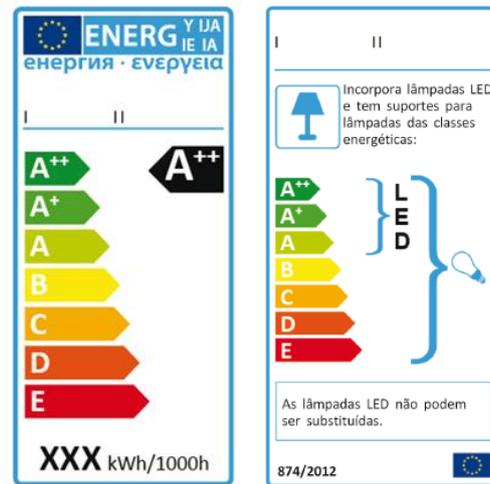


Figura 39 – Etiquetas comparativas para lâmpadas e luminárias da EU
Fonte: EU

O rótulo deve conter as seguintes informações:

- Nome do fornecedor ou marca comercial;
- Identificador do modelo;
- Classe de eficiência energética;
- Consumo de energia ponderado em kWh por 1 000 horas, calculado e arredondado às unidades.

5.3.5 Ecolabel

O Selo *Ecolabel* (Figura 40) foi criado em 1992 pelo regulamento CEE N° 880/92 de 23 de março de 1992 da Comunidade Econômica Europeia, tornando-se o selo ambiental oficial da Europa. Seu objetivo é ajudar os consumidores a identificar os produtos que são menos prejudiciais ao meio ambiente na totalidade do seu ciclo de vida. Em 2000, o selo foi relançado por um novo regulamento, CE n.º 1980/2000, que estendeu o seu escopo para cobrir os serviços, sendo substituído pelo regulamento CE N° 66/2010. A participação no programa é voluntária e é administrada por organismos competentes oficialmente designados em cada país da UE. Os critérios técnicos

específicos são acordados pelos Estados-Membros da UE após consultas e negociações entre representantes europeus da indústria, consumidores, organizações ambientais, os varejistas e as autoridades públicas. A cada quatro anos, em média, os critérios são revistos para refletir a inovação técnica, tais como a evolução dos materiais, processos de produção ou na redução de emissões e as mudanças no mercado.



Figura 40 – Selo *Ecolabel*
Fonte: UE

O Selo *Ecolabel* abrange atualmente uma vasta gama de grupos de produtos: beleza e higiene; limpeza; vestuário e têxtil; tintas e vernizes; equipamentos eletrônicos; materiais de cobertura; móveis de madeira; eletrodomésticos; bombas de calor e aquecedores de água; materiais sanitários; lubrificantes; produtos de papel; assim como outros em desenvolvimento: alimentação, edifícios de escritórios e serviços de limpeza.

Os critérios para fontes luminosas foram instituídos pela Comissão Europeia pela Decisão nº 2011/331/EU, de 6 de junho de 2011, e alterada pela Decisão nº 2014/336/EU de 5 de junho, que prorrogou o prazo de validade até 31 de dezembro de 2015⁷. O selo para fontes luminosas abrange todas as lâmpadas elétricas de iluminação para fins gerais, com um ou dois soquetes, com exceção dos

⁷ Segundo informações prestadas por email pela Comissão Europeia, após 31 de dezembro de 2015, a Comissão Europeia não prorrogou mais a Decisão nº2011/331/EU devido ao baixo número de licenças atribuídas, que no ano 2015 foi de zero pedidos.

seguintes tipos de lâmpadas: lâmpadas fluorescentes compactas com reator magnético, projetores, lâmpadas para iluminação fotográfica e lâmpadas para solários.

Os critérios avaliados para concessão do *Ecolabel* são:

- Eficiência energética;
- Tempo de vida;
- Manutenção do fluxo luminoso;
- Teor de mercúrio;
- Índice de reprodução cor;
- Ciclos ligado/desligado;
- Coerência cromática;
- Substâncias e misturas perigosas;
- Substâncias incluídas na lista em conformidade com o artigo 59. N°1, do Regulamento (CE) nº 1907/2006 do Parlamento Europeu e do Conselho;
- Componentes de plástico;
- Embalagem;
- Manual de instruções;
- Responsabilidade social; e
- Informações que devem constar do rótulo ecológico da UE.

5.4 Programas de eficiência energética em equipamentos no Brasil

No Brasil há três programas principais que visam à eficiência energética em equipamentos consumidores de energia elétrica, ambos no âmbito do Governo Federal. Esses programas são: a regulamentação da Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295/2001), o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) do Inmetro e o Selo Procel de Economia de Energia (Selo Procel) da Eletrobras.

Nesta seção, serão apresentadas as principais informações desses programas para os equipamentos que utilizam a energia elétrica.

No Brasil, as lâmpadas LED já foram incluídas no portfólio dos programas do Selo Procel e do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), por meio da certificação compulsória.

5.4.1 Lei de eficiência energética (Lei 10.295/2001)

A Lei de Eficiência Energética é o instrumento que determina a existência de níveis mínimos de eficiência energética (ou máximos de consumo específico de energia) de máquinas e aparelhos consumidores de energia (elétrica, derivados de petróleo ou outros insumos energéticos) fabricados ou comercializados no país, bem como de edificações construídas, com base em indicadores técnicos pertinentes e de forma compulsória. Esta foi concebida sob o entendimento de que a conservação de energia deve ser finalidade da Política Energética Nacional. A lei estimula o desenvolvimento tecnológico, a preservação ambiental e a introdução de produtos mais eficientes no mercado nacional (MME, 2014).

Para regulamentar e implementar o disposto na Lei de Eficiência Energética, foi criado o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE por meio do Decreto 4.059/2001. O CGIEE é constituído pelos ministérios de Minas e Energia (MME), de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), além das agências Aneel e ANP, um representante da universidade e um cidadão brasileiro, ambos especialistas em energia. Suas principais atribuições são: regulamentar os níveis máximos de consumo de energia ou mínimos de eficiência energética de aparelhos consumidores de energia, estabelecer Programas de Metas com indicação da evolução dos níveis a serem alcançados por cada equipamento regulamentado e constituir Comitês Técnicos para analisar matérias específicas (MME, 2014).

Em 2010, as lâmpadas incandescentes de uso comum foram regulamentadas por meio da Portaria Interministerial N° 1.007, de 31 de dezembro de 2010, que estabeleceu índices mínimos e prazos para vigência. Na prática, os índices propostos para as lâmpadas incandescentes são inatingíveis

por essa tecnologia, resultando no seu banimento do mercado. A Figura 41 apresenta os produtos regulamentados até o ano de 2014.



Figura 41 – Equipamentos regulamentados pelo CGIEE (2002 à 2014)
Fonte: MME, 2014

5.4.2 Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE)

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), de responsabilidade do Inmetro, é composto por diversos programas de avaliação da conformidade, como a etiquetagem de equipamentos consumidores de energia elétrica, GLP, GNV e automóveis, com foco especial na eficiência energética, assim como demandas na área de recursos renováveis (INMETRO, s/d).

O PBE tem como principal objetivo disponibilizar ao consumidor, entre outros elementos, informações sobre o desempenho energético dos equipamentos que, além do preço, podem influenciar na sua decisão de compra. Por sua vez, uma escolha consciente do consumidor estimula a competitividade da indústria, por meio de um processo de melhoria contínua e inovação tecnológica para produção de equipamentos mais eficientes.

A divulgação das informações sobre o desempenho energético dos equipamentos é feita por meio da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (Ence). Na maioria dos casos, a Ence classifica os equipamentos em faixas coloridas de “A” (mais eficiente) a “E” (menos eficiente), além de fornecer outras informações relevantes, como por exemplo, a pressão de funcionamento, mostrada na Figura 42.



Figura 42 - Ence para coletores solares
Fonte: INMETRO (s/d)

A certificação compulsória das lâmpadas LED foi instituída pela Portaria Inmetro nº144/2015, que aprovou os Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC) para lâmpadas LED com dispositivo integrado à base, com foco no desempenho, segurança elétrica e compatibilidade eletromagnética, evidenciados por meio da Ence (Figura 43).



Figura 43 - Ence para lâmpada LED tipo bulbo e tubular
Fonte: INMETRO (s/d)

Complementarmente ao RAC, o Inmetro institui os seguintes documentos:

- Portaria Inmetro nº389, de 25 de agosto de 2014, que aprovou o Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) para lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base;
- Portaria complementar Inmetro nº 143/2015, que aprovou ajustes no RTQ para lâmpadas LED com dispositivo integrado à base;
- Portaria Inmetro nº 76/2016, que prorrogou o prazo constante na Portaria Inmetro nº 144/2015 para fabricação e importação de lâmpadas LED não certificadas;
- Portaria n.º 221, de 16 de maio de 2016, que prorrogou o prazo constante na Portaria Inmetro nº 144/2015 para comercialização, no mercado nacional, por atacadistas e varejistas no Brasil de lâmpadas LED não certificadas.

O Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) do Inmetro classifica as lâmpadas LED em:

- Omnidirecional: são lâmpadas que apresentam uma distribuição de intensidade luminosa simétrica e uniforme ao entorno de seu corpo. Essas lâmpadas devem emular uma lâmpada incandescente convencional (Figura 44);

- Direcional: são lâmpadas que emitem pelo menos 80% do fluxo luminoso dentro de um ângulo de fecho luminoso de 120°, e são destinadas principalmente à iluminação de tarefa e de destaque. Essas lâmpadas emulam as lâmpadas incandescentes ou halógenas do tipo refletoras, MR (*multifaceted reflector*) e PAR (*parabolic aluminized reflector*) (Figura 44);
- Semidirecional: são lâmpadas cuja distribuição luminosa não se enquadra nem como direcional e nem como Omnidirecional. Assim como os modelos omnidirecionais, estas lâmpadas também se propõem substituir as LIs e LFCs, mas com um ângulo de fecho luminoso inferior às anteriores (Figura 44);
- Decorativa: são lâmpadas com bulbo decorativo (ovoide, vela, tocha globo), destinadas ao uso aparente em luminárias decorativas: lustres, pendentes, arandelas, entre outras. São lâmpadas que emulam as lâmpadas incandescentes decorativas de baixa potência (Figura 45); e
- LED tubular: também conhecida como tubo LED, substituem as lâmpadas fluorescentes tubulares de dimensões de acordo com NBR IEC 60081 e base G5, G13 ou R17DC (Figura 46).



Figura 44 – Classificação quanto à distribuição do fluxo luminoso
Fonte: Revista Lumière Eletric nº 208 p99



Figura 45 – Lâmpada filamento LED decorativa
 Fonte: <http://www.brilia.com/vela-chama-filamento.html>



Figura 46 – Lâmpada tubular LED
 Fonte: <https://www.universoled.com/tubo-led-9w-philips.html>

Para serem certificadas, as lâmpadas LED devem passar por ensaios de tipo referente à eficiência energética e segurança elétrica, conforme descritos na Tabela 5 – Ensaios de tipo.

Tabela 5 – Ensaios de tipo

| Ensaios de tipo – Eficiência Energética | Ensaios de tipo – Segurança |
|--|---|
| Potência da lâmpada | Marcação |
| Fator de potência / limite de harmônicas | Intercambialidade da base |
| Fluxo luminoso | Proteção contra contato acidental com partes vivas |
| TCC/IRC | Compatibilidade eletromagnética |
| Eficiência e fluxo luminoso para equivalência | Resistência de isolamento e rigidez dielétrica após exposição à umidade |
| Distribuição luminosa | Resistência a torção |
| Valor da intensidade luminosa de pico | Resistência ao aquecimento |
| Ângulo do fecho luminoso | Resistência à chama e à ignição |
| Manutenção do fluxo luminoso e definição da vida nominal | |
| Ciclo térmico e comutação | |
| Durabilidade do dispositivo de controle incorporado | |
| Verificação da qualidade do projeto eletrônico p/capacitor(es) eletrolítico(s) | |
| Ensaio de desgaste acelerado caso haja capacitor(es) eletrolítico(s) | |

Fonte: Portaria Inmetro nº144/2015

5.4.3 Selo Procel de Economia de Energia

O Selo Procel de Economia de Energia (Figura 47), ou simplesmente Selo Procel, foi instituído pelo Governo Federal em 1993. Por ser um instrumento de endosso, tem a finalidade de ser uma ferramenta simples e eficaz, que permite ao consumidor identificar os equipamentos e eletrodomésticos mais eficientes à disposição no mercado, além de induzir o desenvolvimento e aprimoramento tecnológico de tais produtos (Figura 47). A gestão do programa é realizada pela Eletrobras em parceria com o Inmetro, no âmbito do PBE, juntamente com fabricantes e suas associações, laboratórios de ensaios, universidades, centros de pesquisa e agentes do setor (ELETROBRAS/PROCEL, 2015a). A inscrição de produtos no programa do Selo Procel é voluntária.



