



**Cristina Brandão Pinto de Mendonça**

**Eficiência Energética através do Uso da Tecnologia  
LED em Iluminação Pública: Desafios e  
Oportunidades**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental (opção Profissional).

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza

Co-Orientador: Prof. Roberto Schaeffer



**CRISTINA BRANDÃO PINTO DE MENDONÇA**

**Eficiência Energética através do Uso da Tecnologia  
LED em Iluminação Pública: Desafios e  
Oportunidades**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental (opção profissional) pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Reinaldo Castro Souza**

Presidente / Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. Roberto Schaeffer**

Co-Orientador

UFRJ

**Prof. Rodrigo Flora Calili**

PUC-Rio

**Prof. George Alves Soares**

ELETROBRÁS

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação  
do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de fevereiro de 2016.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Cristina Brandão Pinto de Mendonça**

Graduou-se em Engenharia Química (Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ), especialista em P&D de processos químicos (COPPE - UFRJ) e possui MBA Executivo (COPPEAD – UFRJ). Após início de atividade profissional voltada a otimização e melhorias de processos em indústrias para redução de impactos ambientais e custos, ao longo da carreira tem se dedicado a implementação de projetos transformacionais visando desenvolvimento sustentável de baixo carbono e resiliente, especialmente em cidades. Atualmente, é assessora do presidente da rede C40 (C40 Cities Climate Leadership Group) e chefe do escritório C40 no Rio, onde tem ajudado a demonstrar que o enfrentamento das mudanças climáticas é uma oportunidade para promover desenvolvimento sustentável e resiliente.

#### Ficha Catalográfica

Mendonça, Cristina Brandão Pinto de

Eficiência energética através do uso da tecnologia LED em Iluminação Pública: desafios e oportunidades / Cristina Mendonça; orientador: Reinaldo Castro Souza; co-orientador: Roberto Schaeffer – 2016.

210 f. : il. (color.) ; cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2016.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia civil – Teses. 2. Eficiência energética. 3. LED. 4. Cidades. 5. Iluminação pública. 6. Mudança climática. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Schaeffer, Roberto. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Ao Universo. À Deus. À Todos. Não importa o nome.  
Gratidão por servir com esta pesquisa e pelos inúmeros ensinamentos.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Reinaldo Castro e meu co-orientador Professor Roberto Schaeffer pela orientação, pela confiança depositada e por todo apoio e disponibilidade, independente do intenso calendário de compromissos.

A todos os meus colegas e amigos do curso de mestrado e todos os professores do Mestrado Profissional em Engenharia Urbana e Ambiental, agradeço pelo convívio e aprendizado. Um agradecimento também especial a secretária do programa Paula Enoy por toda ajuda nestes 3 anos de curso.

A todos que me fizeram despertar sobre a importância do tema de iluminação pública, em particular na tecnologia LED: meus colegas da Clinton Climate Initiative e as diversas prefeituras em nível global e no Brasil que vem liderando neste tema. O meu agradecimento especial aos meus colegas de trabalho da C40 Cities Climate Leadership Group que me apoiaram na realização desta pesquisa, e também a Marcel Siqueira e George Soares da Eletrobrás, e Júlio Morandi da RIOLUZ que disponibilizaram informações importantes que usei como base na pesquisa. E a equipe do Banco Mundial que desenvolveu estudo para a cidade do Rio, com quem tanto aprendi.

À toda minha família que me apoiou incondicionalmente, compreendendo os silêncios que deixei em algumas situações e a imensa torcida para que mantivesse a garra para abraçar as demandas profissionais, do mestrado e pessoais.

À minha mãe Ilka, em particular, que com enorme fibra e amor me ajudou que pudesse trilhar este caminho. Ao meu pai Osmar e minha avó Lina, que juntos já em outra dimensão, continuo experimentando amor, carinho e cuidado.

E por fim, um especial agradecimento a Denise Wilson do Kairos Integral, quem me despertou para esta oportunidade do curso e que, junto com meus parceiros evolutivos, estão me ajudando de forma especial a minha evolução como ser humano e me apoiando que eu possa oferecer o melhor de mim para servir ao planeta. Ao Chico Loureiro pelo apoio no esclarecimento de dúvidas na análise econômica, e a Araci Queiroz, Beth Valente, Carmem Pontual, Fabiana Prando, Janeide Franca, Laura Mariani, Lucimara Letelier, Manu Silvestre, Marília Carvalho, Nat Franca, Nilson Brandão, Stef Fernandes, a todos vocês minha enorme gratidão pela força, amor e cuidado ao longo de todos estes anos e, em particular, nos aprendizados ao longo deste processo de pesquisa.

## Resumo

Mendonça, Cristina Brandão Pinto de; Souza, Reinaldo Castro (Orientador); Schaeffer, Roberto (Co-Orientador). **Eficiência Energética através do Uso da Tecnologia LED em Iluminação Pública: Desafios e Oportunidades**. Rio de Janeiro, 2016. 210p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Energia está no cerne do desenvolvimento urbano sustentável. Devido à pressão causada pelas crescentes evidências do desafio das mudanças climáticas, necessidade de aumento de segurança energética e redução de poluição local, além de oportunidade de ganhos com redução de custos operacionais, a eficiência energética surge como uma estratégia fundamental para o meio ambiente, economia e sociedade, especialmente quando se constata que pouco mais da metade da energia produzida no mundo é desperdiçada até o seu uso final.

Dada a relevância do setor de iluminação no contexto de consumo de energia elétrica (cerca de 15% do consumo global), esta pesquisa faz uma análise da introdução da tecnologia de diodos emissores de luz – LED (em inglês *Light Emitting Diode*) no setor de iluminação pública (3% do consumo de energia elétrica no Brasil), a partir de uma análise dos impactos socioambientais e econômicos, com foco num estudo de caso na cidade de Los Angeles, nos Estados Unidos. Este projeto pioneiro é considerado uma das mais bem sucedidas iniciativas na introdução da tecnologia no mundo.

Apesar dos grandes avanços na tecnologia LED, que revoluciona todo o mercado de iluminação, ainda são observados desafios para sua adoção de forma mais acelerada, especialmente no Brasil. O trabalho faz uma avaliação do potencial de economia de energia com a adoção da tecnologia LED no sistema de iluminação pública no Brasil e analisa os desafios para sua introdução e propõe sugestões de como rompê-los.

## Palavras-chave

Eficiência Energética; LED; cidades; iluminação pública; mudança climática.

## Extended Abstract

Mendonça, Cristina Brandão Pinto de; Souza, Reinaldo Castro (Advisor); Schaeffer, Roberto (Co-Advisor). **Energy Efficiency Through the Use of LED Technology in Street Lighting: Challenges and Opportunities.** Rio de Janeiro, 2016. 210p. MSc Dissertation. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Energy is at the core of sustainable urban development. And energy efficiency has been emerging as a key strategy for the environment, economy and society, given the pressures caused by the growing evidence of the challenges of climate change, the need to increase energy security and reduce local pollution, in addition to opportunities around cost savings. When the amount of energy losses is assessed, where more than half of the global energy produced is wasted by the time it reaches its final use and when the need to promote social inclusion is considered, where 1.1 billion people do not have access to electricity, the more critical this strategy becomes - to reduce losses, to increase the efficiency of conversion processes close to its maximum yields, and also to introduce disruptive changes to the conversion processes, increasing its theoretical yields.

Given the relevance of the lighting industry in the context of electricity consumption (about 15% of global consumption), this study analyzes the introduction of LED (Light Emitting Diode) technology in the street lighting sector (3% of electricity consumption in Brazil). It is an example of innovation technology that brings in a new paradigm of electricity conversion, which is nine times more efficient than conventional incandescent lamps, with the potential to be twice as efficient as high sodium vapor lamps. In addition, LED technology will enable street lighting to be a multi-dimension system, that goes beyond providing adequate lighting levels, but promoting connectivity, communication, monitoring and big data management.

In this street lighting application, cities have been identified as the main transformational drivers for this technology revolution, along with other stakeholders, national governments, industries, development banks and organizations of civil society. When designed and implemented properly, it promotes various benefits such as contribution to mitigate climate change, with

negative GHG emissions abatement costs, energy security increases and enhances quality of living for the population.

The literature review demonstrates the complexity of lighting engineering and the need to consider the investigation of new technologies through an integrated approach that includes characteristics of the lighting source, the fixture and its power, while also considering other diverse areas such as health, social, behavioral and ecology in addition to engineering, physics and material sciences.

Lighting pollution is one of those intricate examples, where street lighting, if not well planned, can have adverse environmental, social and economic impacts (with electricity losses as high as 30% being reported). It was evidenced that addressing this challenge by only specifying fixtures is not enough. Other aspects of the projects such as luminous intensity can also have significant effects, as well as the quality of the wavelength of the lighting source.

The other major source of complexity is the very new solid state lighting technology. There has been a change in the culture of design, requiring the adoption of absolute photometry (as opposed to relative) and the introduction of new laboratory and field tests. The innovation of blue light LED, which brought significant gains in efficiency and enabled increased LED application versatility, has also brought the need for additional research regarding photometry evaluation, including scotopic and mesopic performance, as well as assessments of the effects of short wavelength on health (circadian rhythm) and biodiversity in general. The research identified cities that specify fixtures with color temperature up to 4.000K and researchers and civil society organizations, on the other hand, claim that values should be even lower than that and / or backed by more in-depth scientific research.

Given the potential of this technology, the billionaire global market has been growing at quite significant rates and the United States has been identified as the country where most incentives and research programs have been implemented to promote the solid-state lighting industry, or at least it is the country that mostly disseminates data and makes it public. Brazil and Latin America are out of this innovation map.

The Los Angeles case study, a pioneer in converting their street lighting system to LED, was investigated in this study. The case study was rebuilt through the use of an economic and finance modeling tool which is publicly available for



download at the US DOE website. The tool proved to be simple and user friendly, albeit formulas could not be edited or customized. Simulation results confirmed economic/ financial and environmental benefits.

As the literature review of several other international experiments indicated, Los Angeles also benefited from a significant reduction in maintenance costs (over 60%), as well as a reduction in energy costs. The successful implementation of this project was based on three main pillars: (i) adequate planning and engagement of various city departments; (ii) attractiveness of the financial analysis, highlighting the successful negotiation with the energy and water distribution companies, which granted a significant discount for each kwh saved in the system and the loan structure to complement equity, that would be repaid through energy and maintenance savings over the loan term and finally (iii) the technical capacity and leadership of the city staff – that had already been testing LED street lights for over 4 years and developed, in collaboration with other stakeholders, a very robust process of qualifying LED suppliers and approving products, which included catalogue assessment, laboratory testing and extensive field testing program that included the active participation of the population. Field tests were essential, since not all pre-approved products in catalog and laboratory assessments have demonstrated adequate performance in the field.

Important to note that the DOE reports that despite the promise of long life, there is no standard way to rate the lifetime and reliability of LED products. Various failures can occur such as in the management of the optical system, thermal management and driver controls. Inefficient power supply networks can also adversely affect the project investment results, (if the LED is not properly designed). Those challenges can be addressed by negotiating warranties with the suppliers, contracting insurance products, among other contractual modeling options.

Based on the analysis of international case studies and particularly considering the Los Angeles experience, the potential energy savings with the introduction of LED street lighting in Brazil was investigated. Excel spreadsheets were created to model three different scenarios: (i) technical potential, which is a theoretical potential, if there were no technical or economic constraints for lamp replacements; (ii) implementation under municipality's investment point of view,

where a city makes the investment and (iii) implementation under the utility's investment point of view, where it is assessed if an investment to enhance the street lighting system can generate savings that reduce the need to expand the electricity system and/ or reduce operational costs. From the calculated technical potential savings (6,108 MWh), 76% of this savings would be feasibly achievable, considering the implementation under the municipality's investment point of view. The Northeast region, that has low electricity tariffs, considering the adopted price scenario for the LED fixture (R\$ 1,360) and the modeling assumptions, was the only region in which it was not economically viable. From the utility's investment point of view, using the ANEEL methodology to calculate RCB, the projects were not economically viable, unless significant cost reduction of LED fixtures is obtained (from R\$ 1,900 to less than R\$ 1,000). Considering the limitations and simplifications of the model, it is not possible to assure that in no Brazilian city would the LED street light project not be an investment case, but it indicates that – in general – it is not attractive. One of the factors that contribute to this difference between the two scenarios (municipality's and utility's investments views) is that savings with the reduction of maintenance costs are not considered in the calculation of RCB. This suggests that governmental programs that aim to support energy efficient street lighting projects in Brazil should develop other indicators or criteria to assess investments, for example, adopting the ones that were used in this research (ROI, payback and NPV). The reduction of maintenance costs, which is dependent on the reduction of labor costs, had a strong influence over project feasibility. Therefore, it is recommended that municipalities strengthen their knowledge of cost management and that the impact of labor costs reduction be investigated to maximize economic benefits while also guaranteeing social benefits (eventually supporting capacity building programs for skilled labor to maintain their employability in other sectors of the economy).

In spite of the potential benefits of LED technology, there are various challenges that prevent its large scale global adoption and particularly in Brazil the following points have been mapped: i) technological risk posed by the lack of minimum technical specifications and standards in an environment of rapid LED market innovation, and in applications where specifications are available (such as traffic lights), various gaps and opportunities of improvement have been identified, compared to international standards; (ii) lack of infrastructure,

laboratories and technical capacity to conduct evaluation tests, mainly field tests in cities, especially considering that the solid state lighting technology has promoted a deep change in the project culture; (iii) financial constraints (high cost products, low local production scale); (iv) lack of specific funding lines for LED in street lights or traffic signals and (v) challenges that go beyond the LED technology, which are independent of this technology, but that need to be investigated to maximize the application of LED. Among the latter, it was highlighted (v.a) the need for cities to optimize the street lighting management system, to meet NBR 5101: 2012 specifications; (v.b) creation, maintenance and update of street light lamp inventory, a challenge which has been deepened through the ANEEL Resolution No. 414 of 2010, and (v.c) implementation of an effective public tracking system to monitor mercury lamp recycling, since those lamps will be replaced by LEDs.

The regulation of the market (creation of norms and technical specifications for LED street lights), the intensification of capacity building programs and knowledge dissemination (with virtual and in presence meetings, computational tools), the creation of a collaborative ecosystem between municipalities, organizations that promote energy efficiency policies, research centers, universities and the private sector, in addition to the creation of programs to enhance finance access, were some of the proposed suggestions to tackle the challenges to introduce LED technology in Brazil.

Last but not least, reflections about the interdependence and connection between individuals and between individuals and the planet are included. This interdependence was demonstrated in this study through the discussion and analysis of the use of LED in streetlight, the importance of light and its technologies and its important role in promoting sustainable development.

This unequivocally demonstrates that effective solutions to the great challenges of humanity (energy efficiency and climate change, for example) will be effective once an integral and not fragmented approach is applied. That is, when the solution covers all spheres and dimensions of sustainability – the social, economical and environmental, in an integrated approach that considers all aspects of the project throughout its life cycle.

The complexity of lighting science, to be effective, needs to embrace various areas of knowledge. Energy efficiency innovations do not need to be

contradictory, where a solution occurs at the expense of, for example, human health or environmental and biodiversity damage, taking just a single requirement as condition. The optimal solution would meet all spheres and dimensions of sustainability, not excluding the economic, of course.

The development and use of LED technology has led to an acceleration of these reflections on the possible integration of different boundary conditions, which has been perceived as seemingly contradictory. The potential successful experience of the integration of these different boundary conditions - environmental, social and economic - can serve to enhance the replication process in other technological areas.

## **Keywords**

Energy efficiency; LED; cities; public lighting; climate change.

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>22</b>
<b>2. RELEVÂNCIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E O PAPEL DAS CIDADES</b>	<b>26</b>
2.1. O impacto da iluminação no subsetor de energia elétrica	30
2.2. Relevância das Cidades: Oportunidades no Setor de Iluminação Externa	36
2.2.1. Ampliação do Olhar sobre a Iluminação Pública	38
<b>3. LUZ, REVISÃO DE TECNOLOGIAS E MERCADO DE ILUMINAÇÃO</b>	<b>45</b>
3.1. Revisão das Tecnologias	53
3.1.1. A tecnologia LED em detalhes	65
3.1.2. Benefícios da Tecnologia LED, em particular para Iluminação Externa e IP	68
3.2 Mercado de Iluminação Geral e de IP	80
3.2.1. A Indústria de Luz em Estado Sólido: Principais Players	84
<b>4. UTILIZAÇÃO DE LED EM IP E ESTUDO DE CASO DE LOS ANGELES</b>	<b>87</b>
4.1. Lições das Experiências com Uso de LED	90
4.2. Sobre a Cidade de Los Angeles e Histórico	96
4.3. Análise econômico financeira	97
4.3.1 Modelo de Financiamento e Construção do Plano de Negócios	102
4.4. Seleção de Tecnologia	104
4.5. Resultados	106
4.5.1. Resumo dos Impactos Socioambientais e Econômicos	107
<b>5. POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA COM A INTRODUÇÃO DA TECNOLOGIA LED EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL: ANÁLISE, DESAFIOS E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>111</b>
5.1. Análise do Inventário de Lâmpadas de IP no Brasil	111
5.1.1 Verificação da distribuição do número de lâmpadas por região	113
5.1.2. Cálculo do consumo de energia para IP a partir do cadastro	114
5.2. Análise do Potencial de Economia	115
5.2.1. Avaliação do Potencial Técnico	115
5.2.2. Avaliação sob a ótica das concessionárias	119
5.2.3. Avaliação do potencial sob ótica dos municípios	124
5.2.4. Resumo das análises anteriores	138
5.3. Desafios e Recomendações para Introdução da Tecnologia LED em IP no Brasil	138
5.3.1. Ausência de especificações mínimas e padrões técnicos	139
5.3.2 Falta de infra-estrutura e capacitação técnica de forma disseminada	143
5.3.3. Produtos de alto custo, sem escala de produção no Brasil	145
5.3.4. Falta de linha de financiamento específica para otimização de IP	146
5.3.5. Desafios que independem da tecnologia LED	151

<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE FUTUROS TRABALHOS</b>	<b>158</b>
6.1 Sugestões de Futuros Trabalhos	163
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>165</b>
<b>ANEXO</b>	<b>186</b>
A. Metodologia para Avaliação de PEE segundo ANEEL	186
<b>APÊNDICES</b>	<b>192</b>
A. Conceitos sobre parâmetros luminotécnicos e qualidade de energia	192
B. Princípios Básicos do LED	199
B.1. Princípios da Produção de Cor e Processo de Fabricação	202
C. Resultados da Simulação – Estudo de Caso de Los Angeles	206
D. Resultado Simulações – Ótica das Concessionárias	209
E. Resultado Simulações – Ótica dos Municípios	210

## Lista de Figuras

Figura 1 – Balanço de Energia Global (Valores Expressos em PJ)	27
Figura 2 – Contribuição dos Setores de Consumo de Energia Elétrica para Iluminação	30
Figura 3 – Consumo de Energia Elétrica Total e Para Iluminação Pública no Brasil	33
Figura 4 – Emissões de Gee do Sin, Brasil (2006 – 2015) e Sistemas Isolados (2009-2013)	35
Figura 5 – Imagem de Satélite da Terra	39
Figura 6 – Impacto Visual da Poluição Luminosa	41
Figura 7 – Luminárias e Efeito Poluição Luminosa	42
Figura 8 – Efeitos de Luminária e Intensidade Luminosa em Brilho no Céu	42
Figura 9 – Espectro Eletromagnético e a Radiação Visível	45
Figura 10 – Sistema Visual Humano	46
Figura 11 – Curva de Sensibilidade das Condições Escotópica e Fotópica	48
Figura 12 – Curvas de Distribuição Espectral X Sensibilidade em Condições Fotópica e Escotópica	50
Figura 13 – Iluminância Média e Distância Média Percebida	52
Figura 14 – Tipos de Fontes de Iluminação	53
Figura 15 – Diagramas com Balanço de Energia de Lâmpadas de Tecnologias Tradicionais	61
Figura 16 – Balanço de Energia Ilustrativo de Lâmpada LED de Luz Branca	62
Figura 17 – Balanço de Energia para Sinalização Semafórica: Lâmpada Incandescente Versus LED	63
Figura 18 – Histórico e Predições de Evolução Tecnológica	64
Figura 19 – Componentes e Sistemas de um LED	67
Figura 20 – Ondas de Corrente e Tensão na Entrada de Luminárias Vapor de Sódio (A) e LED (B)	69
Figura 21 – Conteúdo Harmônico da Corrente de Entrada	70
Figura 22 – Análise de Ciclo de Vida – Avaliação Impacto Ambiental	71
Figura 23 – Potencial Efeito da Luminária LED sobre Poluição Luminosa	75
Figura 24 – Rua na Cidade de Boston com Iluminação a Sódio (Esquerda) e LED (Direita)	77
Figura 25 – Uso de LED para Iluminação Embaixo de Viadutos	78
Figura 26 – Mercado de Iluminação	80
Figura 27 – Evolução do Número de Patentes e Publicações	81
Figura 28 – Evolução do Preço do Pacote de LED e seu Aumento de Eficiência	81
Figura 29 - Preço de Lâmpada LED nos EUA – uso Residencial	82
Figura 30 – Participação no Mercado de Tecnologia LED	83
Figura 31 – Tipos de Falha	93
Figura 32 – Motivos de Falhas do LED	94
Figura 33 - Etapas para o Desenvolvimento do Programa	97
Figura 34 – Luminária Tipo <i>Cobrahead</i>	100
Figura 35 – Redução Consumo de Energia e de Emissões de Gee	101
Figura 36 – Fluxo de Caixa Simples Acumulado	101

Figura 37 – Fluxo de Caixa Simples Acumulado com Crédito por Economia de Energia	102
Figura 38 – Iluminação em Vapor de Sódio (Esquerda) e LED (Direita)	108
Figura 39 – Redução da Poluição Luminosa em Los Angeles	110
Figura 40 – Potencial de Redução de Custo por Ganho de Escala na Compra	121
Figura 41 – Variáveis para Análise de Sensibilidade	131
Figura 42 – Alocação de Recursos no PEE e Contribuição no Consumo de EE	149
Figura 43 – Vantagens e Desvantagens da Estruturação de PPP	150
Figura 44 – Luminária Tradicional Coberta por Copa de Árvore e Sombreamento na Calçada	151
Figura 45 – Sombreamento em Ciclovia e Avenida (Projetos com LED)	152
Figura 46 – Luminárias Acesas Durante o Dia no Rio de Janeiro e Manaus	153
Figura 47 – Luminárias Acesas Durante o Dia	153
Figura 48 – Ilustração Radiação Emitida pela Fonte	192
Figura 49 – Representação Intensidade Luminosa e Ângulo Sólido	193
Figura 50 – Representação Iluminância	193
Figura 51 – Representação Luminância	194
Figura 52 – Ilustração de Onda Fundamental, Harmônica e Onda Total Distorcida	196
Figura 53 – Deslocamento de Fase e Potência Reativa	197
Figura 54 – Diagrama de Bandas Esquemático	200
Figura 55 – Ilustração Esquemática Junção P-N	201
Figura 56 – Princípios de Produção de Luz Branca	202
Figura 57 - Safira Monocristalina	204
Figura 58 - Reator de MOCVD	204
Figura 59 - Chip de LED e Pacote (Desenho Esquemático e Produto Final)	205
Figura 60 – Cadeia Produtiva de LED	205



## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Projeção do Consumo de Energia Elétrica para Iluminação	32
Tabela 2 – Composição Energia Elétrica Gerada no Brasil – Ano Base 2013	34
Tabela 3 – Diferenças entre foto-receptores e distintas visões	48
Tabela 4 – Eficiência de lâmpadas em condições fotópicas e escotópicas	51
Tabela 5 – Processos de Geração de Luz por Fontes	55
Tabela 6 - Principais características e aplicações de vários tipos de lâmpadas	58
Tabela 7 – Principais Marcos no Desenvolvimento da Tecnologia LED	66
Tabela 8 – Principais Atores Mundiais no Mercado de LED	85
Tabela 9 – Resultados de Uso de LED em IP em Diversos Municípios	89
Tabela 10 - Características do Parque de Iluminação: Antes x Proposta	99
Tabela 11 – Características das Tecnologias: vida útil e custos luminária	100
Tabela 12 - Componentes do Custo de Capital(US\$)	101
Tabela 13 – Composição do Financiamento	103
Tabela 14 – Análise – Impacto do Financiamento	103
Tabela 15 – Resumo do Projeto	104
Tabela 16 - Consumo máximo de potência do LED para atingir economia de energia desejada	105
Tabela 17 – Cadastro de Lâmpadas de IP no Brasil – Tipos e Potência	112
Tabela 18 – Cadastro de Lâmpadas de IP no Brasil – Tipos por Região	113
Tabela 19 – % de Lâmpadas, PIB e População Urbana por Região no Brasil	114
Tabela 20 – Alternativas de Substituição: tradicional VSAP x LED	116
Tabela 21 – Potencial de Substituição de Lâmpadas	117
Tabela 22 – Potencial Técnico de Economia de Energia Elétrica em IP	118
Tabela 23 – Tarifa de IP ponderada pela redução de consumo de energia	119
Tabela 25 – Custos (CEE e CED) e Análise de Sensibilidade de RCB	123
Tabela 26 – Características das Lâmpadas por Região	125
Tabela 27 – Levantamento de Custos das Luminárias	126
Tabela 28 – Comparação sistema de IP em Los Angeles e Curitiba	127
Tabela 29 – Custos de manutenção por lâmpada	129
Tabela 30 – Influência da redução do custo de mão-obra para manutenção	132
Tabela 31 – Influência de instalação coincidente com depreciação de lâmpadas e luminárias	134
Tabela 32 – Variação da Redução do Preço do LED sobre Viabilidade do Projeto	135
Tabela 33 – Ponto de equilíbrio em relação ao preço	136
Tabela 34 – Investimentos, VPL, Redução CO <sub>2</sub> eq e Custo de Abatimento	137
Tabela 35 – Economias de Energia e O&M	137
Tabela 36 – Percentual do Potencial Técnico com Viabilidade Econômica	138
Tabela 37 – Comparação de Normas para Sinalização Semafórica com LED	141
Tabela 38 – Cálculos de Eficiência Energética em Sistemas de Iluminação	186
Tabela 39 – Vida útil de materiais e equipamentos de Iluminação Pública	187
Tabela 40 – Índice de Reprodução de Cor	195
Tabela 41 – Materiais Utilizados na Fabricação do LED	203

## Lista de Quadros

Quadro 1 – Descrição das Principais Barreiras para Aumento de Eficiência da Iluminação	36
Quadro 2 – Fatores para cálculo do CED	191
Quadro 3 - Danos causados pelas harmônicas	196
Quadro 4 - Descrição simplificada do processo de fabricação	204

## Lista de Siglas e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALMR	Associação de Iluminação e Recicladores de Mercúrio
CIE	Comissão Internacional de Energia (do francês <i>Commission Internationale de l'Eclairage</i> )
CED	Custo Evitado de Demanda
CEE	Custo Evitado de Energia
EDEE	Empresa de Distribuição de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Planejamento Energético
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEF	Global Environment Facility
VSAP	Lâmpada de Vapor de Sódio a Alta Pressão
IESNA	Sociedade de Engenharia de Iluminação da América do Norte (do inglês <i>Illuminating Engineering Society of North America</i> )
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
iNDC	Pretendida contribuição nacionalmente determinada (iNDC, em inglês <i>intended Nationally Determined Contribution</i> )
IP	Iluminação Pública
LCF	Lâmpada compacta fluorescente
LEC	Célula Eletroquímica Emissora de Luz (do inglês <i>Light Electrochem Cell</i> )
- p-LEC	polímero-LEC
- iTMC-	Complexos Iônicos de metal de transição (do inglês <i>ionic transition metal complexes – LEC</i> )
LEC	
LED	Diodo Emissor de Luz (do inglês <i>Light Emitting Diode</i> )
MOCVD	Deposição química de organometálicos em fase vapor (do inglês <i>Metal Organic Chemical Vapor Deposition</i> )
Mtep	Milhões de toneladas equivalente de petróleo ou 11.630 gigawatt-hour (do inglês <i>toe – tons of oil equivalent</i> )
NCM	Nomenclatura Comum Mercosul (sistema harmonizado de designação e de codificação de mercadorias)
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico. (do inglês, OECD – <i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i> )
O&M	Operação e Manutenção
OLED (ou SMOLED)	Diodos Orgânicos Emissores de Luz de baixo peso molecular (do inglês <i>Organic light emitting diode ou Small molecule organic light emitting diode</i> )
PEE	Programa de Eficiência Energética
p-OLED (ou PLED)	Polímero Orgânico Emissor de Luz ou Polímero Emissor de Luz (do inglês <i>polymer Organic light emitting diode ou Polymer Lighting Emitting Diode</i> )
PPP	Parceria público privada – instrumento financeiro como modalidade de contrato de concessão
RCB	Relação Custo Benefício
SIN	Sistema Interligado Nacional

SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
TIR	Taxa Interna de Retorno
TR	Tempo de retorno do investimento (em inglês, <i>payback</i> )
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (do inglês <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> )
VPL	Valor Presente Líquido

*“[...] no início tudo era luz e continua sendo tudo luz. Provavelmente, no final, tudo continuará sendo luz. O que nos preocupa no Ano Internacional da Luz, não é apenas a luz que enxergamos, mas sim aquela que a mente deveria enxergar. Então, a luz é um significado que vai além da parte científica e da matéria, e que atinge um pouco a parte filosófica. Estamos vivendo um momento em que as mentes têm que aprender a enxergar, não só com os olhos.*

*E o Ano Internacional da Luz dá essa conotação. Essa comemoração provoca que todos enxerguem um pouco mais do que o óbvio, principalmente em lugares obscuros, por exemplo no Terceiro Mundo, onde as pessoas não entendem o quanto elas têm que contribuir para o coletivo”*

**Vanderlei Salvador Bagnato.**

Doutor em Física, professor da USP, membro de Academia Brasileira de Ciências, National Academy of Sciences, dentre outras. Depoimento em maio de 2015 ao jornalista do Instituto de Física São Carlos/ USP em comemoração ao Ano Internacional da Luz em 2015.

## INTRODUÇÃO

A energia está no cerne do desenvolvimento urbano sustentável. Devido a pressão causada pelas crescentes evidências do desafio das mudanças climáticas, necessidades de aumento de segurança energética e redução de poluição local, além de oportunidade de ganhos com redução de custos operacionais, a eficiência energética surge como uma estratégia fundamental para o meio ambiente, economia e sociedade, especialmente quando se constata que pouco mais da metade da energia produzida no mundo (LLNL, 2011) é perdida até o seu uso final.

A produção de energia elétrica é responsável pelo consumo de cerca de 15% de toda energia primária gerada no mundo (IEA, 2014). No Brasil, a razão é de 16% (EPE, 2014a)<sup>1</sup>. Neste setor de energia elétrica, o consumo para iluminação representa cerca de 15% do consumo global (UNEP,2014) e 16% do consumo no Brasil (UNEP, 2010). A relevância global sobre o tema de iluminação se reflete na escolha feita em 2013 pela Organização das Nações Unidas em celebrar, em 2015, o Ano Internacional da Luz e Tecnologias a Base de Luz, justamente para aumentar a consciência pública sobre luz e suas tecnologias e seu papel central na promoção do desenvolvimento sustentável (ONU, 2014).

Dentre as diversas tecnologias de iluminação, a tecnologia de iluminação em estado sólido, entre elas os diodos emissores de luz – LED (em inglês *Light Emitting Diode*), objeto desta pesquisa, revoluciona todo o mercado e em 2014, como reconhecimento desta inovação, cientistas que desenvolveram o LED de luz azul foram agraciados com Nobel de Física (RSAS, 2014). A tecnologia LED impulsiona a eficiência energética, indo além inclusive do próprio mercado de iluminação, e inclui aplicações de convergência com a comunicação. A tecnologia de comunicação de luz visível não é algo novo, mas dado a natureza microeletrônica do LED e a viabilidade de integração de sensores, inteligência,

---

<sup>1</sup> No mundo, em 2012, a produção de energia foi de 13.371 Mtoe ou 155.505 TWh e a produção de eletricidade de 22.668 TWh (IEA, 2014a). No Brasil, em 2013, os respectivos valores foram 282,5 Mtep e 44,4 Mtep (EPE, 2014a,b).

interface de rede e outras funcionalidades, considerando ainda que a iluminação em LED está disseminada nas mais variadas aplicações internas e externas, estes sistemas de iluminação podem servir como plataforma e infraestrutura para a Internet das Coisas, que oferece uma maneira de conectar dispositivos eletrônicos diversos à rede de comunicação, a partir da qual se espera ser possível uma troca e obtenção de dados em escala jamais antes alcançada e também com alta eficiência energética (KAVEHRAD, 2010; MEDINA et al, 2015).

Esta pesquisa faz uma análise da introdução do LED no setor específico de iluminação pública (IP), através de exame de diversas experiências internacionais e nacionais, com foco num estudo de caso na cidade de Los Angeles, nos Estados Unidos (Capítulo 4). A iniciativa em Los Angeles foi pioneira no uso de LED em iluminação pública em larga escala (CCI-City of Los Angeles, 2009). Segundo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), em outubro de 2013, foi considerado o maior projeto de substituição de LED para iluminação pública no mundo já totalmente implementado (DOE, 2013c). O DOE o considera uma das mais bem sucedidas iniciativas na introdução da tecnologia, servindo como exemplo de estudo de caso para outros municípios americanos<sup>2</sup>, além de ter contribuído para criação de ferramenta de avaliação econômica e financeira para apoiar implantação de projetos LED em IP (C40, 2012), que será utilizada nesta pesquisa. O projeto de Los Angeles também obteve reconhecimento nacional através do prêmio Bright Ideas pela Harvard Kennedy School em 2012<sup>3</sup> e internacionalmente, em 2012 ganhando o prêmio pela ISA – International Solid State Alliance<sup>4</sup> e em 2014, sendo finalista do C40 Awards<sup>5</sup>.

Esta revisão de literatura do uso da tecnologia LED em IP é feita a partir da avaliação dos (i) impactos ambientais, investigando como a tecnologia impacta na redução do consumo de energia e gases de efeito estufa, além do uso de metais

---

<sup>2</sup> No website do Departamento de Energia dos Estados Unidos, o caso de Los Angeles é destacado como exemplo de melhor prática. Disponível em <http://energy.gov/eere/ssl/doe-municipal-solid-state-street-lighting-consortium>. Acesso em 1 de junho de 2014.

<sup>3</sup> Programa que reconhece inovações em programas governamentais nos Estados Unidos. Disponível em <http://bsl.lacity.org/downloads/led/awards/HarvardKennedy.pdf> Acesso em 2 de junho de 2014.

<sup>4</sup> Premiação que reconhece inovações promovida por organização não-governamental que representa cerca de 70% da indústria de iluminação em estado sólido no mundo- ISA. Disponível em <http://bit.ly/1SCd094>. Acesso em 1 de dezembro de 2014.

<sup>5</sup> Premiação que reconhece iniciativas de liderança bem sucedidas em cidades ao redor do mundo, organizada pela C40 Cities Climate Leadership Group. Disponível em <http://www.c40.org/2014-finalists> . Acesso em 1 de dezembro de 2014.

pesados, (ii) impactos econômicos, ou seja, a sustentabilidade econômica da solução, verificada através de análise do investimento, considerando potencial redução de custos de energia e manutenção e (iii) impactos sociais, avaliados através dos parâmetros de qualidade visual, poluição visual e sensação de segurança.

A partir destas investigações e das lições e aprendizados especialmente no caso de Los Angeles, a pesquisa é aprofundada num estudo de caso específico ao Brasil, onde o potencial de economia do uso da tecnologia LED em IP é avaliado. Tal potencial, calculado pelo inventário de lâmpadas de IP no Brasil disponibilizado pela Eletrobrás, é investigado do ponto de vista ambiental e econômico considerando três cenários: (i) potencial técnico, definido como aquele teórico em que não há restrições econômicas para instalação do LED, (ii) potencial sob a ótica das concessionárias de energia, caso os investimentos sejam feitas por estas empresas e (iii) potencial sob a ótica dos municípios, caso estes sejam os implementadores do projeto. Como será discutido, apesar dos grandes avanços na tecnologia LED, ainda são observados desafios para sua adoção de forma mais acelerada, especialmente no Brasil. O trabalho analisa então os desafios para introdução da tecnologia no Brasil e propõe recomendações para rompê-los (Capítulo 5), e por fim apresenta conclusão com propostas para futuros trabalhos (Capítulo 6).

Antes de investigar as diversas experiências internacionais e o estudo de caso de Los Angeles (Capítulo 4), são apresentados o panorama do setor de energia, que dá embasamento à justificativa da pesquisa e evidencia ainda mais a importância da estratégia de eficiência energética em IP e o protagonismo das cidades relativo às oportunidades do setor de iluminação externa no mundo e Brasil, ilustrando um dos principais atores desta revolução tecnológica. O tema de poluição luminosa, que vem ganhando destaque no debate mundial como importante estratégia na redução de desperdício de energia em IP e na otimização de impactos sociais (KOCIFAI E AUBÉ, 2014) é também introduzido neste capítulo (Capítulo 2). O capítulo seguinte apresenta uma revisão das diversas tecnologias de iluminação, com detalhamento da tecnologia LED, evidenciando a complexidade da engenharia de iluminação. Por fim, o bilionário mercado de iluminação geral e de IP em particular é contextualizado (Capítulo 3).



A pesquisa foi realizada a partir de revisão de dados de literatura e entrevistas com algumas das principais partes interessadas no Brasil, incluindo fornecedores de tecnologia, Eletrobrás e Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro - RIOLUZ (este último como referência de um dos maiores municípios no Brasil).

No Anexo deste trabalho é apresentada a metodologia para avaliação de programas de eficiência energética da ANEEL, utilizada como base para investigação do potencial de economia de energia no Brasil. Os Apêndices contêm uma descrição dos principais conceitos de parâmetros luminotécnicos e qualidade de energia, fundamentais para análise de projetos de iluminação (Apêndice A), detalhamento da tecnologia LED e materiais semicondutores (Apêndice B), e resultados da simulação econômica para o estudo de caso de Los Angeles (Apêndice C). Exemplos dos resultados das simulações do potencial de economia do LED sob a ótica das concessionárias de energia (Apêndice D) e dos municípios (Apêndice E) são também apresentados.

## 2

# RELEVÂNCIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E O PAPEL DAS CIDADES

A energia tem papel central no desafio das mudanças climáticas, uma vez que o setor de energia contribui com dois terços das emissões de gases de efeito estufa, já que mais de 80% do consumo global é baseado em combustíveis fósseis (IEA, 2014).

A partir de dados disponibilizados pelo Lawrence Livermore National Laboratory e o Departamento de Energia Americano (LLNL, 2011), conforme Figura 1 a seguir, estima-se que cerca de 54% de toda a energia produzida no mundo é perdida até o seu uso final. Este valor agrega também a energia não recuperável, dado o limite termodinâmico dos processos implantados.

A magnitude deste valor ressalta a importância das estratégias de eficiência energética, tanto para reduzir as perdas, aumentando a eficiência dos processos de conversão de energia próximo aos seus rendimentos máximos, como também destaca a oportunidade de inovações tecnológicas que introduzam novos paradigmas de conversão, com maior rendimento teórico que as tecnologias convencionais, que é por exemplo o caso da iluminação em LED, que é cerca de nove vezes mais eficiente<sup>6</sup> que a lâmpada tradicional incandescente e tem potencial de ter o dobro de eficiência que a lâmpada de vapor de sódio (análise a partir de dados de KUSHWAHA, 2011 e DOE, 2015a), conforme será detalhado no capítulo 3.

---

<sup>6</sup> Eficiência definida como potência radiante em relação a potência elétrica fornecida, não levando em consideração a qualidade de luz emitada ou o tempo de vida útil da lâmpada.

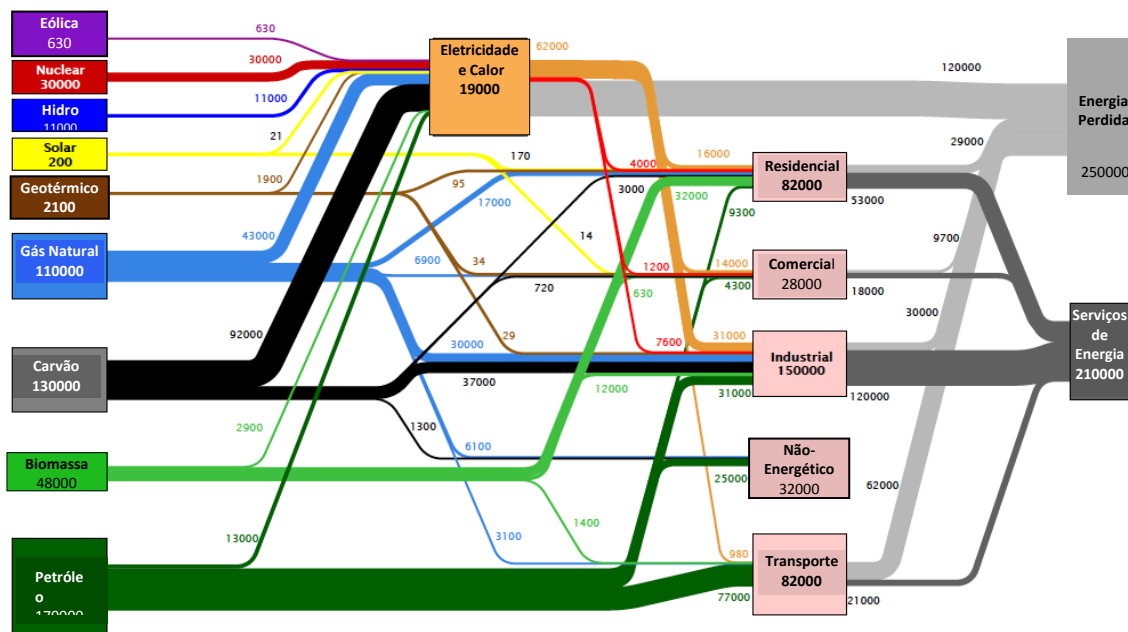


Figura 1 – Balanço de Energia Global (valores expressos em PJ).

Fonte: Lawrence Livermore National Laboratory and US Department of Energy (LLNL, 2011).

As emissões causadas pelo desperdício no uso da energia vão no sentido oposto do cenário de urgência que o 5º Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas divulgou em setembro de 2013 (IPCC, 2013). É demonstrado de forma inequívoca a importância de reduzir substancialmente as emissões de gases de efeito estufa e trabalhar para aumentar a resiliência aos riscos climáticos. Mantendo-se constante a atual trajetória de emissão de gases de efeito estufa (cerca de 10,9 GtC por ano) e considerando-se que até 2014 já foram emitidos 545 GtC, em torno de 30 anos pode-se ultrapassar o limite máximo de estoque de carbono na atmosfera (873 Gt C<sup>7</sup>), que garantiria, com uma probabilidade de 66%, que a temperatura não aumente em mais de 2°C, o que elevaria sobremaneira os riscos de consequências "perigosas" do aquecimento global (FRIEDLINGSTEIN *et al*, 2014).

Quando a este quadro, consideramos ainda que 1,1 bilhões de pessoas sequer têm acesso a eletricidade (IEA e WB, 2015), o aumento de eficiência é premente, de forma a garantir o fornecimento de energia elétrica, sem que haja impacto ambiental decorrente de aumento de emissões. Ademais, o acesso a sistemas de energia é ação necessária, porém não suficiente, para eliminar a injustiça social a estes indivíduos, garantido um padrão adequado de qualidade de

<sup>7</sup> Os valores incluem gases de efeito de estufa além do CO<sub>2</sub> (FRIEDLINGSTEIN, 2014).

vida através de empoderamento e acesso a serviços de saúde, emprego, ao mesmo tempo promovendo o crescimento econômico (IEA e WB, 2015). Conclusão similar chega Jeremy Rifkins<sup>8</sup>(2012, p. 129) “as formas de energia definem a natureza das civilizações – como elas são organizadas, como os frutos do comércio e transações comerciais são distribuídos, como o poder político é exercido e as relações sociais são conduzidas... A democratização da energia terá profundas implicações sobre como orquestramos toda a vida humana no próximo século”. Para lidar com este desafio, um dos 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) aprovados na Assembleia Geral das Nações Unidas em setembro de 2015<sup>9</sup> é a garantia ao acesso de energia sustentável, moderna e confiável a toda população<sup>10</sup>.