Figura 47 – Selo Procel
Fonte: Eletrobras/Procel, 2015

Em 2015, o Selo Procel foi concedido a um total de 39 categorias de equipamentos (Tabela 6), distribuídas entre 3.640 modelos de 190 fornecedores, alcançando a marca de 44 milhões de equipamentos vendidos no Brasil, destacando-se alguns já contemplados na Lei de Eficiência Energética, como por exemplo: as lâmpadas fluorescentes compactas, os motores elétricos trifásicos e os refrigeradores (ELETROBRAS/PROCEL, 2015a).

Tabela 6 - Categorias de equipamentos contemplados com o Selo Procel

| Categoria de equipamento | | Início da concessão | Categoria de equipamento | | Início da concessão |
|--------------------------|--|---------------------|--------------------------|--|---------------------|
| 1 | Bomba Centrífuga | 2011 | 21 | Motor de Indução Trifásico | 1997 |
| 2 | Circulador de Ar | 2012 | 22 | Painel Fotovoltaico de Geração de Energia | 2010 |
| 3 | Coletor Solar Plano - Aplicação Banho | 2000 | 23 | Reator Eletromagnético para Lâmpada a Vapor de Sódio | 2002 |
| 4 | Coletor Solar Plano - Aplicação Piscina | 2000 | 24 | Reator Eletrônico para Lâmpada Fluorescente Tubular | 2010 |
| 5 | Condicionador de Ar - Janela | 1996 | 25 | Refrigerador Combinado | 1995 |
| 6 | Condicionador de Ar - <i>Split</i> Cassete | 2010 | 26 | Refrigerador Combinado <i>Frost-Free</i> | 1998 |
| 7 | Condicionador de Ar - <i>Split Hi-Wall</i> | 2004 | 27 | Refrigerador de 1 Porta | 1995 |
| 8 | Condicionador de Ar - <i>Split</i> Piso-Teto | 2009 | 28 | Refrigerador de 1 Porta Compacto | 2002 |
| 9 | Forno de Micro-ondas | 2014 | 29 | Refrigerador de 1 Porta <i>Frost-Free</i> | 2008 |
| 10 | <i>Freezer</i> Horizontal | 1998 | 30 | Reservatório Térmico | 2002 |
| 11 | <i>Freezer</i> Vertical | 1995 | 31 | Reservatório Térmico - Alta Pressão | 2005 |
| 12 | <i>Freezer</i> Vertical <i>Frost-Free</i> | 2003 | 32 | Televisor CRT - Modo de Espera | 2007 |
| 13 | Lâmpada a Vapor de Sódio | 2008 | 33 | Televisor LCD - Modo de Espera | 2009 |
| 14 | Lâmpada Fluorescente Compacta | 2001 | 34 | Televisor LED - Modo de Espera | 2010 |
| 15 | Lâmpada LED - Bulbo | 2014 | 35 | Televisor Plasma - Modo de Espera | 2009 |
| 16 | Lâmpada LED - Tubular | 2014 | 36 | Ventilador de Coluna | 2012 |
| 17 | Máquina de Lavar Roupa - Automática | 2006 | 37 | Ventilador de Mesa | 2012 |
| 18 | Máquina de Lavar Roupa - Lava e Seca | 2009 | 38 | Ventilador de Parede | 2012 |
| 19 | Máquina de Lavar Roupa - Semiautomática | 2006 | 39 | Ventilador de Teto | 2008 |
| 20 | Motobomba Centrífuga | 2011 | | | |

Fonte: Eletrobras/Procel, 2015a

Em outubro de 2014, o Procel iniciou a concessão do selo para lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado, tipo bulbo (omnidirecional, semidirecional, direcional, decorativas) e tubular (Figura 48).



Figura 48 – Lâmpada LED tipo bulbo e tubular
Fonte: Internet, 2016

Para receber o Selo Procel, o modelo deverá atender aos critérios específicos estipulados pelo Procel (PROCEL INFO, 2016), a saber:

- atender aos requisitos do Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) para Lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base, instituído pela Portaria Inmetro n°389, de 25 de agosto de 2014;
- o fator de potência medido de cada lâmpada não deve ser inferior a 0,92;
- a vida nominal declarada pelo fornecedor deve ser de no mínimo 25.000 h com a manutenção de pelo menos 70% do fluxo luminoso inicial (L70);
- a empresa fornecedora deverá garantir seu produto contra defeitos de fabricação mediante a troca do produto defeituoso com a apresentação da nota fiscal por parte do consumidor, num prazo não inferior a 03 (três) anos após a emissão da nota.

- apresentar um valor de eficiência energética medida e declarada de no mínimo 80lm/W.

As lâmpadas tubulares deverão atender os valores mínimos estipulados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores mínimos de eficiência para lâmpadas tubulares

| Tipo de lâmpada | Tipo de Base | Eficiência mínima inicial em lm/W (medida e declarada) |
|--------------------------------------|---------------------|---|
| Bulbo | Todas | 80 |
| Tubular (comprimento: 600 à 1200 mm) | G13 | 90 |
| Tubular (comprimento: 550 à 1150 mm) | G5 | 105 |

Fonte: Procel Info, 2015

6 Economia de energia devido à inserção da tecnologia LED

Neste capítulo, serão apresentadas as metodologias e as premissas utilizadas para estimar cenários para o potencial de economia de energia em iluminação no setor residencial com a introdução das lâmpadas LED em substituição às lâmpadas fluorescentes e realizar uma análise econômica para uma residência típica brasileira proposta para este estudo.

6.1 Metodologia para cálculo do potencial técnico de economia de energia devido à inserção da tecnologia LED

O potencial técnico de economia de energia devido à inserção da tecnologia LED representa a economia de energia que poderia ser obtida, comparando-se um cenário teórico inteiramente formado por LFs - como consequência da regulamentação das LIs - com um segundo cenário teórico, onde as LFs teriam sido inteiramente substituídas por lâmpadas LED.

Assim como na metodologia elaborada por Bastos (2011), para a realização desta análise tomou-se como base as seguintes fontes de dados: a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso de Energia Elétrica – ano base 2005 (PPH), o Balanço Energético Nacional – ano Base 2014 (EPE, 2015), o Plano Nacional de Energia – PNE 2030 (EPE, 2007) e os dados técnicos de lâmpadas LED dos programas do Selo Procel e *Energy Star*.

A PPH se insere nos trabalhos de Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil, contratado pela Eletrobras, com o apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD e com recursos doados pelo *Global Environment Facility* - GEF, por meio do Banco Mundial (BIRD), tendo como objetivo obter informações necessárias para formar uma nova e adequada concepção do mercado de eficiência energética do país e do impacto do racionamento sobre o mesmo (ELETROBRAS/PROCEL, 2007b). A última PPH do setor residencial foi realizada em 2005, e aplicou 9.847 questionários declaratórios, que contemplaram 16 estados (e o Distrito Federal) das 5 regiões do país, com a participação de 21 empresas distribuidoras de energia elétrica.

Para este estudo foram estabelecidas as seguintes premissas:

- o cálculo do potencial técnico de conservação de energia elétrica será realizado para o ano de 2018, tendo em vista que, a partir 30/06/2017, as LIs de uso comum que não atendam aos índices mínimos de eficiência energética estipulados pela regulamentação, não poderão mais ser comercializadas por atacadistas e varejistas no país;
- Para a realização do cálculo do potencial técnico de economia, os dados de posse de LIs da Pesquisa PPH (2005) foram convertidos para LFCs. Os demais dados de posse e hábitos de uso de lâmpadas por residência continuam inalterados até 2018;
- foi considerada a distribuição do consumo de energia elétrica por tipo de lâmpada no setor residencial por região, segundo dados da Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a);
- o aumento anual do consumo residencial de energia elétrica com iluminação ocorre com o mesmo valor percentual estimado do aumento do número de domicílios do PNE 2030 (EPE, 2007);
- a participação das lâmpadas dicróicas e outras foi desprezada; e
- não há perdas de energia em função do fator de potência.

Na Tabela 8 é apresentada a estimativa do consumo regional de energia elétrica com a iluminação residencial em 2005, calculada a partir do consumo regional de energia elétrica do setor residencial em 2005 (EPE, 2015) e da participação do consumo de energia elétrica das lâmpadas no setor residencial de cada região do país (ELETROBRAS/PROCEL, 2007b).

Tabela 8 - Estimativa do consumo regional de energia elétrica da iluminação residencial em 2005

| Região | Consumo regional de energia elétrica em 2005 (GWh) Fonte: EPE, 2015 | Participação das lâmpadas no consumo regional de energia elétrica residencial (ELETROBRAS/PROCEL, 2007b) | Consumo regional de energia elétrica da iluminação residencial projetado para 2005 (GWh) |
|---------------|--|--|--|
| Norte | 4.132,0 | 14% | 578,5 |
| Nordeste | 13.480,0 | 11% | 1.482,8 |
| Sudeste | 45.490,0 | 19% | 8.643,1 |
| Sul | 13.908,0 | 8% | 1.112,6 |
| Centro Oeste | 6.183,0 | 12% | 742,0 |
| Brasil | 83.193,0 | - | 12.559,0 |

Fonte: Adaptado de Bastos (2011)

A partir do consumo regional de energia elétrica da iluminação residencial projetado para 2005 (GWh) (Tabela 8) e da participação regional do consumo de energia elétrica da iluminação residencial por tipo de lâmpada (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a), foi possível projetar o consumo de por tipo de lâmpada, por região em 2005 (Tabela 9 à Tabela 13).

Tabela 9 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Norte em 2005.

| Tipo de lâmpada | Potência (W) | Participação regional do consumo mensal de energia elétrica por lâmpada em relação ao consumo da iluminação (%) (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a) | Consumo por lâmpada (GWh) |
|-------------------------------------|--------------|--|---------------------------|
| Lâmpadas incandescentes | 25 | 1,19% | 6,9 |
| | 40 | 5,25% | 30,4 |
| | 60 | 32,77% | 189,6 |
| | 100 | 10,13% | 58,6 |
| | 150 | 5,38% | 31,1 |
| LFs tubulares | 20 | 16,60% | 96,0 |
| | 40 | 15,36% | 88,9 |
| LFs compactas | 15 | 3,54% | 20,5 |
| | 20 | 6,89% | 39,9 |
| LFs circulares | 20 | 2,76% | 16,0 |
| Consumo iluminação total (Tabela 8) | | 100,00% | 578,5 |

Fonte: Adaptado de Bastos (2011)

Tabela 10 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Nordeste em 2005.

| Tipo de lâmpada | Potência (W) | Participação do consumo mensal por lâmpada em relação ao consumo da iluminação (%) (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a) | Consumo por lâmpada (GWh) |
|--|---------------------|--|----------------------------------|
| Lâmpadas incandescentes | 25 | 1,89% | 28,0 |
| | 40 | 8,54% | 126,6 |
| | 60 | 42,41% | 628,9 |
| | 100 | 1,54% | 22,8 |
| | 150 | 0,08% | 1,2 |
| LFs tubulares | 20 | 7,91% | 117,3 |
| | 40 | 15,10% | 223,9 |
| LFs compactas | 15 | 4,37% | 64,8 |
| | 20 | 16,94% | 251,2 |
| LFs circulares | 20 | 1,07% | 15,9 |
| Consumo iluminação total (Tabela 8) | | 100,00% | 1.482,8 |

Fonte: Adaptado de Bastos (2011)

Tabela 11 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Sudeste em 2005.

| Tipo de lâmpada | Potência (W) | Participação do consumo mensal por lâmpada em relação ao consumo da iluminação (%) (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a) | Consumo por lâmpada (GWh) |
|--|---------------------|--|----------------------------------|
| Lâmpadas incandescentes | 25 | 0,12% | 10,4 |
| | 40 | 2,05% | 177,2 |
| | 60 | 46,19% | 3992,2 |
| | 100 | 22,13% | 1912,7 |
| | 150 | 2,34% | 202,2 |
| LFs tubulares | 20 | 3,22% | 278,3 |
| | 40 | 12,74% | 1101,1 |
| LFs compactas | 15 | 3,49% | 301,6 |
| | 20 | 6,42% | 554,9 |
| LFs circulares | 20 | 1,13% | 97,7 |
| Consumo iluminação total (Tabela 8) | | 100,00% | 8.643,1 |

Fonte: Adaptado de Bastos (2011)

Tabela 12 – Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Sul em 2005.

| Tipo de lâmpada | Potência (W) | Participação do consumo mensal por lâmpada em relação ao consumo da iluminação (%) (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a) | Consumo por lâmpada (GWh) |
|-------------------------------------|---------------------|--|----------------------------------|
| Lâmpadas incandescentes | 25 | 0,14% | 1,6 |
| | 40 | 3,69% | 41,1 |
| | 60 | 49,70% | 553,0 |
| | 100 | 15,74% | 175,1 |
| | 150 | 1,68% | 18,7 |
| LFs tubulares | 20 | 2,10% | 23,4 |
| | 40 | 12,99% | 144,5 |
| LFs compactas | 15 | 3,43% | 38,2 |
| | 20 | 9,90% | 110,2 |
| LFs circulares | 20 | 0,52% | 5,8 |
| Consumo iluminação total (Tabela 8) | | 100,00% | 1.112,6 |

Fonte: Adaptado de Bastos (2011)

Tabela 13 - Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada da região Centro-Oeste em 2005.

| Tipo de lâmpada | Potência (W) | Participação do consumo mensal por lâmpada em relação ao consumo da iluminação (%) (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a) | Consumo por lâmpada (GWh) |
|-------------------------------------|---------------------|--|----------------------------------|
| Lâmpadas incandescentes | 25 | 0,23% | 1,7 |
| | 40 | 3,86% | 28,6 |
| | 60 | 59,80% | 443,7 |
| | 100 | 2,51% | 18,6 |
| | 150 | 0,08% | 0,6 |
| LFs tubulares | 20 | 3,93% | 29,2 |
| | 40 | 13,10% | 97,2 |
| LFs compactas | 15 | 8,13% | 60,3 |
| | 20 | 4,60% | 34,1 |
| LFs circulares | 20 | 2,34% | 17,4 |
| Consumo iluminação total (Tabela 8) | | 100,00% | 742,0 |

Fonte: Adaptado de Bastos (2011)

Somando-se os consumos regionais mensais por tipo lâmpada (Tabela 9 à Tabela 13), foi possível estimar a participação do consumo mensal de energia elétrica com iluminação no Brasil por tipo de lâmpada em 2005, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Estimativa do consumo de energia elétrica da iluminação por tipo de lâmpada do Brasil em 2005

| Tipo de lâmpada | Potência (W) | Participação do consumo mensal por tipo lâmpada em relação ao consumo da iluminação no Brasil | Consumo por lâmpada (GWh) |
|--|---------------------|--|----------------------------------|
| Lâmpadas incandescentes | 25 | 0,39% | 48,6 |
| | 40 | 3,22% | 403,9 |
| | 60 | 46,24% | 5807,3 |
| | 100 | 17,42% | 2187,9 |
| | 150 | 2,02% | 253,8 |
| LFs tubulares | 20 | 4,33% | 544,10 |
| | 40 | 13,18% | 1655,6 |
| LFs compactas | 15 | 3,87% | 485,40 |
| | 20 | 7,88% | 990,20 |
| LFs circulares | 20 | 1,22% | 152,6 |
| Consumo iluminação total (Tabela 8) | | 100,00% | 12559 |

Fonte: Adaptado de Bastos (2011)

Para a realização do cálculo do potencial técnico de economia de energia devido à inserção da tecnologia LED, tomou-se como base a estimativa da participação do consumo mensal de energia elétrica com iluminação no Brasil por tipo de lâmpada em 2005 (Tabela 14). Tendo em vista que este estudo irá comparar um cenário teórico inteiramente formado por LFs, com um segundo cenário teórico, onde as LFs teriam sido inteiramente substituídas por lâmpadas LED, o parque de incandescentes em 2005 foi convertido para LFCs (Tabela 15).

Tabela 15 - Equivalência entre LIs, LFCs e lâmpadas LED

| Tipo de lâmpada | Potência (W) | PCP (%) | CL₂₀₀₅ (GWh) | Plfc_{eq} (W) | Clfc_{eq} (GWh) | Pled_{eq} (W) | Cled_{eq} (GWh) |
|-------------------------|---------------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Lâmpadas incandescentes | 25 | 0,39% | 48,6 | 7 | 13,59 | 4 | 7,8 |
| | 40 | 3,22% | 403,9 | 13 | 131,26 | 7 | 70,7 |
| | 60 | 46,24% | 5807,3 | 16 | 1548,63 | 9,5 | 919,5 |
| | 100 | 17,42% | 2187,9 | 29 | 634,49 | 16,5 | 361,0 |
| | 150 | 2,02% | 253,8 | 41 | 69,38 | 30 | 50,8 |

Fonte: Autor

Onde:

PCP (%) é a participação do consumo mensal por tipo lâmpada em relação ao consumo da iluminação no Brasil em 2005 (Tabela 14);

CL₂₀₀₅ é o consumo total por tipo de lâmpada incandescente no setor residencial projetado para 2005 (Tabela 14);

Plfceq é a potência da LFC equivalente utilizada na simulação (Tabela 16);

Clfceq é a estimativa do consumo de energia elétrica total por tipo de LFC substituta em 2005, estabelecidos pela equação 1:

$$Clfceq = Plfceq \cdot (CL_{2005} / PL_{2005}) \quad (6.1)$$

Pledeq é a potência da lâmpada LED equivalente utilizada na simulação;

Cledeq é a estimativa do consumo de energia elétrica total por tipo de lâmpada LED substituta em 2005, estabelecidos pela equação 1:

$$Cledeq = Pledeq \cdot (CL_{2005} / PL_{2005}) \quad (6.2)$$

As potências das LFCs e das lâmpadas LED substitutas foram estabelecidas seguindo o critério de correlação de faixas de fluxo luminoso a serem atingidas pelas lâmpadas LED omnidirecionais e semidirecionais, para potências equivalentes de LFCs e LIs, do Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) de Lâmpadas LED, instituído pela Portaria Inmetro nº 143, de 13 de março de 2015 (Tabela 16). As potências das lâmpadas LED substitutas foram estabelecidas comparando os valores de fluxo luminoso da Tabela 16 com os valores médios de fluxo luminoso dos modelos de lâmpadas LED participantes do programa do Selo Procel e *Energy Star*.

Tabela 16 - Fluxo luminoso para equivalência de potência

| Faixa de fluxo luminoso a ser atingida pela lâmpada LED omnidirecional e semidirecional (lm) | Potência de Equivalência (LI) | Potência de Equivalência (LFC) |
|---|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 159 à 212 | 20 | 5 |
| 231 à 301 | 25 | 7 |
| 302 à 479 | 30 | 9 |
| 560 à 640 | 40 | 13 |
| 641 à 802 | 50 | 15 |
| 803 à 946 | 60 | 16 |
| 947 à 1017 | 70 | 17 |
| 1018 à 1115 | 75 | 20 |
| 1116 à 1310 | 80 | 23 |
| 1311 à 1506 | 90 | 26 |
| 1507 à 1671 | 100 | 29 |
| 1672 à 1835 | 110 | 31 |
| 1836 à 2000 | 120 | 33 |
| 2001 à 2082 | 125 | 34 |
| 2083 à 2163 | 130 | 37 |
| 2164 à 2328 | 140 | 40 |
| 2329 à 2517 | 150 | 41 |

Fonte: Portaria Inmetro nº 143, de 13 de março de 2015

As potências das lâmpadas LED tubulares substitutas foram estabelecidas comparando os valores de fluxo luminoso dos modelos participantes do programa do Selo Procel com os valores de fluxo luminoso de catálogo de fabricantes das lâmpadas fluorescentes tubulares.

6.2 Cálculo do potencial técnico de economia de energia elétrica

A partir da conversão do parque de LIs para LFCs foi possível obter a estimativa do potencial técnico de conservação de energia elétrica com a substituição integral do parque de LFs por lâmpadas LED em 2005 e em seguida realizar o ajuste para o ano de 2018 (Tabela 17).

Tabela 17 - Potencial técnico de conservação de energia elétrica

| Tipo de lâmpada | P_{lf} (W) | C_{lf} (GWh) | P_{led} (W) | C_{led} (GWh) | PC_{led}₂₀₀₅ (GWh) | PC_{led}₂₀₁₈ (GWh) |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| LF compactas | 7 | 13,6 | 4 | 7,8 | 5,8 | 7,6 |
| | 13 | 131,3 | 7 | 70,7 | 60,6 | 79,2 |
| | 15 | 485,4 | 9 | 291,2 | 194,2 | 254,0 |
| | 16 | 1548,6 | 9,5 | 919,5 | 629,1 | 822,9 |
| | 20 | 990,2 | 13 | 643,6 | 346,6 | 453,3 |
| | 29 | 634,5 | 16,5 | 361,0 | 273,5 | 357,7 |
| | 41 | 69,4 | 30 | 50,8 | 18,6 | 24,3 |
| LF circulares | 20 | 152,6 | 13 | 99,2 | 53,4 | 69,9 |
| LF tubulares | 20 | 544,1 | 11 | 299,3 | 244,9 | 320,3 |
| | 40 | 1655,6 | 21 | 869,2 | 786,4 | 1028,6 |
| Iluminação Total | | 6225,4 | | 3612,3 | 2613,1 | 3417,9 |

Fonte: Autor

Onde:

P_{lf} é a potência da Lâmpada fluorescente utilizada na simulação (W);

C_{lf} é o consumo estimado por potência de Lâmpada fluorescente em 2005 (GWh);

P_{led} é a potência da lâmpada LED equivalente utilizada na simulação;

C_{led} é a estimativa do consumo estimado de energia elétrica total por tipo de lâmpada LED equivalente em 2005, estabelecidos pela equação 6.3:

$$C_{led} = P_{led} \cdot (C_{lfc} / P_{lfc}) \quad (6.3)$$

$P_{C_{led}2005}$ é a estimativa do potencial técnico de redução no consumo de energia elétrica com a substituição das lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED em 2005, estabelecidos pela equação 6.4:

$$P_{C_{led}2005} = C_{lfc} - C_{led} \quad (6.4)$$

$P_{C_{led}2018}$ é a projeção do potencial técnico de redução no consumo de energia elétrica com a substituição das lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED em 2018, estabelecidos pela equação 6.5:

$$P_{C_{led}2018} = P_{led} 2005 \cdot 1,308^* \quad (6.5)$$

(*) para realizar o ajuste anual do consumo de energia elétrica com iluminação foram adotadas as taxas médias de variação anual do número de domicílios permanentes e ocupados no Brasil do PNE 2030 (EPE, 2007), apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Variação número total de domicílios permanentes ocupados Brasil, 2005-2030*

| Ano | Quantidade de domicílios no início do período (ND) | Variação (%) no período de 5 anos (Vpp) | Taxa média anual (Tm) |
|------|--|---|-----------------------|
| 2005 | 51406,6 | - | - |
| 2010 | 57511,4 | 11,88% | 2,27% |
| 2015 | 63637,8 | 10,65% | 2,05% |
| 2020 | 69746,4 | 9,60% | 1,85% |
| 2025 | 75846,1 | 8,75% | 1,69% |
| 2030 | 81837,4 | 7,90% | 1,53% |

*Referência 31/12

Fonte: PNE 2030 (EPE, 2007)

Com base na projeção da taxa média da variação do número total de domicílios permanentes e ocupados entre os anos de 2015 à 2020 (Tabela 18), foi possível, através da equação 6.6, projetar o valor do número de domicílios permanentes e ocupados no ano de 2018.

$$ND_{2018} = ND_{2015} \cdot (1 + Tm)^n \quad (6.6)$$

Onde:

ND_{2018} é o número de domicílios permanentes e ocupados em 2018;

ND_{2015} é o número de domicílios permanentes e ocupados em 2015;

T_m é a taxa média da variação do número total de domicílios permanentes (2015-2018);

n é o número de períodos.

$ND_{2018} = 63637,8 \cdot (1 + 0,01,85)^3 = 67235,58$, representando um acréscimo de aproximadamente 30,8% com relação ao número de domicílios no ano de 2005.