Os números falam por si e explicam porque a eficiência energética é tão importante e estratégica para o meio ambiente, economia e sociedade.

Apesar do grande desperdício, as ações tomadas até o momento não foram efetivas para conter o crescimento da demanda por energia. Uma das razões levantadas é que “as políticas públicas têm abordado elementos isolados do quebra-cabeça do desafio da eficiência energética” (Jollands e Ellis, 2009 *apud* IEA, 2009). “A eficiência energética é uma parte integrante de um amplo e complexo socioeconômico sistema de energia” (PEET, 1992 *apud* IEA, 2009), onde uma intrincada rede de diferentes atores estão envolvidos com distintos interesses e agendas (as várias esferas de governos, nacionais, estaduais, locais, indivíduos, indústrias, empresas de tecnologia e serviços, concessionárias de energia e organizações não-governamentais).

De fato, de acordo com a Agência Internacional de Energia em seu relatório World Energy Outlook 2014, a projeção no cenário central é que a demanda de energia irá crescer 37% até 2040 e a fonte de energia não fóssil representará apenas um quarto do mix total, o que coloca o mundo num caminho para elevação da temperatura em 3,6°C, bem acima do limite de 2°C acordado pela comunidade internacional para evitar implicações e impactos gravíssimos ao planeta. Neste cenário projetado em 2040, seria consumido todo o estoque de

---

<sup>8</sup> Economista, futurista e pensador social de reconhecimento internacional, autor de 18 best sellers, consultor da União Européia e de diversos chefes de Estado, promotor da visão da Terceira Revolução Industrial.

<sup>9</sup> Press Release do anúncio disponível em <http://bit.ly/1SLPWIj> Acesso em 18 de outubro de 2015.

<sup>10</sup> Descrição do ODS número 7 sobre energia. Disponível em <http://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/> acesso em 18 de outubro de 2015.

carbono remanescente. Como as emissões não irão cair a zero repentinamente, uma vez que este limite seja alcançado, está claro que ações urgentes são necessárias para recolocar o sistema de energia num rumo seguro (IEA, 2014b). Nesse contexto, não só ações visando descarbonizar o suprimento de energia são necessários, mas essencialmente a implementação de ações com objetivo de tornar o consumo de energia mais eficiente, visto que esta estratégia tem um custo de abatimento negativo. Para exemplificar o potencial, ações de eficiência energética no Brasil, China, União Europeia, México e nos EUA podem reduzir o custo de descarbonização em até US\$ 250 bilhões por ano e reduzir as emissões anuais em 11 bilhões de toneladas (Gt) de CO<sub>2</sub>eq em 2030 - cerca de dois terços das reduções de GEE necessárias nessas regiões para limitar o aquecimento a 2 °C (FRAUNHOFER ISI, 2015).

No Brasil, dados de 2007 indicam que as perdas de energia até o uso final são inferiores a média global, em torno de 44% (LLNL, 2011). Segundo EPE, de 1984 a 2004, o potencial de economia de energia tem inclusive caído, pois, com os avanços da implementação de projetos para aumento de eficiência dos processos, seus rendimentos tem se aproximado de seus paradigmas (EPE, 2014b). Estas economias no entanto, de acordo com estimativas da EPE, não são suficientes para conter a demanda de energia, que é prevista aumentar em 72% no período 2013 – 2030 e em mais de 100%, considerando o período 2013 – 2040 (EPE, 2014c).

Segundo a pretendida contribuição nacionalmente determinada (iNDC, na sigla em inglês)<sup>11</sup> que o governo brasileiro apresentou em setembro de 2015, no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), na área de energia, em específico, a meta brasileira é alcançar 45% de energia renovável na matriz até 2030 (BRASIL, 2015), um aumento de 10% em relação a 2013 (EPE, 2014b) e aumento de 10% de eficiência no setor elétrico (BRASIL, 2015). Em 2040, de acordo com a EPE, a previsão é que o mix de energia fóssil na matriz permanecerá em mais de 50% (EPE, 2014c).

Considerando as previsões da EPE de aumento de demanda de energia citadas anteriormente e como o percentual de renováveis na matriz não é proporcional a este aumento (BRASIL, 2015), a estratégia da eficiência energética

---

<sup>11</sup> O anúncio está disponível no site <http://bit.ly/1TjFruh> Acesso em 19 de outubro de 2015.

(tanto em otimização de processos, como na implantação de inovações tecnológicas que proporcionem mudanças transformacionais nos processos) terá papel central para conter aumento de demanda de energia, evitar aumento de emissão de gases de efeito estufa e contribuir ainda mais para aperfeiçoar as metas climáticas brasileiras de longo prazo<sup>12</sup>.

No próximo item, será avaliado o potencial do setor de iluminação geral em redução de emissões de gases de efeito no mundo e o potencial de contribuição do setor de iluminação pública no Brasil.

## 2.1

### O impacto da iluminação no subsetor de energia elétrica

Os quatro setores que consumiam em 2005 energia elétrica para iluminação, (i) comercial, (ii) residencial, (iii) industrial e (iv) externa (esta última se desdobra em usos para iluminação de ruas e avenidas, estacionamentos, sinalização semafórica, aeroportos, *outdoors*<sup>13</sup>), têm suas participações ilustradas na figura 2 abaixo.

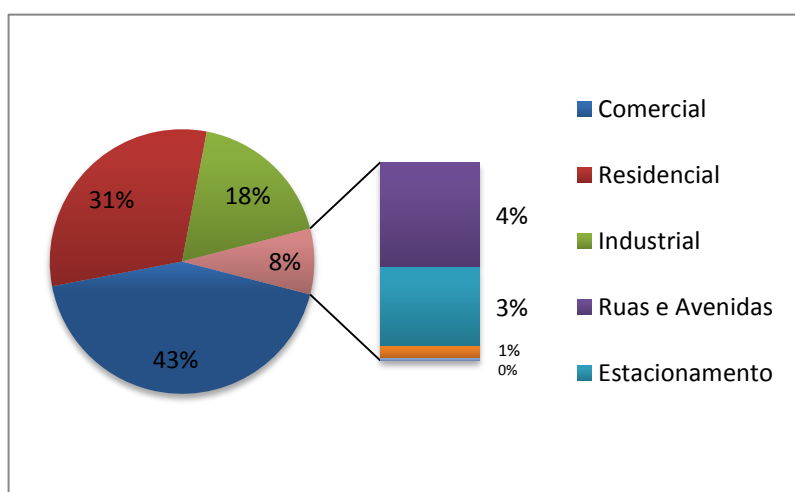


Figura 2 – Contribuição dos Setores de Consumo de Energia Elétrica para Iluminação.

Fonte: Elaborado pela autora, a partir de dados IEA, 2006.

<sup>12</sup> Não há qualquer intuito de analisar ou qualificar as metas brasileiras, que iria muito além do objeto desta pesquisa, demandando avaliações de viabilidade técnico e econômica de implantar metas ainda mais ambiciosas que as listadas no iNDC, além de consideração com as responsabilidades históricas dos países, mas apenas destacar a importância de ações de longo prazo de conservação e eficiência de energia.

<sup>13</sup> Além de iluminação espacial e sinalização, há também um número de importantes aplicações de iluminação em alguns nichos, onde a iluminação não é a principal função dos equipamentos, mas é um fator importante que influencia o consumo de energia. Estes incluem a iluminação de telas de computador, celulares, telefones, televisores e outros aparelhos de comunicações, que não foram analisados aqui.

De acordo com Agência Internacional de Energia (IEA, 2006), em 2005, apenas a iluminação consumiu 2.651 TWh<sup>14</sup> de energia elétrica, respondendo por 19% do consumo global de eletricidade. O custo global deste serviço foi estimado na mesma pesquisa em US\$ 356 bilhões, equivalendo a cerca de 1 % do PIB mundial.

Em 2010, o dado foi atualizado por estudo promovido pela UNEP e GEF (Programa *en.lighten*<sup>15</sup>), que mostra que apesar do consumo de energia elétrica para iluminação ter aumentado para 2.815 TWh, o valor representou pouco mais de 15%<sup>16</sup> do consumo global de eletricidade por ano. As emissões de gases de efeito estufa relacionadas a este consumo equivalem a 1,47 Gt CO<sub>2</sub> (UNEP, 2014), que é um valor bastante expressivo, similar a 22% a mais de todas as emissões de gases de efeito estufa do Brasil em 2012 (MCTI, 2014). Segundo o mesmo estudo do Programa *en.lighten*, a queda na participação global de 19 para 15% poderia ser atribuída, em grande parte, a uma série de abordagens regulatórias proativas principalmente de países da OCDE que estabeleceram parâmetros mínimos de desempenho de eficiência energética em produtos de iluminação, mas também ao aumento do consumo de eletricidade em aparelhos como televisores, ar condicionado, refrigeradores e computadores (UNEP, 2014).

Ainda segundo estudo da UNEP, Programa *en.lighthen* (UNEP, 2014), considerando a tendência de aumento da população mundial e aumento geral de padrão de vida da população, o consumo de energia para iluminação é previsto subir em 27% até 2030 atingindo o valor de 3.575 TWh, caso políticas públicas não sejam eficazes na promoção de eficiência energética. Por outro lado, a transição para uma iluminação mais eficiente em todos os setores que utilizam a iluminação ligada ao grid (setores residencial, comercial e industriais, para aplicações para uso interno e externo) pode economizar mais de US\$ 120 bilhões anualmente na redução de pagamento de contas de energia elétrica pela redução

---

<sup>14</sup> Para ilustrar a magnitude do valor, o consumo equivaleu a quase 7 vezes o consumo de toda energia elétrica no Brasil, naquele mesmo ano de 2005 (EPE, 2006).

<sup>15</sup> A Iniciativa *en.lighten* foi criada em 2009 pela UNEP/ GEF para acelerar a transformação do mercado global de energia, utilizando tecnologias de iluminação eficientes ambientalmente sustentáveis, bem como desenvolver estratégias de eliminar gradualmente as lâmpadas ineficientes para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>.

<sup>16</sup> Atualização de estudo pela Agência Internacional de Energia em 2011, para o relatório de recomendações de 25 políticas públicas para promover eficiência energética (IEA, 2011) indicou que este percentual foi de cerca de 20%. Provavelmente, diversidade em bases de cálculo e premissas geraram esta diferença. Para efeitos deste trabalho, estamos utilizando o dado UNEP, cujo relatório está mais detalhado.

de consumo de 1.209 TWh de eletricidade (UNEP, 2015). Esta transição também permitiria poupar mais de US\$ 233 bilhões de dólares em investimentos evitados equivalentes a 280 grandes usinas de energia movidas a carvão (UNEP, 2015). A magnitude dessas economias globais de energia representa cerca de 37% do consumo de eletricidade por ano para iluminação de todo o mundo e cerca de 160 GW em capacidade de geração evitada de eletricidade. Esta capacidade elétrica seria suficiente para eletrificar aproximadamente mais de um bilhão de residências<sup>17</sup> (UNEP, 2014).

Tabela 1 – Projeção do Consumo de Energia Elétrica para Iluminação.

	2005	2010	2030 sem política pública	2030 com política pública “acelerada”
<b>Consumo energia elétrica para iluminação (TWh)</b>	2.651	2.815	3.575	2.366 <sup>18</sup>
<b>Energia para iluminação/consumo global eletricidade (%)</b>	19	15	N/A	N/A

Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados UNEP, 2014.

Para o Brasil, dados do mesmo estudo indicam que a ampliação da eficiência energética da iluminação, considerando todos os setores anteriores, traria uma oportunidade de economia anual de US\$ 3,5 bilhões, com um retorno sobre o investimento de apenas 3 meses, economizando 27,7 TWh do consumo de eletricidade, além de todos os benefícios ambientais relativos a redução de emissões (UNEP, 2010).

É preciso cautela na consideração deste número pois não é possível, repentinamente, substituir 100% de todo o inventário de lâmpadas ineficientes em todas as residências, comércio, indústria, etc. No entanto, o número é importante pois mostra o impacto econômico e ambiental deste projeto.

Especificamente em Iluminação Pública no Brasil, em 2013, o setor respondeu por 2.9% do consumo total de energia elétrica da rede (EPE, 2014a).

<sup>17</sup> Considerando consumo médio por residência de 1000 kwh/ano (UNEP, 2014).

<sup>18</sup> O cenário, estimado pela Sustainable Energy for All (SE4All), considera uma acentuada transição para tecnologias mais eficientes a nível mundial. A iniciativa SE4ALL foi criada pelo Secretário Ban Ki-Moon em 2011 em parceria com o Presidente Jim Kim do Banco Mundial para promover acesso a energia sustentável a todos até 2030. Vários países tem compromissos assumidos com esta iniciativa, mas não o Brasil.



Apesar de investimentos do governo<sup>19</sup> para promover eficiência energética no país, onde desde o ano 2000 até 2014 cerca de 2,78 milhões de pontos de iluminação pública foram substituídos (ELETROBRÁS, 2015) um aumento do valor absoluto do consumo de energia no setor é observado, conforme gráfico na figura 3 a seguir.

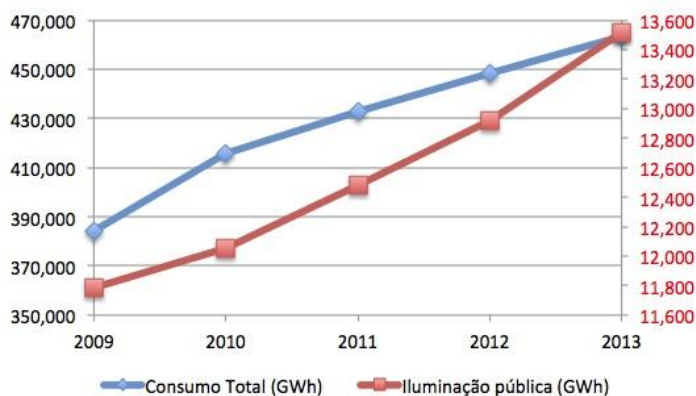


Figura 3 – Consumo de energia elétrica total<sup>20</sup> e para Iluminação Pública no Brasil.  
Fonte: Elaborado pela autora a partir de EPE, 2014a.

A geração de energia elétrica no Brasil inclui (i) a energia produzida pelas usinas que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN), despachada de forma centralizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), (ii) as termelétricas na Região Norte compondo o Sistema Isolado e (iii) Autoprodução, onde estão classificados os produtores de energia para utilização própria. Com relação a avaliação de emissão de gases de efeito estufa relativo ao consumo de energia elétrica para a aplicação em iluminação pública, faz sentido apenas considerar a fração da energia consumida na Rede (pelas centrais de serviço público), que inclui o SIN, onde o consumo de IP representa 2,9% e o Sistema Isolado, onde o consumo de IP representa 4%. A composição dos diversos sistemas e a contribuição em IP são resumidas abaixo na Tabela 2.

<sup>19</sup> Os investimentos do governo brasileiro foram feitos principalmente através do RELUZ, que é um subprograma do PROCEL, programa do governo coordenado pelo Ministério de Minas e Energias e executado pela Eletrobras, destinado a promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício, com foco em promover o desenvolvimento de sistemas eficientes de iluminação pública e sinalização semafórica, bem como a valorização noturna dos espaços públicos urbanos (ELETROBRÁS, 2015).

<sup>20</sup> O valor inclui consumo de energia elétrica pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) e Sistemas Isolados, mas exclui autoprodução não circulante na Rede.

Tabela 2 – Composição Energia Elétrica Gerada no Brasil – Ano Base 2013.

Origem	Geração e Contribuição de Emissões de GEE (%)	Consumo de energia elétrica para IP em relação ao total do sistema (%)
Centrais de serviço público:	85,0	2,9
SIN	74,4	2,9
Sistema Isolado	10,6	4,0
Autoprodutor	15	-

Fonte: Elaborado pela autora a partir de EPE 2014 (tabelas 2.7, 3.20 e 4.1).

Historicamente, a quantidade de emissões de gases de efeito estufa associada a geração de energia elétrica no Brasil foi muito baixa, devido a expressiva participação da geração de energia renovável na matriz (MCT, 2015). Nos últimos 3 anos, no entanto, tem-se observado elevação do fator de emissão da Rede conforme figura 4 a seguir (MCT, 2015 e EPE 2014).

Segundo Coelho et al (2015), os anos de 2012, 2013 e 2014 foram anormalmente mais secos durante verão austral na região sudeste do Brasil, incluindo parte dos estados de Mato Grosso do Sul e Goiás, região esta que concentra a maioria das hidrelétricas do país. De acordo com este mesmo estudo, em decorrência de déficit de precipitação, que ocasionou falta de disponibilidade de água para sistema hidrelétrico, houve necessidade da entrada de usinas térmicas, que queimam combustível fóssil para compensar a redução de produção pelas plantas hidrelétricas, causando, por conseguinte, aumento do fator de emissão. Apesar do fator ser ainda muito inferior à média global (DOE, 2007), a figura 4 ilustra a situação descrita, onde se observa uma elevação do fator de emissão do Sistema Interligado Nacional em quase 3 vezes se 2014 é comparado com a média compreendendo o período 2006 a 2011. O fator da Rede aumenta ainda um pouco mais quando inclui a energia elétrica proveniente do Sistema Isolado, que é quase toda gerada por combustíveis fósseis.

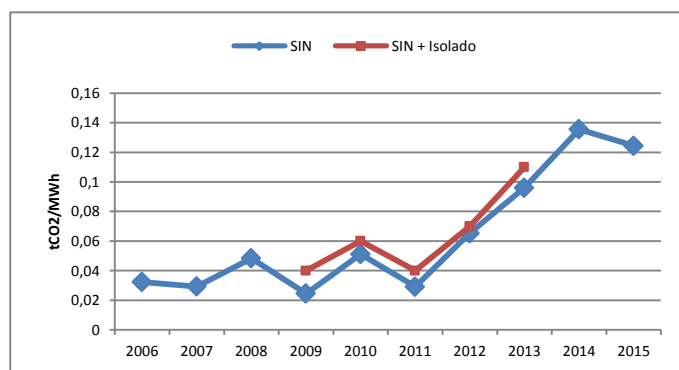


Figura 4 – Emissões de GEE do SIN, Brasil (2006 – 2015) e Sistemas Isolados (2009-2013).

Fonte: MCT, 2015 e EPE, 2014a.

Todo este cenário reforça a importância da redução do consumo de energia através de práticas de eficiência energética na área de iluminação como rota de mitigação de gases de efeito estufa.

Segundo estudo da EPE (Empresa de Planejamento Energético), considerando-se apenas cidades com população superior a 500 mil habitantes, cerca de 4,5 milhões de pontos de iluminação pública seriam elegíveis à substituição de lâmpadas a vapor de sódio para iluminação a LED, possibilitando reduzir o consumo em torno de 3.500 GWh/ano (EPE, 2014c), reduzir as emissões em 435 tCO<sub>2</sub>/ano<sup>21</sup> e eliminar 85 quilos<sup>22</sup> de mercúrio. Cabe ressaltar que segundo IBGE, dos habitantes domiciliados em habitação permanente, 95% são servidos de iluminação pública (IBGE, 2010) e como a população brasileira é eminentemente urbana, o potencial de economia de eficiência energética é ainda maior que este levantado pela EPE, pois este potencial refere-se apenas a 31 municípios que tem população superior a 500 mil habitantes. Haveria ainda outros 5.530 municípios que podem ser elegíveis a projetos onde habitam 92 milhões de brasileiros. No capítulo 5, a partir do inventário detalhado de lâmpadas de IP no Brasil disponibilizado pela Eletrobrás, serão calculados os potenciais de economia de energia elétrica, caso a tecnologia LED seja introduzida no sistema de IP no país.

<sup>21</sup> Para ilustrar o impacto, caso a eficiência fosse integralmente realizada no ano, usando a média do fator de emissão do SIN – Sistema Interligado Nacional de 2015 de 0,1244 tCO<sub>2</sub>/ MWh, disponibilizado pelo MCT no site <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora> acesso em 25 de junho de 2015. Vale ressaltar que o fator da rede muda anualmente, como indicado na figura 4, então o valor indicado não tem muita representatividade, mas apenas ilustrativo.

<sup>22</sup> Considerando teor médio de mercúrio na lâmpada de 19 mg (SILVA, 2010).

Dado o avanço das tecnologias de iluminação, o aumento da eficiência é uma das maneiras mais eficazes para redução de consumo de eletricidade e emissão de gases de efeito estufa e redução de custo<sup>23</sup>. Ademais, outros benefícios são alcançados para usuários finais e governos. Utilizando lâmpadas mais eficientes, consumidores pagam menores contas de luz, capacidade adicional de fornecimento de energia elétrica é criada para apoiar o desenvolvimento econômico a menores custos e governos se beneficiam aumentando segurança energética, reduzindo exposição no mercado externo (UNEP, 2012).

No entanto, apesar de todo ganho, não só no Brasil, mas em nível mundial, ainda se observam barreiras que impedem a aplicação da política pública de forma mais ampla e eficaz, conforme quadro a seguir.

Quadro 1 – Descrição das Principais Barreiras para Aumento de Eficiência da Iluminação.

Tipos de Barreiras	Comentário
<b>Financeira</b>	Custo inicial elevado dos produtos para iluminação mais eficientes, comparados com os ineficientes
<b>Mercado</b>	Falta de disponibilidade de produtos eficientes no mercado local a baixo custo e/ ou altos custos de importação e promoção inadequada de produtos não eficientes
<b>Informação</b>	Comunicação ineficiente e falta de sensibilização entre os profissionais do setor e o público e potenciais consumidores
<b>Institucional regulatório</b>	Falta de recursos ou de interesse de governos; aplicação insuficiente de políticas públicas; priorização do aumento de oferta de energia ao invés de promover redução de consumo; corrupção
<b>Técnicas</b>	Falta de recursos e infraestrutura, problemas na fonte de alimentação elétrica, falta de laboratório para análise, falta de metodologias para aquisição de equipamentos mais eficientes
<b>Percepção de riscos ambientais e de saúde</b>	Preocupação com qualidade da luz, possível exposição a materiais perigosos que possam estar contidos na eletrônica ou outros componentes

Fonte: UNEP, 2012, Sessão 1, p 37.

## 2.2

### Relevância das Cidades: Oportunidades no Setor de Iluminação Externa

Num mundo cada vez mais urbanizado, onde desde 2010 metade da população mundial é urbana e cuja previsão é que esta participação alcance 70% até 2050, o planejamento estratégico urbano visando a transformação sustentável

<sup>23</sup> Em especial no Brasil, pois a tarifa de energia para IP aumentou 33% nos últimos 2 anos. Fonte: ANEEL, 2015a, disponível em <http://bit.ly/1SZ4gZB>. Acesso em 5 de julho de 2015.

das cidades é essencial no enfrentamento dos atuais desafios econômicos, sociais e ambientais (UN HABITAT, 2012). Considerando o Brasil, a situação é ainda mais premente, pois 84% da população já é urbana desde 2010 (IBGE, 2010).

Além de abrigar a maior parte da população do planeta, as cidades respondem também por 70% das emissões globais relacionadas a energia e sobretudo as localizadas na costa e as margens de rios, são especialmente vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas, daí desempenharem um papel crucial nos esforços de mitigação e adaptação. Cidades são também centros de riqueza e inovação, então possuem os recursos e ferramentas necessárias para combater os desafios da mudança climática (ROSENZWEIG *et al*, 2010).

No entanto, do ponto de vista de governança para formulação e implementação de ações eficazes para o clima, cidades ainda enfrentam vários desafios. Muitos governos municipais são limitados em várias frentes, tendo poder restrito para assumir decisões em áreas de planejamento de regiões metropolitanas, estradas e sistemas de transporte, dentre outros (McCARNEY, P, *et al*, 2011). Políticas públicas nacionais que privilegiam o uso de combustíveis fósseis, altas carga tarifárias que cidades não tem qualquer influência são outros exemplos de limitação de poder e atuação.

Em relação ao caso específico do setor de iluminação externa (iluminação pública e sinalização semaforica), um número significativo de prefeitos de megacidades do mundo tem autoridade direta sobre estas fontes de emissões, colocando-as na linha de frente no enfrentamento contra essas ineficiências e fazendo desta ação uma das primeiras a serem priorizadas pela administração pública (C40 - ARUP, 2014).

Na rede de megacidades C40 Cities Climate Leadership Group<sup>24</sup>, que tem expressiva representatividade mundial, executando algumas cidades na Ásia e na Oceania, em todas as demais regiões do planeta, as cidades tem grande poder de atuação sobre estes sistemas de iluminação. Isto se reflete no elevado número de cidades que reportam ações na área de aumento de eficiência na iluminação externa. Até 2013, 38 cidades indicavam ter implantado 109 ações no aumento de

---

<sup>24</sup> C40, fundada em 2005, congrega as maiores megacidades do mundo, com representatividade em todos os continentes, com a missão de promover redução de emissões de gases de efeito estufa e redução de risco climático. Considerando a região metropolitana onde está inserida, responde por mais de 600 milhões de habitantes e mais de 25% do PIB mundial. Tem como Disponível em <http://www.c40cities.org/> Acesso em 1 de novembro de 2015.

eficiência energética, desde substituição de lâmpadas com LED (diodos emissores de luz), além do uso de temporizadores, sensores e energia renovável para alimentar os postes (C40 e ARUP, 2014).

Nos Estados Unidos, um consórcio municipal, *Municipal Solid-State Street Lighting Consortium*, organizado pelo Departamento de Energia – representa um esforço coordenado para apoiar implantação de iluminação em estado sólido, envolvendo mais de 180<sup>25</sup> municípios interessados, provedores de energia elétrica, entidades governamentais, além de outros parceiros. A atuação em rede, de forma coordenada, tem como objetivo minimizar duplicação de esforços e propagação associada de riscos, devido aos constantes avanços e inovações tecnológicas nesta indústria.

A iluminação externa é claramente uma prioridade para as cidades, refletindo tanto os poderes que têm sobre as avenidas, ruas e semáforos, bem como o potencial de economia de energia da iluminação pública, que é significativa na conta de luz municipal, variando segundo estimativa de autores da ordem de 30 a 50% (EPEC, 2013) a 40% até 70% (SMITH et al, 2007).

No Capítulo 4, serão detalhadas as experiências nas cidades no Brasil e no mundo.

### 2.2.1

#### **Ampliação do Olhar sobre a Iluminação Pública**

O mercado geral de iluminação e seus componentes de sistemas de controle é predominantemente impulsionado por novas instalações, que por sua vez está associado ao potencial de atividade construtiva, daí ser constatado que há uma grande correlação deste mercado com o PIB (MCKINSEY, 2012). Um aspecto interessante de observar em relação a iluminação pública é que é um indicador visual da crescente urbanização (ZHANG e SETO, 2011) e também da desigualdade social (IEA, 2006) que há no planeta. A imagem de satélite da NASA ilustra a questão conforme figura 5 a seguir, onde a concentração de cidades de maior PIB tem maior presença de iluminação pública (pontos de luz na imagem). Observa-se que no leste dos EUA, há maior brilho decorrente da

---

<sup>25</sup> DOE. Disponível em <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/consortium-participant-list.pdf> Acesso em 1 de abril de 2015.

iluminação, contrastando com Índia e China, que são regiões com maior densidade populacional.



Figura 5 – Imagem de Satélite da Terra.

Fonte: NASA<sup>26</sup>.

Iluminação segura e confiável, sem dúvida, aumenta o bem-estar das pessoas que atualmente sofrem com a falta de iluminação necessária para a educação, trabalho, vida social e inclusive para proporcionar maior sensação de maior segurança (PAINTER, 1996; LYYTIMÄKI, 2012). Este último benefício é inclusive relacionado a provável origem da iluminação pública na Inglaterra em 1415, por solicitação de comerciantes ao combate ao crime (VASCONCELLOS, 2013). No entanto, existem potenciais riscos ecológicos, de saúde (inclusive câncer) e psicológicos relacionadas com a iluminação exterior noturna que tem sido negligenciados (CHEPESIUK, 2009; FALCHI et al, 2011; LYYTIMÄKI, 2012; MORGAN-TAYLOR, 2015).

É o que se chama de poluição luminosa, em inglês *“lighting pollution”*, comumente referida à luz artificial excessiva ou intrusiva geralmente causada por falhas num projeto de iluminação que é refletida na poeira, vapor de água e outras partículas dispersas na atmosfera (ABNT, 2012). Inclui aspectos como reflexos, clarão da luz, brilho no céu. Luz excessiva e mal direcionada de postes, casas, outdoors, fachada de edificações e cidades como um todo, não só interferem com a biodiversidade (insetos, animais, etc), a observação das estrelas, hábitos de sono, e astronomia profissional, mas também desperdiça uma grande quantidade de energia. Estima-se que 30% da energia elétrica utilizada no sistema de IP nos Estados Unidos é desperdiçada como poluição luminosa, impactando em consumo

<sup>26</sup> Disponível em <http://1.usa.gov/yd7mQe> Acesso em 1 abril de 2014.

desnecessário de 72,9 milhões MWh de eletricidade a um custo de US\$ 6,9 bilhões por ano (GALLAWAY et al, 2010). Na Europa, o desperdício é estimado em quase US\$ 4 bilhões (MORGAN-TAYLOR, 2015).

Ou seja, parte da luz artificial realmente proporciona percepção de segurança, melhora de visibilidade, mas uma grande parte do sistema de iluminação não traz nenhum benefício, se mal desenhado, que é simplesmente poluição. Por exemplo, muitas cidades produzem um brilho no céu noturno, que pode ser visto por enorme distância e Gallaway et al. (2010) complementa que "66% da população dos Estados Unidos e 50% europeia não consegue mais observar a Via Láctea durante a noite. Além disso, aproximadamente 40% do Estados Unidos e quase 20% da população da União Europeia perdeu a capacidade de visualizar o céu noturno com um olhar que se adapte a escuridão do céu noturno, como se tivessem perdido a capacidade de experimentar a noite" (GALLAWAY et al, 2010). Lyytimäki (2012) acrescenta que isso pode gerar uma amnésia geracional, porque a geração mais jovem pode não experimentar e não estar ciente das condições ambientais do passado. Organizações não governamentais como a *Dark-Sky Association*, baseada nos Estados Unidos, fazem campanhas de conscientização deste problema que, em última instância, provoca a total perda de uma conexão maior do indivíduo com o universo.

A figura 6 a seguir ilustra visualmente o impacto da poluição luminosa, de uma paisagem próxima a cidade de Toronto, Canadá. Na figura 6a, a fotografia foi tirada durante uma falta geral de luz que ocorreu dia 14 de agosto de 2003, que contrasta com a figura 6b que ilustra uma noite típica com todo sistema de iluminação externa funcionando (figura 6b) (CHEPESIUK, 2009).





Fig 6.a

Fig 6.b

Figura 6 – Impacto Visual da Poluição Luminosa.  
Fonte: CHEPESIUK, 2009.

Hiscocks e Gudmundsson (2010) indicam que das diversas fontes possíveis de poluição luminosa, iluminação pública é um dos principais contribuintes, medida através de brilho no céu. Num experimento realizado em 2006 na cidade de Reykjavik, Islândia, durante 30 minutos todo o sistema de IP foi desligado e mantidos acesos os sistemas de iluminação de praças, campos de esporte e edificações (públicas e privadas). Após o sistema de IP ser religado, mesmo nesta pequena cidade de menos de 150 mil habitantes, foi constatado um aumento de 30% na percepção de poluição visual através de brilho no céu (HISCOCKS e GUDMUNDSSON 2010). Medições durante três anos em Hong Kong, de 2010 a 2013, constataram que o brilho do céu na área urbana teve intensidade 15% superior do que a área rural. Considerando outra avaliação realizada em Viena, apesar da comparação direta entre cidades não ser possível, em função de diferença de topografia, densidade populacional, é interessante ressaltar que apenas 0,07% dos valores da medição em Hong Kong foram inferiores ao valor típico encontrado em Viena, evidenciando que o potencial de poluição luminosa e consequente desperdício de energia em Hong Kong deve ser maior (PUN et al, 2014).

“Há uma variedade de soluções simples envolvendo o uso de luminárias "cut-off", que direciona o feixe luminoso apenas para baixo (em oposição aos laterais e para cima) e o posicionamento adequado de luminárias, no entanto, estas medidas ainda são raramente empregadas, principalmente devido a falta de consciência do problema.”, cita o relatório da Agência Internacional de Energia (IEA, 2006).

Na figura 7 a seguir, há alguns exemplos ilustrativos de luminárias que intensificam o problema de poluição luminosa (fig 7a) e outras que minimizam significativamente o problema (figura 7d), por garantir baixa emissão de luz acima do eixo horizontal. A Figura 8 ilustra a poluição luminosa, através do reflexo no brilho no céu na cidade de Las Vegas, calculado por simulação computacional com uso destas respectivas luminárias e também reduzindo a intensidade luminosa da fonte.

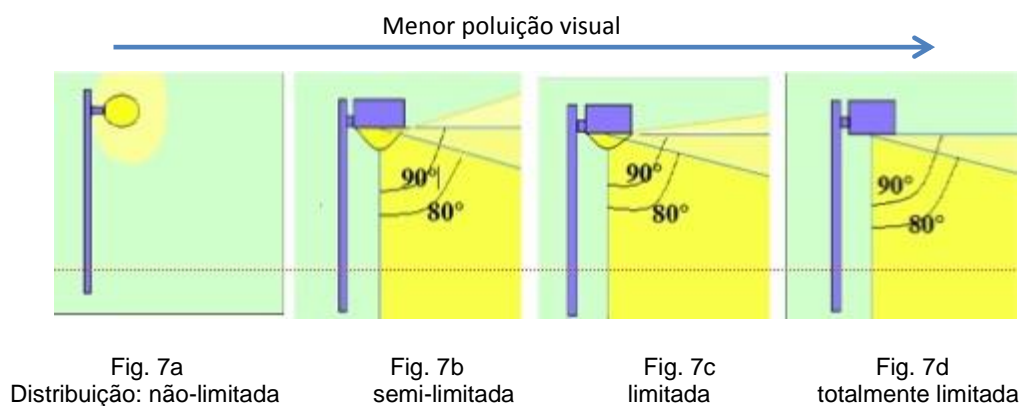


Figura 7 – Luminárias e efeito poluição luminosa.

Fonte: GRIENEISEN, 2006; ABNT 2012.

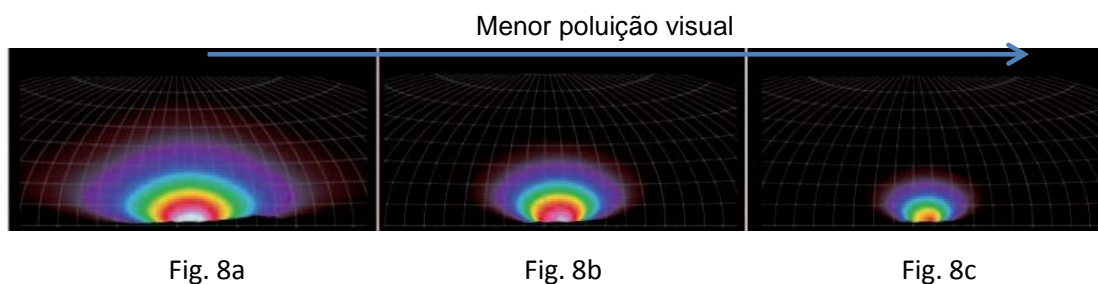


Figura 8 – Efeitos de luminária e intensidade luminosa em brilho no céu.

Fonte: DURISCOE et al, 2014.

A figura 8a ilustra situação onde luminárias não blindadas, que não têm controle de distribuição de intensidade luminosa no espaço acima dos cones de 80° e 90° (por exemplo as descritas na figura 7a, 7b e 7c) são utilizadas. A Figura 8b ilustra a redução de poluição quando todas as luminárias usadas são do tipo de

distribuição totalmente limitada (*full cut-off*) como na fig 7d. E finalmente a figura 8c ilustra como seria a redução de poluição se, além da troca de todas as luminárias para o tipo 7d, a intensidade luminosa fosse reduzida de cerca de 7600 lumens per capita para 2075 lumens per capita, que é valor adotado em outra cidade nos Estados Unidos (DURISCOE et al, 2014).

Há algumas iniciativas que desenvolveram normatização orientada a minimizar poluição luminosa por uso de luminárias mais eficientes, como a diretiva criada pela IDA e IES nos Estados Unidos (IDA – IES, 2011). Já a Slovenia foi um dos primeiros países que criaram legislação para limitar o uso de luminárias ao modelo totalmente blindadas. A lei está em vigor desde 2007. Na França, há também legislação sobre o tema requerendo inclusive que fachadas e vitrines de lojas sejam desligadas após determinado horário, com algumas exceções, como situações de interesse turístico (MORGAN-TAYLOR, 2015).

No Brasil, a norma brasileira que estabelece os procedimentos e requisitos para projetos de iluminação pública, NBR 5101-2012, não cria obrigatoriedade, mas apenas recomenda o uso de luminárias que possuam baixa emissão de luz acima do eixo horizontal, possuam alta eficiência luminosa e permitam baixos ângulos de instalação. Quanto a projetores, a norma cita que sendo necessário seu uso, recomenda o uso de aletas internas e externas que limitem a propagação de luz para fora da área a ser iluminada (ABNT, 2012).

No entanto, tem-se observado que somente a ação sobre as luminárias não é suficiente. Também a intensidade luminosa pode ter significativo efeito, como ilustrado na figura 8 anterior (conforme comparação das figuras 8b e 8c). Além disto, a qualidade do comprimento de onda da fonte emissora de luz, como as de comprimentos de onda curtos na faixa do azul, intensifica qualitativamente e quantitativamente o problema de poluição luminosa (LUGINBUHL et al, 2013). Ademais, as próprias características do ambiente como aerossóis, reflectância do solo, topografia, obstáculos (KOCIFAI E AUBÉ, 2014) tem influência sobre a poluição, o que torna a solução do problema mais complexa.

Um processo de educação e conscientização para que os usuários de iluminação artificial, o poder público, legisladores, fabricantes e demais partes interessadas pode ser importante para que os benefícios da regulação sejam melhor percebidos, de forma a otimizar projeto de iluminação, minimizando poluição através de um conjunto de medidas, além da luminária: (i) emprego de

quantidade apropriada de luz de acordo com sua função, (ii) tipo apropriado de luz, (iv) emprego da iluminação apenas em local necessário e (iv) apenas durante o tempo necessário (MORGAN-TAYLOR, 2015).

A eficiência da iluminação pública não é apenas devido a tecnologia da lâmpada em si. É também dependente do tipo de luminária, seus componentes, do desenho do sistema e de avaliação de todo o ciclo de vida do projeto incluindo aquisição dos materiais, equipamentos, custo de instalação, manutenção e custo de operação. É fundamental a gestão integrada que considere todos estes parâmetros (VASCONCELLOS, 2013).

### 3

## LUZ, REVISÃO DE TECNOLOGIAS E MERCADO DE ILUMINAÇÃO

Luz não é definida de uma forma única. Por um lado, luz é a energia radiante que um observador percebe através da sensação visual. Do ponto de vista de um fenômeno físico, a luz pode ser definida como (i) uma coleção de raios de luz, que diferem entre si por sua frequência e seu comprimento de onda, (ii) uma onda eletromagnética, (iii) uma corrente de fótons, (iv) um fluido de potência (SCHREUDER, 2008).

Com relação à aplicação para iluminação, é especialmente importante o grupo de radiações onde o limite inferior se situa entre 380 e 400nm e o limite superior entre 760 e 830 nm, que é o espectro visível, que estimula a retina do olho humano, conforme figura a seguir (ABNT, 1991)<sup>27</sup>. Vale ressaltar que outras faixas de comprimento de onda, apesar de não influir na geração de imagem, tem efeitos biológicos e impactam saúde e bem-estar (SCHREUDER, 2008).

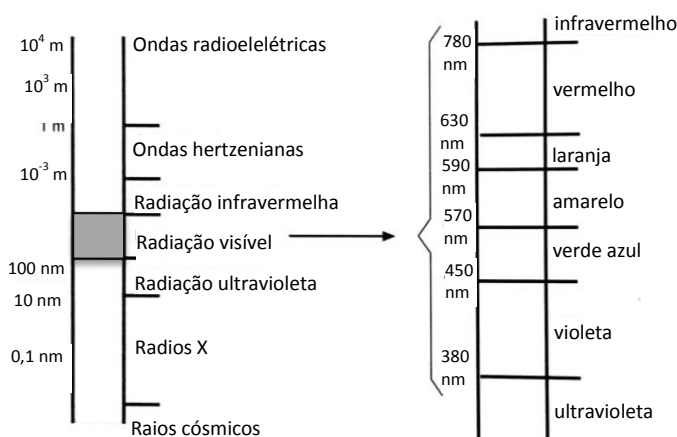


Figura 9 – Espectro eletromagnético e a radiação visível.  
Fonte: MOREIRA, 2008.

Como a iluminação artificial é essencialmente desenhada para atender necessidades do ser humano para que possa melhor desempenhar diferentes tarefas, e como seu sistema visual é o detector que transforma potência radiante

<sup>27</sup> Não existem limites precisos para a faixa spectral da radiação visível, uma vez que os limites dependem do fluxo energético que atinge a retina e da sensibilidade do observador (ABNT, 1991).

em sensação luminosa, faz-se necessário compreender como funciona o sistema visual humano.

### *Funcionamento do sistema visual humano*

O sistema visual humano consiste de cinco elementos principais:

- Os elementos ópticos do olho, com a córnea, lente (cristalino) e a íris (e sua abertura, pupila);
- A retina e os foto-receptores;
- Os neurônios nos olhos;
- Os nervos do trato visual;
- O cérebro, notadamente o córtex visual.

Os elementos ópticos dos olhos trabalham em conjunto para formar uma imagem ótica do mundo exterior na retina (figura 10). A retina converte então a luz entrante em pulsos elétricos, que se propagam ao longo do sistema nervoso ótico, para então finalmente atingir o córtex visual.

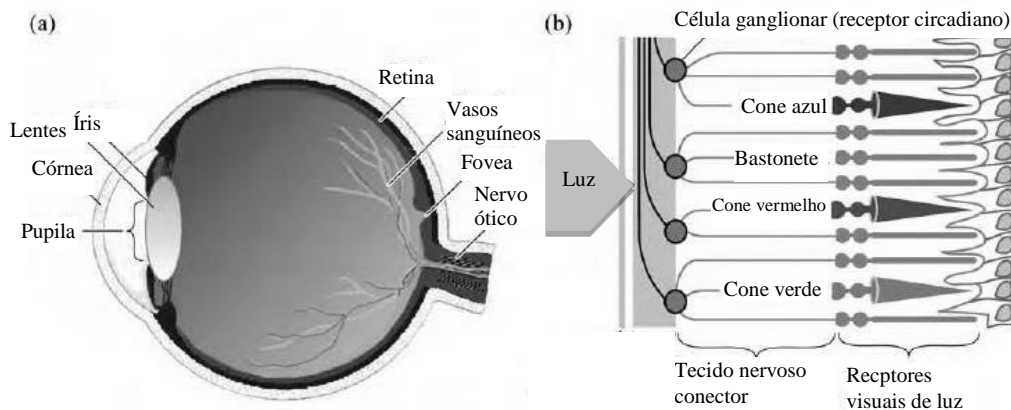


Fig.10a. Corte transversal do olho humano

Fig. 10b. Desenho esquemático da retina incluindo representação dos foto-receptores, cones e bastonetes e células ganglionares

Figura 10 – Sistema Visual Humano.

Fonte: SCHUBERT, 2006 pág. 275.

O sistema visual no entanto não é igualmente sensível a luz em todos estes comprimentos de onda. Ademais, a sensibilidade depende do quanto os foto-receptores estão ativos ao mesmo tempo. O entendimento específico do

funcionamento dos foto-receptores é por isso também fundamental para entendimento e dimensionamento de um projeto de iluminação (SCHREUDER, 2008).

A retina da maioria dos animais vertebrados contém dois tipos distintos de foto-receptores: cones e bastonetes.