6.3 Cenários de entrada da lâmpada LED no mercado

A estimativa do potencial técnico de conservação de energia elétrica realizada no item anterior representa uma meta importante a ser alcançada, mas que na prática se mostra inviável de ocorrer em um espaço tão curto de tempo. Desta forma, foram propostos alguns cenários para a entrada da lâmpada LED no mercado brasileiro baseados nos seguintes critérios:

- relação do preço da lâmpada LED com a LFC;
- tipo de bandeira tarifária praticada pela Aneel; e
- distribuição de uso de lâmpadas de uso habitual por faixa de consumo da PPH.

6.3.1 Relação do preço da lâmpada LED com a LFC

A crise energética de 2001 foi determinante para que a sociedade brasileira revisse seus hábitos de consumo face ao temor de um possível “apagão” – como ficou mais conhecido o racionamento de energia. De maneira a atingir as metas impostas pelo governo e escapar das multas para quem extrapolasse o consumo de energia mensal, o consumidor buscou medidas de economia de energia. Esse fato contribuiu para a expansão do mercado de LFCs no país em substituição às LIs, tendo em vista sua maior eficiência energética. Entretanto, segundo dados da PPH, cerca de 53% dos consumidores não substituíram as LIs por LFCs durante o racionamento, e dos que substituíram, 76% voltaram para as LIs quando as LFCs queimaram, principalmente devido ao preço mais elevado das LFCs (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a). Isso demonstrou na época que o consumidor brasileiro, sobretudo o de mais baixa renda, compra baseado no preço inicial em vez de avaliar os ganhos ao longo de toda a vida útil do produto.

Da mesma forma como ocorreu com as LIs, a partir de 2013, com a ameaça de uma nova crise energética em função da estiagem e do aumento das tarifas, o consumidor buscou novas alternativas para economizar energia, tendo em vista que boa parte das LIs já haviam sido substituídas por LFCs. Neste momento as lâmpadas LED, que já vinham entrando no mercado lentamente como uma

alternativa mais vantajosa para as LFCs, apresentaram um crescimento nas vendas, apesar do custo superior às LFCs. A maior procura desencadeou um movimento forte dos importadores, que inundaram o mercado, fazendo com que o preço das lâmpadas LED se aproximasse do preço das LFCs. Entretanto, a expectativa atual é que haja uma elevação dos preços das lâmpadas LED em função da entrada em vigor da certificação compulsória do Inmetro.

6.3.2 Bandeiras tarifárias

A partir de 2015, a Aneel estabeleceu o sistema de Bandeiras Tarifárias (Tabela 19) nas contas de energia dos consumidores da baixa tensão residencial com o objetivo de indicar se a energia custa mais ou menos, em função das condições de geração de eletricidade. O sistema deve ser aplicado por todas as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia conectadas ao Sistema Interligado Nacional – SIN (ANEEL, 2016b). A partir de 01/02/2016, o sistema de bandeiras tarifárias passa a ser composto por quatro bandeiras: verde, amarela e dois níveis de bandeira vermelha (CPFL, 2016):

Tabela 19 – Bandeiras tarifárias

| Tipo de bandeira | Pré-requisito | Valor da tarifa |
|----------------------------|--|---|
| Bandeira verde | Hidrelétricas operam normalmente. (geração térmica até R\$211,28/MWh) | Não há alteração no valor da tarifa. |
| Bandeira amarela | Usinas térmicas ativadas. (geração térmica de R\$211,28/MWh a R\$422,56/MWh) | Acresce na conta R\$ 1,50 a cada 100kWh |
| Bandeira vermelha Patamar1 | Usinas térmicas ativadas e alta demanda. (geração térmica de R\$422,56/MWh a R\$610,00/MWh) | Acresce na conta R\$ 3,00 a cada 100kWh |
| Bandeira vermelha Patamar2 | Usinas térmicas ativadas e alta demanda. (geração térmica maior que R\$610,00/MWh) | Acresce na conta R\$ 4,50 a cada 100kWh |

Fonte: CPFL, 2016

Para a elaboração dos cenários, o conceito das bandeiras tarifárias foi simplificado para verde e vermelho, de forma a estabelecer uma condição favorável e outra desfavorável para o consumidor.

6.3.3 Distribuição de uso de lâmpadas por faixa de consumo

O Procel disponibiliza no seu portal (Portal Procel Info) o Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos – SINPHA, onde são apresentados os indicadores do segmento residencial de baixa tensão, obtidos a partir dos dados da PPH. O SINPHA também possibilita simular os cruzamentos dos dados da pesquisa, curvas de cargas e o impacto de projetos de substituição de lâmpadas.

Na PPH foram entrevistados consumidores brasileiros na área de concessão de diversas concessionárias de distribuição de energia elétrica. O Plano Amostral distribuiu os clientes residenciais em 6 faixas de consumo mensal, a saber: faixa 1 (0 a 50 kWh); faixa 2 (51 a 100 kWh); faixa 3 (101 a 200 kWh); faixa 4 (201 a 300 kWh); faixa 5 (301 a 500 kWh) e faixa 6 (>500 kWh).

Segundo Souza; Musafir; Pessanha (2010), foi conduzida uma pesquisa por amostragem junto a 1000 clientes residenciais da Ampla (concessionária de distribuição que atua no estado do Rio de Janeiro). Essa pesquisa confirmou a relação entre o consumo de energia elétrica e o rendimento médio domiciliar, seja este declarado pelo próprio cliente ou estimado a partir de suas posses com base no Critério de Classificação Econômica Brasil - CCEB, conforme apresentado na Figura 49.

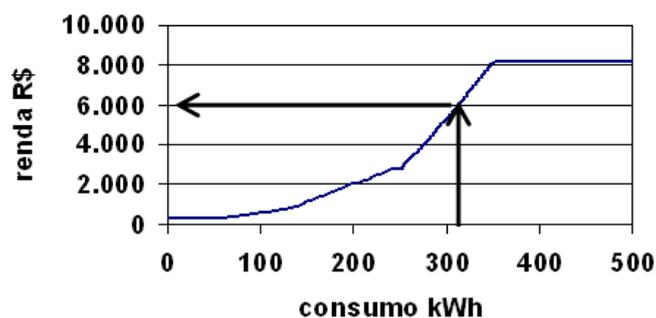


Figura 49 - Relação entre a renda domiciliar e o consumo de energia elétrica
Fonte: Souza; Musafir; Pessanha 2010

A Tabela 20 apresenta o percentual da posse média, por tipo de lâmpada de uso habitual, encontrado pela PPH em cada faixa de consumo disponível no SINPHA.

Tabela 20 – Percentual das amostras de lâmpada de uso habitual por tipo e por faixa de consumo

| | | Faixa 1 | Faixa 2 | Faixa 3 | Faixa 4 | Faixa 5 | Faixa 6 |
|------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Tipo de lâmpada | Potência (W) | 0-50kWh | 51-100kWh | 101-200kWh | 201-300kWh | 301-500kWh | 500kWh |
| Incandescente | 25 | 1,52% | 1,26% | 0,65% | 1,24% | 0,62% | 0,32% |
| | 40 | 4,70% | 4,53% | 2,47% | 2,81% | 3,06% | 1,24% |
| | 60 | 47,80% | 45,62% | 40,35% | 34,25% | 28,41% | 19,69% |
| | 100 | 3,33% | 4,62% | 6,06% | 7,89% | 7,15% | 3,60% |
| | 150 | 0,29% | 0,61% | 0,32% | 0,41% | 0,00% | 0,11% |
| LF compacta | 15 | 11,87% | 10,20% | 9,84% | 8,89% | 12,03% | 15,87% |
| | 20 | 12,30% | 15,38% | 19,33% | 20,83% | 23,43% | 20,87% |
| LF circulares | 20 | 0,87% | 1,79% | 2,24% | 3,47% | 2,90% | 1,45% |
| LF tubulares | 20 | 8,76% | 5,84% | 7,10% | 8,03% | 8,04% | 8,55% |
| | 40 | 7,96% | 9,72% | 10,81% | 10,67% | 12,86% | 26,47% |

Fonte: SINPHA (PROCEL)

Assim como foi realizado no cálculo do potencial de economia de energia, a posse de LIs foi convertida para LFCs, conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Percentual de amostras de lâmpada de uso habitual por tipo e por faixa de consumo

| | | Faixa 1 | Faixa 2 | Faixa 3 | Faixa 4 | Faixa 5 | Faixa 6 |
|------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Tipo de lâmpada | Pot. (W) | 0-50kWh | 51-100kWh | 101-200kWh | 201-300kWh | 301-500kWh | >500kWh |
| LF compactas | 7 | 1,52% | 1,26% | 0,65% | 1,24% | 0,62% | 0,32% |
| | 13 | 4,70% | 4,53% | 2,47% | 2,81% | 3,06% | 1,24% |
| | 15 | 11,87% | 10,20% | 9,84% | 8,89% | 12,03% | 15,87% |
| | 16 | 47,80% | 45,62% | 40,35% | 34,25% | 28,41% | 19,69% |
| | 20 | 12,30% | 15,38% | 19,33% | 20,83% | 23,43% | 20,87% |
| | 29 | 3,33% | 4,62% | 6,06% | 7,89% | 7,15% | 3,60% |
| | 41 | 0,29% | 0,61% | 0,32% | 0,41% | 0,00% | 0,11% |
| LF circulares | 20 | 0,87% | 1,79% | 2,24% | 3,47% | 2,90% | 1,45% |
| LF tubulares | 20 | 8,76% | 5,84% | 7,10% | 8,03% | 8,04% | 8,55% |
| | 40 | 7,96% | 9,72% | 10,81% | 10,67% | 12,86% | 26,47% |

Fonte: Autor

A partir do percentual da posse média por tipo de lâmpada de uso habitual encontrado pela PPH, em cada faixa de consumo, foi possível estimar o percentual de cada tipo lâmpada por faixa de consumo, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Percentual de lâmpadas por potência e faixa de consumo

| | | Faixa 1 | Faixa 2 | Faixa 3 | Faixa 4 | Faixa 5 | Faixa 6 |
|------------------------|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Tipo de lâmpada | Pot. (W) | 0-50kWh | 51-100kWh | 101-200kWh | 201-300kWh | 301-500kWh | >500kWh |
| LF compactas | 7 | 27,09% | 22,46% | 11,59% | 22,10% | 11,05% | 5,70% |
| | 13 | 24,99% | 24,08% | 13,13% | 14,94% | 16,27% | 6,59% |
| | 15 | 17,28% | 14,85% | 14,32% | 12,94% | 17,51% | 23,10% |
| | 16 | 22,12% | 21,11% | 18,67% | 15,85% | 13,15% | 9,11% |
| | 20 | 10,20% | 14,15% | 18,56% | 24,17% | 21,90% | 11,03% |
| | 29 | 10,20% | 14,15% | 18,56% | 24,17% | 21,90% | 11,03% |
| | 41 | 16,67% | 35,06% | 18,39% | 23,56% | 0,00% | 6,32% |
| LF circulares | 20 | 6,84% | 14,07% | 17,61% | 27,28% | 22,80% | 11,40% |
| LF tubulares | 20 | 18,91% | 12,61% | 15,33% | 17,34% | 17,36% | 18,46% |
| | 40 | 10,14% | 12,38% | 13,77% | 13,59% | 16,38% | 33,72% |

Fonte: Autor

6.3.4 Cenários estabelecidos

Com base nos critérios definidos anteriormente, foram estipulados 5 cenários amparados nas seguintes premissas:

- **Cenário 1:** Caso o preço das lâmpadas LED permaneça superior aos das LFs e a tarifa de energia elétrica permaneça na bandeira verde a partir do ano de 2018: as faixas de consumo 5 e 6 realizariam a troca;
- **Cenário 2:** Caso o preço das lâmpadas LED permaneça superior aos das LFs e a tarifa de energia elétrica retorne à bandeira vermelha a partir do ano de 2018: as faixas consumo 4,5 e 6 realizariam a troca;
- **Cenário 3:** Caso o preço das lâmpadas LED se iguale ou fique abaixo ao das LFs e a tarifa de energia permaneça na bandeira verde a partir do ano de 2018: as faixas de consumo 3, 4, 5 e 6 realizariam a troca;

- **Cenário 4:** Caso o preço das lâmpadas LED se iguale ou fique abaixo ao das LFs e a tarifa de energia elétrica permaneça na bandeira vermelha a partir do ano de 2018: as faixas de consumo 2,3,4,5 e 6 realizariam a troca;
- **Cenário 5:** Caso o preço das lâmpadas LED se iguale ou fique abaixo ao das LFs e a tarifa de energia elétrica permaneça na bandeira vermelha a partir do ano de 2018: as faixas de consumo 1,2,3,4,5 e 6 realizariam a troca, sendo que a faixa 1 estaria coberta pelos programas de eficiência energética da Aneel. O cenário 5 corresponderia ao potencial técnico de conservação de energia elétrica apresentado na Tabela 17.