Além de células foto-receptoras (cones e bastonetes), que permitem a recepção e o primeiro processamento de informações sobre o meio ambiente trazida pela luz, há um terceiro tipo de células fotorreceptoras, descoberto em 2002, referido como "o receptor sensorial de ciclo circadiano" ou sensores de um relógio biológico central (HABEL e ŽAK, 2012). Conforme destaca HABEL e ŽAK (2012):

*“Este relógio biológico regula uma série de processos biológicos no corpo humano com base na informação sobre as condições de luz. O principal sincronizador do ciclo circadiano básico é a alternância periódica entre dia e noite. Em termos simples, com níveis elevados de iluminância que ocorrem geralmente ao ar livre ao longo do dia, a secreção da melatonina é bloqueada, o que conduz então a um aumento da atividade do organismo. Em contraste, quando a iluminância cai abaixo de um certo nível, a produção de melatonina aumenta. Como um resultado disso, a atividade do organismo é reduzida. O que é importante é que o relógio biológico central também controla relógios periféricos de órgãos individuais, especialmente os pulmões, rins, coração e pâncreas. Portanto, mudanças na atividade do organismo são acompanhadas por mudanças na temperatura, pressão arterial, frequência cardíaca, etc. A investigação nesta área é importante, principalmente a partir da perspectiva da saúde. Supõe-se que a perturbação significativa e a longo prazo do ritmo natural de uma alternância regular das condições de luz, e, portanto, uma alternância regular entre o estado de repouso e atividade, possam causar diversos problemas de saúde.”*

Será detalhado a seguir as diferenças entre os cones e bastonetes. Apesar da anatomia, em geral, mostrar algumas similaridades, sua operação é bastante distinta, conforme tabela a seguir:

Tabela 3 – Diferenças entre foto-receptores e distintas visões.

Parâmetro	Bastonetes	Cones
Localização na retina (maiores concentrações)	Região periférica da retina	Região central da retina (fóvea)
Sensitividade a luz	Alta	Baixa
Nível de luminosidade	Adaptados para baixo nível de luminosidade	Adaptados para alto nível de luminosidade
Capacidade de distinção de cores	Não. Percepção de claros e escuros apenas	Sim. Capacidade de diferenciar com clareza as cores
Tipo de visão	Visão escotópica	Visão fotópica
Níveis de luminância	Abaixo de $0,01 \text{ cd/m}^2$	Acima de $3 \text{ cd/m}^2$

Fonte: Elaborado pela autora a partir de SCHREUDER (2008).

A resposta da retina média humana considerando ambiente com luz de dia (visão fotópica) e baixo nível de luminosidade (visão escotópica) é apresentada na curva da figura 11 abaixo.

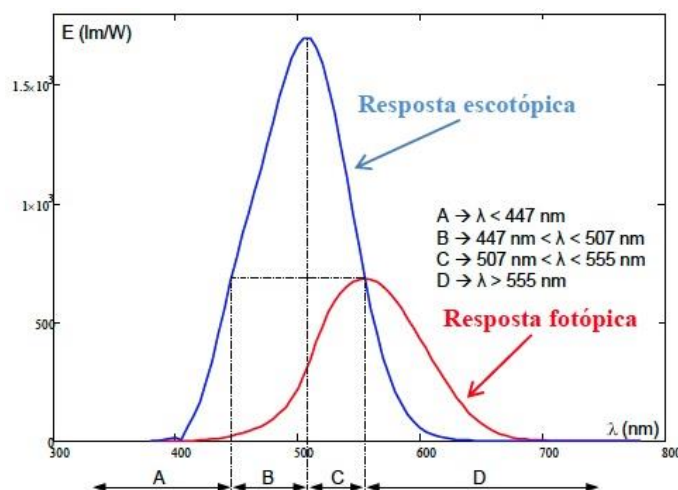


Figura 11 – Curva de Sensibilidade das condições escotópica e fotópica.  
Fonte: HARROLD e MENNIE, 2003 (IESNA/ CIE), apud RODRIGUES, 2012 pág. 66.

Ou seja, para uma situação de alta luminosidade, a resposta do olho humano com a maior sensibilidade é com o comprimento de onda de 555 nm. Neste caso, a máxima eficácia luminosa é de 683 lm/W. Já em situação de luminosidade muito baixa, a melhor resposta percebida é com comprimento de onda de 507 nm, o que equivale a uma eficácia de 1699 lm/W. Isto não significa que lâmpadas serão mais eficientes em visão escotópica, mas apenas que o lumen escotópico tem um valor distinto do lumen para visão fotópica (SCHREUDER, 2008)<sup>28</sup>.

<sup>28</sup> Para a curva fotópica, sua integral dá o equivalente fotométrico de radiação, cujo valor numérico é 1/683. Isto indica que não é teoricamente possível a construção de qualquer fonte de luz que produza mais de 683 lúmens para cada watt; em outras palavras, o valor máximo da eficácia



Quando o nível de iluminamento está compreendido entre 0,1 e 3 cd/m<sup>2</sup>, a resposta a visão humana é chamada de visão mesópica. Este conceito é muito importante pois a condição de visão mesópica está diretamente relacionada às aplicações de iluminação externa, onde a iluminação pública (iluminação de ruas e avenidas, sinalização noturna) está inserida.

Apesar do reconhecimento da comunidade científica internacional que a eficácia luminosa das fontes de luz (relação lm/W) deve considerar o nível de iluminamento, há ainda inúmeros esforços em curso buscando consenso científico global de como tratar o assunto na prática (LUO, 2014; KOSTIC et al 2013).

A Comissão Internacional de Iluminação, CIE (do francês *Commission Internationale de l'Eclairage*) é a principal organização não-governamental, independente, dedicada a ciência da luz e iluminação, cor e visão, fotobiologia e tecnologia de imagem. Desde sua fundação, em 1913, foi aceita internacionalmente como autoridade máxima no tema e como tal, é reconhecida pela ISO (Organização Internacional de Normatização) como uma organização internacional de caráter normativo. O Brasil é membro participante da CIE e o INMETRO é coordenador do comitê nacional.<sup>29</sup>

Após mais de 70 anos de pesquisa, a CIE publicou em 2010 curvas mesópicas, que – segundo a própria organização – irão favorecer as luzes “brancas” com alta relação “S/P” (Escotópica/ Fotópica do inglês *Scotopic/Fotopic*) que proporcionarão melhor reprodução de cores, favorecendo tecnologia como a LED. No entanto, apesar da publicação destas curvas, discussões técnicas ainda permanecem em aberto em como colocar a norma em uso prático e para isso um grupo de trabalho encontra-se formado<sup>30</sup>. A utilização de modelos mesópicos é complexo pois, para cada nível de luminância deveriam ser definidas diferentes grandezas fotométricas em unidades adaptadas. Adicionalmente, os equipamentos medidores de grandezas fotométricas são normalmente calibrados de acordo com

---

luminosa de qualquer fonte de luz na condição fotópica é 683 lm / W. Para a condição escotópica, o valor máximo é 1700 lm/W.

<sup>29</sup> CIE Brasil. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/ciebrasil/origem.asp>. Acesso em 8 de abril de 2015.

<sup>30</sup> A Comissão formada JTC1, “**Implementação da CIE 191:2010 Fotometria Mesópica em Iluminação Externa**”. Por tratar de um assunto complexo, transversal a diversos conhecimentos específicos, envolve 4 das 8 Divisões da CIE: “Visão e Cor”, “Medições Físicas da Luz e Radiações”, “Iluminação e Sinalização para Transporte”, “Iluminação Externa e Outras Aplicações”. Fonte disponível em: <http://www.cie.co.at/index.php/Technical+Committees> Acesso em 08 de abril de 2015.

a resposta fotópica do olho humano (RODRIGUES, 2012). O objetivo então deste grupo de trabalho é o desenvolvimento de diretrizes de design para o dimensionamento mesópico de iluminação, ou seja, orientações de como usar o sistema mesópico por exemplo, em estrada, calçadas para pedestres e iluminação da área urbana. Há certos pontos que requerem consideração no âmbito das várias organizações de especificações, autoridades de iluminação de estrada, designers e da comunidade internacional como um todo voltada a iluminação. Por exemplo, talvez diferentes critérios de especificação sejam necessários em situações onde a qualidade da informação visual no eixo central<sup>31</sup> de visão e na visão periférica sejam distintas, requerendo a criação de ponderação destas duas funções objetivo (HALONEN e PUOLAKKA, 2010; HALONEN e PUOLAKKA, 2012; LUO, 2014).

Sem consideração da visão mesópica, a especificação e escolha de um produto para iluminação pública poderá incorrer em erros e não estar otimizada para melhor atender as características do sistema visual humano e, conseqüentemente, poderá não garantir o objetivo do projeto de iluminação em questão (HABEL e ŽAK, 2012).

Para exemplificar, comparando uma lâmpada LED de um determinado fabricante com a lâmpada de sódio de alta pressão (que até então vem sendo a lâmpada mais usual em IP, com melhor eficiência que as de vapor de mercúrio), verifica-se que a lâmpada LED analisada tem distribuição espectral mais longa, entre 425 e 700 nm, enquanto a de vapor de sódio de alta pressão se situa entre 520 e 625nm, conforme Figura 12 a seguir (Osler, 2009 apud KIVIMÄKI, 2013 pág. 17).

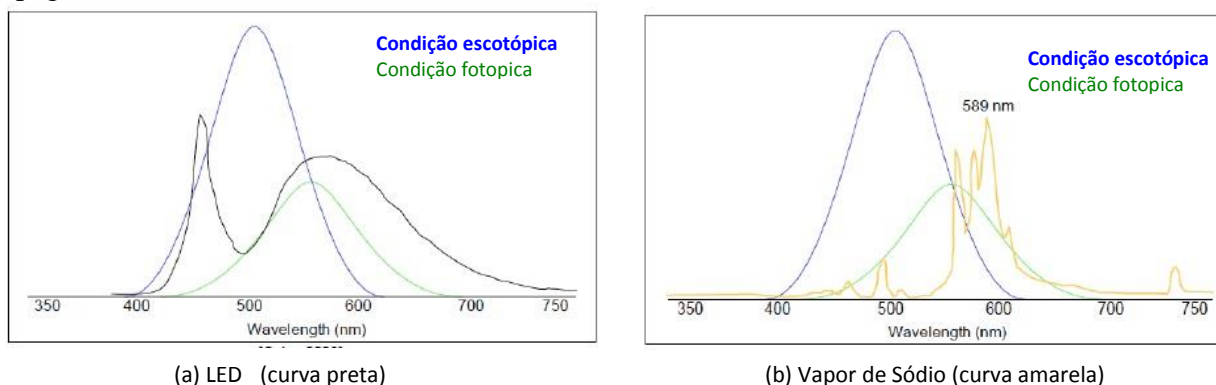


Figura 12 – Curvas de Distribuição Espectral x Sensibilidade em Condições Fotópica e Escotópica.

Fonte: OSLER, 2009 apud KIVIMÄKI, 2013 pág. 17.

<sup>31</sup> No eixo, do inglês “*on-axis*”.

A figura 12 mostra a distribuição espectral (relação lumen por watt para cada comprimento de onda) de um LED (curva preta) e de uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão (curva amarela) e as plota sobre a curva de sensibilidade em condição escotópica (curva azul) e fotópica (curva verde).

O que esta figura sugere é que maior quantidade da luz emitida pelo LED é detectada e percebida pela visão humana do que a da fonte de vapor de sódio. Além disso, percebe-se que ainda maior quantidade de luz é emitida na faixa da condição escotópica, o que se traduz numa melhor condição de percepção da iluminação em ambiente de baixa luminosidade. Numa aplicação prática, isto se traduz em potenciais benefícios aos espaços urbano, transformando-o numa área mais atraente a população, além de potencializar maior percepção de segurança a pedestres e a motoristas (KIVIMÄKI, 2013).

De fato, inúmeros estudos demonstram quantitativamente essa distinção (KOSTIC et al 2013; NOGUEIRA et al, 2014; RODRIGUES, 2012) . A tabela a seguir indica compilação feita por RODRIGUES, 2012, onde se verifica que as lâmpadas LED tem menor eficiência que a de vapor de sódio, caso se considere a condição fotópica, mas apresentam maior eficiência na condição escotópica.

Tabela 4 – Eficiência de lâmpadas em condições fotópicas e escotópicas.

Fonte de Luz	Condição Fotópica (lm/W)	Condição Escotópica (lm/W)
Incandescente	14,7	20,3
Fluorescente (3500K)	84,9	115,9
Sódio em Alta Pressão	126,9	80,5
Sódio em Baixa Pressão	180,0	40,8
Mercúrio em Alta Pressão	52,3	66,8
Multivapores metálicos	107,0	181,0
LED1 (5915K)	46,2	94,5
LED2 (6217K)	85,9	167,8

Fonte: RODRIGUES, 2012.

No relatório de avaliação do uso de LED no município de Anchorage, no Alasca, nos EUA, os autores não chegam a citar a importância da aplicação da condição mesópica, mas indiretamente reportam este efeito quando ilustram os resultados de avaliação comparando a iluminância versus o parâmetro “distância média percebida” (Mutmansky, 2009).

A figura 13 a seguir ilustra o estudo de caso neste município, onde a lâmpada de vapor de sódio foi comparada com lâmpadas LED de quatro fabricantes distintos, identificadas na figura como LED 1, LED 2, LED 3 e LED

4. A avaliação da iluminância média (fig.13 a) foi medida em três posições, em condição de alta e baixa dimerização e em todas estas, a lâmpada de vapor de sódio apresentou maior valor, o que poderia indicar melhor desempenho. Adicionalmente, foram realizadas medições de percepção de distância média que as respectivas lâmpadas proporcionavam (fig. 13 b). Os resultados indicaram que, apesar da lâmpada de sódio ter maior iluminância, a lâmpada não proporciona boa visualização na sua aplicação para iluminação pública se comparada às lâmpadas LED testadas, visto que os valores da “distância média percebida” de todas as lâmpadas LED são superiores conforme mostrado na figura 13b.

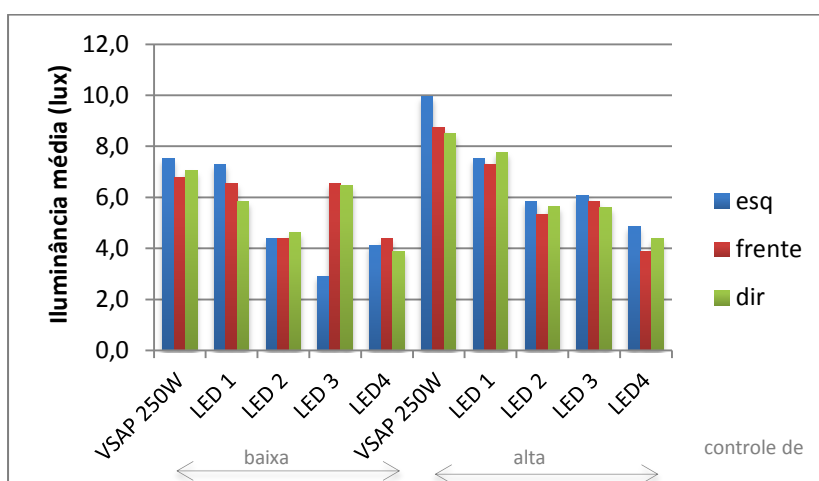


Figura 13a – Iluminância Média para Cada Setor no Teste de Iluminação

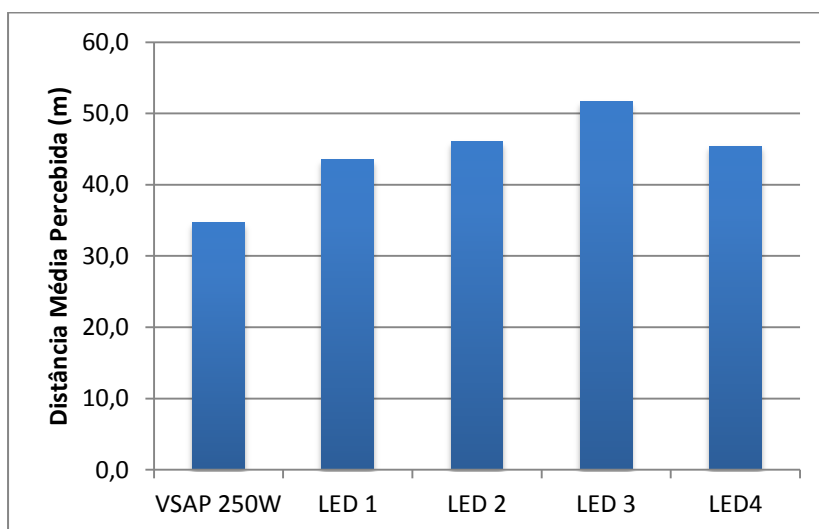


Figura 13b – Distância Média Percebida para Cada Setor no Teste de Iluminação.

Figura 13 – Iluminância Média e Distância Média Percebida.

Fonte: MUTMANSKY, 2009.

Assim como cones e bastonetes, também as células ganglionares do olho, fotorreceptor do ciclo circadiano, possuem sensibilidade ótica, que é máxima no comprimento de onda da ordem de 480 nm, que é na faixa azul. A eficácia da luz azul em sincronizar o ritmo circadiano pode ser da ordem de até três vezes maior que a eficácia da luz vermelha (maior comprimento de onda na faixa de 650 nm), daí a importância deste aspecto no desenho e no uso de luz artificial pelos consumidores para evitar riscos a saúde (SCHUBERT, 2006).

### 3.1

#### Revisão das Tecnologias

O mercado global de iluminação inclui as quatro categorias detalhadas no item anterior, residencial, industrial, comercial, exterior, designado a seguir como “iluminação geral”, e também a automotiva - luz interior, de freio, de marcha ré, setas- e retroiluminação<sup>32</sup> - tela de smartphone, computador, monitor, dispositivos móveis.

A figura 14 abaixo ilustra os diferentes tipos de fontes de iluminação usados nestes setores.

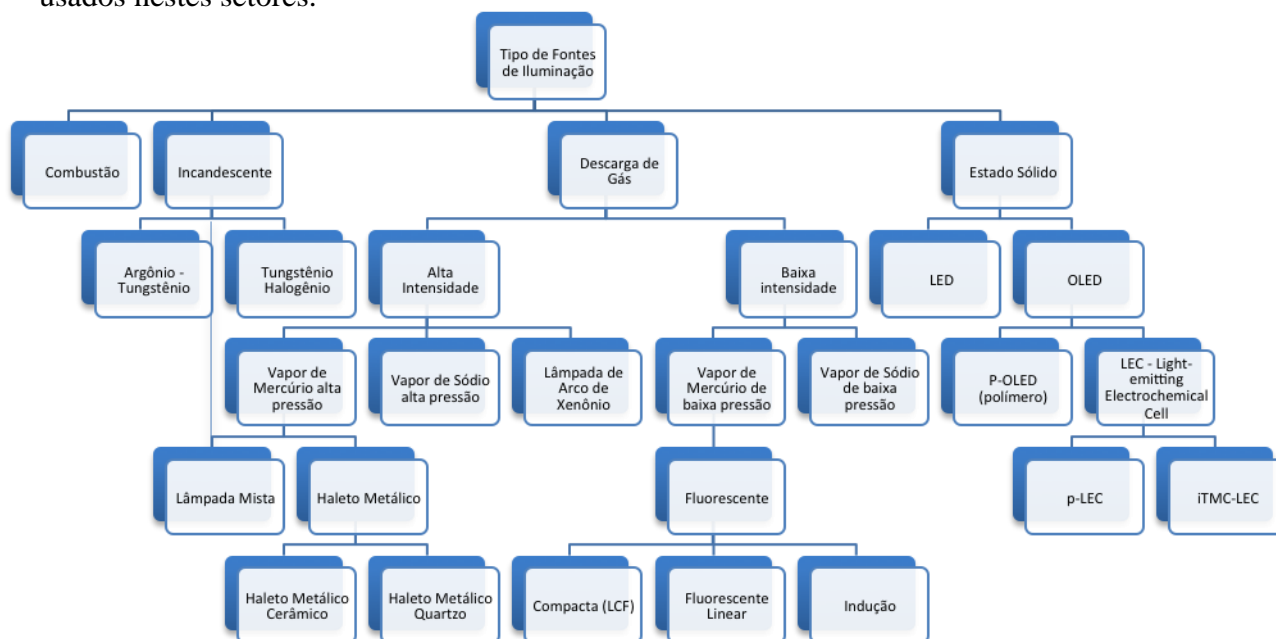


Figura 14 – Tipos de Fontes de Iluminação.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de ATKINSON et al, 2008; CHINDRES e SUDRIA-ANDREU, 2012; HALONEN et al, 2010; MEIER et al, 2014.

<sup>32</sup> Ou *backlighting*, em inglês.

A luz artificial é gerada por diferentes tipos de processos, os quais podem ser classificados em 5 (cinco) tipos<sup>33</sup> de acordo com o fenômeno ou causa produtora do fluxo luminoso: (i) combustão (ii) incandescência, (iii) emissão direta em descarga de gás (recombinação de elétrons e íons em plasma), (iv) luminescência e (v) luz em estado sólido (através da recombinação de elétrons e lacunas em materiais semicondutores), conforme ilustrado na Tabela 5. A tabela sumariza as características dos processos de geração de luz e para cada um deles, exemplifica os tipos de fontes de iluminação. Já a Tabela 6, seguinte, resume algumas das principais características e potenciais aplicações destas fontes.

---

<sup>33</sup> Alguns autores como Schreuder (2008) citam apenas 3 processos básicos, (i) incandescência (base da lâmpada incandescente), (ii) recombinação de elétrons em íons em plasma (base do funcionamento das lâmpadas de descarga em gás) e (iii) recombinação de elétrons em lacunas (base da emissão de luz em semicondutores), mas considero didático e para maior clareza incluo o processo de combustão (que complementa os processos de produção de luz através de energia elétrica) e a luminescência (que complementa geração de luz visível nas lâmpadas de descarga em gás).

Tabela 5 – Processos de Geração de Luz por Fontes.

Tipos de Processos	Descrição	Fontes	Comentários
Combustão <sup>34</sup>	Emissão de luz por reação exotérmica com oxigênio e hidrocarbonetos	Tochas, lamparinas, lampião, vela	Com aplicação de uma faísca, uma reação exotérmica entre oxigênio contido no ar e o vapor de um combustível (hibrocarboneto, seja este em estado sólido como velas, em estado líquido no caso de lamparinas de óleo ou estado gasoso no caso de lampião a gás), luz é produzida. É o processo mais antigo e mais ineficiente de produção de luz, além de gerar poluição local e contribuir diretamente com emissão de gases de efeito estufa. Em qualquer processo por combustão, parte da luz também é emitida por incandescência (através de partículas de carbono de alta temperatura – fuligem).
Incandescência	Emissão de luz por parte de um sólido aquecido (filamento de tungstênio, por exemplo)	Lâmpadas incandescentes	Luz é produzida por elemento aquecido até a incandescência, pela aplicação de corrente elétrica. O bulbo contém gás inerte, argônio, para prevenir a oxidação do filamento. A resistência elétrica a esta passagem de corrente proporciona um aquecimento do filamento, que de tão intenso (temperatura de trabalho de 2.400°C <sup>35</sup> ) emite luz, mas também calor (apenas 5% a 10% é energia eletromagnética com comprimento de onda entre 380 e 780nm e 85 a 95% é energia eletromagnética no comprimento de onda do infravermelho). Em função da baixa eficiência, diversos países estão banindo estas lâmpadas do mercado.
		Lâmpadas halógenas	A utilização de um gás halógeno dentro do bulbo da lâmpada, em adição ao argônio, promoveu uma evolução tecnológica. Devido às propriedades químicas dos elementos halógenos, após o desprendimento das partículas de tungstênio do filamento, essas partículas reagem com o halogênio, retornando ao filamento, elemento mais quente do ambiente, proporcionando “regeneração do filamento”. Outra inovação foi introdução de refletores seletivos de raios infravermelhos, que aumenta o eficácia luminosa de 40-60 %.

<sup>34</sup> Segundo CCAC (2014), querosene é o combustível mais comumente usado para prover eletricidade tanto a população que não tem acesso a eletricidade, quanto a população que tem acesso a uma rede de baixa confiabilidade, que sofre com intermitência no suprimento. Segundo mesmo artigo, é estimado que de 1,3 a 3 bilhões de pessoas, que representa aproximadamente 250 milhões a 500 milhões de residências consumam querosene na faixa de 5 a 65 milhões de toneladas por ano, produzindo emissões anuais de 40 a 500 Mt CO<sub>2</sub>, além de carbono negro e outros poluentes locais. Além do impacto ambiental desta tecnologia de iluminação, seus usuários tem impacto na saúde devido a exposição a poluentes tóxicos (carbono orgânico volátil, formaldeído, NOx, SOx) além de riscos de queimaduras e incêndios relacionados a sua utilização(CCAC, 2014).

<sup>35</sup> A alta temperatura de trabalho é viável tecnicamente dado as características do metal que tem elevado ponto de fusão (3422°C), inclusive o maior ponto de todos os metais e baixíssimo coeficiente de expansão térmica. Fonte: H.S. STARCK. Tungsten powders, metals, alloys, and fabricated products. Disponível em <http://bit.ly/15LX51F>. Acesso em: 30 de Nov. 2014.

Tabela 5 – Processos de Geração de Luz por Fontes (continuação).

Descarga de gás direta	Aplicação de arco elétrico em tubo contendo gás ionizado  A lâmpada de baixa pressão tem pressão de menor valor que a pressão atmosférica, enquanto a de alta pressão tem valor superior a atmosférica	Luz é emitida diretamente por descargas elétricas num gás, num vapor metálico ou numa mistura de diversos gases e vapores. Em funcionamento, o gás está ionizado e elétrons livres, acelerados pelo campo elétrico dentro da lâmpada, colidem com os átomos do gás e do metal. Alguns elétrons nos orbitais atômicos desses átomos são excitados pelas colisões e mudam para um estado de energia mais elevado. Quando o elétron retorna ao seu estado de menor energia há a emissão de um fóton, o que resulta em radiação luminosa. Ao contrário das fontes térmicas sólidas (incandescência) com emissão espectral contínua, a radiação de descarga elétrica entre eletrodos através de um gás ionizado (plasma) ocorre predominantemente em forma de linhas de único espectro. Estas linhas podem ser utilizadas diretamente ou indiretamente, após conversão espectral com fósforo (através do processo de luminescência, que será detalhado abaixo).	
		Lâmpada de Vapor de Mercúrio	Luz é produzida pela descarga elétrica através de vapor de mercúrio ionizado. É uma lâmpada com baixa eficácia e baixa reprodução de cores (IRC). Na Europa, o uso será banido após 2015.
		Haleto Metálico	Para aumentar a eficácia luminosa e o IRC da lâmpada de mercúrio a alta pressão, introduziu-se mistura de componentes metálicos no enchimento do tubo de descarga. Estes aditivos emitem sua própria linha espectral no arco de descarga, promovendo uma diversidade de cores de luz. Quando o vapor entra a região de alta temperatura da descarga, as moléculas se dissociam, os átomos do metal se excitam e então há o processo de emissão de radiação .
		Vapor de Sódio	Luz é produzida por descarga elétrica passando em vapor de sódio. A emissão de luz tem espectro amarelo-dourado e apesar de ser mais eficaz que os outros modelos de descarga, tem baixo IRC. Sua maior aplicação tem sido em iluminação pública e iluminação de áreas industriais.
Incandescência & descarga de gás direta	Descarga elétrica em vapor de mercúrio, em série com filamento incandescente	Lâmpada mista	Maior eficiência em relação a lâmpada incandescente, mas com o aperfeiçoamento da lâmpada de descarga em gás, foi sendo substituída por esta última. Eficiência luminosa é a metade da eficiência da lâmpada de vapor de mercúrio.



Tabela 5 – Processos de Geração de Luz por Fontes (continuação).

Descarga em gás & Luminescência	Descarga elétrica em gás e conversão de radiação UV em radiação visível	Lâmpadas de descarga por meio de gás a baixa pressão, onde a emissão primária está na região do UV e é transformada em radiação visível através de revestimento de fósforo.	
		Lâmpadas fluorescentes	São as lâmpadas de descarga a gás mais comuns no mercado. Há tanto os modelos lineares quanto a compacta fluorescente.
		Lâmpada de indução  O enchimento do tubo de descarga consiste em mercúrio (amálgama) e criptônio em baixa pressão.	Difere das outras lâmpadas de descarga pois não possuem eletrodos como fonte de elétron. Bobinas metálicas eletromagnéticas criam um campo eletromagnético em torno de um tubo de vidro que contém o gás, utilizando uma alta frequência gerada por um reator eletrônico. A ausência de eletrodo gera uma boa qualidade de luz e uma maior vida útil, fazendo-a interessante em aplicações onde a manutenção é mais crítica como em túneis e outros locais de difícil acesso.
Eletro-luminescência	Todas as fontes em Estado Sólido.  Com aplicação de corrente, semicondutor emite luz através de recombinação de portadores de cargas (elétrons e lacunas)	LED	Diodo emissor de luz
		OLED	Diodo orgânico emissor de luz. O material orgânico oferece vantagens como possibilidade de fabricar material leve e extremamente fino <sup>36</sup> . Alguns detentores de tecnologia estão no negócio da iluminação, como também na indústria de geração de energia (filmes OPV - fotovoltaico orgânico), que atua no sentido oposto ao OLED. A partir da luz, geram energia elétrica. <sup>37</sup>
		p-OLED (ou PLED)	Diodo polímero emissor de luz. Quando o material orgânico eletroluminescente tem alto peso molecular, ou seja, quando é um polímero.
		LEC	OLEDs onde há mistura de altas concentrações de íons móveis com um polímero conjugado e um eletrólito sólido. A injeção de cargas eletrônicas dos eletrodos metálicos é descrita como oxidação eletroquímica e a redução do polímero conjugado, a partir do qual deu-se o nome deste novos dispositivos (células eletroquímicas emissores de luz ou LEC)
		p-LEC e iTMC-LEC	Complexos iônicos com metal de transição são colocados entre dois eletrodos. Se o material é um polímero, refere-se a pLEC, quando um composto iônico de baixo peso molecular, refere-se a iTMC-LEC.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de ABNT, 1991; ATKINSON et al, 2008; BOMMEL, 2014; HALONEN et al, 2010; MEIER et al, 2014; MORAN, 2011; MOREIRA, V.A, 2008; SCHREUDER, 2008.

<sup>36</sup> A figura abaixo mostra um monitor numa janela de um automóvel (projeto conceitual SAMSUNG com OLED, que ilustra bem como o material é fino). Fonte: Imagem selecionada de vídeo de YouTube, SAMSUNG. Disponível em [http://youtu.be/NCZ5JDEv9\\_g](http://youtu.be/NCZ5JDEv9_g). Acesso em: 31 dez 2014.



<sup>37</sup> Um exemplo é a Cambridge Display Technology do grupo Sumitomo e outro é a Heliztek que junto com outros parceiros anunciaram um módulo para fachada de edificações composto tanto de OLED quanto OPV. Fonte: Disponível em <http://bit.ly/1yB89ci>. Acesso em: 10 dez 2014.

Tabela 6 – Principais características e aplicações de vários tipos de lâmpadas<sup>38</sup>.

Tipos	Eficácia (lm/W)	Eficiência (%W/W)	Vida útil (h)	Reprodução de Cor	Acendimento	Aplicações
Combustão	0.3 - 2	0,04	N/A	ruim		geral
Incandescente	8 - 15	10	1.000	excelente (100)	imediatos	geral (residencial, comercial)
Halogênio	20 - 30	N/A	750 – 12.000	excelente (100)	imediatos	geral (residencial, comercial)
Fluorescente tubular	60 - 100	22	7.500 – 24.000	médio a bom (50 – 98)	imediatos	geral (residencial, comercial, industrial, externa)
Fluorescente compacta	50 - 65	N/A	10.000 a 20.000	médio a bom (50 – 80)	imediatos	geral (residencial, comercial)
Vapor de Mercúrio	15 - 70	15	6.000 a 24.000	ruim (15 – 50)	3 – 10 min	geral (iluminação pública)
Haleto metálico	60 - 100	N/A	1.500 a 15.000	médio a bom (60 – 90)	10 – 20 min	geral (comercial, industrial, externa)
Vapor de sódio	75 - 150	30	14.000 a 24.000	ruim (17 a 25)	< 1 min	geral (externa, iluminação pública)
LED	200 (meta 250 a 300)	43 (meta para 2020 é 63) <sup>39</sup>	30.000 a 75.000 <sup>40</sup>	> 80	imediatos	geral (todos setores), automotiva, retroiluminação
OLED	60	23 (meta para 2020 é a 53)	15.000	80	imediatos	geral, retroiluminação

Fonte: Elaborado pela autora a partir de CHINDRES e SUDRIA-ANDREU, 2012; HALONEN et al, 2010; DOE, 2012a; DOE 2015a.

Além da eficácia luminosa, em termos de lumens emitidos por potência alimentada, um parâmetro importante de avaliar é a eficiência da lâmpada em termos de percentual da potência aplicada que é efetivamente emitida como radiação visível.

Ineficiências podem ser separadas basicamente em dois grupos: ineficiência na produção de fótons a partir da fonte de potência aplicada e distribuição de fótons para fora do espectro visível. Por exemplo, lâmpadas incandescentes são altamente eficientes na produção de fótons a partir da fonte elétrica, porém produz a vasta maioria deste fluxo na faixa de comprimento de

<sup>38</sup> Os parâmetros indicados na tabela são ilustrativos de faixas. Os valores variam em função de lâmpadas serem de diferentes fabricantes, de diferentes características (potências, temperatura de operação, materiais, dentre outros fatores). O objetivo da tabela é proporcionar uma visão geral qualitativa das distintas tecnologias.

<sup>39</sup> Quando se considera também não só a eficiência da fonte, mas também a eficiência da luminária, a eficiência combinada para o LED fica em 32% com potencial de atingir 54% até 2020 de acordo com DOE, 2015a.

<sup>40</sup> Em relação ao LED para aplicação específica em IP, o tempo de vida útil é de 55.000 horas (6).

onda do infravermelho, que o olho humano não tem sensibilidade (MURPHY, 2012).

O percentual da potência aplicada que é efetivamente emitida como radiação visível é um parâmetro interessante para verificar as perdas de cada tipo de lâmpada e entender como aumentar as eficiências e quais os potenciais de desenvolvimentos em médio e longo prazos. Conforme mostrado na tabela anterior, grande parte da potência aplicada é perdida, especialmente porque a eficiência máxima termodinâmica é baixa.

As figuras abaixo ilustram estas perdas para 5 tipos de lâmpadas, incluindo a lâmpada de tecnologia LED<sup>41</sup>.

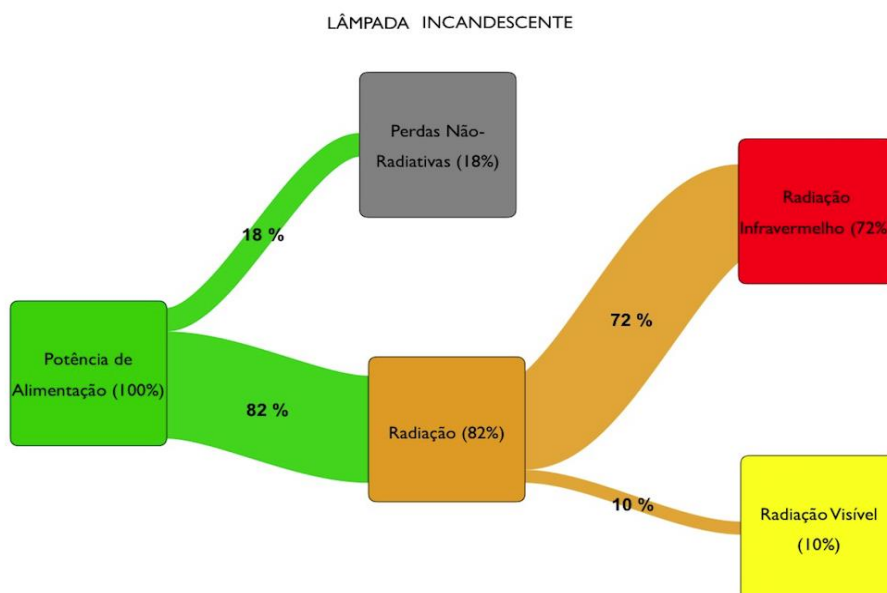


Fig. 15a – Balanço de Energia Ilustrativo para Lâmpada Incandescente.

<sup>41</sup> Os diagramas têm objetivo ilustrar – de forma geral – as perdas e ineficiências de cada tecnologia. Não é objetivo desta pesquisa fazer uma análise quantitativa de perdas, que envolveria avaliação específica de características da lâmpada por potência, por tipo de tecnologia de fabricação, mas apenas uma análise qualitativa. A revisão de literatura foi feita com base em KUSHWAHA, 2011, e os valores referenciados neste artigo são similares e próximos aos citados por CERA, 2010.

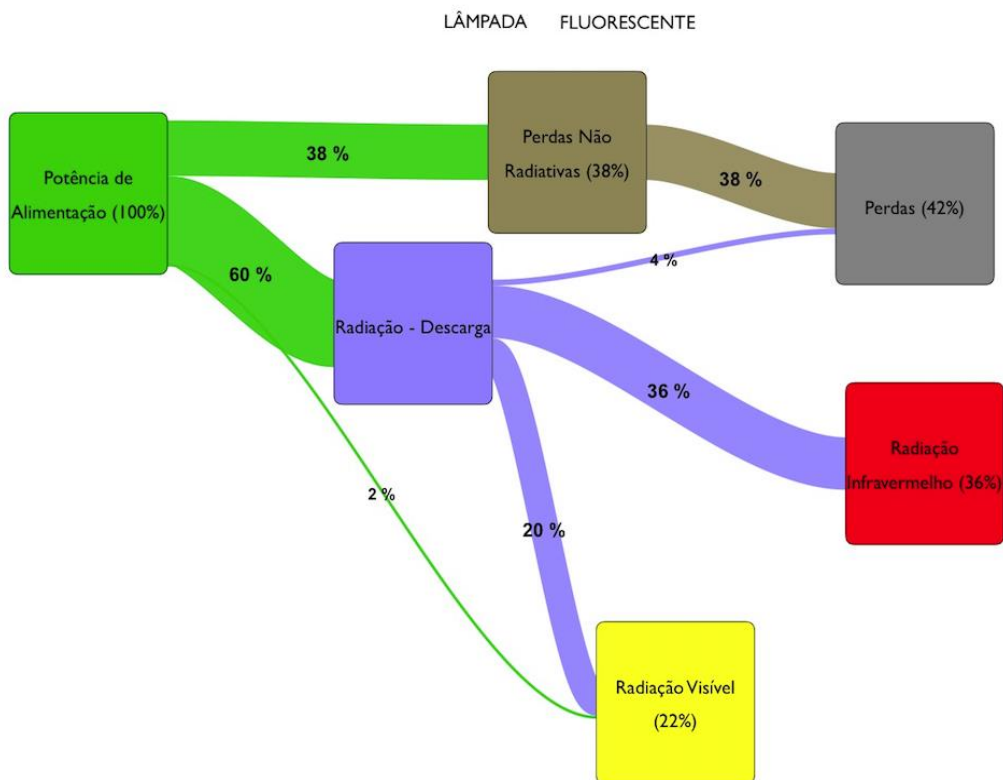


Fig. 15b – Balanço de Energia Ilustrativo para Lâmpada Fluorescente.

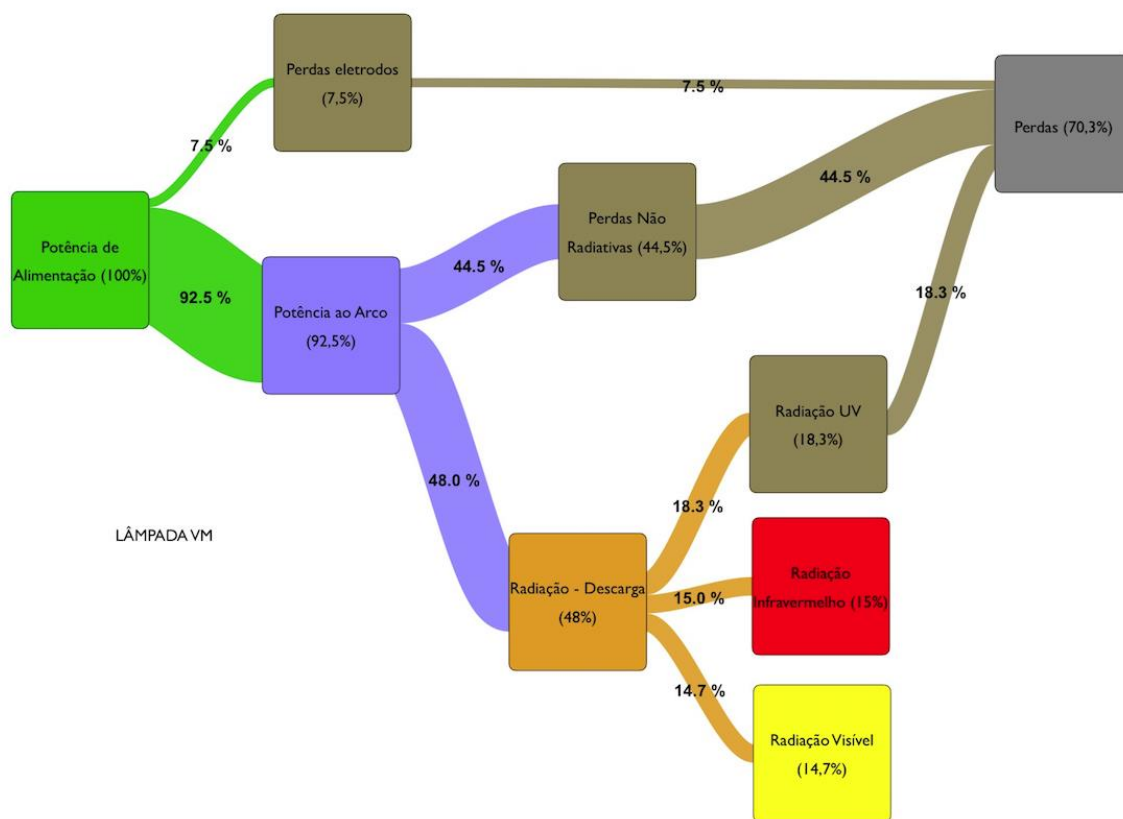


Fig. 15c – Balanço de Energia Ilustrativo para Lâmpada de Vapor de Mercúrio

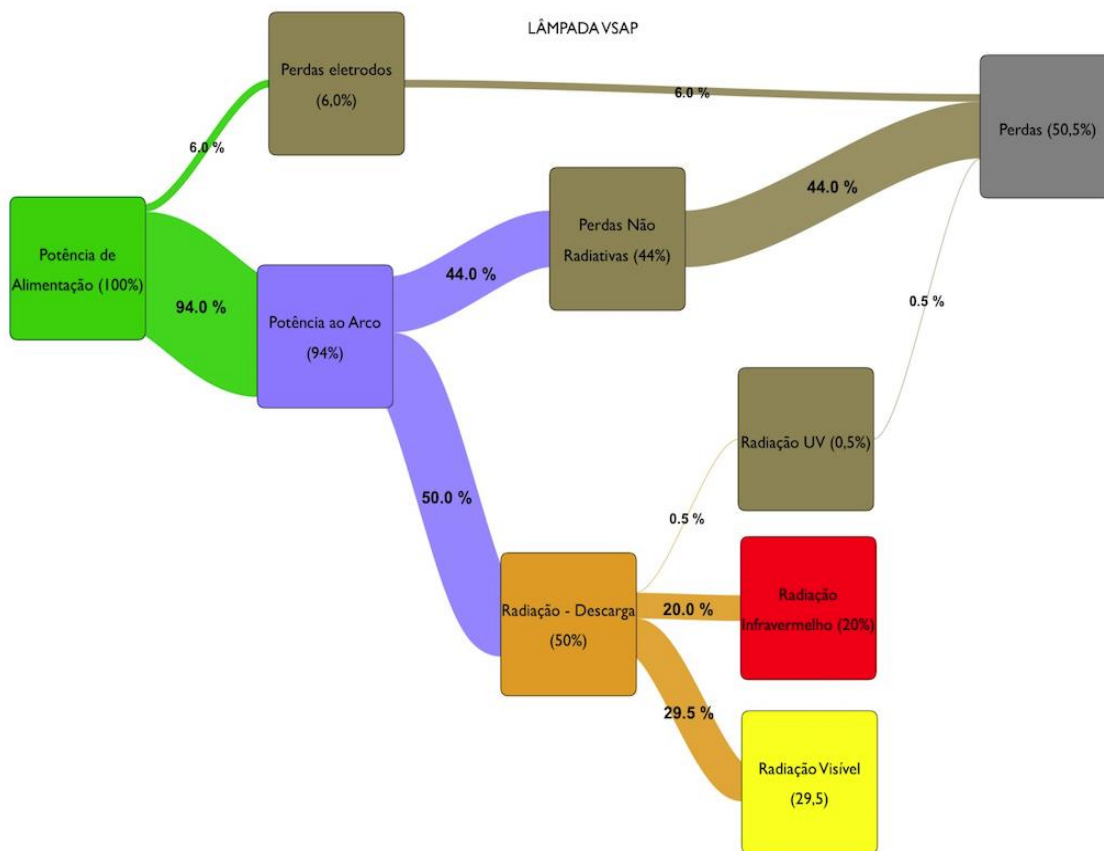


Fig. 15d – Balanço de Energia Ilustrativo para Lâmpada de Vapor de Sódio.