Nas tabelas 23 a 27 a seguir, são apresentados os resultados da estimativa do potencial técnico de conservação de energia elétrica com a substituição do parque de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED nos cenários estabelecidos anteriormente.

Tabela 23 - Cálculo do cenário 1

| Tipo de lâmpada | C_{lf}_{cenário 1} (GWh) | C_{led}_{cenário 1} (GWh) | C_{Total}_{cenário 1} (GWh) | PCT₂₀₀₅_{cenário 1} (GWh) | PCT₂₀₁₈_{cenário 1} (GWh) |
|------------------------|---|--|--|---|---|
| LF compactas | 11,3 | 1,3 | 12,6 | 1,0 | 1,3 |
| | 101,3 | 16,2 | 117,4 | 13,8 | 18,1 |
| | 288,3 | 118,3 | 406,6 | 78,9 | 103,1 |
| | 1204,0 | 204,6 | 1408,6 | 140,0 | 183,1 |
| | 599,0 | 254,2 | 853,3 | 136,9 | 179,1 |
| | 425,6 | 118,9 | 544,4 | 90,0 | 117,8 |
| | 65,0 | 3,2 | 68,2 | 1,2 | 1,5 |
| LF circulares | 100,4 | 33,9 | 134,4 | 18,3 | 23,9 |
| LF tubulares | 349,3 | 107,2 | 456,5 | 87,7 | 114,7 |
| | 826,0 | 435,5 | 1261,6 | 394,1 | 515,4 |
| Total | 3970,1 | 1293,4 | 5263,5 | 961,9 | 1258,1 |

Fonte: Autor

Tabela 24 - Cálculo do cenário 2

| Tipo de lâmpada | C_{lfc}_{cenário 2} (GWh) | C_{led}_{cenário 2} (GWh) | C_{Total}_{cenário 2} (GWh) | PCT₂₀₀₅_{cenário 2} (GWh) | PCT₂₀₁₈_{cenário 2} (GWh) |
|------------------------|--|--|--|---|---|
| LF compactas | 8,3 | 3,0 | 11,3 | 2,3 | 2,9 |
| | 81,6 | 26,7 | 108,4 | 22,9 | 29,9 |
| | 225,5 | 156,0 | 381,4 | 104,0 | 136,0 |
| | 958,5 | 350,4 | 1308,9 | 239,7 | 313,6 |
| | 415,1 | 373,8 | 788,9 | 201,3 | 263,3 |
| | 272,3 | 206,1 | 478,4 | 156,1 | 204,2 |
| | 48,6 | 15,2 | 63,8 | 5,6 | 7,3 |
| LF circulares | 58,8 | 61,0 | 119,8 | 32,9 | 43,0 |
| LF tubulares | 254,9 | 159,1 | 414,0 | 130,1 | 170,2 |
| | 600,9 | 553,7 | 1154,7 | 501,0 | 655,3 |
| Total | 2924,6 | 1904,9 | 4829,6 | 1395,8 | 1825,7 |

Fonte: Autor

Tabela 25 - Cálculo do cenário 3

| Tipo de lâmpada | C_{lfc}_{cenário 3} (GWh) | C_{led}_{cenário 3} (GWh) | C_{Total}_{cenário 3} (GWh) | PCT₂₀₀₅_{cenário 3} (GWh) | PCT₂₀₁₈_{cenário 3} (GWh) |
|------------------------|--|--|--|---|---|
| LF compactas | 6,7 | 3,9 | 10,7 | 2,9 | 3,8 |
| | 64,4 | 36,0 | 100,4 | 30,8 | 40,3 |
| | 155,9 | 197,7 | 353,6 | 131,8 | 172,4 |
| | 669,4 | 522,0 | 1191,4 | 357,2 | 467,2 |
| | 244,4 | 484,7 | 729,2 | 261,1 | 341,5 |
| | 154,5 | 273,1 | 427,6 | 206,9 | 270,6 |
| | 35,9 | 24,5 | 60,4 | 9,0 | 11,7 |
| LF circulares | 31,9 | 78,5 | 110,4 | 42,3 | 55,3 |
| LF tubulares | 171,5 | 205,0 | 376,5 | 167,7 | 219,3 |
| | 372,9 | 673,4 | 1046,3 | 609,3 | 796,9 |
| Total | 1907,7 | 2498,8 | 4406,5 | 1818,9 | 2379,1 |

Fonte: Autor

Tabela 26 - Cálculo do cenário 4

| Tipo de lâmpada | Clf _{cenário 4} (GWh) | Cled _{cenário 4} (GWh) | CTotal _{cenário 4} (GWh) | PCT _{2005cenário 4} (GWh) | PCT _{2018cenário 4} (GWh) |
|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| LF compactas | 3,7 | 5,7 | 9,4 | 4,2 | 5,5 |
| | 32,8 | 53,0 | 85,8 | 45,4 | 59,4 |
| | 83,9 | 240,9 | 324,8 | 160,6 | 210,1 |
| | 342,5 | 716,1 | 1058,6 | 490,0 | 640,9 |
| | 108,6 | 573,0 | 681,6 | 308,6 | 403,6 |
| | 64,7 | 324,2 | 388,9 | 245,6 | 321,2 |
| | 11,6 | 42,3 | 53,9 | 15,5 | 20,3 |
| LF circulares | 10,4 | 92,4 | 102,9 | 49,8 | 65,1 |
| LF tubulares | 102,9 | 242,7 | 345,6 | 198,5 | 259,7 |
| | 167,9 | 781,1 | 949,0 | 706,7 | 924,3 |
| Total | 929,0 | 3071,5 | 4000,5 | 2224,9 | 2910,2 |

Fonte: Autor

Tabela 27 - Cálculo do cenário 5

| Tipo de lâmpada | Clf _{cenário 5} (GWh) | Cled _{cenário 5} (GWh) | CTotal _{cenário 5} (GWh) | PCT _{2005cenário 5} (GWh) | PCT _{2018cenário 5} (GWh) |
|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| LF compactas | 0,0 | 7,8 | 7,8 | 5,8 | 7,6 |
| | 0,0 | 70,7 | 70,7 | 60,6 | 79,2 |
| | 0,0 | 291,2 | 291,2 | 194,2 | 254,0 |
| | 0,0 | 919,5 | 919,5 | 629,1 | 822,9 |
| | 0,0 | 643,6 | 643,6 | 346,6 | 453,4 |
| | 0,0 | 361,0 | 361,0 | 273,5 | 357,7 |
| | 0,0 | 50,8 | 50,8 | 18,6 | 24,3 |
| LF circulares | 0,0 | 99,2 | 99,2 | 53,4 | 69,9 |
| LF tubulares | 0,0 | 299,3 | 299,3 | 244,8 | 320,3 |
| | 0,0 | 869,2 | 869,2 | 786,4 | 1028,6 |
| Total | 0,0 | 3612,3 | 3612,3 | 2613,0 | 3417,9 |

Fonte: Autor

Onde:

Clf_{cenário(i)} é a estimativa do consumo por potência de LF em 2005 nos cenários 1 a 5, estabelecida pelas equações 6.7 a 6.11 (GWh):

$$\text{Clf}_{\text{cenário } 1} = \text{Clfc} \cdot (1 - (\text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6)) \quad (6.7)$$

$$Clf_{\text{cenário } 2} = Clfc \cdot (1 - (\text{Faixa } 4 + \text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6)) \quad (6.8)$$

$$Clf_{\text{cenário } 3} = Clfc \cdot (1 - (\text{Faixa } 3 + \text{Faixa } 4 + \text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6)) \quad (6.9)$$

$$Clf_{\text{cenário } 4} = Clfc \cdot (1 - (\text{Faixa } 2 + \text{Faixa } 3 + \text{Faixa } 4 + \text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6)) \quad (6.10)$$

$$Clf_{\text{cenário } 5} = Clfc \cdot (1 - (\text{Faixa } 1 + \text{Faixa } 2 + \text{Faixa } 3 + \text{Faixa } 4 + \text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6)) \quad (6.11)$$

$Cled_{\text{cenário}(i)}$ é a estimativa do consumo por potência de lâmpada LED equivalente em 2005 nos cenários 1 a 5, estabelecida pelas equações 6.12 a 6.16 (GWh):

$$Cled_{\text{cenário } 1} = Cled \cdot (\text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6) \quad (6.12)$$

$$Cled_{\text{cenário } 2} = Cled \cdot (\text{Faixa } 4 + \text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6) \quad (6.13)$$

$$Cled_{\text{cenário } 3} = Cled \cdot (\text{Faixa } 3 + \text{Faixa } 4 + \text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6) \quad (6.14)$$

$$Cled_{\text{cenário } 4} = Cled \cdot (\text{Faixa } 2 + \text{Faixa } 3 + \text{Faixa } 4 + \text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6) \quad (6.15)$$

$$Cled_{\text{cenário } 5} = Cled \cdot (\text{Faixa } 1 + \text{Faixa } 2 + \text{Faixa } 3 + \text{Faixa } 4 + \text{Faixa } 5 + \text{Faixa } 6) \quad (6.16)$$

$CTotal_{\text{cenário } (i)}$ é a estimativa do consumo total por potência de LF e lâmpada LED nos cenários 1 à 5, estabelecida pela equação 6.17 (GWh):

$$CTotal_{\text{cenário}(i)} = Clf_{\text{cenário}(i)} + Cled_{\text{cenário}(i)} \quad (6.17)$$

$PCT_{2005 \text{ cenário}(i)}$ é a estimativa do potencial técnico de redução no consumo de energia com a substituição das LFs por lâmpadas LED em 2005, por cenário, estabelecida pela equação 6.18 (GWh):

$$PCT_{2005 \text{ cenário } (i)} = Clf - CTotal_{\text{cenário}(i)} \quad (6.18)$$

$PCled_{2018 \text{ cenário}(i)}$ é a estimativa do potencial técnico de redução no consumo de energia com a substituição das LFs por lâmpadas LED em 2018, por cenário, estabelecida pela equação 6.19 (GWh):

$$PCT_{2018 \text{ cenário}(i)} = PCT_{2005 \text{ cenário}(i)} \cdot 1,308^* \quad (6.19)$$

$i=1,\dots,5$

Clf e Cled são encontrados na Tabela 17;

Faixa 1 à 5 são os percentuais do parque de cada tipo de lâmpada por faixa de consumo encontrados na Tabela 22.

(*) para realizar o ajuste anual do consumo de energia elétrica com iluminação foi adotada a projeção do número total de domicílios permanentes e ocupados no Brasil do PNE 2030 (EPE, 2007), conforme Tabela 18.

No gráfico abaixo são apresentados os resultados consolidados nos 5 cenários propostos (Figura 50):

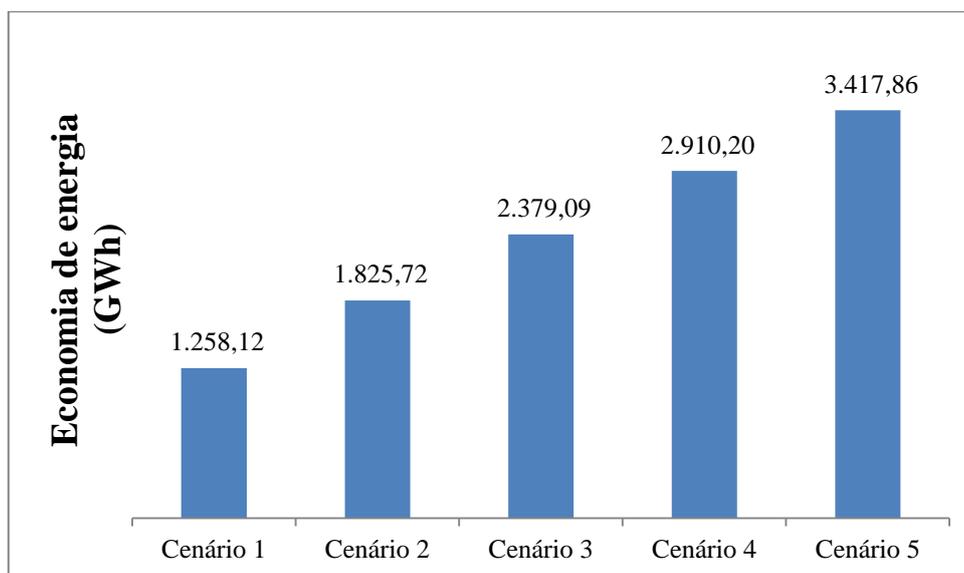


Figura 50 - Cenários de entrada da lâmpada LED no mercado
Fonte: Autor

6.4 Análise econômica da substituição de LFs por lâmpadas LED

Para a realização da análise econômica da substituição das LFs (compactas e tubulares) por lâmpadas LED, estimou-se qual seria a posse média de uma residência típica brasileira. Para isso, tomou-se como referência inicial os valores de posse média por tipo de lâmpada do setor residencial brasileiro, segundo dados levantados na PPH (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a) (Tabela 28).

Tabela 28 – Posse média por tipo de lâmpada no setor residencial brasileiro em 2005

| Tipo de lâmpada | Posse média | Percentual |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|
| Incandescente 25W | 0,11 | 2,74% |
| Incandescente 40W | 0,4 | 9,95% |
| Incandescente 60W | 3,01 | 74,88% |
| Incandescente 100W | 0,48 | 11,94% |
| Incandescente 150W | 0,02 | 0,50% |
| Total incandescentes | 4,02 | 100% |
| Fluorescente Tubular 20W | 0,52 | 12,94% |
| Fluorescente Tubular 40W | 0,76 | 18,91% |
| Fluorescente Compacta 15W | 1,19 | 29,60% |
| Fluorescente Compacta 20W | 1,41 | 35,07% |
| Fluorescente Compacta Circular | 0,14 | 3,48% |
| Total fluorescentes | 4,02 | 100% |
| TOTAL | 8,04* | |

*As lâmpadas dicroicas e outros tipos foram desprezados.

Fonte: PPH (ELETROBRAS/PROCEL, 2007a)

Conforme pode ser verificado na Tabela 28, as residências brasileiras apresentavam em 2005 aproximadamente 8 pontos de iluminação por residência, sendo 50% dos pontos de lâmpadas incandescentes e 50% de lâmpadas fluorescentes.

Da mesma forma que ocorreu no cálculo do potencial técnico de conservação de energia, estabeleceu-se a premissa de que todas as lâmpadas incandescentes foram substituídas por lâmpadas fluorescentes compactas de fluxo luminoso equivalente, seguindo a relação de equivalência da Tabela 15. Desta forma, obtêm-se os valores de posse média por tipo de lâmpada fluorescente para esta estimativa (Tabela 29).

Tabela 29 - Posse média por tipo de lâmpada fluorescente

| Tipo de lâmpada | Posse média | Percentual |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|
| Fluorescente Compacta 7W | 0,11 | 1,37% |
| Fluorescente Compacta 13W | 0,40 | 4,98% |
| Fluorescente Compacta 16W | 4,20 | 52,24% |
| Fluorescente Compacta 20W | 1,41 | 17,54% |
| Fluorescente Compacta 30W | 0,48 | 5,97% |
| Fluorescente Compacta 40W | 0,02 | 0,25% |
| Fluorescente Tubular 20W | 0,52 | 6,47% |
| Fluorescente Tubular 40W | 0,76 | 9,45% |
| Fluorescente Compacta Circular | 0,14 | 1,74% |
| TOTAL | 8,04 | 100,00% |

Fonte: Autor

Para compor a posse da residência típica brasileira (Tabela 30) foram selecionados os tipos de maior incidência e mais representatividade nas residências brasileiras da Tabela 29.

Tabela 30 – Posse média da residência típica brasileira proposta

| Tipo de lâmpada | Posse média | Percentual | Potência LED¹ |
|---------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|
| Fluorescente Compacta 16W | 4,0 | 50,00% | 9,5 |
| Fluorescente Compacta 20W | 1,0 | 12,50% | 13 |
| Fluorescente Compacta 30W | 1,0 | 12,50% | 23 |
| Fluorescente Tubular 20W | 1,0 | 12,50% | 11 |
| Fluorescente Tubular 40W | 1,0 | 12,50% | 21 |
| TOTAL | 8,0 | 100,00% | |

¹ Potências das lâmpadas de LED substitutas conforme estabelecido na Tabela 28

Fonte: Autor

Para realização da análise de viabilidade econômica, foi necessária a construção dos fluxos de caixa que possibilitaram o cálculo dos seguintes indicadores econômicos: o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

O método do valor presente líquido é bastante interessante quando se deseja comparar alternativas mutuamente excludentes. A alternativa que oferecer o maior valor presente líquido será, dentro deste critério, a mais atraente. A taxa interna de retorno (TIR) é aquela que torna o valor

presente dos lucros futuros equivalente ao dos gastos realizados com o projeto, caracterizando, assim, a taxa de remuneração do capital investido (Haddad, 2007).

O cálculo do VPL foi realizado com o auxílio de uma planilha eletrônica do Excel, sendo definido pela seguinte equação:

$$VPL = I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t} \quad (6.20)$$

Onde:

VPL é o valor presente líquido;

I é o investimento de capital na data zero;

FC_t representa o retorno na data “t” do fluxo de caixa;

n é o prazo de análise do projeto; e

k é a taxa mínima para realizar o investimento, ou custo de capital do projeto de investimento.

A regra decisória, ao se aplicar o VPL é: “empreenda o projeto se o VPL for positivo”. Ou seja, se $VPL > 0$, o projeto é economicamente viável.

O cálculo da TIR também foi realizado com o auxílio de uma planilha eletrônica do Excel, sendo definido pela seguinte expressão:

$$VPL = 0 = I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (6.21)$$

Com os dados apresentados na Tabela 31, foi possível montar os fluxos de caixa comparativos entre as lâmpadas fluorescentes (Figura 51), as lâmpadas LED (Figura 52) e da análise (Figura 53), considerando a vida útil das lâmpadas LED (15000h), assim como realizar os cálculos do VPL e da TIR.

Tabela 31 - Dados utilizados na análise

| | Quant. | Potência unitária (W) | Potência total (W) | Preço unitário (R\$) | Preço total (R\$) |
|--|-------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| LF compacta | | | | | |
| Compacta 16W | 4 | 16 | 64 | 10,00 | 40,00 |
| Compacta 20W | 1 | 20 | 20 | 12,00 | 12,00 |
| Compacta 30W | 1 | 30 | 30 | 25,00 | 25,00 |
| LF tubular | | | | | |
| Tubular 20W + reator eletromagnético | 1 | 28 | 28 | 12,00 | 12,00 |
| Tubular 40W + reator eletromagnético | 1 | 52 | 52 | 16,00 | 16,00 |
| Total (compactas + tubulares) | 8 | 146 | 194 | 75,00 | 105,00 |
| Lâmpada LED | | | | | |
| Bulbo - 9,5W | 4 | 9,5 | 38 | 20,00 | 80,00 |
| Bulbo - 11W | 1 | 11 | 11 | 25,00 | 25,00 |
| Bulbo - 16W | 1 | 16 | 16 | 43,00 | 43,00 |
| Tubular - 11W | 1 | 11 | 11 | 59,00 | 59,00 |
| Tubular - 21W | 1 | 21 | 21 | 83,00 | 83,00 |
| Total | 8 | 68,5 | 97 | 230,00 | 290,00 |
| Tempo médio de utilização (h/dia) ¹ | | | | | 2,74 |
| Tempo médio de utilização (h/ano) | | | | | 1000 |
| Tempo de vida útil (h) e (anos) | FLC ² | | | 6000 | 6 |
| | FLT ³ | | | 10000 | 10 |
| | LED ² | | | 15000 | 15 |
| Tarifa média de energia (R\$/kWh) ⁴ | | | | | 0,72 |
| Taxa de juros adotada (a.a) | | | | | 10,00% |
| Taxa média do crescimento da tarifa residencial ⁵ | | | | | 3,63% |

Fonte: Autor

¹ Tempo de utilização constante para lâmpadas residências (CARUZZO, 2008).

² Tempo de vida útil mínimo estipulado pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE, 2015).

³ Tempo de vida útil declarado por fabricantes em catálogos.

⁴ Tarifa residencial da Light de 51 à 300kWh (ICMS de 18%)

⁵ Taxa média de aumento da tarifa de energia elétrica entre os anos de 2003 e 2012 (ANEEL, 2016). Foram excluídos os anos de 2013, 2014 e 2015 em função das revisões tarifárias extraordinárias.

Nas Figura 51 e 52, as setas do ano zero representam, respectivamente, os valores médios de aquisição das lâmpadas fluorescentes e LED. Nos demais anos, as setas apontam o custo com a energia reajustado anualmente pela taxa média do crescimento da tarifa residencial. As setas de cor amarela indicam o custo da energia acrescido do valor da troca das LFCs, e nas setas de cor vermelha, acrescido do valor das LFTs. Na Figura 53 está representado o fluxo de caixa da análise, com indicação das diferenças de custo entre as lâmpadas fluorescentes e LED.

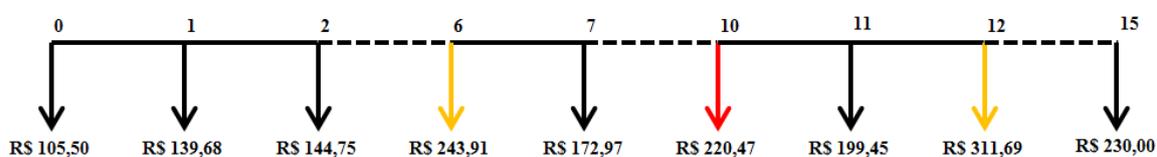


Figura 51 – Fluxo de caixa das lâmpadas fluorescentes
Fonte: Autor

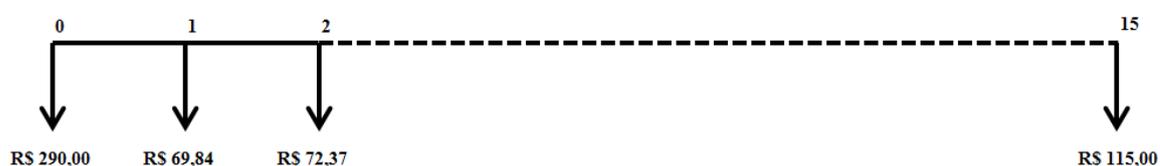


Figura 52 – Fluxo de caixa das lâmpadas LED
Fonte: Autor

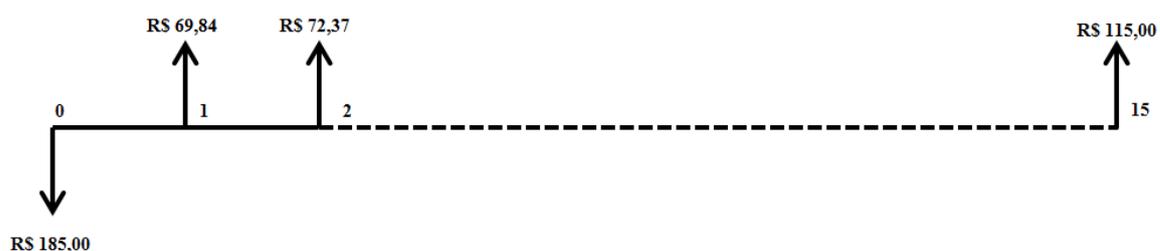


Figura 53 - Fluxo de caixa da análise
Fonte: Autor

Com base nos fluxos de caixas das lâmpadas fluorescentes e LED, foram calculados os indicadores de resultado econômico usando as fórmulas de valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR), cujos resultados são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados encontrados

| | |
|------------------------------|-------------|
| VPL (lâmpadas fluorescentes) | R\$ 1489,07 |
| VPL (lâmpadas LED) | R\$ 938,18 |
| VPL (análise) | R\$ 550,90 |
| TIR (análise) | 45,50% |

Fonte: Autor

Analisando os indicadores econômicos, conclui-se que existe a viabilidade econômica da troca das LFs por lâmpadas LED, pois a diferença entre o VPL das LFs e das lâmpadas LED é maior que zero e que o valor da TIR é maior que a taxa de juros adotada. A economia gerada pelas lâmpadas LED, ao longo da sua vida útil, permitiria operar as mesmas lâmpadas LED por aproximadamente 11730 horas.