Figura 15 – Diagramas com Balanço de Energia de Lâmpadas de Tecnologias Tradicionais.

Fonte: KUSHWAHA, 2011

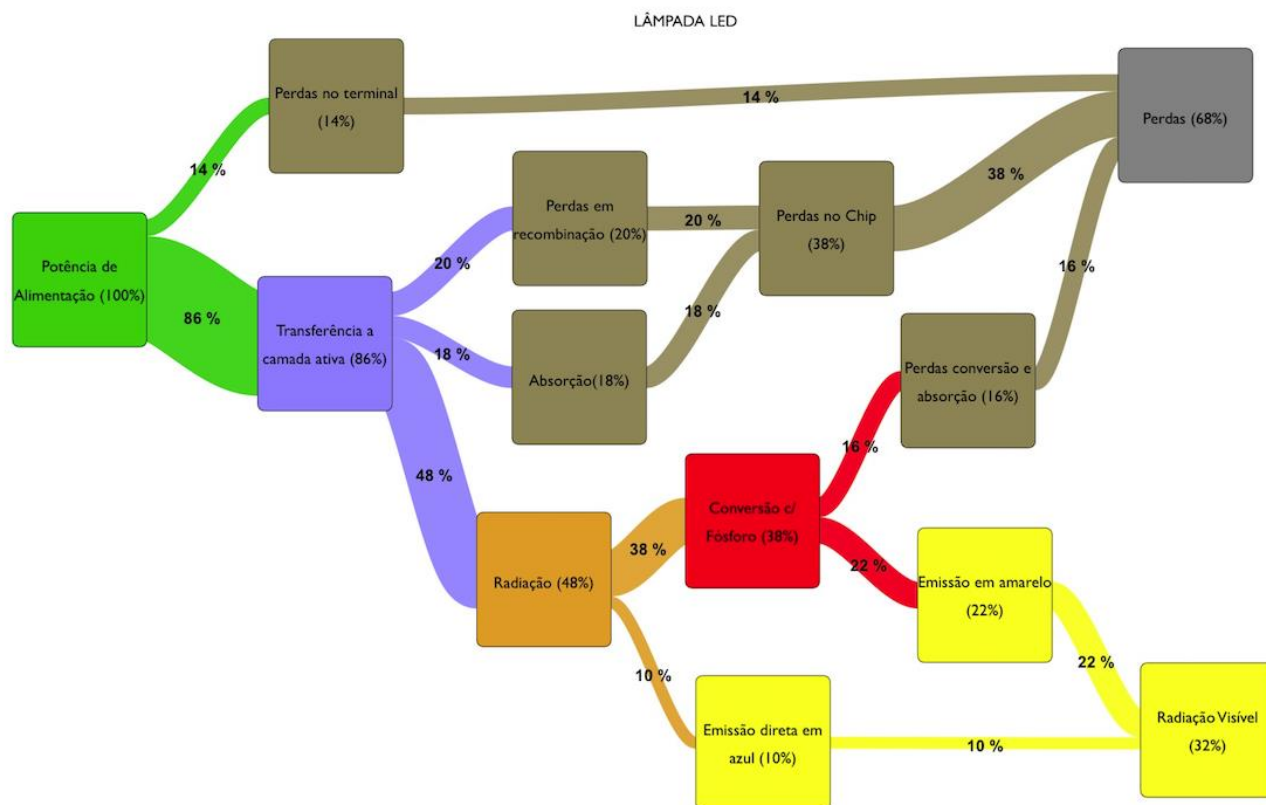


Figura 16 – Balanço de Energia Ilustrativo de Lâmpada LED de Luz Branca.  
Fonte: BESSHO e SHIMIZU, 2012.

O objetivo de listar todos os balanços de energia é meramente ilustrativo para indicar onde as perdas ocorrem e onde os esforços de P&D estão sendo direcionados. Como exemplo do dinamismo da tecnologia LED, o LED com conversão a fósforo para produção de luz branca que foi citado ter eficiência de 32%, segundo o DOE em 2015, o produto mais avançado no mercado já tem eficiência de 43%, com previsão de poder alcançar até 63% em 2020 (DOE, 2015a).

Interessante verificar que a lâmpada LED tem oportunidade de oferecer ainda melhor eficiência, quando se considera todo o conjunto ótico. No caso da sinalização semafórica, por exemplo, como a luz é emitida diretamente nas cores amarelo, vermelho e verde, há redução adicional das perdas, comparada com a tecnologia convencional incandescente, pois não há necessidade de uso de refletor e lente vermelha (ou amarela ou verde). A figura 17 ilustra o balanço.

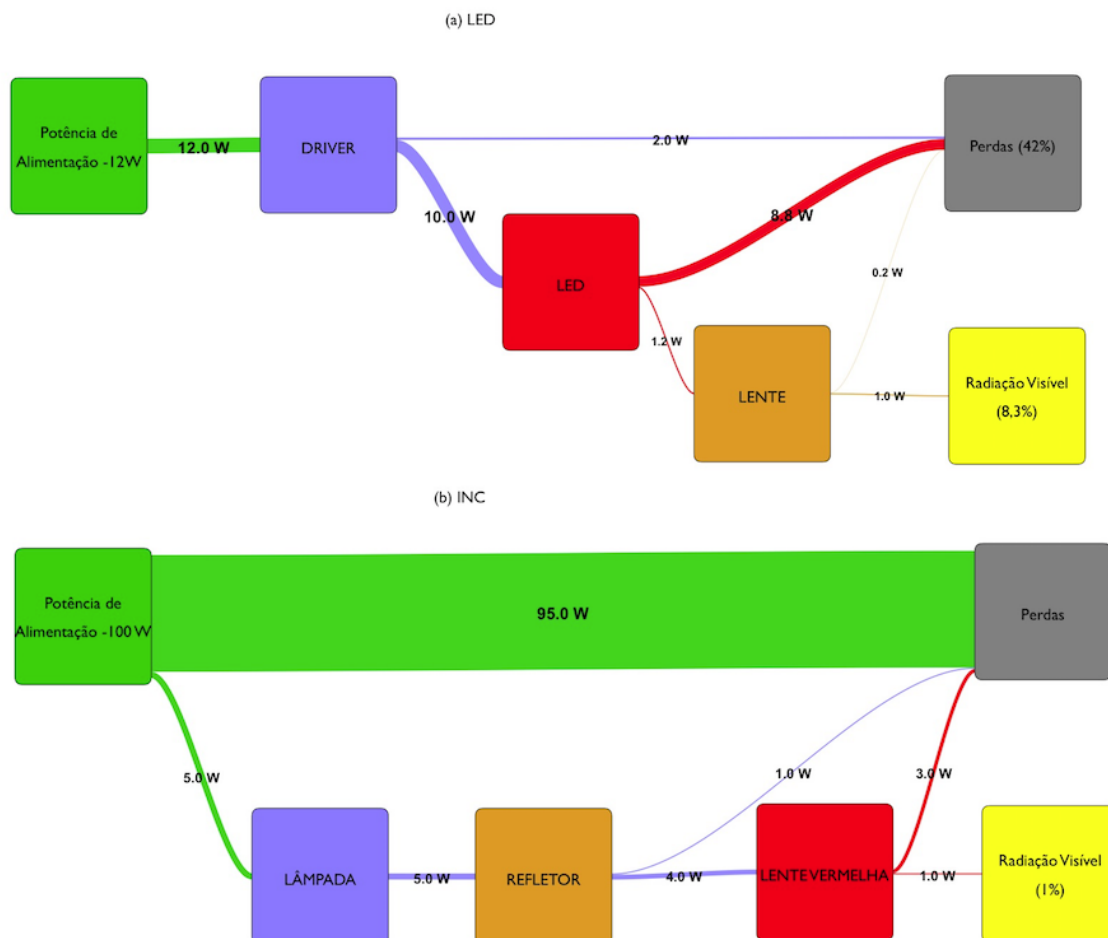


Figura 17 – Balanço de Energia para Sinalização Semafórica: Lâmpada Incandescente versus LED.

Fonte: SCHREUDER, 2008.

As tecnologias halogênio-incandescente, fluorescente e as lâmpadas de descarga em gás evoluíram muito nos últimos 70 anos até hoje, conforme mostrado na figura 18 a seguir. Enquanto fabricantes destas tecnologias continuam buscando aumento de suas eficiências, observa-se pelo gráfico na figura 18 que as eficiências das tecnologias tradicionais atingem um patamar mais estável, enquanto as lâmpadas de tecnologia LED oferecem maior oportunidade de ganhos. Segundo projeção do US DOE (DOE, 2014d), observa-se na mesma figura que as eficiências para os pacotes de LED dos melhores produtos de mercado de cor branca e morna (“*best-in-class cool white*” e “*best-in-class warm white*”) tem previsão de aumentos exponenciais de eficiências. Quando se integra o pacote de LED à luminária, há perdas adicionais decorrente de perdas de potência, perdas no sistema ótico, perdas térmicas, daí o menor valor de eficiência da lâmpada LED, que pode ser verificada na mesma figura 18 na curva de previsão do DOE “US DOE Roadmap”. Esta curva considera a previsão de

aumento de eficiência da lâmpada LED, considerando todos os setores de iluminação geral. As metas são ambiciosas do programa americano, mas os números ilustram o potencial da tecnologia. Verifica-se que a curva de previsão do DOE “US DOE Roadmap” ultrapassa as eficiências das tecnologias tradicionais (DOE, 2014c; DOE, 2014d).

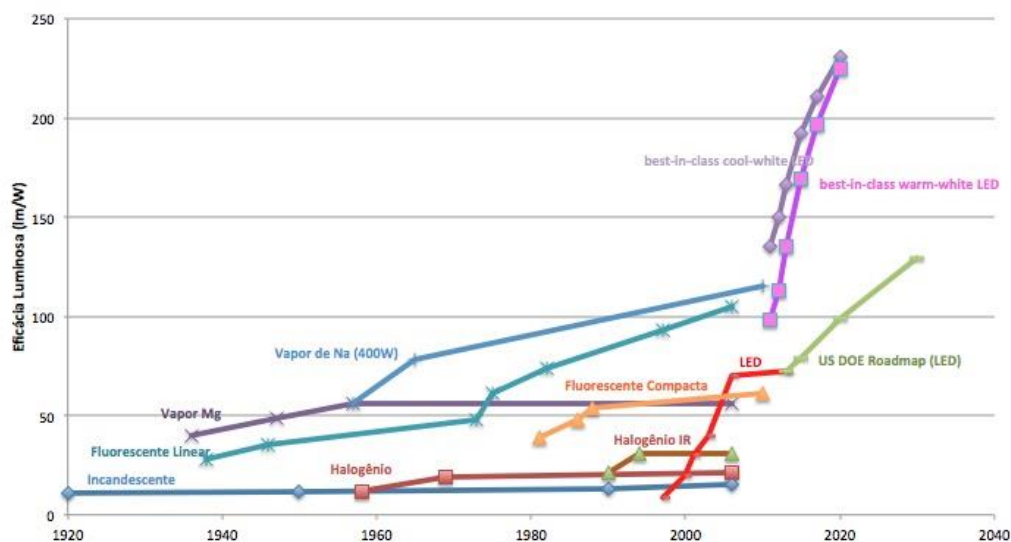


Figura 18 – Histórico e previsões de evolução tecnológica.

Fonte: DOE, 2012a; DOE, 2014c<sup>42</sup>; DOE, 2014d<sup>43</sup>.

Em geral, as luminárias com LED já são mais eficientes que as lâmpadas incandescentes, lâmpadas halógenas, as compactas fluorescentes e são também competitivas com as fluorescentes lineares e com as de vapor de sódio, especialmente se condição mesópica é considerada.

O aumento da eficácia é a meta alvo e um importante objetivo da indústria de luz em estado sólido. Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos, que desenvolve desde início dos anos 2000 o Programa de Luz em Estado Sólido, que tem como objetivo alavancar a indústria e permitir acentuada redução no consumo de energia através da introdução no mercado de luz em estado sólido, é previsto que a eficiência, expressa como percentual da potência aplicada que é efetivamente emitida como radiação visível das lâmpadas LED, que em 2015 se

<sup>42</sup> Desta referência, foram obtidas as projeções alvo do programa de P&D do US DOE, sendo consideradas as médias de eficiências das lâmpadas em todos os setores de iluminação geral, ponderada pelo consumo de energia de cada setor.

<sup>43</sup> Desta referência foram obtidas estimativas de melhores eficiências para os pacotes de LED de cor branca e morna (“best-in-class cool white e “best-in-class warm white”).



situa em torno de 43% para um pacote de LED de fósforo pode aumentar 63% até 2020 (DOE, 2015a)<sup>44</sup>. Em 2013, o mesmo era de 39%.

Considerando que algumas das tecnologias convencionais estão sendo banidas em vários locais do mundo, conforme será discutido no próximo item 3.2, seja por sua baixíssima eficiência, seja por também conter metais pesados como mercúrio, isso impulsiona ainda mais avanços e inovações na indústria de iluminação, que já passa por uma total revolução.

### 3.1.1

#### A tecnologia LED em detalhes

O LED é um dispositivo semicondutor que gera luz de forma eficiente quando polarizado. Segundo a organização internacional IEC - *International Electrotechnical Commission* é definido como “dispositivo de estado sólido que contém uma junção p-n, que emite radiação óptica quando excitado por uma corrente elétrica” (ABNT, 2013). Detalhamento e explicação desta definição encontram-se no Apêndice B.

São componentes eletrônicos, tais como transistores ou circuitos integrados e emergiram de descobertas e explorações nas áreas de ciência de materiais e engenharia, envolvendo dezenas de milhares de pesquisadores especialmente nos Estados Unidos, Europa e Ásia.

A propriedade de eletroluminescência, princípio da emissão de luz em um LED, foi descoberta quase como um acaso em 1907 e passaram-se décadas até que a aplicação ganhasse maior relevância (SCHUBERT, 2006). Os principais marcos de seu desenvolvimento são mostrados na tabela abaixo.

---

<sup>44</sup> O valor exclui as perdas decorrentes da luminária (eficiência térmica, eficiência do controlador (driver), eficiência óptica, eficiência elétrica). O mesmo estudo indica que a eficiência da luminária LED está na faixa de 74% com previsão de chegar a 89% em 2020.

Tabela 7 – Principais Marcos no Desenvolvimento da Tecnologia LED.

<b>Introdução</b>	<b>Aplicação/ Mercado</b>	<b>Desenvolvedor pioneiro</b>
1962	Luz de indicação em placa de circuito	Texas Instruments
1962	Display (painel) alfanumérico	GE
1967	Luz de sinalização	
1968	Primeiros displays eletrônicos	
1970	Relógio com LED (Pulsar)	Hamilton Watch Co
1977	Tela de TV em LED	
1981	LED para sinalização semafórica	
Final dec 80	Iluminação interior de automóveis, primeiros displays	Siemens, Sanyo e mais tarde Cree
1993	LED azul de alto brilho, permitindo retro-iluminação de equipamentos eletrônicos	Nichia, Toyota Gosei
Dec 90	LED branco de alto brilho; sinalização semafórica, iluminação pública, lanterna	Nichia, Lumiled (Philips), Cree
1997	Iluminação de arquitetura	Color Kinetics (Philips adquiriu)
Anos 2000	Lâmpadas LED	Vários
2004	Iluminação comercial para o dia, LED em faróis	Audi/ Lumiled
2004	LED com uso de corrente alternada - AC (e não DC)	Industrial Technology Research Institute e 23 empresas em Taiwan
2007	Televisão com OLED	Sony

Fonte: SANDERSON e SIMONS, 2014.

Um dos mais significativos foi o desenvolvimento do LED azul, permitindo o desenvolvimento da luz branca que alavancou diversas outras aplicações, revolucionando o mercado de iluminação. Pouco mais de vinte anos depois, os 3 pesquisadores que desenvolveram o produto receberam prêmio Nobel de Física em 2014 (RSAS, 2014).

A unidade funcional essencial do LED é o seu chip, mas inclui vários outros componentes e sistemas até ser um produto acabado para uso final (lâmpada ou lâmpada integrada a luminária) como mostrado na figura 19.

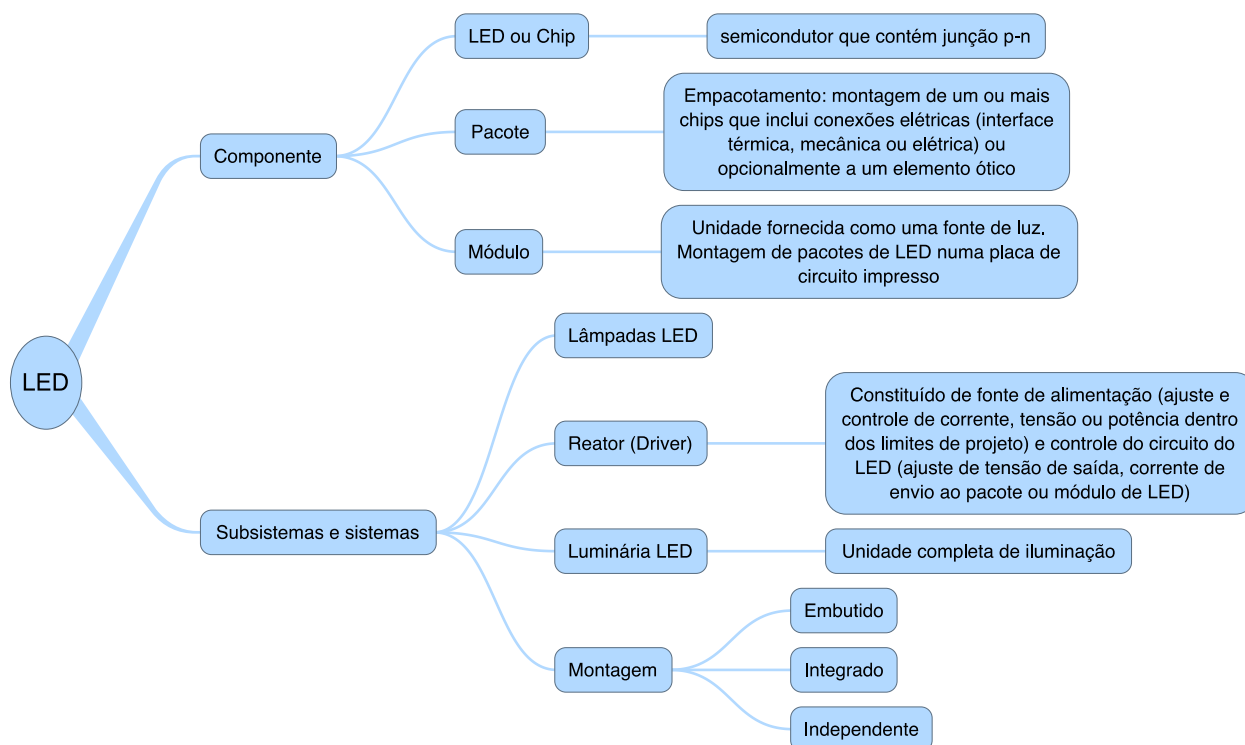


Figura 19 – Componentes e Sistemas de um LED.  
Fonte: Elaborado pela autora a partir de DOE, 2012a e ABNT, 2013.

Seu processo produtivo é altamente intensivo de tecnologia. Não é objeto deste projeto de pesquisa discutir este item em profundidade, mas apenas fazer uma breve descrição para ilustrar as diferenças desta tecnologia, se comparada às tecnologias tradicionais e mostrar sua complexidade.

Ainda segundo a especificação técnica da CIE, há 45 termos distintos que são necessários para definir iluminação geral com fontes de luz LED, que vão, por exemplo, desde temperatura máxima nominal no ponto de medição (temperatura de junção – que é explicada no Apêndice B), passando pela máxima corrente direta permitida, à vida útil do módulo de LED em relação a temperatura de junção (ABNT,2013).

A sofisticação deste produto torna a seleção do tipo de produto mais especializada, o que é crítico numa tecnologia entrante. Há uma mudança na

cultura de projeto, onde a análise de distribuição fotométrica e demais características da luminárias e da fonte de luz se tornam mais complexas do que a simples escolha de lâmpada de sódio em função de sua potência, que tem sido a prática até então. A capacitação de mão-de-obra especializada e a disponibilidade de infraestrutura, como equipamentos e ensaios tanto de laboratórios como de campo, são fundamentais para que a escolha da lâmpada e luminária LED seja a mais apropriada para o objetivo desejado. Isto é ainda mais premente, especialmente em função do expressivo ambiente de inovação tecnológica, com contínuos avanços em cada dimensão de cada uma das etapas de produção (escolha e desenvolvimento de materiais, tecnologias de produção, tecnologia de aplicação para uso final, projeto de luminárias, etc) que têm proporcionado expressiva otimização de eficiência do produto ao longo dos últimos anos<sup>45</sup>. Conforme será mostrado no capítulo seguinte, o Brasil não desponta neste mapa de inovação e tecnologia, o que além de reduzir a competitividade do país nesta indústria global de baixo carbono, gera no curto prazo aumento dos custos de aquisição no mercado interno, o que também aumenta a barreira para o processo de transição para uma iluminação eficiente de baixo carbono.

### 3.1.2

#### **Benefícios da Tecnologia LED, em particular para Iluminação Externa e IP**

A tecnologia LED confere uma série de benefícios se comparada a tecnologia tradicional, porém há alguns pontos controversos que demandam necessidades de desenvolvimento e pesquisas adicionais, especialmente no que tange ao consumo de recursos naturais para sua fabricação e destinação final da lâmpada (ou luminária) e aspectos relacionados à poluição luminosa. As vantagens da tecnologia são descritas abaixo, assim como os desafios são apontados.

---

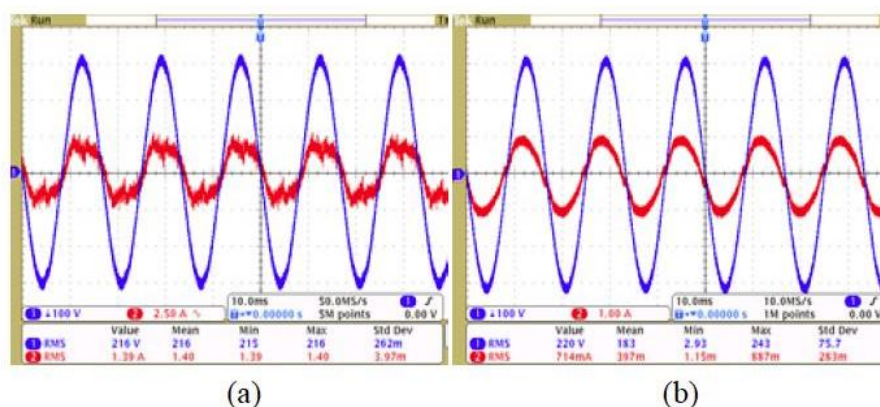
<sup>45</sup> Nos primeiros 50 anos da descoberta do LED, a eficiência aumentou num fator de 10 a cada 10 anos (LIU 2011).

### a. Redução do consumo de energia e melhor qualidade de energia

Conforme detalhado nos itens anteriores, o aproveitamento energético do LED é superior às tecnologias convencionais com ainda amplo potencial de otimização. Na aplicação para sinalização semafórica, a redução do consumo de energia é da ordem de 80 a 90% (ABNT, 2010; ITE 2005), com resultados expressivos já consolidados (LONG et al, 2012). Especificamente na aplicação em IP, frequentemente é até 50% mais econômico que os dispositivos de vapor de sódio de alta pressão, e oferece até mais de 60% de economia de energia sobre os de vapor de mercúrio (CCI e CITY OF LOS ANGELES, 2009; KIVIMÄKI, 2013; THE CLIMATE GROUP, 2014).

A redução do consumo de energia é significativa, mesmo se considerando todo o ciclo de vida - transporte, uso de matérias-primas, produção dos pacotes de LED, uso além de sua destinação final - para um caso avaliado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2012b).

Com reatores (*drivers*) bem projetados, a iluminação a LED tem potencial de promover menor injeção de corrente harmônica no sistema elétrico (RODRIGUES, 2012). De fato, avaliações piloto realizadas na Universidade Federal de Juiz de Fora constataram este benefício (NOGUEIRA et al, 2014; GIL-DE-CASTRO et al, 2013), que é ilustrado nas figuras 20 e 21 .



Vermelho: corrente  
Azul: tensão

Figura

20 – Ondas de Corrente e Tensão na Entrada de Luminárias Vapor de Sódio (a) e LED (b).

Fonte: NOGUEIRA et al, 2014.

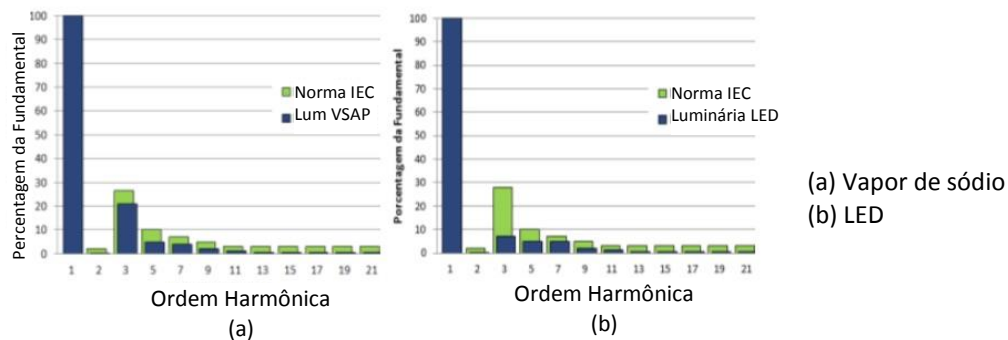


Figura 21 – Conteúdo harmônico da corrente de entrada.  
Fonte: NOGUEIRA et al, 2014.

A figura 20 mostra as formas de onda de tensão e corrente de entrada nas luminárias de vapor de sódio (a) e luminária LED (b). A figura 21 ilustra as amplitudes dos harmônicos da corrente de entrada em comparação com os limites estabelecidos pela norma IEC 61.000-3-2. Observa-se que ambas as luminárias atendem a norma, sendo que a luminária LED causa menor emissão de correntes harmônicas na rede elétrica (NOGUEIRA et al, 2014).

Aqui foi ilustrado como um potencial sistema de IP em LED, se projetado adequadamente, contribui para a qualidade de energia da rede. Mas, igualmente importante é investigar como a qualidade do sistema de energia e condições de fornecimento de energia da rede onde o novo sistema de LED será implantado pode impactar o sistema de iluminação a LED.

A má qualidade do sistema de energia pode comprometer adversamente o sistema de IP a LED, se medidas de proteção adicionais não forem projetadas adequadamente (HUANG et al, 2007), o que pode comprometer o resultado financeiro do projeto.

A manutenção constante da corrente que alimenta o LED é essencial para garantir o funcionamento adequado do LED, assim como para manter constante a qualidade de saída ótica. Como o LED é um semicondutor com resistência não-linear (corrente varia exponencialmente com tensão aplicada), o controle do driver é crítico nesta função e particular a cada luminária, pois o sistema dinâmico de resposta do LED não é igual em cada luminária. Da mesma forma, pequenas variações de temperatura ambiente poderiam ocasionar mudança de corrente, também afetando o desempenho do LED, na ausência de um sistema de controle na luminária (HUANG et al, 2007).

Alguns fabricantes de luminárias já dispõem de sistemas de controle

integrados na própria luminária que garantem seu funcionamento apropriado, mesmo em situações de sobre-voltagem da rede de até 8 kV. No entanto, situações de falhas no aterramento, áreas de maior risco de queda de raios e outros fatores que provoquem ocorrência de grandes sobre tensões, requerem implantação de um sistema adicional de proteção para garantir funcionamento adequado do sistema de iluminação (OSRAM, 2015; BETTERMANN, 2014).

### b. Menor impacto ambiental

LED apresentou menor impacto ambiental, considerando todo o ciclo de vida, incluindo manufatura, transporte e uso além da destinação final, através de uma análise independente feita pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos que comparou a tecnologia com lâmpadas incandescentes e compactas fluorescentes. Foi considerada duas simulações para o LED: no estágio de desenvolvimento da tecnologia na época do estudo, 2012 e também projetado cenário com melhorias de desempenho até 2017 (DOE, 2012b). Os resultados da avaliação considerando 15 parâmetros são indicados na figura abaixo.

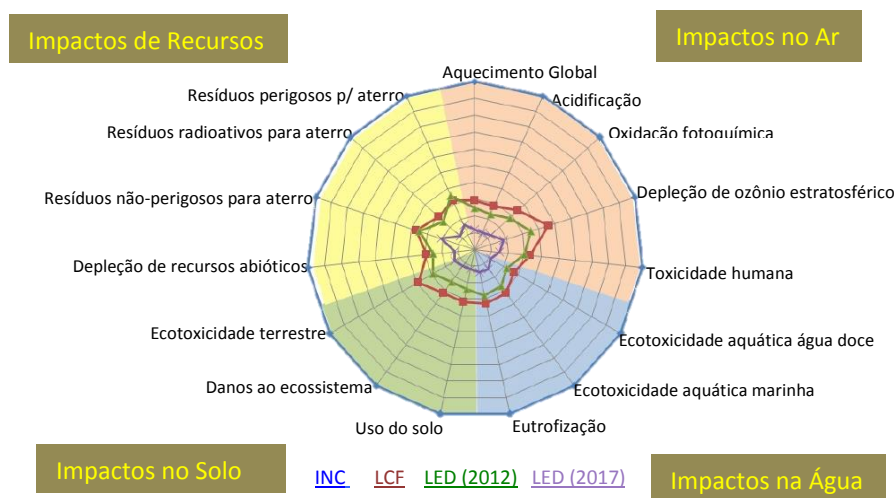


Figura 22 – Análise de Ciclo de Vida – avaliação impacto ambiental.  
Fonte: DOE, 2012b.

O consumo de energia durante a vida útil das lâmpadas foi identificado como o parâmetro mais importante na avaliação das diversas lâmpadas

considerando análise de ciclo de vida, conseqüentemente a eficácia luminosa é um item prioritário a ser considerado ao se fazer uma decisão de compra. No entanto, a responsabilidade pela destinação e uso final das lâmpadas deve ser também levada em consideração. (DOE, 2013a).

Um centro de pesquisa na Finlândia desenvolveu outra análise de ciclo de vida comparando o LED especificamente com a tecnologia de vapor de sódio a alta pressão (VSAP) para aplicação em iluminação pública. Nesta análise, o consumo de energia durante a vida útil das lâmpadas também foi identificado como o parâmetro mais importante na avaliação e o LED teve desempenho ambiental superior a VSAP quando as luminárias foram comparadas em relação a lumens por hora. No entanto, quando se utilizou o indicador km de avenida iluminada, a vantagem do LED em relação ao VSAP foi apenas marginal de 3%. Considerando que a tecnologia LED está em intensa evolução e a tecnologia VSAP já alcançou seu estágio de máximo desempenho, até 2020, os autores esperam que o impacto ambiental da tecnologia LED seja 41% menor que a VSAP (TAHKAMO e HALONEN, 2015).

Outra importante consideração a ser feita diz respeito ao uso de materiais nobres. Considerando a expansão da indústria de iluminação em estado sólido (apenas para atender mercado de LED de luz branca de alto brilho), haverá aumento da necessidade de gálio de 9 t em 2006 para 143 t em 2030. Como comparação, a atual capacidade de mineração é de 106 toneladas por ano. Com relação a índio e outros metais de terras raras, também necessários à fabricação do LED, a situação de demanda e suprimento é similar. Como consequência, o padrão de consumo atual e as futuras demandas podem resultar em riscos de desabastecimento e ou perda de valiosos recursos econômicos e ecológicos (ISA, 2013). Considerando a projeção de uso até 2050, segundo a ELC/CELMA (Fabricantes Europeus de Lâmpadas e Associação da Federação Nacional de Fabricantes de Luminárias e Componentes Eletrônicos para Luminárias na União Europeia, respectivamente), a quantidade excede as atuais reservas naturais, o que torna o tema de P&D de novos materiais para fabricação e reciclagem de lâmpadas essencial (CELMA, 2011).

A tecnologia LED não contém metal pesado como mercúrio, minimizando impacto na saúde ocupacional durante a etapa fabricação de lâmpadas, como também na disposição final de lâmpadas, que sem uma política pública efetiva de



reciclagem pode provocar emissão de mercúrio em aterros sanitários seja através de lixiviado ou emissão gasosa (HU, 2012). Este aspecto é de grande relevância e um grande benefício do LED se comparado às tecnologias tradicionais com mercúrio.

Para ilustrar, considerando apenas a etapa de fabricação das lâmpadas, aqui mesmo no Brasil, estudos indicam que a capacidade neuropsicológica<sup>46</sup> de alguns trabalhadores em indústrias de lâmpadas contendo mercúrio ficou reduzida, inclusive anos após a interrupção da exposição ocupacional ao vapor de mercúrio (TAUB et al, 2006;). Há relatos também de trabalhadores em situações de insônia crônica (ROSSINI et al, 2000), com mercurialismo (MELO, 2015) e até mesmo casos de morte de trabalhador<sup>47</sup> (VALOR, 2014).

Considerando a etapa de destinação final, o benefício da tecnologia LED se destaca ainda mais. No Brasil, mesmo com o Plano Nacional de Gerenciamento de Resíduos Sólidos que instituiu a responsabilidade do poluidor pagador (BRASIL, 2010b), e apesar de diversas legislações estaduais terem determinado que os fabricantes, distribuidores, importadores, revendedores e comerciantes de lâmpadas contendo mercúrio sejam obrigados a receber o produto para providenciar sua reciclagem e descarte adequado (SILVA, 2010), ainda hoje, a reciclagem no país é muito baixa, o que gera um descarte anual não apropriado na ordem de 1,5 toneladas de mercúrio (DEGRA e GOBI 2015), causando impacto ambiental que não pode ser desprezado.

Independente de não conter resíduos perigosos, a reciclagem de lâmpadas e luminárias LED também deve ser estimulada para recuperar valiosos constituintes. É recomendável que esta meta seja base para nortear desde o desenho do produto, de forma que o processo de escolha de materiais e processo fabril venha a facilitar a reciclagem, valorizando o conceito de economia circular para maximizar eficiência no uso de recursos. O uso de simulação computacional no desenho da fabricação permite a prospecção de interações e efeitos de considerações de projeto (escolha de materiais) em combinação com infra-

---

<sup>46</sup> Lentidão psicomotora, indicação de sintomatologia depressiva e de ansiedade, dentre outros sintomas.

<sup>47</sup> Em 2014, a empresa Philips foi condenada no Brasil a pagar R\$ 15 mil danos morais e quase R\$ 200 mil por danos materiais a funcionário que faleceu por hidrargirismo – intoxicação severa e aguda por mercúrio. Disponível em <http://www.valor.com.br/legislacao/3785754/destaques> Intoxicação por mercúrio. Acesso em 2 jan 2015.

estruturas de processamento de reciclagem e rotas tecnológicas para recuperação de materiais (metalurgia de reciclados), avaliação de perdas, emissões e, conseqüentemente, previsão de eficiência da reciclagem (REUTER e SCHAIK, 2015).

Não foram identificados processos atualmente viáveis economicamente de reciclagem de lâmpadas LED (decompondo todos os seus constituintes), mas encontrada linha de pesquisa na Alemanha que investiga a uso de rota tecnológica de cominuição eletrohidráulica para separação dos diferentes constituintes (FRAUNHOFER, 2015).

### **c. Longa Vida Útil**

As lâmpadas LEDs têm expectativa de vida útil até 50 a 75 vezes superior à de uma incandescente e de 2 a 4 vezes superior à de tecnologias tradicionais para IP (CHINDRES e SUDRIA-ANDREU, 2012; HALONEN et al, 2010; DOE 2015a). Particularmente em aplicações para iluminação externa esta característica é muito importante, pois reduz o custo de manutenção do sistema, além de reduzir, por consequência, o impacto que a intervenção de manutenção causa no sistema viário, uma vez que não são necessários caminhões – que invariavelmente devido seu posicionamento na pista, podem ocasionar retenção no trânsito. Ademais, a confiabilidade do sistema aumenta com menores chances de ter uma lâmpada fora de funcionamento.

Este aspecto é significativo não só para iluminação pública, mas também crítico em iluminação semafórica (MENDONÇA e BORBOREMA, 2012).

### **d. Poluição luminosa**

A emissão de luz direcional permite, com a ótica adequada, construir luminárias de alta eficiência e, por conseguinte, com potencial de minimizar poluição luminosa, conforme figura 23 a seguir, que ilustra estudo de caso em Adelaide, Austrália. A luminária de linha de base referenciada no teste era de haleto metálico, com relação iluminância por potencia de 1 lux/Watt, quase 5 vezes menor que a luminária LED, evidenciando o quanto a luminária LED pode ser potencialmente mais eficaz (THE CLIMATE GROUP, 2012).

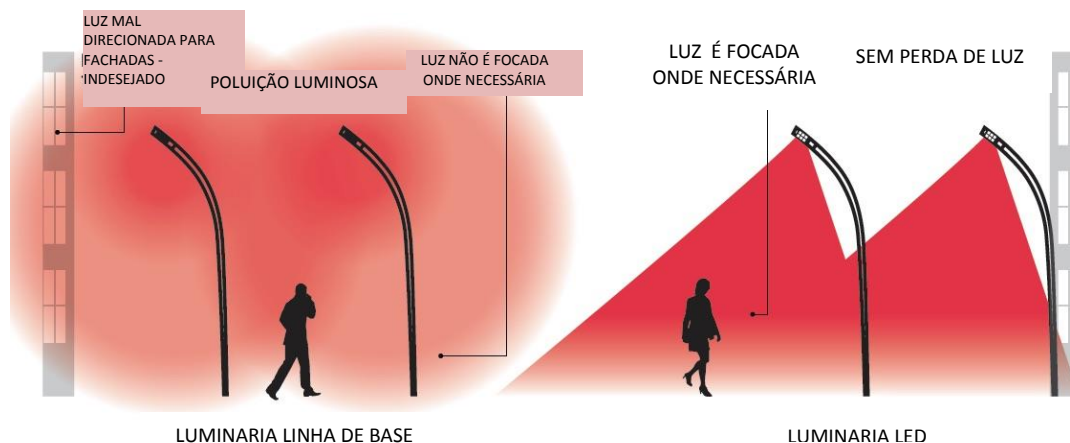


Figura 23 – Potencial Efeito da Luminária LED sobre Poluição Luminosa.  
Fonte: The Climate Group, 2012.

No entanto, estudos científicos indicam que o LED, devido a qualidade de sua composição espectral (maiores emissões em baixo comprimento de onda, na faixa do azul) pode intensificar não só a poluição luminosa, aumentando o brilho no céu, como também pode afetar o ritmo circadiano (FALCHI et al, 2013).

Especificamente quanto ao impacto do brilho/ luminosidade antropogênica do céu, enquanto alguns pesquisadores demonstram que o aumento do brilho causado pelo LED pode ser desprezível, se comparado a tecnologia tradicional vapor de sódio a alta pressão (BIERMAN, 2012), outros reforçam o argumento indicando limitações desta pesquisa – não considerando condição escotópica nas medições, por exemplo – e reforçam os desafios e pontos negativos da atual tecnologia, independente da temperatura de cor do LED – seja este mais “quente” ou de “luz branca” (LUGINBUHL et al, 2014).

Numa divergência científica, Bierman cita a chegada num paradoxo onde “a sociedade deverá chegar numa decisão se os benefícios de uma fonte de luz branca com alto IRC, que tem maior eficácia e gera melhor percepção visual, são superiores aos pontos negativos como aumento do brilho no céu e maior potencial de perturbar e romper o ritmo circadiano” (BIERMAN, 2012).

Em revisão de literatura e promoção de workshop para debate sobre o tema, que incluiu os potenciais impactos negativos a saúde, o Departamento de Energia dos Estados Unidos - ao mesmo tempo que confirma que os atuais trabalhos científicos não respondem a todos os questionamentos e lista uma série de pesquisas adicionais que precisam ser feitas, por outro reporta que “dado o

conjunto de incertezas e lacunas científicas, não deve haver, neste momento, mudanças nos critérios de seleção do sistema de iluminação” (DOE, 2010).

Justamente devido às incertezas e aos potenciais riscos à saúde e meio ambiente, Morgan-Taylor (2015) questiona se o princípio da precaução de riscos não deveria ser adotado nesta situação. Se aplicado o princípio à luz artificial, então a fonte que emite grande proporção na faixa de comprimento de onda do azul poderia ser considerada não segura, exceto se for comprovado que os malefícios à saúde e ao meio ambiente sejam menores que os indicados no estágio atual das pesquisas. Nesta direção, o Conselho da Europa criou uma resolução sobre poluição visual, com um pacote abrangente de recomendações, que encoraja pesquisadores a intensificarem pesquisa para mapear poluição visual, incluindo o tema em grade de currículos, visando determinação de nível máximo de iluminação em ruas e estradas para minimizar poluição (MORGAN-TAYLOR, 2015).

#### **e. Melhor reprodução de cores e melhor visibilidade**

A melhor visibilidade permite não só melhorar a qualidade para pedestres e motoristas na iluminação pública, como também potencializa o aumento da segurança viária.

Na aplicação de LED em sinalização semafórica, evita o chamado “efeito fantasma” que ocorre quando a luz do sol incide no sinal semafórico com lâmpada incandescente. Nestas situações de incidência de sol, a visualização se o sinal está aberto (verde) ou fechado (vermelho) fica muito prejudicada, dando a falsa impressão que as lâmpadas incandescentes estão todas ligadas, problema que é inexistente com o uso de LED (MENDONÇA e BORBOREMA, 2012), devido a menor reflexão da luz do sol.

A figura 24 a seguir ilustra a substituição de luminárias de vapor de sódio por luminárias LED na cidade de Boston, que tem um parque de iluminação com 64.000 pontos. Observa-se na figura que a iluminação a LED proporcionou uma distribuição de luz mais homogênea e a modernização teve um retorno positivo da população, que indicou melhor reprodução de cores e visibilidade (BOSTON, 2012; KIVIMAKI, 2013).



Figura 24 – Rua na cidade de Boston com iluminação a sódio (esquerda) e LED (direita).  
Fonte: BOSTON, 2012.

#### f. Atração de insetos e impacto na biodiversidade

Insetos tendem a voar em direção à luz. No entanto, eles não reagem de forma igual a todo comprimento de onda: são atraídos apenas por uma faixa de luz invisível aos olhos humanos do azul ao ultravioleta. Como os LEDs emitem pouco na faixa do ultravioleta, atraem menos insetos que uma fonte convencional de iluminação. Como consequência, tem menor tendência de serem contaminadas por insetos, facilitando manutenção, limpeza e higiene (BESSHO e SHIMIZO, 2012), minimizando também impacto ambiental em locais próximos a matas. A não emissão de raios UV também traz benefícios a iluminação de interiores, por exemplo em aplicação em museus (iluminação de obras de arte) pois não degrada pintura.

Por outro lado, outros estudos sinalizam que os benefícios não são claros neste quesito e ao contrário, demonstram – cientificamente – que a tecnologia LED tem impacto negativo na biodiversidade, citando que, independente de sua temperatura de cor, o LED promove maior atração de invertebrados que voam (PAWSON e BADER, 2014), assim como afetam algumas espécies de morcegos que habitam usualmente o espaço urbano (STONE et al, 2012).

Pawson e Bader (2014) sinalizam que a mudança no processo de geração de luz branca, pela combinação de 3 cores de LED, ao invés do uso de fósforo, talvez consiga minimizar este problema. Os autores reforçam a urgente necessidade da soma de esforços de pesquisa entre ecologistas e engenheiros de

forma a garantir que futuros desenvolvimentos minimizem ao máximo potenciais efeitos ecológicos (PAWSON e BADER, 2014).