A viabilidade da utilização de sistemas de iluminação mais eficientes e mais caros ocorre para maiores níveis de utilização, levando-se em consideração os custos de aquisição e seus impactos operacionais (FUPAI, 2006). Tomando-se como base os mesmos dados da Tabela 30, foi possível realizar uma análise comparativa do custo anual de operação, considerando os custos de aquisição, operação e reposição, entre um sistema com lâmpadas fluorescentes, e outro com lâmpadas LED, representados, respectivamente, pelas linhas vermelha e azul da Figura 54. No cruzamento das duas linhas verificou-se que, a partir de aproximadamente 315 horas/ano de operação, as lâmpadas LED tornam-se a opção mais viável.

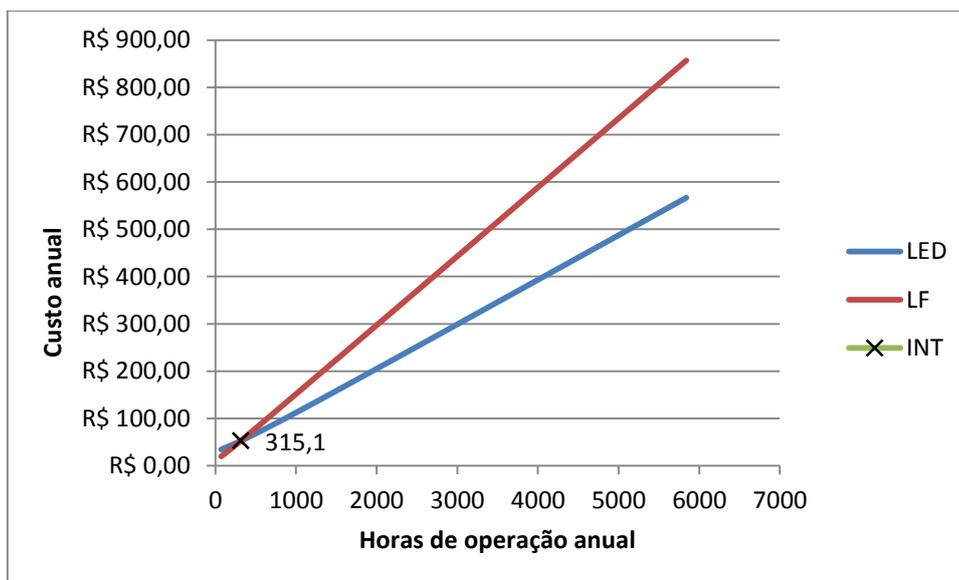


Figura 54 – Custo anual de operação LED X LF
Fonte: Autor

$$C_{\$} = I \times FRC + C_{kWh} \quad (6.22);$$

Onde:

$C_{\$}$ é o custo de aquisição do equipamento mais custo de operação e reposição;

C_{kWh} é o custo de operação anual; e

I é o valor de aquisição das lâmpadas.

$$FRC = i \cdot \frac{(1+i)^n}{((1+i)^n - 1)} \quad (6.23);$$

Onde:

FRC é o fator de Recuperação de capital;

i é a taxa de juros; e

n é o período de análise considerando a vida útil e tempo de utilização anual.

6.5 Impactos ambientais devido à inserção da tecnologia LED

As mudanças climáticas têm sido alvo de discussões no mundo todo, motivando a adoção de políticas governamentais de promoção da eficiência energética e de uso de energias renováveis que possibilitem a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa, tanto para aqueles países que têm uma matriz energética que emite uma quantidade significativa de CO₂, como para aqueles que possuem uma matriz menos poluente, mas que se comprometeram com metas de redução na emissão de gases causadores do efeito estufa.

Na última Conferência das Partes (COP-21) em Paris, foi assinado o Acordo de Paris, no qual o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025 e apresentou o indicativo de redução de 43%, até 2030. Ambos são comparados aos níveis de 2005. Nesse acordo, a eficiência energética foi reconhecida como uma ferramenta eficaz para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), representando cerca de 40% das reduções de emissões necessárias até 2050 para limitar o aumento da temperatura global.

O Ministério de Ciência e Tecnologia publica anualmente três tipos de fatores de emissão de CO₂ do Sistema Interligado Nacional do Brasil: dois para serem usados em projetos de MDL e um terceiro para inventários corporativos (MCT, 2016a). O fator de emissão de CO₂ do SIN varia muito, entre outros motivos, em função do regime de chuvas, pois, caso os reservatórios das hidrelétricas estejam muito baixos em consequência de poucas chuvas, há a necessidade de gerar uma quantidade maior de eletricidade através de usinas térmicas, geralmente mais poluidoras, fazendo com que o fator de emissão de CO₂ fique mais alto, conforme pode ser observado nos anos de 2014 e 2015 (Tabela 33).

Tabela 33 – Fatores de Emissão de CO₂ do SIN para inventários de 2010 à 2015

| Ano | Fator Médio Anual (tCO₂/MWh) |
|------------|--|
| 2010 | 0,0512 |
| 2011 | 0,0292 |
| 2012 | 0,0653 |
| 2013 | 0,0960 |
| 2014 | 0,1355 |
| 2015 | 0,1244 |

Fonte: MCT, 2016b

Para estimar as emissões de CO₂ equivalentes (CO₂e)⁸ evitadas em 2018 em função do potencial técnico de conservação de energia elétrica com a substituição integral do parque lâmpadas fluorescente por lâmpadas LED (Tabela 17), utilizou-se a estimativa do fator de emissão de CO₂ do SIN para inventários corporativos para o ano de 2018 (cf. BASTOS, 2011, p.64), resultando em um potencial técnico de redução da emissão de 252,9 MtCO₂/ano, conforme apresentado na Tabela 34.

Tabela 34 – Potencial técnico de redução na emissão de carbono (tCO₂e)

| Potencial de técnico de conservação de energia elétrica (GWh) Fonte: Tabela 17 | Fator médio anual (tCO₂/MWh) Fonte: (cf. BASTOS, 2011, p.64) | Potencial técnico de redução na emissão de carbono (tCO₂e) |
|---|--|--|
| 3417,9 | 0,074 | 252925,6 |

Fonte: Autor

⁸ O dióxido de carbono equivalente (CO₂e) é uma medida internacionalmente utilizada que expressa a concentração dos gases de efeito estufa, em termos equivalentes de dióxido de carbono (CO₂), baseada no potencial de aquecimento global de cada elemento, definido na decisão 2/COP 3 ou conforme revisado subsequentemente de acordo com o Artigo 5. O dióxido de carbono equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de gases de efeito estufa pelo seu potencial de aquecimento global. Por exemplo, o potencial de aquecimento global do gás metano é 21 vezes maior do que o potencial do CO₂. Então, dizemos que o CO₂ equivalente do metano é igual a 21. (IPAM, 2016)

7 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

O mercado da iluminação residencial no Brasil, que durante décadas era basicamente composto por lâmpadas incandescentes, nos últimos 25 anos vem passando por profundas transformações, inicialmente, com a introdução das lâmpadas fluorescentes compactas na crise energética de 2001, e mais recentemente, com a substituição de todas as tecnologias anteriores pela iluminação a LED. Vale destacar o apoio governamental na disseminação de novas tecnologias, por meio dos programas de eficiência energética, seja através de campanhas informativas, dos programas de etiquetagem e Selo, pelo Programa de Eficiência Energética (PEE) da Aneel, entre outros.

Por meio deste estudo foi possível avaliar os benefícios da lâmpada LED em substituição às lâmpadas fluorescentes nas residências brasileiras, tanto para o consumidor como para o meio ambiente, traduzidos em uma iluminação de qualidade com mais eficiência e maior vida útil.

De forma a quantificar os benefícios dessa substituição, primeiramente, foi elaborada uma metodologia para estimar o potencial técnico de economia de energia no setor residencial brasileiro com a substituição do parque de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED no ano de 2018, tendo como premissa que a partir desse ano as LIs já teriam sido substituídas por LFs. Tendo em vista que este potencial poderá variar em função do comportamento do consumidor e do mercado, entre outros fatores, elaboraram-se cenários associados ao nível de renda do consumidor, que foi representado pelas faixas de consumo de energia elétrica (Tabela 35).

Tabela 35 – Cenários propostos

| Faixas de consumo | Potencial técnico de redução | Percentual |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Faixas 6 e 5 | 1.258,12 | 36,81% |
| Faixas 6, 5 e 4 | 1.825,72 | 53,42% |
| Faixas 6, 5, 4 e 3 | 2.379,09 | 69,61% |
| Faixas 6, 5, 4,3 e 2 | 2.910,20 | 85,15% |
| Faixas 6, 5, 4,3, 2 e 1 | 3.417,86 | 100,00% |

Fonte: Autor

O potencial técnico de economia de energia no setor residencial brasileiro com a substituição integral do parque de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED no ano de 2018 é de aproximadamente 3,24 TWh/ano, o que equivaleria a aproximadamente 2,45% do consumo residencial em 2014 (EPE, 2015), ou ainda à energia suficiente para atender aproximadamente 1,70 milhões residências durante um ano⁹. Esta economia também corresponderia à energia gerada durante um ano por uma usina hidrelétrica equivalente com capacidade aproximada de 762 MWh¹⁰.

Na primeira parte da análise, comparou-se o fluxo de caixa de uma instalação de lâmpadas fluorescentes com lâmpadas LED, um VLP da instalação a LED 37% inferior às das lâmpadas fluorescentes, e uma TIR de 45,50%. A avaliação econômica proposta demonstrou também que, a partir de aproximadamente 315h anuais de operação, um sistema de iluminação com lâmpadas LED já se mostraria mais vantajoso que o de lâmpadas fluorescentes.

Em termos de impactos ao meio ambiente, a lâmpada LED é uma alternativa importante, pois comparada às tecnologias tradicionais, esta proporciona um menor consumo de energia elétrica com uma maior vida útil, o que minimiza a quantidade de lâmpadas a serem descartadas e a emissão de CO₂ na atmosfera. Além disso, a tecnologia LED não apresenta na sua composição elementos tóxicos, como é o caso do mercúrio no interior do bulbo das lâmpadas fluorescentes, que, caso sejam descartadas de forma incorreta, pode contaminar o solo e o lençol freático, causando danos irreversíveis à saúde dos seres vivos.

Para o programa do Selo Procel, o estudo ratificou a importância da concessão do Selo Procel para as lâmpadas LED, tendo em vista o potencial de economia de energia e de recursos que as mesmas representam para o país e para consumidor. Por se tratar de uma tecnologia ainda em constante evolução, o programa deverá estar atento a possíveis modificações que se façam necessárias com o objetivo de manter os seus critérios atualizados com as tendências do mercado.

⁹ Considerando que o consumo médio de energia de uma residência no Brasil é de 167 kWh por mês (Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica, ano VIII, nº 88, Janeiro de 2015, EPE).

¹⁰ A usina equivalente foi obtida a partir da energia economizada, considerando um fator de capacidade médio típico de 56% para usinas hidrelétricas e incluindo 15% de perdas médias na T&D. Considerou-se esse nível de perdas, tendo em vista que a grande parcela de utilização da energia elétrica se dá no sistema de distribuição em baixa tensão.

O presente trabalho teve como foco a iluminação residencial, entretanto o potencial de economia de energia elétrica com a Iluminação a LED pode ter sua abrangência estendida para as áreas da indústria, comércio e iluminação pública, entre outras. A iluminação do estado sólido aliado a uma política nacional de economia de energia elétrica trará muitos benefícios, tanto para a população, como para os cofres públicos, gerando uma economia para todo o país em um curto espaço de tempo.

Os benefícios das lâmpadas LED podem ir muito além dos já citados anteriormente. Além da função de ligar / desligar, as lâmpadas LED podem acumular uma série de outras funcionalidades associadas à automação e à Internet das Coisas. São tecnologias que já estão disponíveis, conectando os diversos produtos, permitindo, por exemplo, que as luzes acendam ou apaguem sozinhas para simular uma presença na casa. Ou ainda, alterar remotamente, com o auxílio de aplicativos para celular, a cor ou temperatura de cor da fonte luminosa em função da ambientação desejada, possibilitando a criação de ambientes personalizados, ou mesmo o monitoramento do consumo de energia. Assim, é possível literalmente conectar diferentes atributos e criar comportamentos diferentes.

Para trabalhos futuros, há os seguintes direcionamentos que podem ser abordados:

- estudo semelhante abrangendo o setor comercial, industrial e de iluminação pública;
- estudo da influência da qualidade de energia na rede elétrica com o uso das lâmpadas LED;
- estudo sobre o efeito *rebound* com a introdução da tecnologia LED;
- avaliação do impacto no consumo de energia elétrica com a introdução da tecnologia LED, associada à automação residencial, à Internet das Coisas, assim como a novas tecnologias de comunicação e de transferências de dados através da emissão da luz, como por exemplo a LI-FI;
- realização de uma nova pesquisa de posse e hábitos de equipamentos, pois nos últimos 10 anos grandes mudanças ocorreram no padrão de consumo do brasileiro, especialmente nas classes C e D.