**g. Baixa temperatura de operação**

Devido ser uma lâmpada “fria”, com baixa emissão de calor, nas aplicações de iluminação interiores oferece inúmeros benefícios em aplicações em vitrines em lojas que comercializam alimentos (pois não esquenta alimento) e também não contribui com calor ao ambiente, minimizando o consumo de energia em sistemas de refrigeração.

**h. Versatilidade na aplicação**

A versatilidade na aplicação permite o uso em inúmeras aplicações externas visando requalificação de espaço urbano que antes parecia inimaginável, como por exemplo na figura 25 abaixo, onde o LED foi empregado para melhorar a qualidade do espaço urbano, deixando a região embaixo de viaduto mais atrativa a pedestres e motoristas.



Figura 25 – Uso de LED para iluminação embaixo de viadutos.  
Fonte: ARUP, 2015.

Alguns autores relatam que essa versatilidade, associado ao baixo custo operacional da iluminação à LED dado sua eficiência, poderia gerar uma potencial explosão de consumo para novas aplicações, que poderia comprometer no longo prazo o objetivo de redução global do consumo de energia elétrica para iluminação (KYBA et al, 2014).

### **i. Facilidade para integrar sistema de telegestão e sistemas de ICT**

Uma propriedade importante do LED é poder ter seu fluxo luminoso reduzido, sem que impacte negativamente na vida útil da lâmpada ou sua emissão ótica, cor (BECCALI et al, 2015), o que já não ocorre por exemplo com tecnologias tradicionais como haleto metálico ou fluorescente (MORAN, 2011) e poder ser ligado ou desligado instantaneamente sem qualquer limitação como as lâmpadas VSAP (CAMPOS, 2014). Quando a esta capacidade, se considera que a rede de iluminação pode ser utilizada como uma plataforma para uma rede inteligente, que desempenha outras funções como por exemplo monitoramento de qualidade do ar (material particulado, ozônio), tráfego, consumo de energia, dentre outros, aumenta ainda mais a atratividade do uso da tecnologia LED (BECCALI et al, 2015).

Sistemas de telegestão tendem a aumentar a eficiência energética de sistemas tradicionais de IP (JÚNIOR et al 2012) e tem demonstrado potencial de incrementar ainda mais o desempenho do LED (CAMPOS, 2014; BECCALI, 2015). Dependendo do cenário do preço da luminária LED e custo de energia, pode não ser suficiente apenas substituir a lâmpada por LED. Ao contrário, se apenas o sistema de telegestão e automação for implantado, podem haver maiores potenciais de ganhos com o sistema de automação. Quando se associa as duas trocas, tecnologia LED e sistema de telegestão, o sistema então teria seu maior ganho (BECCALI, 2015). Avaliações caso a caso precisariam ser investigadas.

### 3.2

#### Mercado de Iluminação Geral e de IP

Em 2011, o faturamento estimado do mercado global de iluminação<sup>48</sup> foi de US\$ 95 bilhões<sup>49</sup> onde o setor de “iluminação geral” representou aproximadamente 75% ou US\$ 72 bilhões (MCKINSEY, 2012).

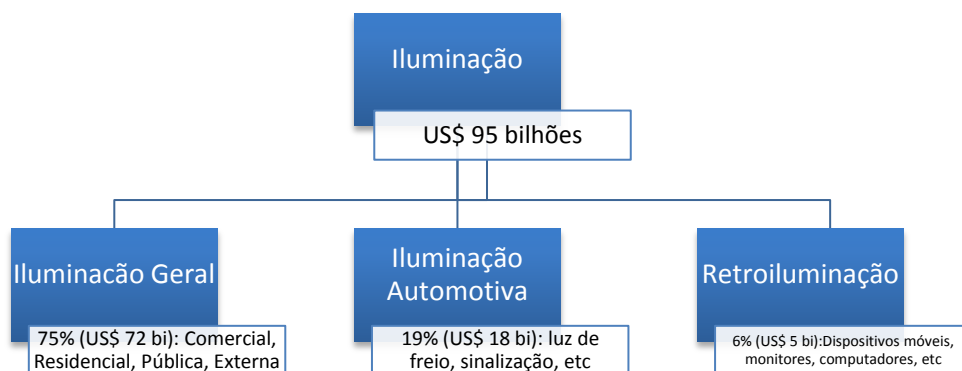


Figura 26 – Mercado de Iluminação.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de MCKINSEY, 2012.

Devido a oportunidade de redução de custos operacionais, crescentes evidências do desafio das mudanças climáticas e necessidade de aumento de segurança energética, tem-se observado uma intensa transformação no mercado na direção de produtos mais eficientes do ponto de vista energético. Há por exemplo consenso entre 66 países, entre desenvolvidos e em desenvolvimento, da necessidade de banir tecnologias de iluminação ineficientes. Enquanto os prazos e as tecnologias diferem entre os países, (se apenas incandescente ou também halógenas), de forma geral todos estes concordam em banir do mercado lâmpadas incandescentes até 2016 (DOE, 2014 - 3).

O Brasil é um dos países que aderiu a esta política. A legislação foi instituída pela Portaria Interministerial 1.007 de 31 de Dezembro de 2010. Desde

<sup>48</sup> Como citado no item 2, o mercado global de iluminação inclui “iluminação geral” (residencial, industrial, comercial, exterior) e também a automotiva -luz interior, de freio, de marcha ré, setas- e *backlighting* - tela de smartphone, computador, monitor, dispositivos móveis. Estes valores incluem toda a cadeia (novas instalações, novas lâmpadas, substituição, luminárias, sistemas de controle, etc).

<sup>49</sup> Considerando câmbio médio de 1 Euro = US\$ 1,39 no ano de 2011. Referência: site ONDA, disponível em <http://www.oanda.com/currency/historical-rates/>



junho de 2013 é proibida a venda de lâmpadas incandescentes de 100 e 150W e desde junho de 2014 é proibida venda de lâmpadas de 60W<sup>50</sup>. Até 2016, estarão banidas as de 40 e 25W. Na prática, a portaria especificou parâmetros mínimos de eficiência energética para estas lâmpadas e dado a limitação tecnológica, como as mesmas não atendem aos parâmetros, não podem ser comercializadas, ficando fora do mercado (BRASIL, 2010).

A intensa evolução tecnológica, evidenciada pelo crescente número de publicações e patentes, conforme figura 27, se traduz numa queda vertiginosa dos preços ilustrada na figura 28, que indica preços alvo tanto para as fontes de luz branca “fria” quanto “quente”.

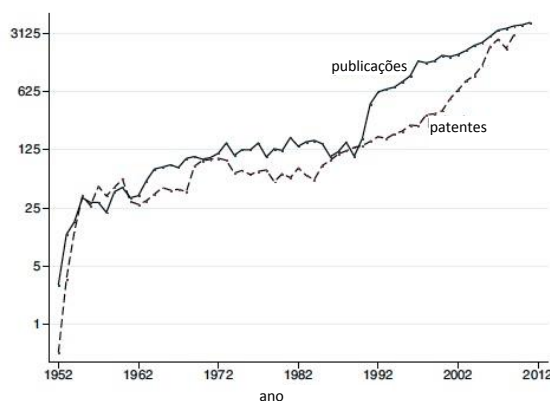


Figura 27 – Evolução do número de patentes e publicações.  
Fonte: SANDERSON e SIMONS, 2014.

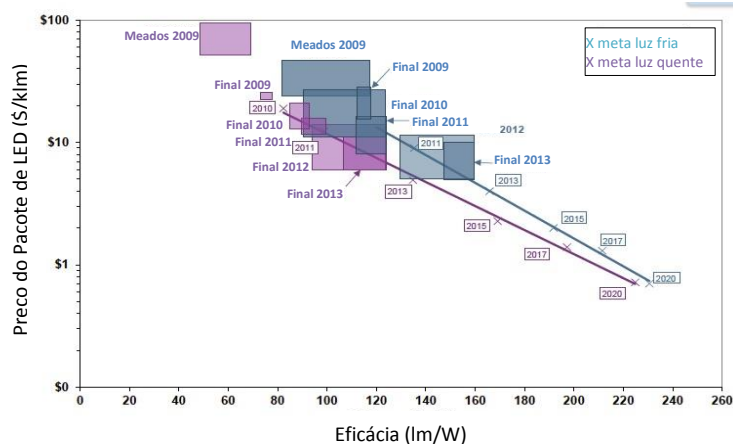


Figura 28 – Evolução do preço do pacote de LED e seu aumento de eficiência.  
Fonte: DOE, 2014d.

<sup>50</sup> Importante ressaltar que há várias exceções nesta Lei e dependendo do tipo de aplicação, a comercialização de lâmpadas ineficientes ainda hoje é possível, incluindo, por exemplo, a venda de lâmpadas incandescentes de filamento reforçado de 100W para uso em sinalização semafórica (BRASIL, 2010c).

A queda no preço tem sido acentuada nos diversos mercados. Para ilustrar, é utilizada como referência o mercado norte-americano para aplicação do LED em uso residencial (figura 29), onde em 2013 já era possível adquirir uma lâmpada LED em lojas de varejo no valor de US\$ 13,00, o que corresponderia a um preço normalizado de US\$ 16,00/klm. Em 2014, o preço esteve em US\$ 10,00 (US\$ 12,5/ klm). Além disso, para incentivar a adoção, diversas empresas de distribuição de energia elétrica têm oferecido desconto para aquisição das lâmpadas, fazendo com o que preço final ao consumidor seja tão baixo como US\$ 6,00/klm (DOE, 2014d). Comparando o preço atualmente praticado no Brasil, cerca de US\$ 31,20/ klm<sup>51</sup>, é evidenciada uma grande lacuna e um maior desafio para introdução da tecnologia no país.

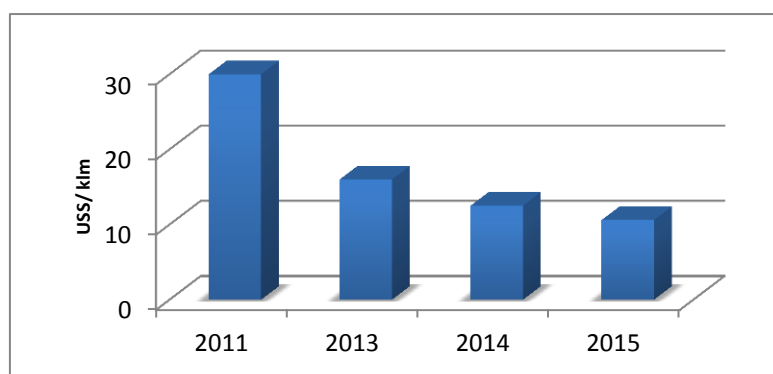


Figura 29 – Preço de lâmpada LED nos EUA – Uso residencial.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de DOE 2012, DOE 2014d e consulta em website na loja Amazon<sup>52</sup>.

Tendência similar de redução de preços é observada no mercado de LED para aplicação em iluminação pública. Ao longo dos últimos anos, o preço base nos Estados Unidos para uma luminária que oferece 8.000 a 10.000 lumens (substituição típica às lâmpadas de vapor de sódio de 150W ou vapor de mercúrio de 175W) caiu de US\$ 150/klm para cerca de US\$ 50/klm em 2013 (DOE, 2015). No Brasil, o preço estimado em 2013 é da ordem de US\$ 90/klm<sup>53</sup>, calculado a partir de MAURER e MEYER (2014)<sup>54</sup>.

<sup>51</sup> Cotação na loja Leroy Merlin para lâmpada Osram 60W, 2700 K, 810 lm. Disponível em <http://bit.ly/1QicgCz> Acesso no dia 3 de maio de 2015.

<sup>52</sup> Cotação na loja Amazon para lâmpada Philips 60 W, 2700 K, 800 lm. Disponível em <http://amzn.to/1VhZ2dC> Acesso no dia 03 de maio de 2015.

<sup>53</sup> Preço de R\$ 1.900,00 para uma lâmpada de 111W com eficiência de 93 lm/W e câmbio médio de R\$2,15/US\$.

<sup>54</sup> Além de inexistirem fábricas nacionais, o que eleva sobremaneira o preço final devido a impostos de importação, o fato de não haver escala por não haver mercado é outro fator que eleva o preço da luminária.

Associando à política de aumento de eficiência energética, a melhoria de performance da tecnologia e a queda de seu preço, tem-se então um cenário global muito favorável a indústria de luz em estado sólido, que por sua vez, revoluciona o mercado de iluminação. LED domina o mercado, com o OLED restrito a lâmpadas decorativas e projetos específicos customizados à necessidades de clientes.

Os dados de estimativa deste mercado em termos de vendas de unidades são controversos, dependendo do instituto de pesquisa, mas há consenso na ordem de grandeza no valor do mercado de LED e que sua participação é cada vez maior (DOE, 2014d).

A consultoria Mckinsey estimou que o mercado de LED em 2011 representou 12 % do mercado global de iluminação (MCKINSEY, 2012). Em 2013, a consultoria IHS estimou que as vendas de LED representaram 18% do faturamento daquele ano (DOE, 2014d). Para 2016, a consultoria Mckinsey estima que o mercado de LED represente 41% do valor total do mercado e em 2020 atinja 63%, onde o setor de iluminação geral deve possuir a maior fatia com US\$ 79 bilhões e participação de 69% (MCKINSEY, 2012). A figura 30 resume as projeções da consultoria Mckinsey para os três setores, iluminação geral, retro-iluminação e iluminação automotiva tanto em termos de participação do LED por setor e no mercado global.

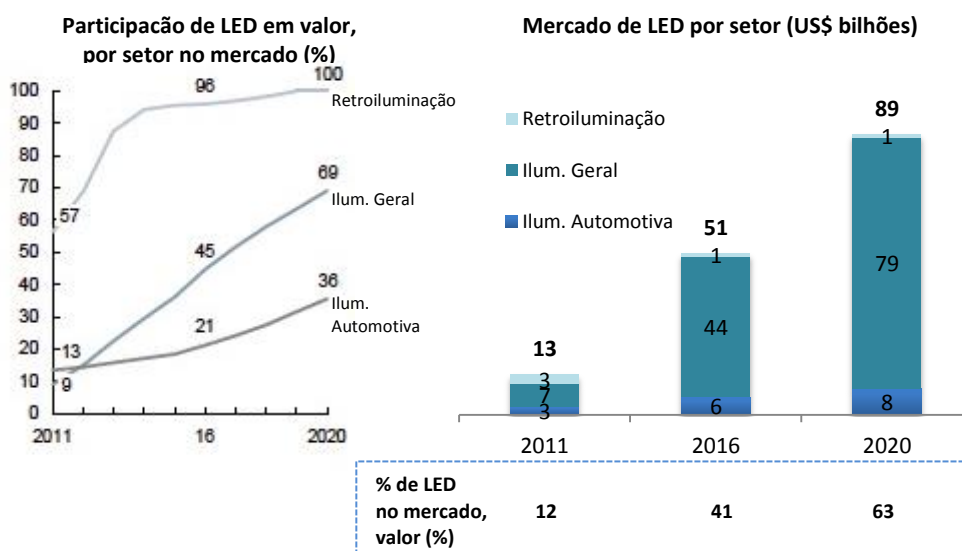


Figura 30 – Participação no mercado de tecnologia LED.

Fonte: MCKINSEY, 2012.

As projeções globais, apesar de terem pequenas divergências entre os diversos institutos de pesquisa, indicam de forma inequívoca um crescimento acentuado na participação da tecnologia LED, com taxa de crescimento anual acumulada de 33% no período de 2011 até 2016 e variando de 15% a 18% de 2016 até 2020 (MCKINSEY, 2012; DOE, 2014d; LEDinside, 2014).

No Brasil, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Iluminação (Abilux), o mercado brasileiro dos produtos de LED cresce mais de 30% ao ano, essencialmente com materiais importados (PORTAL BRASIL, 2014), pois como será visto a seguir, o Brasil e a América Latina, como um todo, não despontam no mapa desta inovação tecnológica.

### **3.2.1**

#### **A Indústria de Luz em Estado Sólido: principais players**

Os principais atores na indústria de luz em estado sólido estão localizados no Canadá, China, Coréia, Europa, Estados Unidos e Japão, conforme resumo apresentado na tabela a seguir.

De modo geral, todos estes países têm programas dedicados com apoio de recursos financeiros para P&D, além de programas de capacitação e apoio a municípios para avaliação da qualidade de produtos e suporte para implementação de projetos.

Observa-se uma intensa competição no mercado, acordos entre diversas empresas visando integralizar as distintas etapas de produção para redução de custos e otimização de processos e verdadeiras batalhas judiciais em relação à propriedade intelectual.

Tabela 8 – Principais Atores Mundiais no Mercado de LED.

Região	Canadá	China	Coréia do Sul	Europa	Estados Unidos	Japão
Programas dedicados	Resource Canada  Canadian Urban Institute	Ministério de Ciência e Tecnologia & NDRC Plano de estabelecer 20 bases industriais e 50 projetos em cidades. Meta de consolidar o país como um dos 3 maiores atores no mundo	Ministério de Economia e Conhecimento Plano que LED tenha penetração em 60% até 2020 (mercado nacional) e 100% nos setores públicos)	Comissão Europeia	US Department of Energy <sup>55</sup>	Ministério de Economia, Indústria e Comércio Plano de substituir lâmpadas por LED até 2020
Fundos						
Meta de redução de GEE associada	10%		NA			
Número de empresas no setor <sup>56</sup>	55	107	4	144	544	3
Algumas empresas líderes	LED Roadway Lighting	Epistar, Sanan Opto HC Semitek	Samsung, Seoul Vyosis LG Innotek	Philips Lumiled, Osram Opto	GE Soraa	Nichia
Organizações que promovem a tecnologia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lightsavers consorcio de municipalidades e empresas</li> <li>The Climate Group ONG que envolve diversas corporações, e governos regionais a nível global</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ISA – International Solid State Alliance ONG que envolve diversos fabricantes de LED e instituições acadêmicas</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>The Climate Group</li> <li>R20 ONG que envolve governos regionais e empresas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Light Research Center (NYC)</li> <li>Clinton Climate Initiative (CCI)</li> </ul>	

Fonte: Elaborado pela autora a partir de ELC/ CELMA, 2011; EUROPEAN COMMISSION, 2013; ISA, 2013; SANDERSON e SIMONS, 2014; LIGHTSAVERS CANADA, 2013; LEDINSIDE, 2015.

<sup>55</sup> O Departamento de Energia nos Estados tem diversos programas para fomentar a indústria de Luz de Estado Sólido, dentre elas o Programa Calipper (que visa testar lâmpadas e luminárias), o Programa Gateway (que visa criar projetos demonstrativos) e o Consórcio de Municípios para avaliação de Luz em Estado Sólido. De 2003 a 2012, investiu cerca de US\$ 300 milhões, que – de acordo com DOE – se traduziram em benefícios de US\$ 2,8 bilhões entre patentes, fortalecimento de indústria e lançamento de produtos no mercado. Disponível no link. Acesso em 21 de junho de 2015.

<sup>56</sup> Obtida pelo cadastro de diretório de fabricantes da LED Magazine, que é uma revista especializada em LED com grande penetração internacional. Disponível em <http://buyersguide.ledsmagazine.com/index.html> Acesso em 21 de junho de 2015.

No Brasil, apesar do país figurar em décimo terceiro lugar num ranking que mapeou os países que têm centros de pesquisa voltados a iluminação, lâmpadas e fontes de luz (KITSINELIS, 2011)<sup>57</sup>, no tema de LED, a produção científica não tem expressividade a nível global (SANDERSON e SIMONS, 2014) o que se reflete no mercado, onde, excetuando montagem de luminárias, não há fábrica de LED instalada no país (ALVARENGA, 2015; BRASIL ENGENHARIA, 2014). A experiência e capacitação para avaliação de LED está limitada a poucos centros de pesquisa, dentre os quais destacam-se Universidade Federal de Juiz de Fora (NOGUEIRA et al 2014, SIQUEIRA, 2010), UNESP – campus de Guaratinguetá<sup>58</sup>, além do CEPEL<sup>59</sup> e do INMETRO (INMETRO, 2013b<sup>60</sup>). No esforço de posicionar o país no mercado de semicondutor, destaca-se a iniciativa CI-Brasil<sup>61</sup> que tem como missão a criação e desenvolvimento de empresas de projetos de circuitos integrados no Brasil e criação de um ecossistema de microeletrônica. Dois centros de pesquisa de universidades compõem a rede na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)<sup>62</sup> e na Universidade de São Paulo (USP)<sup>63</sup>.

---

<sup>57</sup> Comparado com os países líderes, China, Coréia do Sul e Estados Unidos, o número de centros de pesquisa no Brasil dedicados ao tema, 17, representam apenas 6%, 8% e 9%, respectivamente, do total de centros dos países líderes.

<sup>58</sup> Em relação a UNESPL: <http://bit.ly/1PAJUqa>

<sup>59</sup> Em relação ao CEPEL: <http://bit.ly/1Xu57ov>

<sup>60</sup> Evidenciado aqui na liderança da regulamentação ainda em curso.

<sup>61</sup> CI-Brasil. Website <http://ci-brasil.gov.br/index.php/pt/o-ci-brasil/cenario>

<sup>62</sup> Sobre centro de pesquisa na UFRGS: Disponível em <http://bit.ly/1oimfkU>

<sup>63</sup> Sobre centro de pesquisa na USP Disponível em <http://bit.ly/215tUkU>

## 4

# UTILIZAÇÃO DE LED EM IP E ESTUDO DE CASO DE LOS ANGELES

Durante várias décadas, a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão tem sido considerada a tecnologia padrão de IP em todo o mundo, no entanto, significativos avanços tecnológicos na iluminação de estado sólido, ocorreram nos últimos anos, fazendo com que a aplicação de LED em IP seja uma das mais promissoras e onde mais avanços são previstos.

Sem dúvida, dos quatro setores de iluminação mapeados, IP é onde se observa um dos maiores potenciais de crescimento no curto prazo e onde há uma intensa política para promoção do uso do LED (STRATEGIES UNILIMITED, 2014), com previsão que a penetração no setor atinja 94% até 2023 (NAVIGANT, 2014). Abaixo, são apresentadas algumas das razões que explicam esta rápida expansão na aplicação em IP:

- É o setor que tem um dos maiores consumos de energia sob controle de uma única parte interessada (normalmente ou o município ou empresa de distribuição de energia elétrica). As lâmpadas tem alta potência, permanecem ligadas continuamente por mais de 8 horas, em túneis ficam 24 horas ligadas por dia e como consequência apresentam alto potencial de economia;
- Tem larga escalabilidade, pois ou município ou a empresa de distribuição de energia elétrica tem controle sobre todo o parque de iluminação envolvendo muitas vezes mais de 200 mil pontos de iluminação;
- No caso de municípios, o consumo de energia elétrica no parque de iluminação pública é dos mais representativos no gasto geral de eletricidade;
- Eventual depreciação de cor do LED, que seria crítica em aplicação para uso interno, não afeta tanto a aplicação para uso externo.

Um dos trabalhos mais extensivos que mapeou estudos de casos da aplicação de LED para IP foi desenvolvido por KIVIMÄKI que entrou em contato (por telefone e ou e-mail) com mais de 100 municípios ao redor do mundo para

levantar dados (KIVIMÄKI, 2013). A tabela a seguir apresenta um resumo de suas principais conclusões, considerando os municípios que retornaram resposta a consulta (cerca de 20%) e é complementada com dados adicionais levantados de outras cidades, por pesquisa de literatura. Os valores dos investimentos são apresentados em dólar canadense (CAD), dólar americano (US\$), libra esterlina (£) e um dado em reais (R\$).



Tabela 9 – Resultados de Uso de LED em IP em Diversos Municípios.

Localização	Nº de pontos	Invest. milhões (tempo de retorno em anos)	Resultados -%		Comentários
			EE	Man	
<b>América do Norte</b>					
<b>Canadá</b>					
Mississauga, ON	5.500	CAD 2,88 (6,1)	55	50	Feedback positivo de residentes
North Bay, ON	5.567	CAD 2,8 (8)	37	53	Financiado recursos próprios + EDEE
Welland, ON	4.300	CAD 2,4 (6,4)	74	60	Tornou obrigatório uso de LED
<b>Estados Unidos</b>					
Anchorage, AK	6.500	US\$ 2,2 (6,1)	50	25	Financiamento não reembolsável
Baltimore, MD	11.000	US\$ 4,1 (15)	65	33	Resistência da EDEE
Boise, ID	2.200	US\$ 1,2 (9,5)	50	45	TR alto, pois custo energia baixo
Boston, MA	30.000	US\$ 15,5 (11,8)	75	95	Ajustes para reduzir poluição luminosa
Brentwood, CA	5	US\$ 0,270 (4,3)	56	50	Financiamento com taxa de juros de 0%
Canton	1.100	US\$ 0,550 (9,2)	55	80	↑ iluminação, ↑ uso espaço público
Chattanooga, TN	2.000	US\$ 2 (20)	75	90	Sistema totalmente automatizado
Fallon, NV	2.200	US\$ 1.200 (7)	50	66	Diferentes percepções usuário ↑↑↑↑↑
Jackson Township, IN	4.900	US\$ 0,415 (11,3)	40	72	Resistência da EDEE
Las Vegas, NV	41.600	US\$ 18 (7,5)	50	71	Bonds governo federal financiou projeto
Los Angeles, CA	143.855	US\$ 57 (6,8)	58	61	Primeiro projeto de LED em larga escala
Portland, OR	22.500	US\$ 18 (8)	ND	ND	Articulação com EDEE foi crítica, Reportado problemas de ofuscamento
Salt Lake City	1.530	US\$ 0,875 (6,4)	50	100	Necessidade otimizar temperatura cor
Seattle	34.969	US\$ 18,5 (7,7)	48	43	Negociaram garantia de 10 anos
<b>Europa</b>					
<b>Reino Unido</b>					
Birmingham	90.000	£70	50		Parceria público privada e 24% de subsídios do governo para financiar
Leicestershire	16.400	£ 5 (14,3)	45	63	Recursos próprios para financiar
Walsford	6.200	£ 3.1 (13,8)	50	70	Feedback misto de residentes quanto a efeito de LED na segurança
<b>América Latina</b>					
<b>Argentina</b>					
Buenos Aires	91.000	ND	40	ND	Projeto inclui automação e gestão inteligente <sup>65</sup>
<b>Brazil</b>					
Itaipava, RJ	900 <sup>64</sup>	ND	30-40	ND	Retorno investimento 7 anos, garantia 5 (projeto piloto)
Manaus, AM	5.500	ND	ND	ND	Meta: instalar LED em 90% dos pontos <sup>66</sup>
Rio de Janeiro, RJ	3.300	ND	~ 50	ND	Aplicações em túneis, Lagoa Rodrigo de Freitas, Porto Maravilha, dentre outros
São Paulo, SP	715.000	R\$ 1,3 bilhões			Previsão de edital de PPP <sup>67</sup>

Fonte: Compilado pela autora a partir de BOSTON, 2014; BUENOS AIRES, 2014; DOE, 2015; G1 Amazônia, 2015; ILUME, 2014; KIVIMÄKI, 2013; NOGUEIRA et al, 2014; SEATTLE, 2014; THE CLIMATE GROUPE, 2012; BNDES, 2015.

<sup>64</sup> Fonte: <http://www.ufjf.br/noticias/2015/12/22/novo-sistema-de-iluminacao-de-led-na-ufjf-traz-maior-economia-e-durabilidade/>

<sup>65</sup> Fonte: Press Release - NYTimes <http://nyti.ms/1mGAzDm>

<sup>66</sup> Fonte: G1 Amazonia - <http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2015/08/avenida-das-torres-em-manau-recebe-iluminacao-de-led-diz-prefeitura.html>

<sup>67</sup> Fonte: G1-São Paulo <http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2015/10/tcm-autoriza-retomada-de-licitacao-da-ppp-da-iluminacao-publica-em-sp.html> e BNDES, 2015.

A diversidade de cidades na tabela reflete de certa forma informação mapeada na rede de cidades C40 Cities Climate Leadership Group que indica que são as cidades de maior PIB que lideram a utilização de LED em nível global (C40 e ARUP, 2014).

Observam-se algumas tendências que fogem a esta regra em cidades no Brasil. Está em curso em São Paulo, por exemplo, lançamento de edital para a concorrência – que está sendo avaliada como o maior projeto de LED do mundo, com modernização de 600.000 pontos e instalação de outros 175.000 pontos até o final do contrato (ILUME, 2014). No município de Manaus, a Prefeitura até agosto de 2015, já havia substituído 5.500 pontos com LED e anunciou meta de alcançar 90% do parque de iluminação com a nova tecnologia (G1 Amazônia, 2015). No município do Rio de Janeiro, segundo a RIOLUZ (2015), até junho de 2015, havia na cidade cerca de 3.300 pontos com aplicações em túneis, na ciclovia da Lagoa Rodrigo de Freitas, na região do Porto Maravilha, dentre outras áreas.

Há várias iniciativas piloto em curso no Brasil (COSTA, 2013) entretanto, excetuando estudos de caso em campus de universidades como por exemplo Universidade Federal de Juiz de Fora (NOGUEIRA et al, 2014), UNESP (SILVEIRA *et al*, 2010), Universidade de Piracicaba (CAMPOS, 2014), não foram encontrados registros de avaliação do desempenho por instituição independente após a implantação do projeto. Esta prática seria recomendável para mensurar qualidade fotométrica e verificar atendimento a norma de Iluminação Pública, NBR 5101:2012 (ABNT, 2012), além de avaliar os benefícios e impactos econômicos, ambientais e sociais.

#### 4.1

#### **Lições das Experiências com Uso de LED**

A partir da revisão de literatura, o Estados Unidos foi identificado como o país onde há mais tempo é dedicado um programa de incentivos e pesquisa para promoção da luz em estado sólido ou pelo menos que divulga dados e os torna público. Neste país, em 2012, pelo menos 400 municípios reportaram terem investigado o uso de LED e em vários deles, testes pilotos foram implementados (RESEARCH and MARKETS, 2012). Inúmeros são os programas desenvolvidos pelo governo através do Departamento de Energia (DOE) para fortalecer a

aplicação, cujas principais ações são (DOE, 2015a):

- Programa CALiPER<sup>68</sup> de testes e estudos exploratórios: avalia e reporta o desempenho de produtos LED que estão comercialmente disponíveis;
- Programa GATEWAY de projetos demonstrativos: realiza demonstrações práticas de LED em iluminação geral, desde uso residencial e comercial a iluminação pública;
- Processo de planejamento multianual de P&D;
- Atualização regular de estudos de mercado e esforços para realizar mapas de prospecção tecnológica;
- Realização de workshops anuais e eventos com as maiores indústrias do mercado;
- Extensiva interação com fabricantes, revendedores, designers de iluminação e consultores, instituições de pesquisa e associação de classes, municipalidades, empresas distribuidoras de energia elétrica, etc.

A partir desta extensa experiência que vem sendo adquirida desde 2006, o Departamento de Energia dos Estados Unidos publicou em 2014 um resumo das lições aprendidas neste período, resumida a seguir (DOE, 2014a).

- Lição 1 – Especialmente nos anos iniciais de adoção da tecnologia LED, testes rigorosos em lâmpadas e luminárias se fizeram necessários para conter exageradas declarações de desempenho de alguns fabricantes.

A indústria de iluminação utilizava a fotometria relativa como método tradicional, assumindo que fontes de luz eram omnidirecionais, uniformes e escalonáveis. Mas com a advento da iluminação em estado sólido, foi necessário adotar a fotometria absoluta, com criação de novas metodologias como a IESNA LM-89 que provocou significativa mudança na cultura de projeto, devido a complexidade da avaliação das luminárias (DOE, 2014a). Não basta avaliar uma luminária LED e extrapolar desempenho fotométrico para diferentes tipos de

---

<sup>68</sup> *Commercially Available LED Product Evaluation and Reporting (CALIPER)*. Em 2006, devido a falta de confiabilidade de produtos LED no Mercado, o Departamento de Energia dos Estados Unidos passou a adquirir produtos do mercado, em canais de venda tradicionais, para testes e avaliação. A partir deste esforço, houve aceleração de introdução de normas e especificações.

lâmpadas, mas testar cada luminária em si completa, como um só conjunto. Na fotometria absoluta condições operacionais e ambientais são mantidas constantes na avaliação do desempenho, entre estas a temperatura ambiente, processo de estabilização e orientação da luminária. Em relação ao último ponto, para ilustrar a maior complexidade, o processo de emissão de luz de um LED não é afetado pela orientação, mas a orientação da luminária pode alterar as condições térmicas do LED empregado na luminária, que por sua vez pode alterar a saída de luz da luminária. Vale ressaltar que mesmo novos testes de laboratório e especificações, talvez não sejam suficientes para prover todas as informações necessárias para assegurar um bom desempenho no campo (BIERMAN et al, 2012). A Prefeitura da Cidade de Los Angeles, por exemplo, não abriu mão de realização de testes de campo para qualificar fabricantes para participar de concorrências, o que se mostrou importante, pois nem todos os produtos pré-aprovados em avaliações de catálogo e de laboratório tiveram desempenho adequado em campo (CITY OF LOS ANGELES, 2011a).

Ou seja, a prática tradicional de simples escolha de uma lâmpada por sua potência (por exemplo, substituição de lâmpadas de vapor de mercúrio por lâmpadas de vapor de sódio, sendo conhecida sua luminária), não se aplica para a tecnologia LED.

- Lição 2 - Apesar da promessa de vida útil de longa duração, não há nenhuma maneira padrão para avaliar a vida útil e confiabilidade de produtos de LED.

Muitos esforços se concentraram no desenvolvimento de testes para medir a manutenção da intensidade luminosa ao longo da vida útil do LED, mas só este parâmetro não é suficiente para garantir o desempenho adequado da luminária. Conforme ilustrado nas figura 31 há diversas outras possibilidades de falhas nas luminárias LED, decorrentes de falha na gestão de potência, ótica, gerenciamento térmico, onde o problema em um componente pode comprometer a integridade de toda a luminária. Para ilustrar como as causas de falhas se associam aos diversos componentes da luminária, uma pesquisa qualitativa promovida pelo US DOE com membros de um grupo de especialistas da indústria foi realizada para que indicassem quais as falhas mais comuns observadas (considerando inclusive

falhas sob condições operacionais de grande estresse). A figura 32 mostra os resultados levantados, indicando o número de vezes que o problema foi detectado<sup>69</sup>.

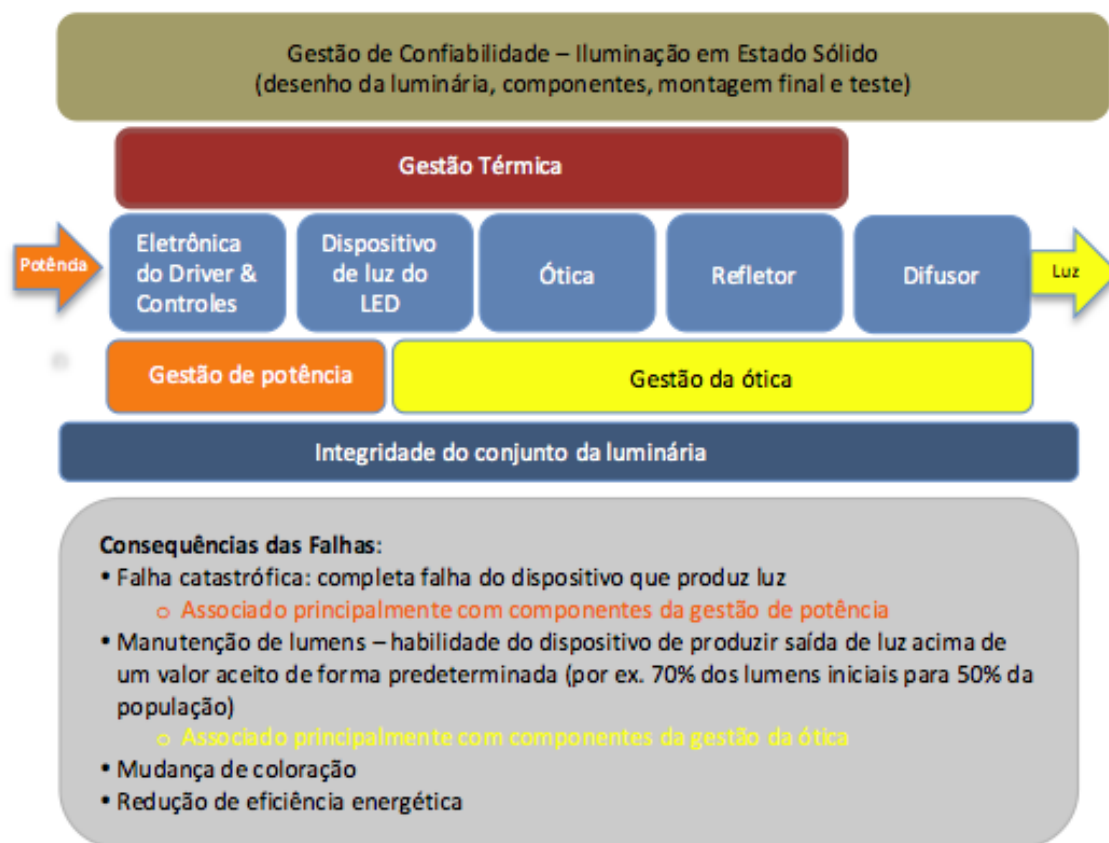


Figura 31 – Tipos de falha.  
Fonte: RTI International, 2013.

A negociação de garantias com fabricantes e forma de contratação do serviço, a contratação de seguros<sup>70 71</sup> para pagamento de financiamento em caso de desempenho do LED inferior ao projetado são pontos importantes a serem considerados. Para fabricantes, a avaliação de risco e modelagem estatística da degradação do LED são aspectos igualmente importantes, especialmente para contratação de seguros.

<sup>69</sup> Os dados não representam análise estatística de frequência de falhas, mas tem simples objetivo de ilustrar as diferentes falhas.

<sup>70</sup> Exemplo: produto financeiro desenvolvido pelo BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento para Colômbia. Disponibilizado em <http://bit.ly/21uhbYp>, acesso em 15 jan 2016.

<sup>71</sup> Exemplo: produto financeiro e securitização de economias de energia com resseguradora Munich RE. Disponibilizado em <http://wbg-eficienciaip.com.br/pdfs/wbg-eficienciaip-alvaronunez.pdf>, acesso em 15 jan 2016.

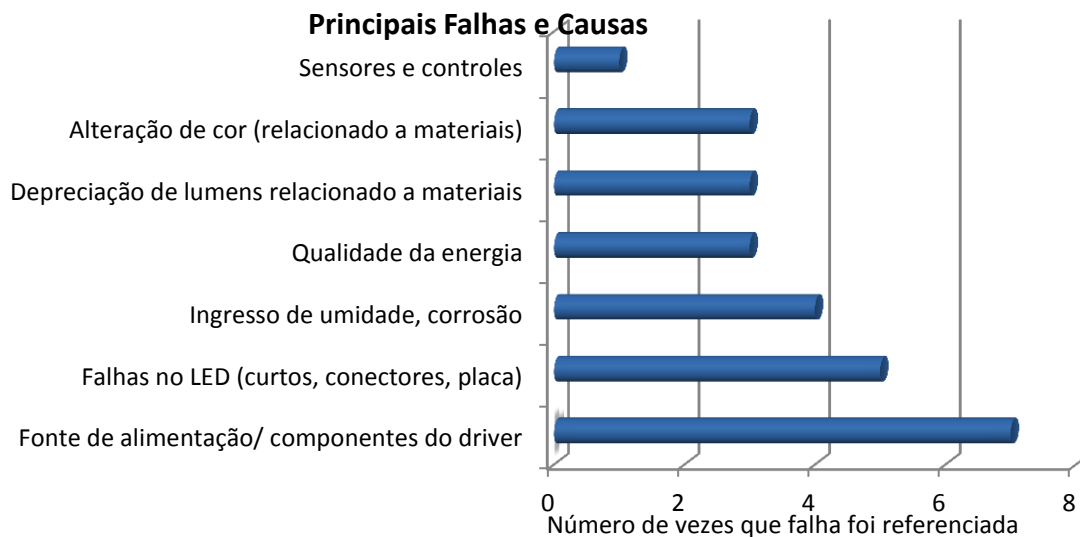


Figura 32 – Motivos de falhas do LED.  
Fonte: LSRC, 2014.

- Lição 3 - Especificadores preferem famílias completas de produtos, mas a rápida evolução da tecnologia LED apresenta um desafio para os fabricantes na criação e manutenção de linhas completas de produtos.
- Lição 4 - A gama da qualidade de cores disponíveis dos produtos à base de LED e as limitações de métricas existentes podem confundir usuários. Este ponto é especialmente crítico nas aplicações para uso interno.
- Lição 5 - A cor fornecida por alguns LEDs pode mudar ao longo do tempo, o suficiente para impactar negativamente a adoção em algumas aplicações (especialmente em aplicações para uso interno)
- Lição 6 - Alguns LEDs podem piscar visivelmente, o que pode impactar negativamente a adoção em algumas aplicações.
- Lição 7 - LEDs pode causar reflexos/ ofuscamento, o que pode impactar negativamente a adoção em algumas aplicações.

O desenho do sistema ótico varia bastante de fabricante para fabricante e modelos de luminárias. Portanto, testes de campo específicos devem ser realizados para evitar problemas. De forma geral, tem-se observado que temperaturas de cor mais elevada (mais “azulada) combinada a pequena abertura

do fecho de luz, tem maior probabilidade de gerar problemas de ofuscamento. Na cidade de Portland, por exemplo, após reclamações de problema de ofuscamento, foi solicitado aos fabricantes desenho luminária que permitisse o ajuste de intensidade luminosa. Assim, uma mesma luminária poderia emitir 3000, 4100 ou 5000 lumens, consumindo respectivamente 29, 42 e 54W. Em ruas residenciais, a opção foi de 3000 lumens. Graças a montagem de piloto e consulta à população, tais problemas puderam ser minimizados (DOE, 2015b). Isto reforça o ponto listado anteriormente (lição 1), destacando a mudança da cultura de projeto com luminárias LED.

- Lição 8 – O recurso de dimerização de alta qualidade em LEDs ainda representa uma dificuldade, se o mercado como um todo em suas distintas aplicações é considerado, especialmente caso se deseje utilizar o mesmo sistema de dimerização da lâmpada tradicional, mas já há grandes avanços.
- Lição 9 - Uma maior interoperabilidade de componentes de controle de iluminação e especificações mais precisas de sistemas de controle de iluminação são necessários para maximizar a economia de energia por fontes baseadas em LED.
- Lição 10 - Falta de manutenção e intercambialidade de produtos LED criou barreiras de adoção do mercado em determinados setores

Algumas cidades têm preferido optar por soluções de fabricantes de luminárias que permitam a habilidade de remover e substituir o reator (também chamado de dispositivo de controle ou fonte de alimentação ou ainda *driver* em inglês) se necessário. Alguns fabricantes assumem que nenhuma manutenção será feita no campo, por consequência os reatores ou não são acessíveis ou requerem maior recurso de mão-de-obra para removê-lo (CITY OF LOS ANGELES, 2011a).

- Lição 11 - A infraestrutura de iluminação existente pode limitar o potencial de iluminação em LED, gerando maior esforço para promover sua adoção.

- Lição 12 - Programas que fornecem maneiras de identificar produtos de LED de qualidade têm ajudado a fortalecer o mercado e facilitar sua adoção.

## 4.2

### Sobre a Cidade de Los Angeles e Histórico

A cidade de Los Angeles nos Estados Unidos implementou o primeiro projeto de LED em larga escala à nível mundial e hoje tem o maior parque de iluminação pública em LED no mundo, sendo reconhecido internacionalmente como um caso de sucesso (ESMAP, 2011; Harvard Kennedy School - Bright Ideas - 2012, DOE, 2013c).