8 Referências bibliográficas

AMAN, M.M.; JASMON G.B.; MOKHLIS H.; BAKAR; A.H.A. (2013). Special Section: Transition Pathways to a Low Carbon Economy. **Energy Policy. Special Section: Transition Pathways to a Low Carbon Economy**. vol. 52, 2013, pp. 482–500.

ANEEL (2016a) **Nota Técnica nº 021/2013-SRC/SRE/ANEEL** – Disponível em < http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2013/126/documento/nt-021-alteracao_bandeiras_tarifarias_jalv4.pdf >. Acessado em: 01/04/2016

ANEEL (2016b). **Bandeiras Tarifárias** – Disponível em < http://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/bandeira-tarifaria/654800?inheritRedirect=false >. Acessado em: 01/04/2016

BASTOS, F. C. (2011). **Análise da política de banimento de lâmpadas incandescentes do Mercado brasileiro**. Tese (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, PPE-COPPE, Março de 2011

BRAGA, N.C. (2014). **A cor dos LEDs**. Instituto Newton C.Braga. Disponível em: < <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/1000-a-cor-dos-leds-art142> > Acessado em: 10/02/2016

BRASIL. **Lei 9.991/2000 - Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências**. DOU, Brasília, 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19991.htm>. Acessado em: 15/05/2012.

BRITISH PETROLEUM (2015). **BP Statistical Review of World Energy June 2015**. Disponível em: < <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf> >. Acessado em: 18/02/2016.

BYUN, Jinsung; HONG, Insung; LEE, Byoungjoo; PARK, Sehyun (2013). Intelligent Household LED Lighting System Considering Energy Efficiency and User Satisfaction. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, vol. 59, n. 1, 2013, pp. 70 – 76.

CALLISTER, W. D. Jr. (2007). **Materials Science and Engineering: an Introduction**. 7. Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007

CARDOSO, Rafael B; NOGUEIRA, Luiz A.H. (2008). Avaliação do Impacto Energético do Uso de Lâmpadas Fluorescentes Compactas no Setor Residencial Brasileiro. **VI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Rio de Janeiro, 2008. 16p**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BCF5C00E2-A168-4A38-A829-E033C0C3AD74%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>Acessado em: 22/02/2016.

CARUZZO, A. (2008). **Análise do uso de tecnologias eficientes em iluminação: um estudo considerando condições climáticas**. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, UNIFEI, Itajubá, 2008

CERVELIN, G.; CAVALIN, S.; AMORIM, S. (2014). **Instalações Elétricas Prediais**. 14. Ed. São

Paulo: Editora Erica, 2014

CHENG, Y.K.; CHENG, K.W.E. (2006). General Study for using LED to replace traditional lighting devices. **2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications. IEEE Conference Publications**, 2006, pp. 173 – 177.

CLASP (2005). **Energy efficiency labels and standards: a guidebook for appliances, equipment, and lighting**. Washington, D.C, 2005. Disponível em: < <http://clasp.ngo/en/Resources/Resources/PublicationLibrary/2005/SL-Guidebook-English#SLGuidebookEnglishFiles>> Acessado em: 13/02/2015

CLASP (2012). **LED State of Play**. Washington, D.C, 2012. Disponível em: < <http://clasp.ngo/Resources/Resources/PublicationLibrary?p=Lighting&s>> Acessado em: 13/02/2015.

COMISSÃO EUROPÉIA (2014). **Comprender as políticas da União Europeia: Energia - Uma energia sustentável, segura e a preços acessíveis para os europeus - União Europeia** - Disponível em: < http://europa.eu/pol/ener/index_pt.htm >. Acessado em: 28/02/2016.

COMISSÃO EUROPÉIA (s/d) Disponível em: <<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>>. Acessado em: 18/02/2016.

COSTA, Gilberto J. C. (2006). **Iluminação Econômica: Cálculo e Avaliação**. 4ª Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2006.

CPFL (2016). Disponível em: < <http://www.cpfl.com.br/atendimento-a-consumidores/bandeira-tarifaria/Paginas/default.aspx>>. Acessado em: 04/05/2016.

DAVID, Rafael M. (2013). **Análise comparativa da eficiência energética das lâmpadas fluorescentes compactas com reator integrado participantes do selo procel eletrobras, Energy Star e equipment energy efficiency**. Itajubá, Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Dezembro de 2013.

DOE - *The U.S Department of Energy* (2012a). **National Energy Efficiency and Conservation Program**. [s/l], [s/d]. Disponível em <<http://www.doe.gov/ph/necp/default.htm>>. Acessado em: 07/08/2012

DOE - *The U.S Department of Energy* (2012b). **Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications** - Disponível em < http://www.ssl.energy.gov/tech_reports.html >. Acessado em: 07/02/2016

DOE - *The U.S Department of Energy* (2012c). **Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan April 2012** – Disponível em < http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2012_web.pdf >. Acessado em: 01/04/2016

DOE - *The U.S Department of Energy*, (2015). **Adoption of Light-Emitting Diodes in Common Lighting Applications - Prepared for the U.S. Department of Energy Solid-State Lighting Program** - Disponível em < http://energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f24/led-adoption-report_2015.pdf>. Acessado em: 07/02/2016

DUBOIS, Marie-Claude; BLOMSTERBERG, Åke (2011). Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review. **Energy and Buildings**. vol. 423, n. 10, 2011, pp. 2572–2582.

EKOS BRASILE; VITAE CIVILIS (2010). **Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar**. Realizadores: Instituto Ekos Brasile e o Vitae Civilis - Instituto para o Desenvolvimento, Meio

Ambiente e Paz Disponível em: < <http://www.procelinfo.com.>> Acessado em: 18/02/2016.

ELETROBRAS/PROCEL (2007a). **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil - Simulação de Potenciais de Eficiência Energética para a classe residencial.** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acessado em: 23/02/2016.

ELETROBRAS/PROCEL (2007b). **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil - Sumário Executivo.** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acessado em: 23/02/2016.

ELETROBRAS/PROCEL (2015^a). **Relatório de Avaliação de Resultados do Programa Selo Procel de Economia de Energia 2015.** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acessado em: 09/08/2015.

ELETROBRAS/PROCEL (2016). **CrITÉrios para Concessão do Selo Procel de Economia de Energia a Lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base - Revisão – 1 (Ajustada).** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acessado em: 10/03/2016.

ELETROBRAS/PROCEL; UNA (2014). **Curso de Capacitação em Aquecimento Solar – Rede Eletrobras Procel Solar – Manual do Professor/Instrutor.** Disponível em: “<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7b864629F8-AFCB-4AEC-9FD7-184047D68486%7d>”. Acessado em: 13/04/2016

ENERGY STAR. (2015a). **About ENERGY STAR.** Disponível em < https://www.energystar.gov/about/why_energy_star> Acessado em 07/08/2015.

ENERGY STAR. (2015b). **Certified Products.** Disponível em < <https://www.energystar.gov/products/spec>> Acessado em 10/08/2015.

EPA - Environmental Protection Agency (2011). **Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA) US EPA Backgrounder spring 2011 - frequently asked questions.** Disponível em: < file:///C:/Users/danield/Desktop/EISA_Backgrounder_FINAL_4-11_EPA.pdf/. > Acessado em: 18/03/2016.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2007). **Plano Nacional de Energia 2030 – Projeções.** Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Nacional%20de%20Energia%20%E2%80%93%20OPNE/Estudos_12.aspx>. Acessado em: 09/03/2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2015). **Balanco Energético Nacional – BEN 2015: Ano Base 2014.** Rio de Janeiro, 2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2015). **Nota Técnica Dea 13/15 - Série Estudos da Demanda de Energia - Demanda de Energia 2050** - Rio de Janeiro, 2016.

FERREIRA, André Rosa (2014). **Iluminação do Estado Sólido, Economia Potencial de Energia Elétrica para o País.** Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do ABC, São Paulo, 12 de maio de 2014.

FUPAI (2006). **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações.** 3^a Edição, Itajubá.

GELLER, H. S. (2003). **Revolução Energética: Políticas para um futuro sustentável.** Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003.

GELLER, H. S. (2006). **Índices Mínimos de Eficiência Energética, Etiquetas e Procedimento de**

Ensaio para Refrigeradores, Freezers e Condicionadores de Ar de Janela no Canadá, México, Estados Unidos, China e Outros Países em Desenvolvimento e em Transição. 2006. Disponível em: <http://clasp.ngo/~media/Files/SLDocuments/2006-2011/2006-07_MEPSLabelTestProcedureForRefrigeratorsAndFreezers_Portuguese.pdf> Acessado em: 14/05/2012

HELD, Gilbert. (2009) **Introduction to light emitting diode technology and applications.** New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009.

IEA – *International Energy Agency* (2010). **Energy Energy Performance Certification of Buildings - A policy tool to improve energy efficiency** - Disponível em: <<http://www.iea.org/>>. Acessado em: 11/11/2015.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial (2015).

Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE / Eficiência Energética. - Disponível em:

<<http://www.inmetro.gov.br>>. Acessado em: 11/11/2015.

IPAM - Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (2016). **Glossário.** Disponível em: <<http://ipam.org.br/glossario/>>. Acessado em: 05/02/2016.

IPCC - *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014). **Review of Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers.** Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf>. Acessado em: 18/02/2016.

KOH L. H.; TAN Y. K.; WANG Z. Z. ; TSENG K. J. (2011). An energy-efficient low voltage DC grid powered smart LED lighting system. **37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society - IEEE Conference Publications.** IEEE Conference Publications, 2006, pp. 2883 - 2888.

LI, F.; CHEN, D.; SONG, X.; CHEN, Y. (2009). LEDs: A Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE Conference Publications,** 2009, pp. 1-3.

MALVINO, A.P.; BATES D.J. (2008). **Eletrônica.** 7.ed. São Paulo: McGraw Hill, 2008. v2.

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia (2016^a). **Fatores de Emissão de CO₂ do Sistema Interligado Nacional do Brasil.** Disponível em:

<<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/72764.html>> 09/11/2015.

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia (2016^b). **Arquivo dos fatores de Emissão de CO₂ do Sistema Interligado Nacional para inventários.** Disponível em: <

<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>> Acessado em: 09/11/2015.

MIDC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (2016). **Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior - AliceWeb.** Disponível em: <<http://aliceweb.mdic.gov.br/>> Acessado em: 08/04/2016.

MMA – Ministério do Meio Ambiente (2008). **Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).** Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/politicanacional-sobre-mudanca-do-clima/plano-nacional-sobre-mudanca-do-clima>>. Acessado em: 09/05/2016.

MMA – Ministério do Meio Ambiente (2015). **Fundamentos para a elaboração da Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) do Brasil no contexto do Acordo de Paris sob a UNFCCC.** Brasília, 2015. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/Bases_elaboracao_iNDC.pdf>.
Acessado em: 11/02/2016.

MME – Ministério de Minas e Energia (2014). **Relatório de Atividades do Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE**. Brasília, 2014. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138787/0/Relatorio+CGIEE+2014_formato+oficial.pdf/041985b1-dd26-4d56-a2c5-bb0e9733dd5c?>. Acessado em: 12/06/2015.

NOGUEIRA, L. A. H. (2007). **Uso racional: a fonte energética oculta**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 21, p. 91-105, 2007.

OSRAM, s/d. **Manual Luminotécnico Prático**. Disponível em: <<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/ManualOsram.pdf>> Acessado em: 04/04/2016.

PESSOA, João L.N.; GHISI, Enedir; LAMBERTS, Roberto (2013). **Estado da arte em eficiência energética: iluminação e envoltória**. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em edificações Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/>> Acessado em: 18/02/2016.

PNAD/IBGE (2006). **Pesquisa Nacional por Amostra a Domicílio/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acessado em: 22/02/2016.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (2005). “**SINPHA: Simulador Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos**”. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BA6340DFB-8A42-41FC-A79D-B43A839B00E9%7D&Team=¶ms=itemID=%7BA797016A-8D13-4E7B-B5C3-0ECE28880269%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>>.
Acessado em: 18/03/2016.

SOUZA, Reinaldo C.; MUSAFIR, Jacques R.; PESSANHA José F. M. (2010). Índice De Capacidade de Pagamento dos Consumidores Residenciais BT: Um Método Baseado em Lógica Fuzzy. **XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI**, 2010.