Los Angeles é a maior cidade do estado da Califórnia, segunda mais populosa cidade nos Estados Unidos, com 4,1 milhões de habitantes e possui o segundo maior parque de iluminação pública daquele país, com 209.000 pontos de luz, cobrindo uma área de 1.214 km<sup>2</sup> e um total de mais de 11.000 km de ruas e avenidas. Este sistema de iluminação é mantido e operado pelo *Bureau of Street Lighting*, subordinado a Secretaria de Obras (*Department of Public Works*) da Prefeitura de Los Angeles. A conta de luz é paga mensalmente a empresa municipal de produção e distribuição de energia elétrica - Departamento de Água e Energia de Los Angeles (*Los Angeles Department of Water and Power*), a partir do consumo estimado de energia onde cada ponto de luz é georeferenciado. Os recursos para a manutenção do sistema, incluindo o custo do consumo de energia elétrica são obtidos pela cobrança de taxa à população que se beneficia do sistema de iluminação, gerando uma receita anual de aproximadamente US\$ 42 milhões. Motivada pela necessidade de reduzir o custo de manutenção e de energia, uma vez que a empresa de iluminação da cidade corria o risco de se tornar deficitária, o programa de eficiência energética, contando com apoio da ONG Clinton Climate Initiative, foi desenvolvido a partir de 2008 (CCI – CITY OF LOS ANGELES, 2009).

A Figura 33 a seguir ilustra as etapas de implementação do Programa que foi formalmente anunciado em fevereiro de 2009.



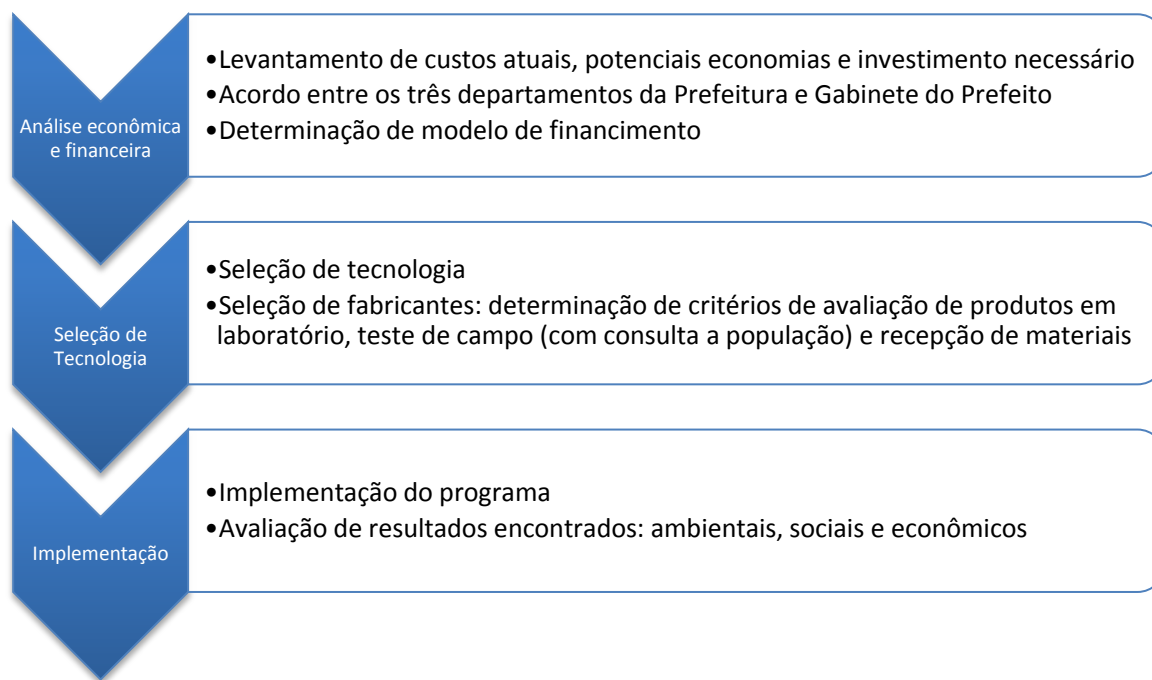


Figura 33 – Etapas para o desenvolvimento do Programa.  
 Fonte: Adaptado pela autora a partir de CCI – CITY OF LOS ANGELES, 2009.

### 4.3

#### **Análise econômico financeira**

A primeira etapa do projeto consistiu em verificar se este projeto era um “caso de investimento”. Para tanto, com apoio da Clinton Climate Initiative, foi desenvolvida uma planilha de análise econômico/ financeira usando plataforma em Excel e levantadas uma série de informações sobre operação, manutenção e previsão de investimento (CCI – CITY OF LOS ANGELES, 2009). A previsão inicial de investimento de US\$ 61 milhões foi depois revista pela Prefeitura para um total aproximado de US\$ 57 milhões.

Visando reconstruir o estudo de caso e calcular os benefícios ambientais e econômicos, são apresentados a seguir, as variáveis consideradas na análise e o resultado da simulação, usando a planilha financeira<sup>72</sup>, que está disponibilizada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos – “Ferramenta de Análise

<sup>72</sup> Fruto do esforço de realização da análise econômico financeira para esta aplicação, em conjunto com a CCI – Clinton Climate Initiative/ C40, Departamento de Energia dos EUA e o Programa de Gerenciamento de Energia do Governo Federal americano (Federal Energy Management Program - FEM) foi desenvolvida uma ferramenta, “*Retrofit Financial Analysis Tool*”, que desde 2012 é disponibilizada para uso público pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. A planilha pode ser utilizada em qualquer situação, bastando para isso empregar os dados específicos de cada cidade.

Financeira de Modernização do Sistema de IP” em seu site (DOE, 2013b). Todos os dados de entrada do modelo foram obtidos do estudo de caso original (CCI – CITY OF LOS ANGELES, 2009), exceto em situações específicas indicadas em nota de rodapé, onde o dado ou foi calculado ou atribuído pela autora.

- Custo de eletricidade<sup>73</sup> (US\$/ kWh) = 0,084
- Taxa anual de aumento do custo de eletricidade (%) = 4
- Custo do aluguel de veículo para realizar instalações (US\$/h) = 16
- Custo total mão-de-obra p/ instalação, considerando 12 funcionários (US\$/h) = 146
- Taxa anual de aumento do custo de mão-de-obra (%) = 2
- Taxa de desconto do projeto, custo de capital (%) = 7
- Fator de emissão (kgCO<sub>2</sub>eq/kWh) = 0,59
- *Overhead*, nº de pessoas necessárias para planejar e gerenciar o projeto de modernização: 2
- Custo *overhead*, custo de mão-de-obra para planejar e gerenciar projeto (US\$/h): 55 por pessoa
- Tempo de implementação do projeto (nº de anos) = 5

---

<sup>73</sup> Calculado a partir de informações sobre o gasto anual da conta de eletricidade de US\$ 16 milhões e o consumo anual de 190.000.000 kWh (CITY of LOS ANGELES, 2012).

Tabela 10 – Características do Parque de Iluminação: Antes x Proposta.

Vapor de Mercúrio (VM)				LED	
Watt lâmpada	Watt consumido	US\$ Manutenção luminária/mês	Nº pontos	Watt consumido	US\$ Manutenção luminária/mês
400	440	5,48	971	108	1,18
250	275	3,44	90	78	0,90
175	200	2,41	1391	50	0,55
100	120	1,51	6	39	0,47
Vapor de Sódio a Alta Pressão (VSAP)				LED	
400	465	5,61	1756	210	5,3
360	410	5,29	4	210	5,3
310	365	4,40	2399	153	5,3
250	295	3,56	8066	153	1,18
220	260	3,42	27	108	1,18
200	240	2,89	49884	108	1,18
150	190	2,29	17093	78	0,90
100	138	1,67	56627	50	0,55
70	86	1,04	2684	39	0,47
50	68	0,82	2	39	0,47
<b>Total</b>			<b>140.000</b>		

Fonte: Adaptado<sup>74</sup> pela autora a partir de CCI – CITY OF LOS ANGELES, 2009 e CITY OF LOS ANGELES, 2012.

- Número de horas em operação das lâmpadas (h/ ano) = 4.284
- Custo de descarte de lâmpadas: \$ 2.00 para lâmpadas que contém mercúrio e US\$ 0.25 demais
- Tempo de vida útil, requisitos de instalação e manutenção de cada tecnologia (conforme tabela 11)

O custo de manutenção para cada luminária apresentado na tabela anterior, envolve o custo de reparo programado (incluindo o custo destes materiais, custo de mão-de-obra, aluguel de veículo, tempo de reparo de cada componente da luminária), custo de compra de materiais, custo de limpeza, custo de descarte dos materiais e custo de reparo emergencial da luminária. Excetuando a lâmpada LED e a incandescente, as demais – ao final de sua vida útil, são consideradas resíduos perigosos (devido presença de mercúrio), devendo ser descartadas de maneira

<sup>74</sup> Os dados inicialmente estimados disponibilizados no relatório CCI-City of Los Angeles 2009, geravam uma economia no custo de manutenção e energia superiores ao declarado pela Prefeitura, daí o ajuste.

apropriada de acordo com a legislação visando reciclagem e recuperação do mercúrio e outros componentes.

Tabela 11 – Características das Tecnologias: vida útil e custos luminária.

<b>Tempo de Vida Útil</b>					
<b>Característica</b>	<b>VM</b>	<b>VSAP</b>	<b>Haleta metálico</b>	<b>Incandescente</b>	<b>LED</b>
Vida útil (h)	24.000	20.000	14.000	8.000	50.000
Vida útil (anos)	5,5	4,7	3,3	1,9	11,7 <sup>75</sup>
<b>Requisitos de Instalação</b>					
Custo luminária (US\$)	150	150	150	150	435
Varição do custo da luminária por ano (%)	0%	0%	0%	0%	-17%

Fonte: CCI – CITY OF LOS ANGELES, 2009.



Com um inventário de luminárias de mais de 400 tipos distintos, a Prefeitura de Los Angeles optou por priorizar a substituição das luminárias tipo *cobrahead* (conforme figura 34 ao lado), que representa a maioria dos pontos, para facilitar processo de avaliação e seleção de fabricantes e produtos. Tais pontos utilizam lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor de sódio.

Figura 34 – Luminária Tipo *Cobrahead*.

Fonte: CITY OF LOS ANGELES, 2012e.

Alimentando então a planilha disponibilizada pelo DOE com os dados de entrada apresentados anteriormente, as tabelas e figuras a seguir indicam os resultados do projeto.

<sup>75</sup> Na prática na simulação realizada, considerou-se que em 15 anos não haveria nova compra de luminárias LED.

O investimento total necessário para modernização dos 140.000 pontos para LED foi de US\$ 57 milhões, conforme detalhado na Tabela 12, considerando materiais (compra de novas luminárias e descarte das antigas), mão de obra (instalação e gerenciamento do projeto) e leasing de veículo para instalação.

Tabela 12 – Componentes do Custo de Capital (US\$).

Ano	Material	Mão-de-obra	Veículo	Descarte	Overhead
1	\$13.519.800	\$1.226.400	\$134.400	\$56.000	\$211.200
2	\$11.221.434	\$1.250.928	\$139.776	\$56.000	\$211.200
3	\$9.313.790	\$1.275.947	\$145.367	\$56.000	\$211.200
4	\$7.730.446	\$1.301.465	\$151.182	\$56.000	\$211.200
5	\$6.416.270	\$1.327.495	\$157.229	\$56.000	\$211.200
	<b>\$48,2 milhões</b>	<b>\$ 6,4 milhões</b>	<b>\$728 mil</b>	<b>\$280 mil</b>	<b>\$1 milhão</b>

Fonte: Elaborado pela autora com a ferramenta disponibilizada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2013b).

A modelagem da modernização indicou significativos benefícios ambientais, com redução de 58% de emissões (figura 35) e econômicos, conforme pode ser verificado na figura 36, onde tempo de retorno é de 8 anos, com TIR de 17% e valor presente líquido positivo, no valor de US\$ 30 milhões.

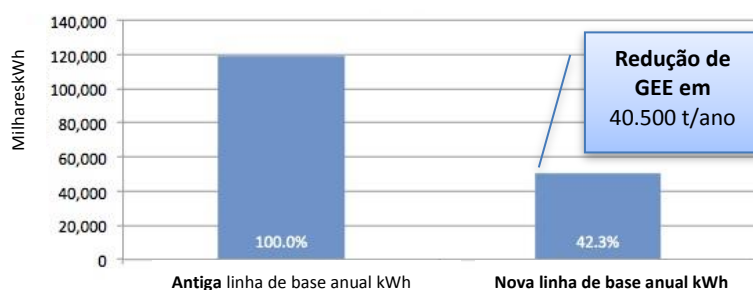


Figura 35 – Redução Consumo de Energia e de Emissões de GEE.

Fonte: Elaborado pela autora com a ferramenta disponibilizada pelo DOE (DOE, 2013b).



Figura 36 – Fluxo de Caixa Simples Acumulado.

Fonte: Elaborado pela autora com a ferramenta disponibilizada pelo DOE (DOE, 2013b).

### 4.3.1

#### Modelo de Financiamento e Construção do Plano de Negócios

Uma vez constatado os benefícios econômicos, a próxima etapa do projeto foi definir o modelo de financiamento a ser utilizado. Segundo Clinton Climate Initiative (CCI – CITY OF LOS ANGELES, 2009), os principais resultados da avaliação econômica em conjunto com as metas desejadas para financiamento (com foco em pagamento do empréstimo a partir de economia de energia) foram consolidados e encaminhados para vários agentes e instituições financeiras para recebimento de propostas.

A partir do conjunto destas informações, foi então construído o Plano de Negócios, incluindo as opções de financiamento do custo de capital total de R\$ 56,6 milhões. Deste montante, apenas 30% poderia ser arcado pela própria Prefeitura: US\$ 3,6 milhões com recursos próprios e US\$ 13,2 milhões como um crédito para cada kWh de energia economizada, fornecido pela empresa de fornecimento e distribuição de água e energia, que é do município, totalizando então US\$ 16,8 milhões como capital próprio. O restante do recurso foi obtido através de obtenção de empréstimo, detalhado a seguir.

Refazendo a avaliação econômica, considerando o crédito por economia de energia no fluxo de caixa, o projeto ficou ainda mais atrativo, conforme ilustrado na figura 37. Há um aumento da taxa interna de retorno de 17 para 24%, redução do tempo de retorno sobre o investimento de 8 para 7 anos e aumento do VPL em US\$ 10 milhões.

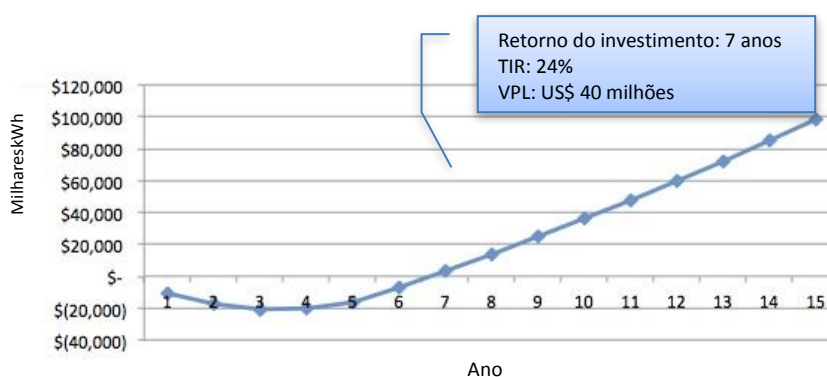


Figura 37 – Fluxo de Caixa Simples Acumulado com Crédito por Economia de Energia.  
Fonte: Elaborado pela autora com a ferramenta disponibilizada pelo DOE (DOE, 2013b).

Para complementar o capital próprio, foi necessário então levantar empréstimo de US\$ 39,8 milhões. A Tabela 13 ilustra toda a composição das fontes de financiamento: capital próprio, descrito anteriormente e empréstimo (contração de dívida). Importante ressaltar que a viabilização do empréstimo foi alcançada pela negociação de taxa de juros (5,25% ao ano) e prazo de pagamento (7 anos) de forma que a amortização das parcelas fossem feitas com as próprias economias de energia e manutenção, sem necessidade de aumento de impostos ou taxas de arrecadação para viabilizar o fluxo de caixa operacional do projeto.

Tabela 13 – Composição do Financiamento

<b>Custo Total do Projeto</b>	<b>\$56,6 milhões</b>	
<b>Capital Próprio</b>	<b>\$16,8 milhões</b>	<b>30%</b>
Recursos próprios ( <i>Bureau of Street Lighting</i> )	\$ 3,6 milhões	
Crédito economia de energia (Fornecedora e Distribuidora de Energia) <sup>76</sup>	\$13,2 milhões	
<b>Dívida Total</b>	<b>\$39,8 milhões</b>	<b>70%</b>
Empréstimo de 5 parcelas anuais de US\$ 7,96 milhões a serem amortizadas em 7 anos a taxa de 5,25% aa		

Fonte: CCI-CITY OF LOS ANGELES, 2009.

A tabela 14 ilustra o novo VPL e TIR do fluxo de caixa do projeto, considerando o pagamento do empréstimo (coluna b) e compara o impacto deste financiamento à avaliação puramente econômica (coluna a). O VPL do fluxo de caixa permanece positivo (cerca de R\$ 30 milhões), com uma TIR atrativa (23%). Verifica-se uma redução do VPL de R\$ 10 milhões, visto que as economias tiveram de ser parcialmente empregadas para quitar o empréstimo. A conclusão mais importante e significativa, é que a simulação demonstrou a viabilidade que o projeto era de fato um “caso de negócios”.

Tabela 14 – Análise – Impacto do Financiamento.

Análise	Associado a avaliação econômica (a)	Associado ao capital próprio e financiamento (b)
VPL do Fluxo de Caixa Líquido (15-anos)	\$40.845.457	\$29.821.077
VPL do Fluxo de Caixa de Economias (15-anos)	\$77.425.322	\$44.581.186
TIR projeto (incluindo crédito energia) (15 anos)	24%	23%

Fonte: Elaborado pela autora com a Ferramenta disponibilizada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2013b).

<sup>76</sup> O valor é equivalente a US\$ 0,19 por cada kWh economizado ao ano com o projeto.

A Tabela 15 consolida os principais resultados do projeto.

Tabela 15 – Resumo do Projeto.

<b>Número de Luminárias Instaladas</b>	<b>140.000</b>
<b>Tempo de Implementação do Projeto (anos)</b>	<b>5</b>
<b>Período de Análise (anos)</b>	<b>15</b>
<b>Tempo de retorno simples (anos)</b>	<b>6,6</b>
<b>TIR – 15 anos (avaliação econômica)</b>	<b>24%</b>
<b>VPL – 15 anos (US\$)</b>	40.845.457
<b>Custos de Capital (US\$)</b>	<b>56.647.929</b>
<b>Economia anual de energia (kWh)</b>	<b>68.805.870</b>
<b>Economia anual de energia (US\$)</b>	<b>7.031.880</b>
<b>Economia anual de manutenção (US\$)</b>	<b>2.744.371</b>
<b>Emissões GEE evitadas (tCO<sub>2</sub>e/ano)</b>	<b>40.595</b>
<b>% de economia de energia/ economia total</b>	<b>72%</b>
<b>% de economia manutenção/ economia total</b>	<b>28%</b>
Linha de Base anual anterior - kWh	119.194.976
Linha de Base anual anterior (tCO <sub>2</sub> e)	70.325

Fonte: Elaborado pela autora com a Ferramenta disponibilizada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2013b).

#### 4.4

#### Seleção de Tecnologia

A tecnologia LED foi selecionada em detrimento a lâmpada de indução, pois já em 2009 a mesma apresentava melhor desempenho fotométrico, melhor retorno sobre o investimento e havia também a perspectiva de contínua queda de preços e melhoria tecnológica do LED. Como a cidade já vinha realizando testes piloto com LED por 4 anos e dado o resultado da avaliação do Plano de Negócios, a opção tecnológica por LED pode ser definida com segurança. Fabricantes foram então comunicados e convidados a participar de um processo de qualificação para posterior participação em licitação pública.

Uma vez que a tecnologia LED está em constante inovação e aperfeiçoamento, de forma a garantir a atualização tecnológica durante todos os 5 anos do ciclo de implementação do projeto, a aquisição das novas luminárias LED foi programada para ser feita a cada 6 meses, através de uma nova licitação, incluindo etapa de testes de campo (CITY OF LOS ANGELES, 2009).

A avaliação técnica de produtos compreendia uma seleção inicial para filtrar e pré-selecionar fabricantes para então prosseguir na etapa de testes extensivos de campo durante 90 dias, que compreendia avaliação mecânica,



elétrica e fotométrica (CITY OF LOS ANGELES, 2009; CITY OF LOS ANGELES, 2011a).

- Avaliação mecânica (em laboratório e no campo)
- Avaliação elétrica
  - o Tensão
  - o Fator de potencia: maior ou igual a 0,9
  - o Distorção harmônica total: menor que 15%
  - o Tempo de vida útil declarado pelo fabricante: 50.000 horas
  - o Potência (medida no laboratório e no campo) e redução comparada a potência da lâmpada de vapor de sódio de alta pressão correspondente (ver tabela a seguir)

Tabela 16 – Consumo máximo de potência do LED para atingir economia de energia desejada.

**100W VSAP lâmpada e reator consomem: 138W**

LED que substitui deve consumir até: 53W (em uso) e 2,5 W fora de uso

**150W VSAP lâmpada e reator usam: 190W**

LED que substitui deve consumir até: 115W (em uso) e 2,5 W fora de uso

**200W VSAP lâmpada e reator usam: 240W**

LED que substitui deve consumir até: 140W (em uso) e 2,5 W fora de uso

**310W VSAP lâmpada e reator usam: 365W**

LED que substitui deve consumir até: 150W (em uso) e 0,5 W fora de uso

**400W VSAP lâmpada e reator usam: 465W**

LED que substitui deve consumir até: 210W (em uso) e 2,5 W fora de uso

Fonte: CITY OF LOS ANGELES 2011a,b,c e CITY OF LOS ANGELES 2012a, b, c.

- Avaliação fotométrica/ qualidade de iluminação
  - o Medição de iluminância fotóptica e escotópica
  - o Desconforto causado por ofuscamento medido em até 21 diferentes locais que poderiam potencialmente causar problemas para pedestres e motoristas
  - o Pesquisa de percepção com motoristas e pedestres
  - o Matriz ponderada para avaliação dos equipamentos LED, desenvolvida pelo próprio Departamento de Iluminação da Prefeitura de Los Angeles, composto por diversos parâmetros, incluindo (CITY OF LOS ANGELES, 2011a):
    - Cumprimento a norma IES LM-79 (norma técnica desenvolvida pela IESNA que especifica a medição do desempenho elétrico e fotométrico dos produtos de iluminação LED. Seu foco está na definição de protocolos de medição para fluxo luminoso, potência elétrica, cromaticidade e distribuição de intensidade luminosa)

- Cumprimento a norma IES LM-80 (norma técnica desenvolvida pela IESNA que determina a manutenção de lumen relativa a toda extensão da vida útil do produto)
- Participação no programa de teste do Departamento de Energia, CALiPER
- Certificação “*Energy Star*” ou atendimento aos critérios definidos pelo programa
- Avaliação da qualidade da construção/ montagem da luminária (inspeção visual baseada em qualidade da peça, durabilidade, se é à prova d’água, dentre outros critérios)
- Tempo de vida útil estimado pelo fabricante
- Facilidade de instalação das luminárias
- Avaliação de iluminância comparada a lâmpada de vapor de sódio tradicional
- Iluminância, razão de uniformidade baseada em norma IES
- Reatores: controle e acesso
- Avaliação de redução de potência
- Avaliação do desconforto causado por ofuscamento ( $\text{cd/m}^2$ )
- Avaliação de garantia (garantia da lâmpada LED, driver e corpo da luminária)

## 4.5

### Resultados

Antecipando em 2 anos a conclusão do projeto, em 2012 a Cidade finalizou a substituição de 141.089 pontos de luz com lâmpadas LED, de seu total de 209.000 pontos. Antes do programa o sistema consumia 168 GWh com um custo anual de US\$ 15 milhões, enquanto emitia 110.000 toneladas métricas de dióxido de carbono. O novo sistema reduziu o uso de energia em 63.1% e reduziu as emissões de carbono em mais de 47.000 toneladas métricas por ano (CITY OF LOS ANGELES, 2012d). Os resultados qualitativos de pesquisa de percepção com moradores foi também muito positivo e foi reportado redução de crime na cidade, que a prefeitura associa a melhoria de desempenho da iluminação (CITY OF LOS ANGELES, 2012e). Do ponto de vista de poluição luminosa, o resultado

foi expressivo, obtendo reconhecimento por organizações independentes como a organização não-governamental *Dark Skies Association*<sup>77</sup>.

Em 2009, quando do início do projeto, previu-se um retorno sobre o investimento em 7 anos, com uma redução no consumo de energia de 40%. Na prática, em 2011, observou-se redução de 58% do consumo, fazendo com que sua implementação fosse antecipada e acelerada (C40, 2011) sendo concluída em 2012 (CITY OF LOS ANGELES, 2012d).

Conforme depoimento do representante da Prefeitura “nem todas as declarações dos fabricantes são verdadeiras”. Para garantir segurança no investimento, o Departamento de Iluminação conduz testes e avaliações prévias de cada luminária para garantir adequada performance. Ainda segundo relato da Prefeitura, outro ponto importante é a forma de aquisição das luminárias para contemplar o rápido avanço da tecnologia. As compras foram realizadas a cada 6 meses, de forma incorporar melhorias e usufruir de benefícios financeiros (CITY OF LOS ANGELES, 2012e). Num intervalo de 6 meses, entre abril e setembro de 2012, o custo unitário da luminária caiu 37% de US\$ 495 para US\$ 309 (GERDES, 2013).

Desde 2009 até setembro de 2015, num processo que conta agora com a solicitação direta de moradores para instalação do sistema LED – que pagam pela instalação e manutenção - mais 23.178 pontos foram substituídos, totalizando 164.267 pontos com LED, reduzindo emissões de gases de efeito estufa em 58.866 toneladas ano, além de reduzir a despesa com custo de energia em mais de US\$ 8,8 milhões (CITY OF LOS ANGELES, 2015).

#### 4.5.1

### **Resumo dos Impactos Socioambientais e Econômicos**

Considerando o período de avaliação 2009 – 2012, um resumo dos parâmetros relacionados aos impactos socioambientais são listados abaixo:

- Consumo de energia: redução do consumo de energia em 63%, proporcionando uma economia anual de 99 GWh;

---

<sup>77</sup> Referência sobre Dark skies association neste site da Prefeitura de Los Angeles - <http://bsl.lacity.org/led.html>

- Emissão de gases de efeito estufa: redução de emissão de 47.000 tCO<sub>2</sub>eq/ano. Apesar do valor expressivo, representa menos de 1% das emissões totais da cidade de Los Angeles, que é 32,29 milhões de tCO<sub>2</sub>eq/ano<sup>78</sup>.
- Tratamento e disposição de resíduos e metais pesados: desde 2009, as lâmpadas instaladas funcionam à contento com expectativa de terem vida útil de 3 a 4 vezes superior que lâmpadas tradicionais., Por conseguinte, há menor necessidade de tratamento, reciclagem e disposição de resíduos. Dentre os resíduos, se destaca a eliminação da presença de mercúrio da ordem de 3,1 kg<sup>79</sup>. A previsão inicial era que todas as lâmpadas de vapor de sódio e mercúrio seriam descartadas, mas como tinham ainda expectativa de vida útil, as mesmas foram leiloadas rendendo recursos de US\$ 513.000,00.
- Percepção de qualidade visual: melhor reprodução de cores e melhor visibilidade (tanto para pedestres como motoristas). A figura 38 a seguir ilustra qualitativamente a diferença;

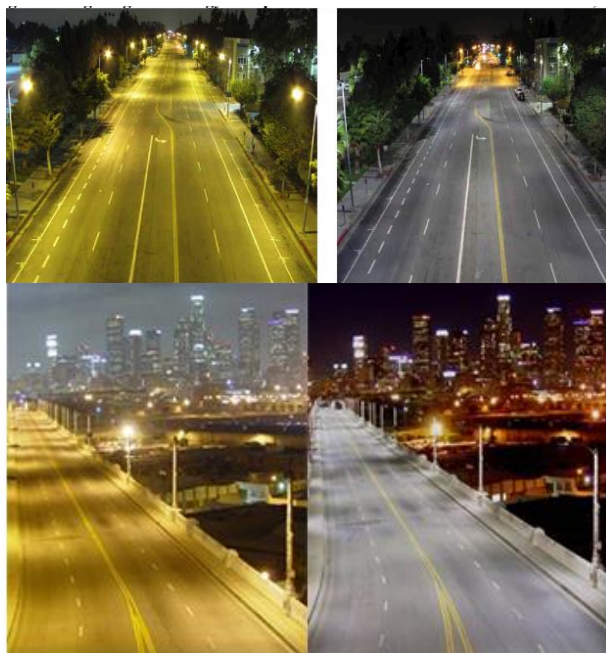


Figura 38 – Iluminação em Vapor de Sódio (esquerda) e LED (direita).  
Fonte: CITY OF LOS ANGELES<sup>80</sup>.

<sup>78</sup> <http://www.c40.org/cities/los-angeles>

<sup>79</sup> Na ausência de indicação da quantidade de mercúrio nas lâmpadas utilizadas, foi considerado teor médio de 19 mg de mercúrio nas 164.267 lâmpadas substituídas (SILVA, 2010).

<sup>80</sup> Fotos disponíveis neste website: <http://bit.ly/1PB9A5L> Acesso em 5 jul 2015.

Em geral, a luz branca foi bem recebida por residentes. Apesar de a maioria dos fabricantes ter encaminhado amostras para testes com faixa de temperatura entre 5.500K e 6.000K, a equipe de avaliação percebeu que nesta temperatura havia produção de uma cor azulada que gerava incômodo a algumas pessoas e causava ofuscamento. Como resultado, a Prefeitura especificou uma cor mais quente na faixa de 4.300 K<sup>81</sup>, decisão esta que significou conceder uma pequena porção do potencial de eficiência energética e priorizar a escolha de luminárias que reduzissem o ofuscamento (CITY OF LOS ANGELES, 2009).

- Percepção de segurança: segundo levantamento pela Prefeitura, comparando os anos de 2009 a 2011, no período de 19h à 7h, houve redução de 10% na taxa de crimes, incluindo roubos, furtos e vandalismo, que – segundo relato - pode ser atribuído em parte a melhor iluminação, o que também refletiu na resposta a uma pesquisa à população que houve aumento de percepção de segurança (CITY OF LOS ANGELES, 2012e).
- Poluição luminosa: todas as luminárias tinham distribuição totalmente limitada (de acordo com figura 7d) e o parâmetro poluição luminosa foi um dos pontos considerados na avaliação de desempenho, minimizando luz intrusa (espalhamento pelas laterais que invade locais adjacentes ao ponto luminoso como janela de residências), espalhamento de luz para atmosfera e ofuscamento. Como resultado, conforme identificado qualitativamente na figura a seguir, houve significativa redução da poluição luminosa (aqui expresso em termos de brilho no céu).

---

<sup>81</sup> A cidade de San Diego optou por especificar LED na faixa de 3000K devido a familiaridade com iluminação por sódio e para preservar Observatório Astronômico de Palomar (DOE, 2010). Já recomendação da organização Dark Skies Association para minimizar poluição luminosa é especificar em no máximo 3000K (<http://darksky.org/led-retrofit-revolution/>)



Figura 39 – Redução da poluição luminosa em Los Angeles.  
Fonte: CITY OF LOS ANGELES, 2012e<sup>82</sup>.

Em relação aos benefícios econômicos:

- Redução do custo de energia em 58%
- Redução do custo de manutenção em 61%

O projeto demonstrou ser um excelente “caso de investimento” com taxa interna de retorno superior a 23% e tempo de retorno sobre o investimento inferior a 7 anos.

- Custo da tonelada de CO<sub>2eq</sub> evitada: calculou-se a relação do valor presente líquido em relação as toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas no período de 15 anos.

$$\text{Custo abatimento} = - \text{VPL} / \text{t CO}_{2\text{eq}} = - \text{US\$ } 29.821.077 / 527.741 = - \text{US\$}57$$

Ou seja, o custo de abatimento das emissões de gases de efeito estufa nesta aplicação é negativo, demonstrando que reduzir as emissões na prática gera lucro e melhora o desempenho econômico-financeiro.

<sup>82</sup> Fotos disponíveis neste website: <http://bsl.lacity.org/led-news-media.html#prettyPhoto> Acesso em 5 jul 2015.

## 5

# POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA COM A INTRODUÇÃO DA TECNOLOGIA LED EM ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL: ANÁLISE, DESAFIOS E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo, será analisado o potencial de economia de energia caso o sistema de IP no Brasil seja convertido para a tecnologia LED e, em seguida, serão destacados os desafios para introdução desta tecnologia e recomendações para rompê-los.

Inicialmente, será feita uma análise do inventário de lâmpadas de IP no Brasil, que é parte fundamental para a determinação do potencial de economia de energia.

### 5.1

#### **Análise do Inventário de Lâmpadas de IP no Brasil**

Na atual legislação brasileira, é de competência dos municípios<sup>83</sup> as responsabilidades de gestão, projeto, implantação, expansão, operação e a manutenção do sistema de iluminação pública (ANEEL, 2010 e ANEEL, 2012). Para custear este serviço, segundo emenda constitucional “Emenda Constitucional nº 39 de dezembro de 2002”, os municípios e o Distrito Federal poderão instituir contribuição, na forma das respectivas leis, para o custeio do serviço de iluminação pública (BRASIL, 2002).

O faturamento das contas de consumo de energia elétrica associadas à iluminação pública é realizado pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica, em geral através de cadastro dos pontos de iluminação pública dos municípios. Esse cadastro contém as quantidades de pontos, segregados por tipo de tecnologia utilizada nas lâmpadas e potência (SILVA, 2006).

---

<sup>83</sup> Existe um processo em trâmite no Senado Federal (já aprovado na Câmara de Deputados) que visa sustar o art. 13 da Resolução Normativa nº 479, de 3 de abril de 2012, e os arts. 21 e 218 da Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, da Agência Nacional de Energia Elétrica — ANEEL, que repassa aos Municípios a responsabilidade pelos serviços. Disponível em <http://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/120998> Acesso em 28 de dez 2015.

O país não conta com um cadastro consolidado, atualizado regularmente, com os tipos de lâmpadas em uso. Fruto dos esforços do programa RELUZ, a Eletrobrás vinha desempenhando este papel (SILVA, 2006), mas com a Lei 12.783/ 2013 que desobrigou as concessionárias de energia elétrica do recolhimento de RGR – Reserva Global de Reversão - que era a fonte de recursos utilizada para financiar o programa RELUZ (BRASIL, 2013), o mesmo está descontinuado por falta de verbas e o último inventário disponível consta de 2012 (SIQUEIRA, 2015), conforme apresentado a seguir.

Como uma atualização deste cadastro junto as distribuidoras de energia elétrica envolveria uma demanda além do objetivo desta pesquisa, a estimativa técnica de economia será feita com base no dado de 2012.

Tabela 17 – Cadastro de Lâmpadas de IP no Brasil – Tipos e Potência.  
Ano Base 2012

Tipo de Lâmpadas	Número de Lâmpadas	Participação por tipo de lâmpada (%)	Potência (kW)	Participação por potência (%)
Vapor de Mercúrio	3.799.133	23,65	592.068	22,97
Vapor de Sódio	11.414.217	71,05	1.814.081	70,39
Multi Vapor Metálico	201.218	1,25	82.503	2,97
Mistas	283.346	1,76	55.343	2,15
Incandescentes	188.459	1,17	26.120	1,01
Fluorescentes	160.405	1,00	7.937	0,31
Halógena	10.939	0,07	4.706	0,18
Compacta	4.189	0,03	169	0,01
LED	436	< 0,002	43	<0,002
Outras	1.773	0,01	281	0,01
<b>Total Geral</b>	<b>16.064.115</b>	<b>100.00</b>	<b>2.582.801</b>	<b>100.00</b>

Fonte: Elaborado pela autora a partir de SIQUEIRA, 2015.

A distribuição de lâmpadas em relação a cada região no Brasil é mostrada na tabela 18.



Tabela 18 – Cadastro de Lâmpadas de IP no Brasil – Tipos por Região.

Ano Base 2012

Tipo de lâmpada	Participação do tipo de lâmpada por Região (%)					% Geral por lâmpadas
	NORTE	NORDESTE	CENTRO-OESTE	SUL	SUDESTE	
Vapor de Mercúrio	7	19	10	19	45	23,65
Vapor de Sódio	5	21	10	20	44	71,05
Multi Vapor Metálico	5	28	8	10	50	1,25
Mistas	2	45	11	16	26	1,76
Incandescente	2	73	8	4	13	1,17
LED	-	23	-	41	35	< 0,002
Outras	11	31	7	44	7	1,12
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>22</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>43</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Elaborado pela autora a partir de SIQUEIRA, 2015.

Para confirmar a consistência dos dados deste inventário, foram realizadas duas análises: (i) verificação da representatividade do número de lâmpadas e tipos por região e (ii) e cálculo do consumo de energia de todas as lâmpadas e comparação com valor de consumo de IP indicado pela EPE.

### 5.1.1

#### Verificação da distribuição do número de lâmpadas por região

Os números percentuais – por região - são muito próximos do inventário de 2004 apresentado por Silva (SILVA, 2006). Diferença se dá nos percentuais dos tipos de tecnologia, onde se observa transição das lâmpadas de vapor de mercúrio, que representava 52% em 2004, por substituições pela VSAP, que representava apenas 40% em 2004 e atingiu 71% em 2012. Vale destacar que este valor, no entanto, ainda é inferior a metas alcançadas por outros países latino-americanos como Peru, que em 2004, já tinha parque com mais de 80% com lâmpadas de vapor de sódio (SILVA, 2006).

A distribuição de lâmpadas por região, que é prevista ser relacionada ao PIB (McKinsey & Company, 2012) e também proporcional à população urbana (SILVA, 2006; ZHANG e SETO, 2011) foi confirmada conforme tabela abaixo.

Tabela 19 – % de Lâmpadas, PIB e População Urbana por Região no Brasil.

Parâmetro	NORTE	NORDESTE	CENTRO-OESTE	SUL	SUDESTE
Lâmpadas para IP (%)	5	22	10	20	43
PIB (% de contribuição)	6	13	10	16	55
População urbana (% do Brasil)	5	21	9	19	46

Fonte: Elaborado pela autora a partir de SIQUEIRA, 2015; IBGE, 2010.

### 5.1.2

#### **Cálculo do consumo de energia para IP a partir do cadastro**

Considerando perda média nos reatores das lâmpadas segundo Manual de Instruções PROCEL-RELUZ (ELETROBRÁS, 2005) e aplicando fórmula da eq 3, tabela 38 apresentada no Anexo A, foi encontrado o consumo de energia para IP no valor de 11.313 GWh, que é 12% inferior ao consumo para o mesmo ano de 2012 segundo EPE (EPE, 2014a), que foi de 12.916 GWh, que por sua vez também tem pequeno desvio em relação ao cadastro da ANEEL também no mesmo período, 13.031 GWh (ANEEL, 2015). Assumindo perdas médias nos reatores conforme caso de Los Angeles, o consumo se aproxima um pouco mais do valor reportado pela EPE, ficando 6% menor.

Segundo consulta a Eletrobrás, esta diferença encontrada é devida ao inventário 2012 não contabilizar os pontos de luz em túneis e praças, mas apenas ruas e avenidas (SOARES, 2016).

Para futuros trabalhos, seria recomendável um esforço de atualização do inventário de lâmpadas e também confirmar através de entrevistas, as premissas utilizadas na determinação do valor de consumo de IP junto a EPE e ANEEL. Para esta pesquisa, dado que a variação do consumo de IP não é tão expressiva, a investigação do potencial de economia no Brasil com a introdução do LED utilizará este inventário e as perdas médias nos reatores consideradas pelo RELUZ, a qual daria uma economia de energia inclusive mais conservadora.

## 5.2

### **Análise do Potencial de Economia**

A partir deste inventário de lâmpadas de IP no Brasil disponibilizado pela Eletrobrás, o potencial de economia é investigado do ponto de vista ambiental (emissões de GEE) e econômico considerando três cenários: (i) potencial técnico, definido como aquele teórico em que não há restrições econômicas para instalação do LED, (ii) potencial sob a ótica das concessionárias de energia, caso os investimentos sejam feitas por estas empresas e (iii) potencial sob a ótica dos municípios, caso estes sejam os implementadores do projeto.

#### 5.2.1

##### **Avaliação do Potencial Técnico**

As alternativas de substituição das lâmpadas atuais por LED, apresentado na tabela 20, a seguir, foi fundamentado a partir da experiência do caso de Los Angeles e também da referência de um estudo de caso em Yuma no Arizona, nos Estados Unidos, na fronteira com o México, onde foi demonstrada viabilidade técnica de substituição de ponto de mais de 1.000 W de lâmpada de haleto metálico de quartzo em poste de altura de 13 metros (DOE, 2014f).

Tabela 20 – Alternativas de Substituição: tradicional VSAP x LED.

Tipo de Lâmpadas	Potência lâmpada atual (W)	Potência alternativa tradicional VSAP <sup>(*)</sup> (W)	Nova Potência proposta LED <sup>(**)</sup> (W)
Vapor de Mercúrio	80	70	39
	125	100	50
	250	150	78
	400	250	153
	700	400	210
VSAP	35 a 80		39
	100 a 125		50
	150, 180		78
	210 a 225		108
	250 a 350		153
	360 a 400		210
	500		210
	600		210
	700		398
	800		398
	1000		398 <sup>(***)</sup>
	1500		-
	2000		-
Multi Vapor Metálico	70	-	39
	100	-	50
	175	-	78
	250	-	108
	400	-	153
Incandescentes	100	70	39
	200	70	39
	300	70	39
	500	100	50
Mistas	160	70	39
	250	70	39
	500	150	78
Fluorescentes	110	70	39
Halógena	400	150	78
	500	150	78
	1000	250	153
	1500	400	210

Fonte: ELETROBRÁS, 2005<sup>(\*)</sup>, CCI-CITY OF LOS ANGELES, 2009; CITY OF LOS ANGELES, 2012; DOE, 2014f<sup>(\*\*\*)</sup>.

A partir da tabela 20 e do cadastro de IP, foi realizada estimativa do potencial técnico do número de lâmpadas elegíveis a substituição, que totalizou aproximadamente 15,9 milhões de pontos, mostrado em detalhe na tabela 21. Vale ressaltar que o valor é uma estimativa teórica, pois inúmeras restrições técnicas e/ou econômicas podem impedir a realização deste potencial, calculado a seguir.

Tabela 21 – Potencial de Substituição de Lâmpadas.

Tipo de lâmpadas	Potência das lâmpadas (W)	Lâmpada LED equivalente (W)	Nº Total de Lâmpadas
<b>Vapor de Mercúrio</b>	70	39	4.576
	80	39	1.583.311
	100	50	53.673
	125	50	1.441.668
	150	50	4,043
	160	50	698
	200	60	326
	210	60	1
	215	78	156
	250	78	361,968
	350	108	223
	360	108	563
	400	153	344,538
	500	153	653
700	210	152	
<b>Vapor de Sódio</b>	35	20	94
	48	20	237
	50	20	123,788
	55	39	14
	65	39	26
	70	39	4,805,570
	80	39	1,380
	100	50	1,703,115
	110	50	333,869
	115	50	56
	125	50	25
	150	78	1,573,447
	180	78	759
	210	108	2,132
	215	108	32,709
	220	108	7
	225	108	3,188
	250	153	2,055,734
	300	153	8,118
	350	153	15,432
360	210	37,967	
400	210	700,445	
500	210	11,396	
600	210	3,277	
700	398	235	
800	398	12	
1000	398	468	
<b>Multi Vapor Metálico</b>	70	39	17,274
	80	39	2
	85	39	171
	100	50	5,439
	110	50	189
	150	50	23,945
	175	78	389
	200	78	329
	250	108	45,806
	300	108	48
	315	153	294
	400	153	93,509
	500	210	1
	700	398	197
1000	398	4,596	

Tabela 21 – Potencial de Substituição de Lâmpadas (Continuação).

Tipo de lâmpadas	Potência das lâmpadas (W)	Lâmpada LED equivalente (W)	Nº Total de Lâmpadas
Incandescentes	100	39	51.458
	150	39	75.713
	200	39	41.759
	240	39	168
	250	39	604
	300	39	107
	400	50	7
	500	78	105
Mistas	160	39	179.761
	200	39	3.333
	250	39	81.036
	300	78	12
	350	78	4
	360	78	8
	400	78	944
	500	78	7.648
Fluorescente	110	39	93
	150	50	1.440
	215	50	1
	500	78	4
Halógena	100	39	240
	150	39	369
	160	60	113
	250	60	50
	300	60	4.760
	400	78	365
	500	78	3.830
	1000	153	1.024
	1500	210	12
	2000	300	28
<b>TOTAL</b>			<b>15.857.234</b>

Fonte: Elaborado pela autora a partir da Tabela 20 e cadastro de IP (SIQUEIRA, 2015).

Considerando todas as substituições listadas na tabela 21 e aplicando as fórmulas constantes na tabela 38 no Anexo A, o potencial técnico de economia de energia é então apresentado na tabela 22.

Tabela 22 – Potencial Técnico de Economia de Energia Elétrica em IP.

Parâmetro	Caso Base	Conversão para LED	Redução
Potência Instalada (MW)	2.550	1.155	1.395
Energia consumida (GWh/ano)	11.169	5.060	6.108
Economia total conta de luz (R\$/ano)			R\$ 2,1 bilhões

Para a determinação na economia na conta de luz foi considerada tarifa média de energia elétrica para IP de 2015, com impostos, (ANEEL, 2015) ponderada pelo potencial de economia de cada uma das 5 regiões, resultando em valor de R\$ 345,05/ MWh, conforme tabela 23.

Tabela 23 – Tarifa de IP ponderada pela redução de consumo de energia.

Região	Redução potencial de energia		Tarifa IP com impostos	
	GWh	%	R\$/ MWh	Valor ponderado (R\$/MWh)
Norte	324	5,3	337,33	17,91
Nordeste	1.200	19,6	300,17	58,97
Centro-Oeste	674	11,0	366,81	40,47
Sul	1.098	18,0	362,97	65,22
Sudeste	2.812	46,0	352,88	162,47
Total	6.108	100	-	<b>345,05</b>

Conforme Silva descreve em pesquisa sobre o sistema de IP no Brasil (SILVA, 2006), é interessante investigar quais os potenciais benefícios do alcance deste potencial técnico, do ponto de vista (i) das concessionárias de energia elétrica, que – se investissem na melhoria do sistema de IP para LED, poderiam auferir economias decorrentes do adiamento de investimentos na expansão do sistema elétrico (custo da demanda evitada) e/ou da redução de despesas operacionais (custo da energia economizada) e (ii) dos municípios que – investindo em eficiência energética poderiam se beneficiar com a redução de custos operacionais.

No estudo de caso de Los Angeles (capítulo 4) ficaram claros os benefícios ao município e seguramente também à empresa municipal de geração e distribuição de energia elétrica, que – de outra forma – não teria sido um dos investidores do projeto, concedendo desconto para cada kwh economizado.

Serão investigados a seguir os benefícios para o caso brasileiro sob estas duas perspectivas.

## 5.2.2

### Avaliação sob a ótica das concessionárias

Do ponto de vista das concessionárias de energia elétrica, sob a ótica do sistema elétrico, de acordo com a metodologia adotada pelos Programas de Eficiência Energética da ANEEL “a racionalidade da avaliação de um projeto de eficiência energética feito com recurso advindo do conjunto dos consumidores de energia elétrica consiste em saber se o benefício auferido é maior que aquele que haveria se o recurso tivesse sido empregado na expansão do sistema elétrico”. Assim, considera-se que o benefício apurado com a valoração da energia e da

demanda reduzidas ao custo unitário marginal de expansão do sistema deve ser no mínimo 25% maior que o custo do projeto, ou seja, a relação custo benefício (RCB) do projeto deve ser igual ou inferior a 0,8 (ANEEL, 2013b - Módulo 4).

A metodologia e fórmulas utilizadas estão detalhadas no Anexo A e para sua aplicação, as seguintes premissas e simplificações foram consideradas:

- (a) Preço médio da luminária LED, com impostos: R\$ 1.900,00/ ponto<sup>84</sup>. A potencia média ponderada dos pontos a serem substituídos equivale a 78W e será detalhada no próximo item, 5.2.3.

A referência deste valor foi calculada através de um estudo de caso para a cidade do Rio de Janeiro pelo Banco Mundial (2014). A partir de entrevistas com diversos fabricantes, o estudo reporta que o preço médio, ano base de 2013, para uma luminária LED substituindo ponto de vapor de sódio de 250W (LED de 153 W) era de R\$ 1.900,00 De acordo com Banco Mundial, em uma situação de compra de luminárias em grande quantidade, era esperado que o preço pudesse sofrer queda de 20% dado o potencial de ganho de escala (MAURER e MEYER, 2014) conforme figura abaixo. Além disso, dado o avanço de tecnologia, há potencial de redução de preço de 10% ao ano, conforme detalhado no caso de Los Angeles (CCI-CITY of LOS ANGELES, 2009) e premissas usadas para cenários pelo DOE que consideram taxas ainda maiores de redução (DOE, 2014d).

A partir deste mesmo estudo (WORLD BANK, 2014) foi possível extrapolar o preço base para lâmpada de LED de 78W, calculado em R\$ 1.600,00 para o mesmo ano. Considerando que o produto é importado e que portanto o preço reflete a variação cambial do dólar frente ao real, a atualização de preço para 2015 deve considerar os seguintes parâmetros: (i) desvalorização cambial do real frente ao dólar que ocorreu entre 2013 até dezembro de 2015 de cerca de 83%<sup>85</sup>, (ii) considerar desconto de 20% (Navigant Research, 2014 *apud* MAURER e MEYER, 2014) com o ganho de escala para compras em grandes quantidades, e (iii) associar a redução de custo de LED de 10% ao ano, dada inovações tecnológicas. Assim, o preço atualizado (dez 2015) de uma luminária

<sup>84</sup> Atualizado a partir de MAUER e MEYER, 2014, num trabalho do Banco Mundial para o município do Rio de Janeiro.

<sup>85</sup> Cotação de variação histórica do dólar frente ao real obtida através do site Oanda <http://www.oanda.com/currency/historical-rates/>



de 78W é de aproximadamente R\$ 1.900,00<sup>86</sup>. O preço da luminária de 50W foi considerado o mesmo.

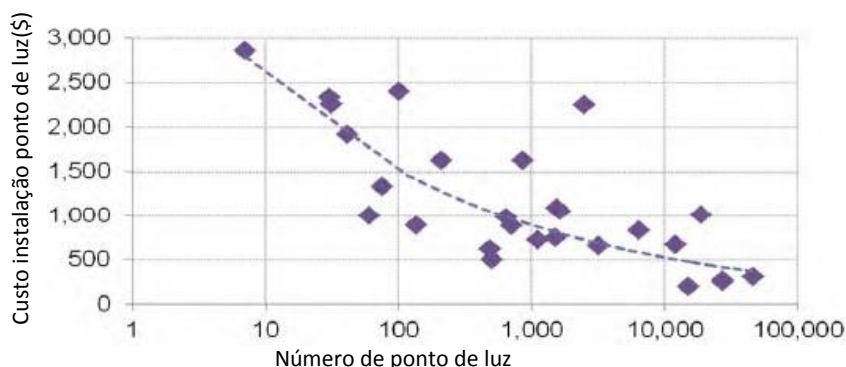


Figura 24 – Potencial de redução de custo por ganho de escala na compra.  
Fonte: Navigant Research, 2014 *apud* MAURER e MEYER, 2014.

(b) Custo de mão-de-obra para instalação por ponto: R\$ 91,00 (SILVA, 2006; IBGE, 2015)

- Foi utilizada premissa de Silva (SILVA, 2006) e feita atualização pelo índice de custo de mão-de-obra da construção civil obtida na Base de Dados SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, de 2006 a 2015 (IBGE, 2015), ponderado pelo potencial de redução de economia de cada uma das regiões do Brasil.

(c) Custo de relé fotoelétrico: R\$ 33,20 (SILVA, 2006; IBGE, 2015)

- Foi utilizada premissa de Silva (SILVA, 2006) e feita atualização pelo índice de custo de materiais da construção civil obtida na Base de Dados SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, de 2006 a 2015 (IBGE, 2015), ponderado pelo potencial de redução de economia de cada uma das regiões do Brasil.

Com a alta vida útil prevista para o LED, tanto as cidades de Boston (BOSTON, 2014) quanto Seattle (SEATTLE, 2014) nos Estados Unidos reportam o benefício de instalação de células fotoelétricas de alta vida útil, de 20 anos,

<sup>86</sup> Preço atualizado em R\$ =  $1600 * 1,80 * (1-0,2) * (1-0,1)^2$ .

contra a usual de apenas 3 anos. Segundo estes depoimentos, o benefício com o incremento de preço deste relé são mais que compensados com a redução dos gastos de manutenção associados a frequente substituição dos relés. Nesta análise, por desconhecimento do preço do relé de nova tecnologia, foi admitido por simplificação o uso de relé fotoelétrico tradicional com a baixa vida útil associado a instalação do LED.

(d) Custo de braço, conexões e fios: R\$ 107,90 (SILVA, 2006; IBGE, 2015)

- Adotada a mesma premissa descrita anteriormente

(e) Custo de transporte e indiretos: 5 % do total

(f) Custo total por ponto instalado:  $= \frac{(a+b+c+d)}{(1-e)}$

(g) Taxa de desconto: 8% (EPE, 2007)

(h) Tarifa Branca, subgrupo B3 – Demais Classes (C) na ponta (p) e fora de ponta (fp) na bandeira verde:

- Como as tarifas<sup>87</sup> são distintas para cada distribuidora, como simplificação, para evitar necessidade do levantamento das tarifas de todas as distribuidoras de energia elétrica homologadas pela ANEEL, foram selecionadas as distribuidoras mais representativas de cada região, definidas como aquelas que respondem por mais de 70% do consumo<sup>88</sup> de IP da respectiva região.

(i) Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD) no horário de ponta (p) e fora de ponta (fp)

- Adotada a mesma premissa descrita anteriormente

---

<sup>87</sup> As tarifas para cada distribuidora (tanto branca quanto de uso dos sistemas de distribuição) foram obtidas pela consulta às Resoluções Homologatórias emitidas pela ANEEL para cada distribuidora. Disponível em (<http://biblioteca.aneel.gov.br/index.html> Acessos entre 01 e 7 de jan 2016.

<sup>88</sup> As tarifas de IP e consumo de energia foram obtidos a base de dados da ANEEL. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=550> Acessos entre 26 dez e 10 de jan 2016.

- (j) Tempo de vida útil do LED: a ANEEL indica na metodologia o tempo de vida útil de 20 anos, o que para a aplicação em IP se traduz numa utilização da lâmpada por 87.600 horas, que é bastante superior aos limites encontrados em literatura conforme mostrado anteriormente na tabela 7. Como este parâmetro tem influência direta no custo anualizado e, por conseguinte no RCB, será feita também análise considerando tempo de vida útil médio de 12 anos ou 55.000 horas (DOE, 2015a).

Aplicando a equação 16 constante no Anexo A , considerando por simplificação a realização de todo investimento em 1 ano, foram calculados os índices de relação custo benefício (RCB) para cada uma das regiões do Brasil, cujos resultados são mostrados na tabela 25. Como em nenhuma região o RCB foi inferior a 0,8, o que não indica um caso de investimento para as distribuidoras, foi realizada análise de sensibilidade em relação ao preço do LED.

Tabela 25 – Custos (CEE e CED) e Análise de Sensibilidade de RCB.

Preço LED	RCB				CEE	CED
	R\$1.900,00		R\$900,00			
	20 anos	12 anos	20 anos	12 anos	R\$/ MWh	R\$/ kW ano
Vida útil - LED						
<b>REGIÕES</b>						
Norte	1,5	1,9	0,8	0,8	245,60	702,60
Nordeste	1,9	2,5	1,0	1,0	203,96	590,68
Centro-Oeste	1,4	1,8	0,7	0,7	230,98	597,24
Sul	1,5	1,9	0,8	0,8	292,29	570,36
Sudeste	1,3	1,7	0,7	0,7	262,14	659,44

Fonte: Elaborado pela autora a partir de ANEEL (2013).

O preço final do LED precisaria cair à R\$ 900,00 para que – considerando vida útil do LED de 20 anos – o projeto seja viável economicamente do ponto de vista da concessionária. Na prática, como a vida útil do LED, de acordo com a literatura, deve ser em torno de 12 anos, o preço - de fato - precisaria cair à R\$ 650,00 para que o RCB indique um caso de investimento à distribuidora. Mesmo com a queda nestes preços, a Região Nordeste como um todo não atinge o requisito de investimento. Isto é devido às menores tarifas praticadas na região, gerando um menor custo evitado de energia.

Como o sistema de IP é mantido pelos municípios (ou por empresas terceirizadas por eles contratados, mas custeados pelo município), outros potenciais benefícios como redução de custos de manutenção do sistema não

foram contabilizados nesta análise de RCB e serão incorporados apenas na próxima avaliação.

A avaliação do potencial considerando potencia média de lâmpadas LED, a investigação por região considerando valores médios de custo de energia, manutenção (e não detalhando por estados), assim como a consideração que uma lâmpada tradicional necessita ser substituída por uma equivalente LED (desconsiderando situações que lâmpada LED pode ser mais eficiente e permita maior espaçamento entre postes) são simplificações e limitações da modelagem. Ou seja, não é possível afirmar que em nenhuma cidade do país, o investimento de LED em IP não faça sentido para uma concessionária de energia, mas indica – de forma geral – que este não é atrativo.

### 5.2.3

#### **Avaliação do potencial sob ótica dos municípios**

A avaliação econômica sob a ótica dos municípios será feita de acordo com o valor presente líquido (se possui valor positivo), TIR (se possui valor atrativo, acima da taxa de desconto do projeto), e tempo de retorno do investimento (menor do que tempo da vida útil da lâmpada LED), tal qual foi ilustrado no estudo de caso de Los Angeles.

As seguintes considerações e simplificações foram adotadas:

- (a) Uma vez que as lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor de sódio representam mais de 94% do parque de IP do Brasil, para o cálculo de viabilidade econômica do potencial de economia, somente estas duas lâmpadas serão consideradas.
- (b) Para cada conjunto de lâmpadas, em cada região, foi determinado a potência média ponderada das lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor de sódio que serão substituídas e as lâmpadas LED equivalentes, conforme tabela 26.

Tabela 26 – Características das Lâmpadas por Região.

Características das Lâmpadas		Regiões				
		N	NE	CO	S	SE
VM	Nº lâmpadas	282.249	724.320	374.526	724.159	1.691.295
	Potência lâmpadas (W)	124	132	155	121	157
	Perda reatores <sup>(1)</sup> (W)	11	12	13	11	13
	LED Equivalente (W)	50	55	62	50	62
VSAP	Nº lâmpadas	581.918	2.401.541	1.118.572	2.276.983	5.034.486
	Potência lâmpadas (W)	139	120	164	141	148
	Perda reatores <sup>(1)</sup> (W)	17	15	19	17	18
	LED Equivalente (W)	78	67	91	78	82
Total		864.167	3.126.184	1.493.098	3.001.251	6.727.760

(1) Os valores das perdas dos reatores referem-se a valores ponderados pelo número de lâmpadas, a partir de valores de perda de reator convencional referenciados no Manual de Instruções Procel-Reluz (ELETROBRÁS, 2005).

(c) Tempo de vida útil dos equipamentos. Serão adotadas as premissas ANEEL (2013) listadas no Anexo A (tabela 39), exceto para o LED onde será adotado 55.000h (12 anos) ao invés de 20 anos, valor mais conservador e consistente com pesquisa de literatura (DOE, 2015a) e para a lâmpada de vapor de mercúrio que ANEEL não contempla, será adotado 12.000 h de acordo com Manual de Instruções do RELUZ (ELETROBRÁS, 2005).

(d) Os custos de materiais serão o mesmo em todas as regiões do Brasil<sup>89</sup>, conforme tabela 27 a seguir. Os preços dos demais materiais, relé, braços e conexões são os mesmos listados no item anterior.

<sup>89</sup> Segundo SINAPI, para o ano de 2015, há uma variação de cerca de 10% entre preços nas regiões do país. Para uma investigação mais detalhada, seria necessário levantar cotações representativas em cada estado para caracterizar as regiões. Ademais, Muito provavelmente, dentro de um mesmo estado, variações podem ocorrer em cidades.

Tabela 27 – Levantamento de Custos das Luminárias.

Ano Base - 2015				
Tipo	Lâmpada (R\$)	Reator (R\$)	Luminária (R\$)	Total (R\$) <sup>90</sup>
VM <sup>(1)</sup>	13,63	62,54	217,39	294,00
VSAP <sup>(2)</sup>	29,53	117,00 <sup>91</sup>	217,39 <sup>92</sup>	364,00
LED <sup>(3)</sup>	-	-	1.900,00	1.900,00

Fonte: Elaborado pela autora.

(1) e (2) Foi realizado levantamento de custos na base SINAPI (CAIXA, 2016) e o município do Rio de Janeiro foi utilizado como referência no mês de dezembro 2015.

(3) Valor calculado conforme descrição citada no item anterior 5.2.2. Considerado que o preço da luminária LED cai 10% ao ano em função de inovações tecnológicas, enquanto os demais preços permanecem inalterados ao longo do ciclo do projeto.

(e) Custos de manutenção total por ponto.

Conforme verificado no estudo de caso de Los Angeles, o valor tem relativa representatividade nos ganhos de economia total, contribuindo com 28% do ganhos totais. De acordo com tabela 9 do capítulo 4, as reduções dos custos de manutenção com a introdução do LED podem ser bastante significativas, com ganhos variando desde 25% de redução à valores superiores a 90%, com mediana de 61%.

A partir do estudo de caso de Los Angeles e de referência sobre os custos de manutenção do sistema de IP na cidade de Curitiba citado por SALES (2011) e a partir de entrevista realizada pela autora com RIOLUZ (2016) no Rio de Janeiro, será definida premissa para arbitrar os custos de manutenção que serão utilizados na simulação para o caso dos municípios brasileiros.

Não é objeto desta pesquisa investigar as diferenças ou qualificar a qualidade de informação das fontes, até porque o nível de serviço, a estrutura administrativa, além da própria forma de contabilização dos custos pode ser muito distinto entre as cidades, o que impediria uma comparação direta, mas levantar referências do custo, que é um componente importante do cálculo de viabilidade econômica.

<sup>90</sup> Para maior precisão, seriam necessárias especificações mais detalhadas e consulta a base de dados SINAPI representativa de cada região do país em mais de um mês do ano.

<sup>91</sup> Na ausência de cotação de preço de reator para lâmpada de vapor de sódio a 150W, foi utilizada cotação de reator para lâmpada de 250W e aplicado fator de desconto de 14%, assumindo que a mesma variação de custo de lâmpada de 250 para 150W se aplica ao reator.

<sup>92</sup> Assumiu-se o mesmo custo da luminária de mercúrio, na ausência de uma cotação específica para vapor de sódio.

De acordo com SMOP (2010) apud SALES (2011), a cidade de Curitiba possui um parque de iluminação com 131.206 pontos, onde 32.000 pontos são reparados anualmente. Ainda segundo a mesma referência, o orçamento anual para manutenção em 2010, excluindo consumo de energia elétrica é de R\$ 12,63 milhões. Ou seja, o custo de manutenção anual por ponto é de R\$ 395,00 (gastos de manutenção dividido pelo número de pontos reparados anualmente) ou R\$ 244,00 se considerado o custo dividido por todos os pontos de luz do parque de iluminação.

Tabela 28 – Comparação sistema de IP em Los Angeles e Curitiba.

Parâmetro	Ano Base - 2010	
	Los Angeles	Curitiba
Número de pontos em IP	209.000	131.206
Número de reparos por ano (%)	70.000 (33%)	32.000 (24%)
Orçamento anual de manutenção (% do orçamento total, que inclui energia)	R\$ 11,2 milhões <sup>93</sup> (27%)	R\$ 12,63 milhões (37%)
Custo de manutenção anual por pontos reparados	R\$ 161,00	R\$ 395,00
Custo de manutenção anual por pontos totais	R\$ 53,6	R\$ 244,00
% de variação do custo de mão de obra, comparado aos Estados Unidos (BLS, 2012) <sup>94</sup>	-	-57% no Brasil

Fonte: Elaborado pela autora a partir de CITY of LOS ANGELES, 2012 e SMOP (2010) apud SALES, 2011.

A partir da tabela 30 observa-se que mesmo com o custo de mão-de-obra no Brasil representando menos da metade do valor nos Estados Unidos, o custo de manutenção – na mesma base monetária – é quase 5 vezes superior em Curitiba que em Los Angeles.

Em entrevista com a RIOLUZ, empresa municipal responsável pelas operações de gestão e manutenção do sistema de IP da cidade do Rio de Janeiro, foi informado que os custos de O&M (excetuando energia elétrica) no ano de 2015 foi da ordem de R\$ 60 milhões, considerando manutenção do parque de iluminação com 425.000 pontos. Este valor representa um custo anual por ponto

<sup>93</sup> Adotando dólar médio de 1,88 (<http://www.oanda.com/currency/historical-rates/>) para o ano de 2010, que é o ano de referência de custos de Curitiba.

<sup>94</sup> Custo de compensação horária de mão-de-obra em indústria de equipamentos elétricos. BLS – Bureau of Labor Statistics. United States Department of Labour. Table 27. Electrical equipment (ISIC 27), Hourly compensation costs. Disponível em <http://www.bls.gov/fls/ichccindustry.htm#27>, utilizada referência de 2010. Acesso em 22 de jan 2016.

de R\$ 141,00 que inclui materiais, mão-de-obra e veículo (RIOLUZ, 2016).

Tendo em vista a dificuldade de apurar os custos totais relativos a manutenção para cada região no Brasil, nesta análise será considerado o custo médio de substituição por ponto da RIOLUZ (2015) como referência, que é um valor cuja ordem de grandeza se situa entre os valores de Los Angeles e Curitiba. Dada a magnitude dos valores, a apuração de forma detalhada do cálculo de manutenção das lâmpadas pode ser uma importante ferramenta de otimização de gestão.

A potencial redução no custo de manutenção com a instalação da lâmpada LED se dá tanto pela redução na compra de materiais – pela menor necessidade de substituição de equipamentos, como também pela menor necessidade de mão-de-obra para realização do reparo e conseqüente gestão e administração do sistema. Esta redução da necessidade de mão-de-obra é um ponto importante a ser considerado, não contemplado nesta pesquisa, investigando o impacto da ação de substituição de lâmpadas em termos de geração de emprego e, se for o caso, havendo um impacto negativo, avaliar como qualificar mão-de-obra com a finalidade de absorvê-la em outras aplicações e atividades, para manter empregabilidade do trabalhador.

- f) Custos de mão-de-obra para manutenção por ponto (devido a reposição de materiais em função destes atingirem sua vida útil).

A alocação do custo de mão-de-obra direta por ponto instalado foi feita proporcional aos custos de materiais. Ou seja, foi assumido que a complexidade de instalação é proporcional ao custo dos equipamentos.

Uma vez conhecidos os custos de materiais, conforme premissas listadas anteriormente e a partir da vida útil de cada material, considerando ainda a premissa de R\$ 140,00 (RIOLUZ, 2016) de custo de manutenção por ano, por ponto, o custo de manutenção anual por cada componente do custo de manutenção (mão-de-obra, materiais e veículo) foi calculado e é mostrado na tabela 31.



Tabela 29 – Custos de manutenção por lâmpada.

<b>Custos por ponto (R\$/ ano)</b>	<b>VM</b>	<b>VSAP</b>
Materiais	39	45
Mão-de-obra (direta e adm)	99	92
Veículos	2	3
Total (R\$/ ano)	140	140

## g) Redução dos custos de manutenção com a tecnologia LED

Além da redução de materiais, pela menor necessidade de reposição de equipamentos em função da vida útil, será avaliado a potencial redução de custos com mão-de-obra. Considerando as experiências internacionais citadas na tabela 12 capítulo 4, será realizada análise de sensibilidade da redução do custo de mão-de-obra para manutenção sobre VPL, TIR e TR, variando-o de 25%, 50% e 75% de redução.

Foi considerado uma taxa de falhas para o LED e arbitrado que 0,2% das luminárias instaladas precisariam ser substituídas que foi valor observado no projeto da cidade de Los Angeles (CITY OF LOS ANGELES, 2012e). Esta é uma premissa conservadora, pois deve ser possível firmar contrato de fornecimento com garantias que cubra esta falha.

## h) Horizonte de avaliação econômica do projeto: 12 anos

Conforme SILVA (2010) cita, apesar de alguns equipamentos terem vida útil de até vinte anos, na ótica das prefeituras considera-se preferência pela análise em prazos mais curtos. Ao invés de 10 anos, premissa utilizada em sua pesquisa, nesta pesquisa foi adotado 12 anos para ser equivalente ao período de vida útil prevista para o LED. Uma vez que o horizonte de avaliação econômica é bem superior ao tempo de gestão de uma administração (4 anos), considerou-se que a variação de 10 para 12 anos não seja crítica. Ademais, quanto maior o tempo de análise do projeto, melhor serão capturados os benefícios. Não foi adotado valor superior a este como por exemplo 15 anos, comumente usado em algumas análises (DOE, 2013b) pois a partir do ano 13, já seria necessário computar os custos de manutenção (reposição) das lâmpadas LED. E em 13 anos, dado o acentuado desenvolvimento da tecnologia LED, poderia haver grande incerteza na

previsão de novas eficiências e preços das luminárias.

i) Tempo de instalação das luminárias LED

O tempo de instalação do projeto tem efeito sobre seu resultado econômico, ilustrado no caso de Los Angeles. Inicialmente planejado para ser instalado em 5 anos, como os benefícios apurados foram maiores que o esperado, a instalação foi antecipada e realizada em 3 anos (C40, 2011 e CITY of LOS ANGELES, 2012). Nesta análise, será considerado que todas luminárias serão instaladas em 5 anos.

j) Valor residual dos equipamentos ao fim do horizonte do projeto

Ao final do horizonte de 12 anos do projeto, parte das luminárias LED ainda terá vida útil<sup>95</sup>, portanto adotando mesma premissa que SILVA (2010), serão considerados os valores residuais das luminárias. Os valores serão atualizados financeiramente ao presente e incorporados ao VPL. Apenas o valor da luminária LED será considerado, pois os demais constituintes do ponto de luz (relé, braço, conexões) seriam também empregados com tecnologia VM e VSAP.

Considerando que muitos dos pontos a serem modernizados já se encontram depreciados, isto é, estão no fim de sua vida útil e por não oferecer a mesma qualidade de serviço, já teriam de ser substituídos, se a instalação do LED for programada para coincidir com esta manutenção, é possível descontar do investimento do LED, o investimento que já iria de qualquer forma ser realizado com as lâmpadas e luminárias VM e VSAP. Será realizada análise de sensibilidade da taxa de depreciação das lâmpadas e luminárias instaladas no parque de IP sobre VPL, TIR e TR, variando-a de 0%, 50% e 100%.

---

<sup>95</sup> Luminárias LED instaladas no ano 2, 3, 4 e 5 tem valor residual de 8%, 17%, 25% e 33%, respectivamente.

- k) Manutenção do custo de mão-de-obra e tarifa de energia elétrica ao longo do ciclo do projeto.

A análise é feita considerando manutenção de seus valores reais, sem considerar inflação. Esta é uma premissa conservadora, visto que aumentos reais de custo de mão-de-obra e de energia elétrica favoreceriam o LED, que consome menos energia e requer menor intervenção de mão-de-obra para manutenção.

A figura 41 ilustra as 3 variáveis selecionadas para análise de sensibilidade para verificação de influência sobre VPL, TIR e TR. Será apresentado a seguir um resumo dos parâmetros analisados, para cada uma das regiões do Brasil.

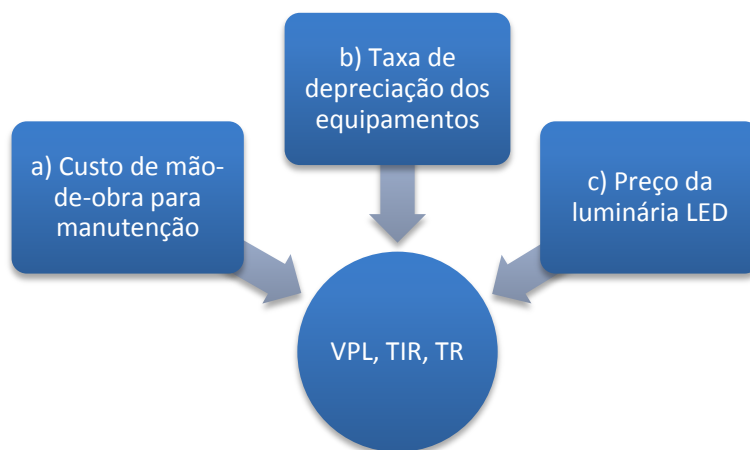


Figura 41 – Variáveis para Análise de Sensibilidade.

**a) Redução do custo de mão-de-obra para manutenção em 25%, 50% e 75%**

Dado a estrutura de custos de manutenção adotada, mesmo que não haja redução no custo de mão-de-obra, o modelo indica redução de 20% no custo total de manutenção pela redução da necessidade de compra de materiais em função da baixa vida útil das tecnologias atuais frente ao LED. Reduções no custo de mão-de-obra de 25%, 50% e 75% representam reduções no custo de manutenção de 37%, 54%, 70%, respectivamente.

O objetivo desta análise de sensibilidade é verificar o quão dependente de redução do custo de mão-de-obra o projeto é e fundamentar escolha do valor a ser

fixado<sup>96</sup> para análise dos outros 2 parâmetros (taxa de depreciação dos equipamentos e preço de luminária).

Assim, mantendo o preço da luminária fixo e desconsiderando instalação coincidente com taxa de depreciação de lâmpada ou luminária, a tabela abaixo ilustra como o % de redução de custo de mão-de-obra para manutenção influencia o projeto. Além de seus valores absolutos calculados, para cada parâmetro foi incluído o seu % de variação (tendo a redução de 0% como referência). Como a variação sobre VPL e TIR é muito similar, para facilitar visualização da tabela, optou-se incluir apenas o percentual de variação sobre TIR e indicar o valor de TR.

Tabela 30 – Influência da redução do custo de mão-de-obra para manutenção.

Região	Parâmetro	Redução do custo de mão-de-obra para manutenção			
		0%	-25%	-50%	-75%
N	VPL (milhões R\$)	- 447	- 319	-190	-62
	TIR (%)	-9,9	-6,9 (30%)	-4,0 (60%)	-1,3 (87%)
	TR (anos)	21	19	16	13
NE	VPL (milhões R\$)	-2.098	-1.637	-1.177	-716
	TIR (%)	-13,1	-9,9 (24%)	-6,9 (47%)	-4,1 (69%)
	TR (anos)	21	21	19	16
CO	VPL (milhões R\$)	-457	-236	-15	204
	TIR (%)	-5,6	-2,8 (50%)	-0,2 (96%)	2,4 (143%)
	TR (anos)	17	15	13	11
S	VPL (milhões R\$)	-1.405	-963	-520	-77
	TIR (%)	-8,8	-5,9 (33%)	-3,1 (65%)	-0,5 (94%)
	TR (anos)	21	18	15	13
SE	VPL (milhões R\$)	-2.666	-1.673	-680	312
	TIR (%)	-7,3	-4,5 (38%)	-1,8 (75%)	0,8 (111%)
	TR (anos)	20	16	14	12

Os resultados da tabela 30 indicam que o modelo é fortemente influenciado pela redução do custo de manutenção, podendo este fazer a diferença entre um projeto ser ou não considerado um caso de investimento.

Será adotado como referência para as demais análises que serão apresentadas a seguir, o parâmetro de redução de custo de mão-de-obra para manutenção em 50%, representando redução do custo de manutenção geral de

<sup>96</sup> Uma outra alternativa de abordagem, não considerada nesta pesquisa, seria considerar uma análise multivariável e através de técnicas estatísticas, maximizar VPL e TIR, dados os diferentes parâmetros e seus possíveis valores.

54%, que é o valor próximo ao médio que vem sendo encontrado em experiências internacionais (conforme discutido no capítulo 4).

Com este parâmetro, dado o cenário do preço do LED e considerando instalações não coincidentes com a taxa de depreciação dos equipamentos, em nenhuma região do país, o investimento em LED aparece atrativo. Nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, como o parque de iluminação têm lâmpadas com maior potencial de economia e também maiores tarifas de IP, as mesmas aparecem com melhor resultado porém, mesmo no cenário ótimo com redução do custo de mão-de-obra em 75%, ainda assim, apesar do VPL positivo e TR menor ou igual a vida útil da luminária LED, a TIR é muito baixa, não indicando um caso de investimento atrativo. Dadas as diversas prioridades de investimentos de municípios, o investimento em LED dificilmente seria viabilização.

***b) Instalação coincidente com depreciação de equipamentos: 50%, 100%***

Serão investigados 2 cenários, instalação de LED coincidente com depreciação de lâmpadas e com depreciação de luminárias.

No caso de depreciação de lâmpadas, foi considerado que lâmpadas e relés precisariam ser substituídos por terem atingido sua vida útil. Para o caso de instalação coincidente com depreciação de luminárias, foi considerado que lâmpada, relé, reator e luminária precisariam ser substituídos.

Tabela 31 – Influência de instalação coincidente com depreciação de lâmpadas e luminárias.

Região	Parâmetro	Sem depreciação	Depreciação lâmpada		Depreciação luminária	
		0%	50%	100%	50%	100%
N	VPL (milhões R\$)	-190	-163	-136	-91	9.163
	TIR (%)	-4,0	-3,5 (13%)	-3,0 (25%)	-2,1 (48%)	0,2 (105%)
	TR (anos)	16	15	15	14	12
NE	VPL (milhões R\$)	-1.177	-1.075	-974	-818	-459
	TIR (%)	-6,9	-6,5 (6%)	-6,0 (13%)	-5,2 (25%)	-3,1 (55%)
	TR (anos)	19	19	18	17	15
CO	VPL (milhões R\$)	-15	32	81	156	327
	TIR (%)	-0,2	0,4 (300%)	1,0 (600%)	2,0 (1100%)	4,5 (2350%)
	TR (anos)	13	12	12	11	10
S	VPL (milhões R\$)	-520	-423	-326	-175	169
	TIR (%)	-3,1	-2,6 (16%)	-2,0 (35%)	-1,1 (65%)	1,2 (139%)
	TR (anos)	15	14	14	13	12
SE	VPL (milhões R\$)	-680	-463	-246	93	865
	TIR (%)	-1,8	-1,3 (28%)	-0,7 (61%)	0,3 (117%)	2,7 (250%)
	TR (anos)	14	13	13	12	11

Os resultados da tabela 31 indicam que sendo a instalação da luminária LED coincidente com a depreciação de equipamentos, especialmente em fase com a manutenção do conjunto de luminárias, há expressivo potencial de melhora do “caso de investimento”. O custo de reposição da luminária tradicional que seria de qualquer forma feito, no caso de um equipamento depreciado, é reduzido do valor de instalação do LED, proporcionando uma redução do custo de instalação do LED da ordem de 13%.

Não foi objeto desta pesquisa investigar a taxa de depreciação de equipamentos do sistema de IP no Brasil, o que deve ser extremamente variado, mas salientar a importância deste parâmetro na avaliação pelo município. Se os equipamentos do sistema atualmente em uso ainda tiverem vida útil adequada, pode ser investigada possibilidade de revenda destes ativos para outro município, tal qual ocorreu com Los Angeles, onde as lâmpadas e luminárias foram vendidas, gerando receita de pouco mais de US\$ 500 mil (CITY OF LOS ANGELES,

2012e). Situação similar foi também reportada pela cidade de Boston onde foram realizados leilões dos materiais retirados (BOSTON, 2014).

Como o ciclo de instalação do projeto é de cinco anos e visto que o tempo de vida útil de lâmpadas situa-se entre 2,7 anos a 5 anos e relés é de 3 anos, é razoável admitir que a instalação da luminária LED possa coincidir com pelo menos metade da reposição que naturalmente ocorreria, dado a depreciação do sistema atual de lâmpadas e relés. Este parâmetro (50% de depreciação de lâmpadas) será então fixado para investigar quanto o preço da luminária LED precisaria reduzir para que o investimento se torne viável economicamente. c)

**c) Redução do preço da luminária LED em 10%, 20%, 30%, 40% e 50%**

Considerando então redução do custo de mão-de-obra para manutenção em 50%, instalação do LED coincidente com depreciação de lâmpadas e relés (50%), o impacto da redução no preço do LED na viabilidade do projeto é mostrado na tabela abaixo. Estão hachurados as simulações que tem atratividade econômica dada a menor necessidade de redução de preços para cada região.

Tabela 32 – Variação da Redução do Preço do LED sobre Viabilidade do Projeto.

Região	Parâmetro	Redução de Preço				
		10%	20%	30%	40%	50%
N	VPL (milhões R\$)	-46	71	188	304	421
	TIR (%)	-1,1	1,8	5,4	10	17
	TR (anos)	13	12	10	9	7
NE	VPL (milhões R\$)	-648	-221	206	633	1.059
	TIR (%)	-4,2	-1,6	1,7	5,8	11,4
	TR (anos)	16	14	12	10	8
CO	VPL (milhões R\$)	236	439	643	847	1.050
	TIR (%)	3,1	6,4	10,6	16	24
	TR (anos)	11	10	9	8	7
S	VPL (milhões R\$)	-13,4	396	806	1.215	1.625
	TIR (%)	-0,1	2,9	6,7	11,5	18,2
	TR (anos)	13	11	10	8	7
SE	VPL (milhões R\$)	454	1.371	2.288	3.205	4.121
	TIR (%)	1,3	4,5	8,4	13,5	21
	TR (anos)	12	10	9	8	7

O ponto de equilíbrio econômico para cada uma das regiões (considerado aquele em que no mínimo TIR é igual a taxa de desconto) é mostrado na tabela a seguir.

Tabela 33 – Ponto de equilíbrio em relação ao preço.

Região	Parâmetro	Redução de Preço – Ponto de Equilíbrio				
		24% R\$ 1.444	29% R\$ 1.349	33% R\$ 1.273	36% R\$ 1.216	50% R\$ 950
N	VPL (milhões R\$)	-	-	-	258	-
	TIR (%)	-	-	-	8	-
	TR (anos)	-	-	-	9	-
NE	VPL (milhões R\$)	-	-	-	-	1.059
	TIR (%)	-	-	-	-	11,4
	TR (anos)	-	-	-	-	8
CO	VPL (milhões R\$)	521	-	-	-	-
	TIR (%)	8	-	-	-	-
	TR (anos)	9	-	-	-	-
S	VPL (milhões R\$)	-	-	929	-	-
	TIR (%)	-	-	8	-	-
	TR (anos)	-	-	9	-	-
SE	VPL (milhões R\$)	-	2.198	-	-	-
	TIR (%)	-	8	-	-	-
	TR (anos)	-	9	-	-	-

Considerando que preços para compra em larga escala nos Estados Unidos situam-se na faixa de US\$ 220,00 (CITY OF LOS ANGELES, 2012 e SEATTLE, 2014) o que numa taxa de câmbio médio de 2015 representa R\$ 852,00, uma vez haja demanda interna que justifique a criação de fábricas locais no Brasil, a redução de preços citado anteriormente não é improvável ocorrer.

De fato, um grande fabricante americano de LED indicou que consideraria avaliar a instalação de planta local de luminárias LED se houvesse demanda de pelo menos 100.000 pontos (MAURER e MEYER, 2014). No caso brasileiro em específico, apesar de ainda haver necessidade de importação de componentes para montagem da luminária e apesar da intensa carga tributária no país, verificada através de consulta ao site da Receita Federal<sup>97</sup>, os tributos incidiriam em

<sup>97</sup> Incidência de Imposto de Importação de 18%, IPI variando de 5, 10 a 15% dependendo do componente, se é LED, driver ou placa já montada, respectivamente, PIS de 2,10%, COFINS variando de 9,65 a 10,65%, ICMS cujo valor varia de acordo com cada estado. Consulta realizada no site da Receita Federal disponível em [www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/Simulacao-tag.jsp](http://www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/Simulacao-tag.jsp), utilizando NCM's baseados em recomendação ABILUX (2015). Acesso em 2 de fev 2016.



componentes de menor valor agregado, o que teria potencial de redução do preço final de venda, reforçando a viabilidade de redução de preços. O edital da licitação de compra, instalação de luminárias e operação do sistema de IP da cidade de São Paulo passou a requerer – como obrigatoriedade – que diversos componentes da luminária (circuitos integrados, encapsulamento do LED, etc) sejam projetados e fabricados no país (BNDES, 2015), o que tende a contribuir para este cenário de redução de preços.

As tabelas 34 e 35 sumarizam as necessidades de custo de capital, o VPL para 12 anos, estimativa de redução de emissão de gases de efeito estufa, apenas ilustrativa, considerando o fator de emissão de 2015 e o custo de abatimento, calculado como a razão entre o VPL e a redução cumulativa de emissões no horizonte de 12 anos do projeto. Destaca-se o tamanho do potencial de mercado brasileiro para a indústria de LED, de quase R\$ 10 bilhões (sem mesmo considerar a região nordeste), com potencial faturamento anual de quase 1 bilhão, considerando o tempo de vida útil do LED de 12 anos.

Tabela 34 – Investimentos, VPL, Redução CO<sub>2</sub>eq e Custo de Abatimento.

Regiões	Investimento			VPL	Redução CO <sub>2</sub>	Custo de abatimento (R\$/tCO <sub>2</sub> eq)
	Equipamento	Mão-de-obra e indiretos	Total		tCO <sub>2</sub> eq/ano	
Norte	732.787.373	70.989.747	803.777.121	257.615.448	37.804	-524
Centro-Oeste	899.890.512	196.350.889	1.096.241.402	1.050.421.477	77.643	-1.353
Sul	2.449.427.452	452.422.415	2.901.849.867	928.810.691	131.608	-706
Sudeste	5.827.736.492	1.035.923.014	6.863.659.506	2.196.028.614	329.951	-666
<b>Total</b>	<b>9.909.841.829</b>	<b>1.755.686.066</b>	<b>11.665.527.896</b>	<b>4.432.876.230</b>	<b>577.005</b>	<b>-753</b>

Tabela 35 – Economias de Energia e O&M.

Região	Economias			% Redução	
	Energia (GWh/ano)	Energia (R\$/ano)	O&M excluindo energia (R\$/ano)	Energia	Manutenção
Norte	304	69.766.897	44.123.270	52	54
Centro-Oeste	624	155.812.499	76.764.848	51	54
Sul	1.058	261.345.212	153.682.634	51	54
Sudeste	2.652	636.996.696	344.563.216	49	54
<b>Total</b>	<b>4.638</b>	<b>1.123.921.304</b>	<b>619.133.968</b>		

## 5.2.4

### Resumo das análises anteriores

Em resumo, considerando viável a redução no preço do LED em 36% (R\$ 1.216), a tabela abaixo consolida qual a fração do potencial de economia técnica que se traduziria de fato em economia de energia do ponto de vista da concessionária e do ponto de vista dos municípios.

Tabela 36 – Percentual do Potencial Técnico com Viabilidade Econômica.

<b>Cenários analisados</b>	<b>Economia de Energia (GWh)</b>	<b>Redução viável (%)</b>
Potencial técnico (teórico)	6.108	-
Potencial sob ótica da concessionária	0	0
Potencial sob ótica dos municípios	4.638	76

Importante destacar que este cenário de viabilidade econômica, com redução do preço do LED em 36%, somente se justifica se for também considerada redução do custo de mão-de-obra para manutenção (54% de redução total de custos de O&M) e não apenas redução do consumo de energia elétrica. A relevância da redução dos custos de O&M é um dos fatores que explica porque o investimento, sob a ótica de concessionárias (onde este benefício não foi considerado), não se viabilizou – conforme apresentado no item 5.2.2. Isto reforça a importância do profundo conhecimento da contabilização e gestão do serviço de manutenção para que a construção do caso base dos custos de manutenção possa fundamentar, com precisão, o desenho e aprovação do projeto de investimento.

## 5.3

### Desafios e Recomendações para Introdução da Tecnologia LED em IP no Brasil

Apesar dos benefícios potenciais, existem desafios que dificultam a incorporação em grande escala da tecnologia LED no Brasil:

- (i) risco tecnológico representado pela falta de especificações mínimas e padrões técnicos em um clima de rápida inovação no mercado de LED;
- (ii) falta de infraestrutura: laboratórios e capacidade técnica para realizar testes de avaliação;
- (iii) limitações financeiras: produtos de alto custo, baixa escala de produção local;
- (iv) falta de linha de financiamento específica para LED em IP ou mesmo semafórica.

Ademais, do ponto de vista mais amplo de efficientização do sistema de IP, há alguns desafios que vão além da tecnologia LED, que independem desta tecnologia, mas que necessitam ser investigados até mesmo para maximizar a aplicação do LED.

A partir de análise das lições aprendidas e desafios encontrados internacionalmente, em específico no projeto de Los Angeles, e da análise do potencial de economia no Brasil, cada um destes desafios e oportunidades no país é contextualizado.

### 5.3.1

#### **Ausência de especificações mínimas e padrões técnicos**

Especialmente nos anos iniciais de introdução da tecnologia nos Estados Unidos, o desempenho de muitos dos produtos não refletiam as declarações dos fabricantes. Houve também inúmeros casos reportados onde o LED causou reflexos e ofuscamento, impactando negativamente a adoção em algumas aplicações. Se for considerado que todos estes desafios ocorreram num ambiente que havia maciços investimentos em P&D e ampla disseminação de informação, a situação torna-se mais desafiante no Brasil, onde não há política pública apoiando o uso do LED de forma similar para aplicações de uso externo. Tampouco ainda há normas regulamentadas para Iluminação Pública. No final de 2013, esteve em consulta pública, coordenada pelo INMETRO, a nova regulamentação<sup>98</sup> de luminárias LED, que tinha como objetivo impulsionar o mercado, apoiando

---

<sup>98</sup> Disponível neste website até 23 de Novembro de 2013: <http://bit.ly/17cyFI5>.

introdução desta tecnologia de forma sustentada. No entanto, até o momento, a mesma aguarda regulamentação.

No Brasil, normas que existem, por exemplo para sinalização semafórica tem limitações. A norma ABNT NBR 15889 de 2010 foi baseada numa simplificação da norma americana ITE 2005, conforme detalhado na Tabela 39 a seguir. São ressaltados três pontos na análise entre ambas. Em primeiro lugar, a norma americana cita que a intensidade luminosa do LED deverá ser mantida em 48 meses. Os termos “ser mantido em 48 meses” foram excluídos da norma NBR. Em segundo, desde 2006, o Departamento de Energia dos Estados Unidos estabeleceu portaria com limite mínimo de eficiência energética, onde apenas os LEDs se adequam (DOE, 2006), enquanto no Brasil, mesmo com a tecnologia de LED para sinalização já madura e consolidada, ainda é permitido o uso das lâmpadas incandescentes de filamento de tungstênio reforçado de 60 e 100W que são muito ineficientes. A tabela 37 a seguir resume os pontos observados.

Tabela 37 – Comparação de Normas para Sinalização Semafórica com LED.

Parâmetro	ABNT – NBR 15889	ITE 2005	Comentários
Potência do foco semafórico de 200 mm	15W máximo @ 25°C para todas lâmpadas (verde, vermelho e amarelo)	-	Nos EUA, Programa Energy Star desde 2005 restringe o uso de LED para aplicação em semáforos por limitar potência máxima das lâmpadas:
Potência do foco semafórico de 300 mm	-	-	<p>Foco 200 mm</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>verde: 12 W máx 25°C e 74°C</li> <li>vermelho: 8W a 25°C e 13W a 74°C</li> <li>amarelo: 13W a 25°C e 16W a 74°C</li> </ul> <p>Foco 300 mm</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>verde: 15 W máx 25°C e 74°C</li> <li>vermelho: 11W a 25°C e 17W a 74°C</li> <li>amarelo: 22W a 25°C e 25W a 74°C</li> </ul> <p>No Brasil, portaria do MME ainda permite uso de lâmpadas incandescentes de 60 a 100W. Lâmpadas LED no Brasil podem consumir até 50% mais energia que similares nos EUA</p>
Intensidade luminosa	Valores mínimos no recebimento de amostra em temperatura de -10°C a + 60°C	Valores mínimos mantidos por 48 meses em condições de temperatura que variam de -40°C a + 74°C	Os valores de intensidade luminosa são iguais, mas em condição ambiental menos restritiva no Brasil e sem garantir manutenção do valor ao longo da vida útil.
Distorção harmônica total	-	Máx 20%	A ausência de um limite máximo na norma brasileira pode diminuir a qualidade de energia da rede e gerar prejuízos no longo prazo.
Testes de qualificação do projeto do foco semafórico	11 testes de qualidade	Mais de 20 testes incluindo testes nas lentes, ruído eletrônico, etc	
Notas Técnicas para esclarecer a norma	-	6 notas técnicas incluindo recomendação de 60 meses (5 anos) de prazo de garantia, monitoramento de intensidade luminosa	No caso americano, percebe-se que a norma não só tem uma função técnica, científica, mas também tem uma função educativa para esclarecer o gestor na aplicação da norma. A norma também indica como o consumidor pode se proteger frente a falhas decorrente de defeitos de fabricação.

Fonte: ABNT, 2010; ITE, 2005; DOE, 2005.

A norma NBR é também voluntária, exceto em situações específicas, “cabe aos agentes econômicos decidirem se as usam ou não como referência técnica para uma transação”<sup>99</sup>.

A abordagem em detalhes da aplicação de LED no uso semafórico foi realizada neste item, para ilustrar o tamanho da lacuna do desenvolvimento tecnológico no Brasil, especialmente considerando que a tecnologia de LED para iluminação pública está ainda em evolução, é mais complexa, e gera mais riscos ao gestor público, pois seu investimento é significativamente superior.

Como um exemplo internacional de contraponto, o Departamento de Energia dos Estados Unidos, em nível federal, implantou uma série de programas de qualidade para testar produtos para IP em laboratório e realizar testes demonstrativos em campo, além de patrocinar reuniões com fabricantes, universidades, designers e engenheiros de iluminação, empresas de serviço de conservação de energia, companhias distribuidoras de energia elétrica, municípios, agentes financeiros, etc. A criação deste ecossistema de inovação favoreceu a criação de novas normas, ferramentas e maior transparência no mercado, facilitando a disseminação de conhecimento. Iniciativas como SEAD (Desenvolvimento de Utensílios e Equipamentos Super-Eficientes, do inglês *Super-efficient Equipment and Appliance Deployment*, que é uma iniciativa envolvendo 17 governos nacionais, e a iniciativa privada num esforço colaborativo para troca de experiências), desenvolveram ferramentas em Excel específica para IP para apoiar a consolidação deste mercado (SEAD, 2015).

O governo brasileiro faz parte da iniciativa SEAD através do INMETRO<sup>100</sup> e o fortalecimento de recursos ao INMETRO para que possa avançar nos processos regulatórios, assim como a ativa participação da comunidade acadêmica e centros de pesquisa, em conjunto com fabricantes de produtos LED e potenciais grande consumidores (representantes de prefeituras) em comitês técnicos e fóruns como o da ABNT, são exemplos de algumas das maneiras de avançar neste tema no país de forma sustentada.

---

<sup>99</sup> Disponível em <http://www.abnt.org.br/normalizacao/o-que-e/niveis-de-normalizacao> Acesso em 10 julho 2015.

<sup>100</sup> Disponível em <http://www.superefficient.org/About-Us/Member-Governments.aspx> Acesso em 10 de julho de 2015.

### 5.3.2

#### **Falta de infraestrutura, capacitação técnica e mudança na cultura de projeto**

Mesmo num ambiente de alta regulação de mercado, desafios ainda existem pois, apesar da promessa de vida útil de longa duração, não há nenhuma maneira padrão para avaliar a vida útil e confiabilidade de produtos de LED. Falhas podem ocorrer não só devido à depreciação de intensidade luminosa da lâmpada, mas devido à falha do driver, má qualidade de energia da rede precipitando falha no driver, ingresso de umidade, corrosão, dentre outras falhas decorrentes de interação entre os diversos componentes do sistema, que podem comprometer a rentabilidade do projeto e aumentar custos operacionais do projeto devido a frequência de substituições de peças e manutenção. Alguns LEDs podem piscar visivelmente, o que pode impactar negativamente a adoção em algumas aplicações.

Isto evidencia a necessidade de capacitação técnica não só para avaliação de produtos em laboratório, mas também para realização de testes de campo e criação de mecanismos de proteção de compra em contratos de aquisição de produtos. Isto se torna ainda mais premente, pois a indústria de iluminação em estado sólido traz uma mudança na cultura de projeto, com adoção da fotometria absoluta, antes não necessária.

A Prefeitura de Los Angeles desenvolveu um extenso projeto de avaliação das luminárias, não só realizando testes em laboratórios, mas também executando testes em campo, incluindo avaliações de desempenho fotométrico e testes de percepção junto aos moradores.

Algumas cidades nos Estados Unidos e mesmo em algumas aplicações para a cidade do Rio de Janeiro, produtos foram fornecidos com garantia de 10 anos, o que pode minimizar este problema. Mas de forma geral, em entrevistas, a percepção é que a garantia de 10 anos pode ser um programa de marketing de curto prazo, do que propriamente uma garantia que poderá ser oferecida de forma extensiva a todo mercado. Ademais, a análise para identificar falha do produto pode ser complexa, e um município com corpo técnico sem tanta especialização poderia ter dificuldade de questionar o fabricante.

Um outro desafio é que a infraestrutura de iluminação existente pode limitar o benefício do LED de longo prazo, antecipando falha no driver por exemplo em linhas aéreas que não têm proteção contra descarga atmosférica. Outras limitações seriam a distância entre postes e braços existentes não serem compatíveis com características fotométricas de luminárias LED, o que acarretaria um investimento adicional para adequar o sistema que dificilmente seria viável.

A engenharia de iluminação é uma ciência complexa, multidisciplinar, que envolve distintas áreas de conhecimento, não se restringindo apenas a fonte de luz e luminárias. Diversos outros temas devem ser considerados como efeitos não-visuais da luz ao ser humano e a toda biodiversidade de forma geral, visão mesópica, efeitos secundários da iluminação, consumo de potencia da fonte de iluminação, inovações tecnológicas (fontes de luz, luminárias, sistema de gestão de iluminação), solução conceitual para projeto de iluminação externa que leve em consideração o aspecto visual da cidade durante a noite, princípios para lidar com luz indesejável, etc (HABEL e ŽAK, 2012). A diversidade de composição da CIE e suas 7 distintas divisões nos temas de visão e formação de imagem, radiação e medição física da luz, desenho de iluminação, sinalização para transporte, fotobiologia e fotoquímica e tecnologia de imagem ilustram a complexidade da disciplina.

No Brasil, há algumas iniciativas de cursos específicos de pós-graduação sobre engenharia de iluminação pública<sup>101</sup>, grupos de pesquisa voltados a iluminação<sup>102</sup>, cursos de desenho de iluminação (CAVALLO, 2006), presença de organizações como ASBAI - Associação Brasileira de Arquitetos de Iluminação<sup>103</sup> e a representação no Brasil da CIE – Comitê Brasileiro de Iluminação<sup>104</sup>, mas há espaço para aperfeiçoamento. Durante a realização desta pesquisa, para citar um exemplo, verificou-se que normas ABNT adotadas para definir LED, iluminação e iluminação pública não estão disponíveis para consulta em bibliotecas universitárias, sendo um potencial indicador que evidencia que o tema, por ser muito específico não é usualmente tratado, havendo campo para expansão e disseminação de conhecimento e informação. O aprofundamento da

---

<sup>101</sup> PUC- Minas, por exemplo disponível neste site <http://bit.ly/1o13P3I> Acesso em 10 de janeiro 2016.

<sup>102</sup> UFJF – NIMO – Núcleo de Iluminação Moderna - <http://bit.ly/1XueBQM>

<sup>103</sup> ASBAI: <http://www.asbai.org/quem-somos/>

<sup>104</sup> CIE – Brasil: <http://www.inmetro.gov.br/ciebrasil/>



atuação do Brasil em redes de cooperação internacional como o SEAD citado anteriormente e uma colaboração ainda mais estreita com países que estão mais avançados no desenvolvimento de pesquisa de luz em estado sólido pode alavancar benefícios ao país.

No contexto de municípios, a implantação de um projeto de LED em IP implicaria na criação de equipe multidisciplinar com conhecimento de planejamento e gestão de projetos, gestão de custos de manutenção, eficiência energética, engenharia elétrica, desenho de iluminação, finanças de projeto e modelagem financeira e de contratação de serviços. Considerando a realidade brasileira, com milhares de pequenos municípios que não tem corpo técnico especializado, a decisão entre substituir uma lâmpada de VSAP que custa R\$ 30,00 ou investir numa luminária LED de R\$ 1.900,00 muito provavelmente tenderia a uma comparação de preços, numa decisão simplista de curto prazo. O que, realisticamente, num cenário de curto prazo, poderia reduzir o potencial de mercado listado na tabela 36.

A replicação e adaptação no Brasil de uma rede colaborativa de municípios para troca de informações sobre iluminação pública voltada a LED, como nos Estados Unidos através do *Municipal Solid-State Street Lighting Consortium*, poderia ser um exemplo para lidar com este desafio. A estruturação de consórcios municipais seria também benéfica para reduzir custos transacionais do projeto. E fundamentalmente a ampliação da disseminação de informações e conhecimento para os municípios.

### 5.3.3

#### **Produtos de alto custo, sem escala de produção no Brasil**

Conforme apresentado no item 3.2, no varejo, o custo de uma luminária LED para IP no Brasil é estimada ser 80% superior a uma equivalente nos Estados Unidos, usando referência de preço do DOE (DOE, 2015) e estimativa do Banco Mundial para o Brasil (2015). Utilizando referências de preços práticas de cidades como Seattle (2014) e Los Angeles (2012), ao invés de cenários do DOE, o que se verifica é que o distanciamento de preços entre os Estados Unidos e Brasil ainda se intensifica, chegando a ser mais que o dobro. Para lâmpadas de uso interior,

conforme também apresentado no item 3.2, o preço – dependendo da potência – é o triplo no Brasil.

Esta grande lacuna é justificada pela inexistência de fábricas de LED no Brasil, mas de montagem, que acarreta num elevado custo de importação, somada a elevada carga tributária citada anteriormente.

Vale ressaltar que até que se tenha uma demanda consolidada e pedido de compra em grande escala ou uma intenção firme de compra no Brasil, os preços tenderão a ser ainda muito imprecisos, sujeitos a variações.

Dado o potencial do tamanho de mercado de LED para IP no Brasil, da ordem de bilhões de reais por ano, e ao possível interesse de construção de fábricas locais, uma vez estruturada uma operação de compra de luminárias, o preço do produto deve se reduzir e esta barreira de preços tenderá a ser mitigada. A estruturação de consórcios municipais ou apenas uma aliança temporária entre diferentes municípios para compra conjunta de luminárias pode resultar em redução de preço, dada a economia de escala<sup>105</sup>.

Com relação a carga tributária, seria recomendável aprofundar análise para verificar – de fato – que componentes da luminária não poderiam ser fabricados no Brasil, devido a ausência de mão-de-obra qualificada ou ausência de indústria local com capacidade de produção para estudar efeitos de desoneração tributária para facilitar importação. Uma política de aumento generalizado de tributos para dificultar importação e favorecer a indústria local pode não ser efetiva, caso o país não tenha capacidade técnica de fabricação. Segundo estimativa do BNDES, a partir de demanda de licitação do município de São Paulo, diversos componentes de luminárias já poderiam ser projetados e/ou fabricados no país (BNDES, 2015).

#### **5.3.4**

#### **Falta de linha de financiamento específica para otimização de IP**

Além de recursos financeiros para fortalecer a indústria local, os Estados Unidos conta com instrumentos e linhas de financiamento para impulsionar a

---

<sup>105</sup> Exemplo de aliança no estado americano de Iowa onde 15 municípios (com população inferior a 5.000 habitantes) se juntaram para compra conjunta de 1.150 luminárias LED. Disponível em <http://energy.gov/eere/ssl/volume-purchasing-alliances> Acesso em 15 jun 2015.

modernização e conversão do parque de iluminação pública para LED, cujas informações ficam disponibilizadas on-line no website do Departamento de Energia (DOE)<sup>106</sup>. Os instrumentos variam de descontos na tarifa proporcionados por distribuidoras de energia elétrica, à linhas de financiamento da iniciativa privada (incluindo os próprios fabricantes), passando por contratos de desempenho energético onde ESCOS (Empresas de Serviço de Conservação de Energia) são remuneradas a partir das economias obtidas no projeto. O DOE também disponibiliza planilha (com instruções em vídeo) para apoiar as cidades na avaliação econômica e também financeira do projeto.

No Brasil, não há linhas de financiamento específicas à iluminação pública, excetuando o Procel-RELUZ e em certa medida também ANEEL (2013) que contempla o setor. Historicamente, as melhorias para o setor de IP e sinalização semafórica foram fortemente dependentes do Procel RELUZ que, por falta de verba, atualmente está descontinuado sem recursos para aplicar em mais projetos (BRASIL, 2013), abrindo uma grande lacuna no setor. Mesmo que houvesse recursos, como um dos critérios de aprovação é que o projeto proporcione uma relação RBC (inverso da relação custo benefício listada no Anexo A) superior a 1, com os cenários atuais de preço e mesmo com a projeção de redução de 36%, os projetos com LED não seriam elegíveis a obtenção de financiamento.

A ANEEL, assim como o Procel-RELUZ, por avaliar o investimento sob a ótica da concessionária, com os cenários atuais de preços também não se viabiliza como uma alternativa de linhas de financiamento para modernização do parque de iluminação de LED para IP. Com as regras atuais para IP, por disponibilizar recursos sob a forma de doação (sem pagamento do empréstimo) e por ter critérios ainda mais rígidos que o RELUZ, tende a ser pouco aplicável aos projetos de eficiência com LED, cuja viabilidade econômica é influenciada pela redução dos custos de manutenção, exceto para a sinalização semafórica, uma vez que a redução do consumo de energia elétrica é mais significativa (ANEEL, 2015b).

---

<sup>106</sup> As diferentes formas de financiamento listadas pelo DOE podem ser acessadas on line neste link. Acesso em 1 nov 2015.

De fato, consultando histórico de projetos financiados pela ANEEL desde 2008 até dez 2015<sup>107</sup>, os projetos de iluminação pública são desprezíveis (apenas 3 de um total de mais de 1600 implementados) contribuindo com menos de 0,1% do total de economia alcançada no período. A seguir são apresentadas algumas sugestões de alternativas, que não pretende ser extensiva, mas ilustrativas do conceito de algumas possíveis abordagens:

- Recursos ANEEL

De acordo com a Lei nº 12.212 de 2010 (BRASIL, 2010a), as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica aplicam, no mínimo, 60% dos recursos dos seus programas de eficiência para unidades consumidoras beneficiadas pela Tarifa Social. Se por um lado este tem sido uma forma de distribuição de renda e melhoria de qualidade de vida à população de baixa renda, ao mesmo tempo que proporciona ganhos de economia de energia, por outro gera uma disparidade entre o percentual de investimento alocado aos setores que consomem energia elétrica versus sua real contribuição no consumo total de energia elétrica. A figura 42 ilustra a situação mostrando o histórico de 2008 a 2015. Verifica-se por exemplo que o setor industrial – que consome 40% da energia elétrica em 2013, recebeu menos de 10% dos investimentos.

---

<sup>107</sup> “Em 2005, a ANEEL modificou a regulamentação do PEE ao proibir a alocação de recursos para projetos de iluminação pública. Com isso, o PROCEL/RELUZ se tornou uma das únicas fontes de recursos públicos para investimentos em eficiência energética na iluminação pública. Contudo, pouco após a reforma legal que determinou o encerramento da RGR em 2012, um novo conjunto de regras veio novamente permitir o uso do PEE para financiar projetos de iluminação pública (Resolução 556/2013)”(WORLD BANK, 2014).

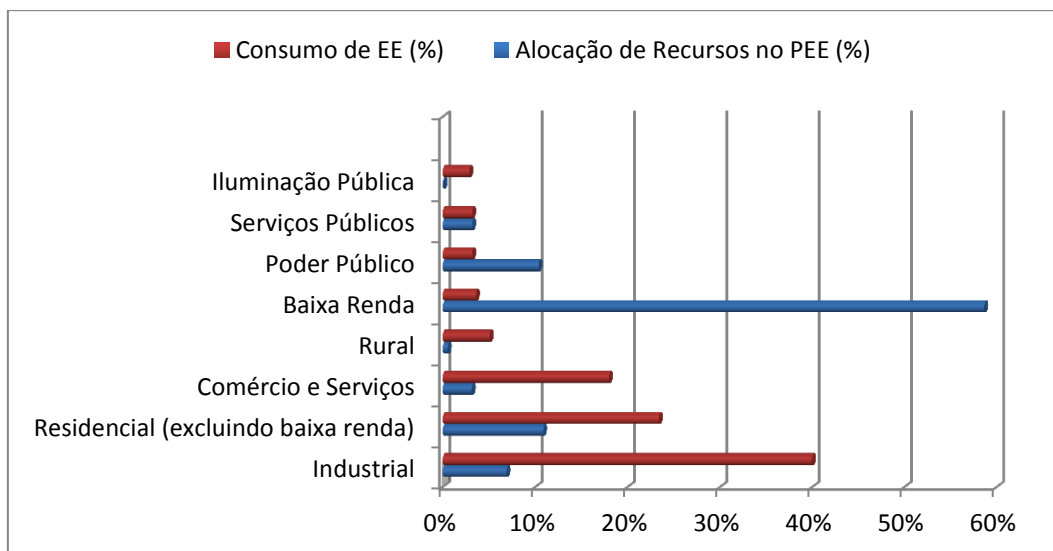


Figura 42 – Alocação de Recursos no PEE e Contribuição no consumo de EE.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de ANEEL, 2015b e EPE, 2014<sup>a</sup>.

Já o consumo de energia elétrica da população de baixa renda, que no ano de 2013 representou 3,6% do consumo total de energia elétrica no país (EPE, 2014a), que é um valor um pouco maior que o consumo de energia para IP (EPE, 2014a), recebeu 59% do investimento, enquanto IP recebeu menos de 0,1%.

Dependendo do cenário de preços da luminária LED, como o projeto de LED em IP pode ter grande atratividade sob a ótica dos municípios, conforme discutido anteriormente, uma possível alternativa seria investigar a viabilidade de utilizar o recurso ANEEL não como uma doação ao município, mas como um empréstimo em condições financeiras atrativas aos municípios. A avaliação e escolha do portfolio de projetos incluiria parâmetros como TIR, VPL e TR. Uma vez implementados os projetos, com a economia de energia (descontada diretamente pela distribuidora), o empréstimo poderia ser amortizado e o retorno deste recurso poderia então ser reinvestido à fundo perdido nos sistemas de eficiência de baixa renda.

Não é objeto desta pesquisa detalhar a viabilidade desta medida ou o impacto em termos de administrar esta alternativa, mas considerando que o sistema de medição e verificação de projetos em baixa renda é complexo, pois o número de consumidores é pulverizado e o consumo de energia pode variar por uma série de fatores, já IP é simples pois o consumo é fixo e de certa forma consolidado através da distribuidora de energia elétrica, talvez a gestão e implementação desta medida não seja tão complexa.

- Parceria público privada

Esta alternativa envolveria a criação de uma sociedade de propósito específica pela empresa vencedora para compra das luminárias LED, instalação e manutenção dos sistemas.

A figura a seguir ilustra as vantagens e desvantagens deste tipo de financiamento.

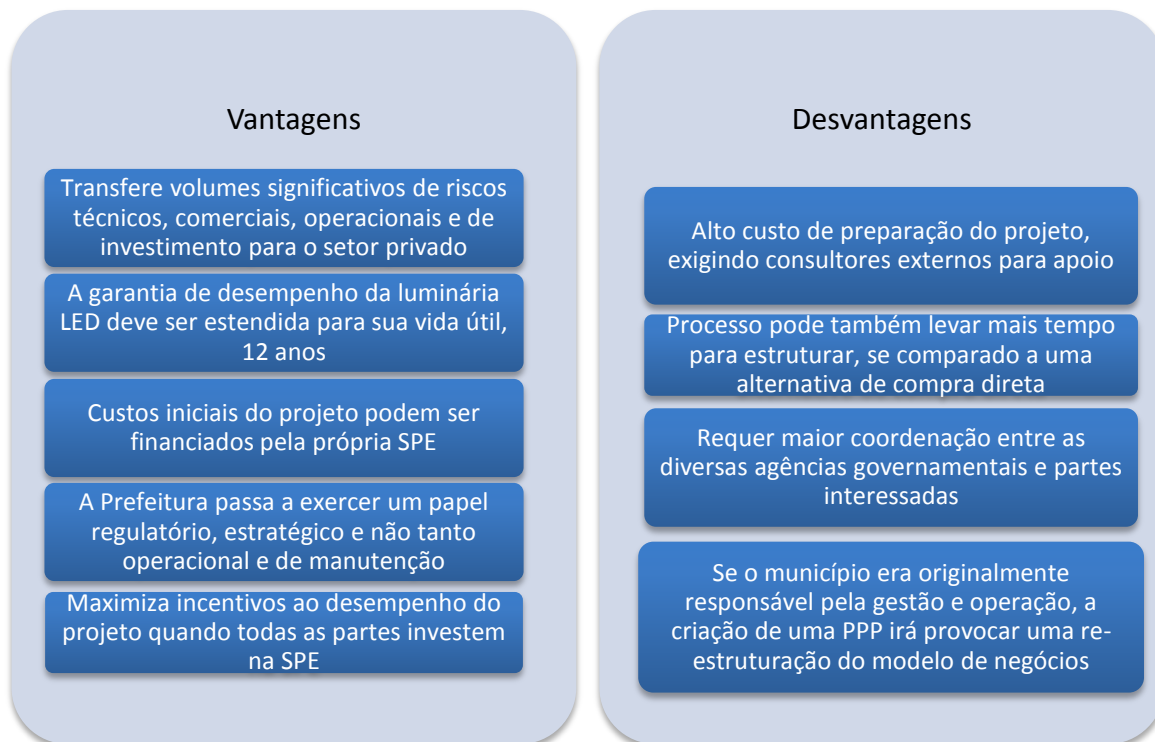


Figura 43 – Vantagens e Desvantagens da Estruturação de PPP.

Fonte: MAURER e MEYER, 2014.

A Prefeitura de São Paulo por exemplo estrutura uma das maiores PPP's do mundo com investimentos estimados em mais de R\$ 1 bilhão para contrato de 20 anos (BNDES, 2015).

### 5.3.5

#### Desafios que independem da tecnologia LED

##### *Sombreamento*

Em cidades que têm extensa arborização, não é incomum ser constatado má qualidade de iluminação, não devido ao baixo desempenho fotométrico ou baixa eficiência da luminária em si mas devido ao mal posicionamento da luminária. As fotos da figura 44 evidenciam o impacto do posicionamento da luminária acima da copa de árvores, resultando em uma zona de sombreamento na calçada.

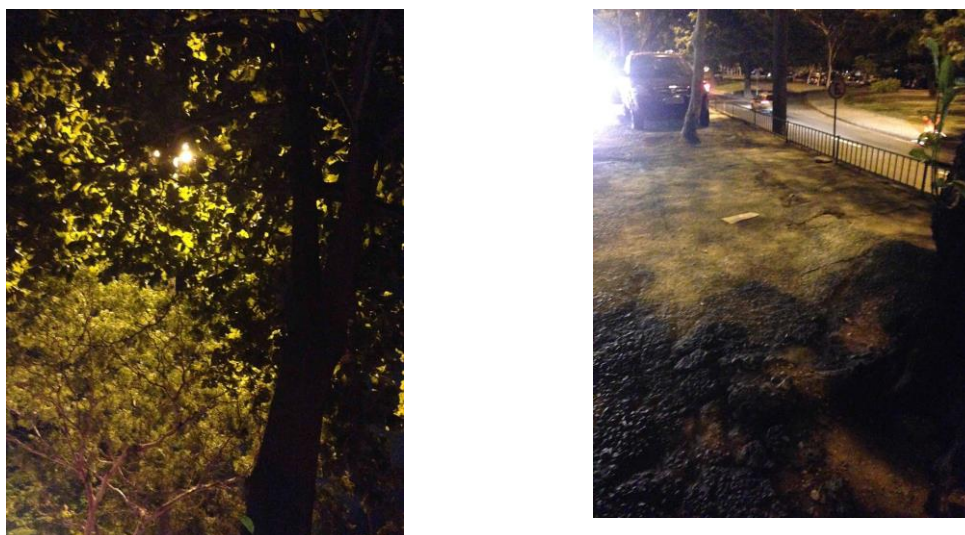


Figura 44 – Luminária Tradicional Coberta por Copa de Árvore e Sombreamento na Calçada.

Fonte: Foto tirada pela autora em junho de 2015 no Rio de Janeiro.

A realização de um inventário detalhado das luminárias de IP pelos municípios (envolvendo as secretarias responsáveis pelas pastas de iluminação e meio ambiente – parques e jardins) para fundamentar correções no sistema, solucionando problemas como o reportado, certamente traria benefícios a motoristas e pedestres, com melhoria de qualidade da iluminação, sem que necessariamente incorra aumento do consumo de energia para atender a norma NBR 5101:2012 (ABNT, 2012). A própria norma dá orientações de posicionamento adequado da luminária relativo às árvores.

Sombreamento também pode ocorrer quando o projeto não está otimizado em seu ponto ótimo. Por exemplo, zonas de sombreamento nas áreas localizadas entre os postes nas duas figuras 51a e 51b ilustram a questão, onde seria interessante verificar se o parâmetro de uniformidade atende a NBR 5101:2012.



Fig 45a. Ciclovía no Rio de Janeiro com LED



Fig 45b. Av Efigênio Sales em Manaus com LED

Figura 45 – Sombreamento em ciclovía e avenida (projetos com LED).

Fonte: Rio (GOBI, E. 2012 – foto Rubens Campo GE Iluminação) e Manaus (G1 Amazônia, 2015).

A avaliação se o sistema de IP atende aos diversos parâmetros e recomendações da NBR 5101:2012 (ABNT, 2012) e não apenas a questão de uniformidade (citado através do caso de sombreamento) poderiam também trazer potenciais benefícios ao sistema.

A troca de experiências entre cidades, uma das propostas de recomendações citadas anteriormente, também teria benefício de estabelecer parâmetros comparativos entre cidades e eventualmente apoiar a identificar eventuais distorções em termos de padrão de iluminação (kWh/ km de ruas e avenidas). Este parâmetro, utilizado pelo Banco Mundial em estudo ilustrou indicadores muito diversos entre cidades brasileiras entre si e entre cidades de outros países (ESMAP, 2014).

### ***Problemas com células fotoelétricas***

Não é incomum visualizar lâmpadas acesas em plena luz do dia devido a problemas em fotocélulas, evidenciando desperdício de energia.





Fig46a. Rio de Janeiro, Bairro Lagoa (LED)



Fig 46b. Rio de Janeiro, Bairro Botafogo (VSAP)

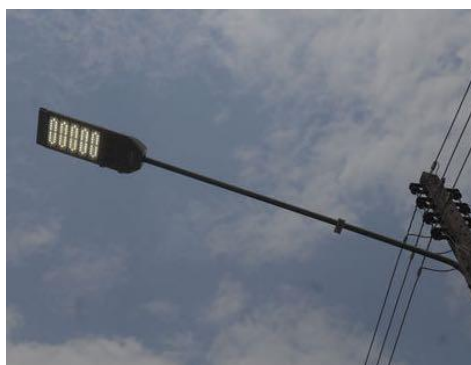
Fig46c. Manaus, bairro Dom Pedro - LED (foto Antonio Menezes<sup>108</sup>).

Figura 46 – Luminárias Acesas Durante o Dia no Rio de Janeiro e Manaus.  
 Fonte: Rio de Janeiro (autora, junho de 2015) e Manaus (VALOIS, 2015).

As fotos na figura 47 ilustram situações semelhantes de desperdício de energia em Londres e Copenhagen, para citar dois exemplos no exterior.



Fig. 47a Londres, Aeroporto Heathrow.



Fig. 47b Copenhagen, próximo ao Centro.

Figura 47 – Luminárias Acesas Durante o Dia.  
 Fonte: Fotos tiradas pela autora em agosto de 2015 nas cidades de Londres e Copenhagen.

<sup>108</sup> VALOIS, I. Lâmpadas de postes de Manaus ficam ligadas de dia e desligadas durante a noite. 19 ago 2015. Disponível em [http://acritica.uol.com.br/manaus/Amazonas-Amazonia-Lampadas-postes-Manaus-durante-apagadas\\_0\\_1415258467.html](http://acritica.uol.com.br/manaus/Amazonas-Amazonia-Lampadas-postes-Manaus-durante-apagadas_0_1415258467.html) Acesso em 20 de dezembro de 2015.

Não há intenção de comparar cidades ou magnitude do desafio desta ineficiência, mas apenas ilustrar – qualitativamente – as situações de desperdício.

O aperfeiçoamento da gestão do sistema de IP, o uso de novas tecnologias como tele-gestão e novos materiais como relés de alta vida útil – 20 anos (SEATTLE, 2014) pode incrementar o desempenho do sistema de IP e potencializar redução de consumo de energia e consequentes custos operacionais.

### ***Ausência de inventário atualizado de IP em nível nacional***

A ausência de inventário em nível nacional dificulta a estruturação de políticas públicas, pela ausência de dados que subsidiem incentivos e apoio técnico aos municípios. Especialmente no Brasil, onde há grande pulverização de municípios (mais de 5.500) e onde agora são responsáveis pela gestão de IP conforme resoluções 414 e 479 (ANEEL, 2010 e ANEEL, 2012), isto se torna ainda mais premente. Apesar de pequena variação entre o consumo de energia elétrica para IP reportado pela EPE (EPE, 2013) e pela ANEEL (ANEEL, 2015), como apresentado anteriormente neste item, a diferença evidencia a necessidade de apurar o inventário para consolidação de informação.

Nos Estados Unidos, em 2013, o Departamento de Energia realizou uma extensa pesquisa junto a diversos municípios, empresas de distribuição de energia elétrica e outras partes interessadas, para mapear a situação no país. Número de pontos de iluminação, tecnologia empregada, idade do sistema, custos e consumo de energia e custos de manutenção foram alguns dos pontos levantados (DOE, 2014e).

A implementação de processo similar no Brasil, coordenado pelo governo nacional, poderia ser um primeiro passo para cobrir a lacuna, que a mudança de legislação com a resolução ANEEL 414 (ANEEL, 2010 e ANEEL 2012) intensificou. Com o avanço da tecnologia de comunicação, a criação de um portal na internet, por exemplo, para que o município realize o cadastro on-line do sistema de IP poderia ser também outra alternativa, similar ao que hoje é realizado pelo Ministério das Cidades para consolidar dados sobre situação dos municípios

quanto aos tratamentos de água e esgoto e resíduos sólidos (SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento)<sup>109</sup>.

### ***Ausência de controle da reciclagem de lâmpadas que contêm mercúrio***

Concomitantemente à estruturação de um programa de eficiência energética de iluminação pública, deve ser estruturado um programa que aperfeiçoe o sistema de rastreamento, monitoramento e controle do descarte das lâmpadas que serão substituídas, que contêm mercúrio.

Em nível global, a taxa de reciclagem de lâmpadas que contêm mercúrio é muito baixa. Em 2004, a Associação de Iluminação e Recicladores de Mercúrio (ALMR)<sup>110</sup>, organização norte-americana sem fins lucrativos de empresas membro que fornecem serviços de iluminação e reciclagem do mercúrio ao redor do mundo, publicou pesquisa onde mostra que apenas 20% de lâmpadas com mercúrio eram recicladas por empresas, instituições e órgãos do governo nos Estados Unidos, e apenas 2% de lâmpadas domésticas eram recicladas (ALMR, 2004).

De 2004 para hoje, mesmo com incentivos de políticas públicas, como criação de taxas agregadas ao valor do produto para contribuir para financiar a reciclagem pelas empresas fabricantes, ainda assim, a destinação correta de lâmpadas com mercúrio por empresas, órgãos governamentais e indivíduos (no caso das lâmpadas compactas fluorescentes para uso interno) é baixa, conforme entrevista por e-mail com a associação ALMR, transcrita a seguir (ALMR, 2016).

*“A indústria de reciclagem de lâmpadas que contém mercúrio é uma indústria robusta nos Estados Unidos e continua a crescer ao redor do mundo. Ainda assim, a Associação de Iluminação e Recicladores de Mercúrio estima que aproximadamente 2/3 de todas as lâmpadas que contém mercúrio usadas em países desenvolvidos não são recicladas ao final de sua vida útil. Infelizmente,*

---

<sup>109</sup> Disponível em <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em 03 de outubro de 2015.

<sup>110</sup> ALMR é uma organização nacional sem fins lucrativos de empresas membro que fornecem serviços de iluminação e reciclagem do mercúrio ao redor do mundo. Estas empresas processam resíduos para recuperar o mercúrio, impedindo-o de entrar no ambiente ou impactar a saúde humana. A indústria também processa lâmpadas fluorescentes com fósforo para a recuperação de elementos de terras raras. ALMR serve como um recurso educativo e informativo para o governo, empresas e ao público em relação a recuperação de mercúrio e disposição adequada. Uma importante parte da missão é promover programas, políticas e práticas que desviem resíduos que contenham mercúrio do fluxo de resíduos sólidos e o ambiente- especificamente para a recuperação de mercúrio e terras raras. Disponível em [www.almr.org](http://www.almr.org).

*em países em desenvolvimento e nações insulares não há praticamente reciclagem.*

*É inevitável que mercúrio seja descartado ao meio ambiente e possivelmente exponha seres humanos quando lâmpadas não são recicladas. Além disso, valiosos elementos de terras raras contidos nas lâmpadas com fósforo não poderão ser recuperados quando lâmpadas são descartadas. Reciclagem é conveniente e não é custosa, então por que tantas lâmpadas são descartadas no lixo?*

*Dados são difíceis de ser levantados pois não há sistema de rastreamento público para monitorar a reciclagem de lâmpadas, há pouca responsabilidade e poucos incentivos para gestão apropriada. Regulamentos e leis não são consistentes de estado para estado e há lacunas que permitem a disposição em aterros em quase todos lugares. Mesmo quando requerido, a aplicação de leis por governos tem sido esporádica. As taxas de reciclagem para setores específicos da economia não são conhecidas. Podemos apenas esperar que setores como a iluminação pública, que usa VSAP, VM, municípios, instituições, serviços públicos e grandes empresas levem seus requisitos de conformidade à sério e façam a reciclagem de lâmpadas. Pequenas empresas e residentes participam de forma voluntária, pois são em grande parte isentos dos requisitos legais.*

*Na União Europeia e Canadá, governos têm cobrado impostos sobre novas lâmpadas (também chamados de eco-taxas ou gastos de gestão ambiental) aumentando o custo de iluminação para os consumidores para que os fabricantes possam utilizar este recurso, ao invés de seu próprio, para custear a reciclagem. A intenção inicial era aumentar a reciclagem, mas de forma geral, as taxas de reciclagem destes programas não se elevaram, porque o mesmo não incluiu motivações<sup>111</sup> para as pessoas levarem as lâmpadas para reciclagem: não há punição se não há reciclagem e nenhuma recompensa se esta é feita!”*

Corroborando com a posição de AMLR, indicando que a reciclagem de lâmpadas contendo mercúrio é quase inexistente em países em desenvolvimento, no Brasil, segundo a ABILUMI (Associação Brasileira de Importadores de Produtos de Iluminação), a taxa é de apenas 6% (DEGRA e GOBI 2015). Em novembro de 2014, o acordo setorial para logística reversa de lâmpadas que contém mercúrio estabeleceu como meta elevar o percentual de reciclagem para 20% em 2020. Apesar do expressivo aumento de 6 para 20% da taxa de reciclagem, elevando o Brasil em 2020 ao mesmo patamar que muitos países desenvolvidos atingiram em 2015, o acordo pressupõe então que é aceitável o

<sup>111</sup> O desafio da baixa taxa de reciclagem de lâmpadas contendo mercúrio e a necessidade de introduzir recompensas externas para esta promoção, reflete o estágio da consciência humana neste momento, onde indivíduos e sociedade como um todo não tem o cuidado com o planeta como parte integral de seus valores pessoais. Segundo Zimmerman e Esbjörn-Hargens, o ser humano tem potencial de evoluir para alcançar um estágio de consciência “planetocêntrico” (perspectiva de visão de mundo onde todos os seres vivos são incluídos, com mesmo valor, sem o dualismo natureza x cultura ou homens x animais) e mesmo mais elevado como “cosmocêntrico”(onde nesta perspectiva, o ser humano tem experiência transpessoal, não dual em relação a natureza) (ZIMMERMAN e ESBJÖRN-HARGENS, 2009).

descarte anual, sem reciclagem, de 1,2 toneladas de mercúrio presente em lâmpadas<sup>112</sup>, um contaminante que bioacumula no sistema. Mesmo considerando que a indústria de iluminação não é o maior consumidor de mercúrio metálico no país – comparado a indústria de garimpo, cloro-soda, entre outros (CETESB, 2014), o impacto de 1,2 toneladas anuais não deveria ser desprezado.

No Brasil, como em países desenvolvidos, tampouco há dados de taxa de reciclagem por setores específicos. No setor de IP, vale destacar os esforços positivos alcançados com o Programa RELUZ, assim como ANEEL que criaram obrigatoriedade da destinação adequada de lâmpadas inservíveis como condicionante ao recebimento de financiamentos.

A realização do inventário de cadastro de lâmpadas de IP citado anteriormente, poderia suprir também esta lacuna, permitindo monitoramento e controle de que toda lâmpada de IP retirada seja destinada apropriadamente. Tal cadastro poderia também ser utilizado para cruzar informações com o setor privado que faz a reciclagem de lâmpadas.

---

<sup>112</sup> Considerando que cerca de 240 milhões de lâmpadas por ano (80% do mercado) poderão ser descartadas sem reciclagem em 2020 (DEGRA e GOBI 2015).

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE FUTUROS TRABALHOS

Foi ilustrado, tanto em nível global como nacional, a importância das estratégias de eficiência energética para reduzir as perdas, aumentando a eficiência dos processos de conversão de energia próximo aos seus rendimentos máximos e também introduzindo mudanças disruptivas de conversão, alterando seus rendimentos teóricos. O desafio das mudanças climáticas foi contextualizado indicando a urgência dessas ações de efficientização, especialmente quando se considera necessidade de inclusão social a 1,1 bilhões de pessoas que sequer tem acesso a eletricidade.

A tecnologia LED para iluminação, em específico em IP, foi objeto desta pesquisa como exemplo de inovação tecnológica que introduz um novo paradigma de conversão de energia elétrica, com maior rendimento teórico que as tecnologias convencionais, sendo nove vezes<sup>113</sup> mais eficiente que a lâmpada tradicional incandescente, com potencial de ter o dobro de eficiência que a lâmpada de vapor de sódio. Ademais, com o LED, há possibilidade que o sistema de IP se transforme em um sistema multifuncional, provendo serviços às cidades que vão muito além da iluminação, mas promovendo conectividade, comunicação, monitoramento e gestão de dados abertos.

Nesta aplicação em IP, as cidades foram identificadas como o principal agente de transformação desta revolução tecnológica, em conjunto com os demais atores, governos nacionais, indústrias, bancos de fomento ao desenvolvimento e organizações da sociedade civil. As aplicações, quando projetadas adequadamente, têm como benefícios a contribuição na mitigação das mudanças climáticas, possibilitando uma rota com custo de abatimento de emissões negativas, o aumento da segurança energética e aumento da qualidade de vida da população.

Ficou evidenciado na revisão de literatura a complexidade da engenharia de iluminação e necessidade de integrar a investigação de novas tecnologias, não apenas no contexto de fonte de iluminação, luminária e sua potência, mas numa

---

<sup>113</sup>Eficiência definida como potência radiante em relação a potência elétrica fornecida, não levando em consideração a qualidade de luz emitida ou o tempo de vida útil da lâmpada.

avaliação integrada que contemple diversas outras áreas como saúde, humanas e comportamental e ecológica, em adição as áreas de engenharia, física e ciência de materiais.

O tema de poluição luminosa é um destes exemplos, onde a iluminação pública, se mal planejada, contribui gerando consequências negativas ambientais, sociais e econômicas (sendo identificado desperdícios de energia tão altos quanto 30%). Foi evidenciado que somente a ação sobre a especificação de luminárias não é suficiente para tratar deste desafio. Aspectos do projeto como a intensidade luminosa também pode ter significativo efeito, assim como a qualidade do comprimento de onda da fonte emissora de luz.

A outra principal fonte de complexidade é a própria nova tecnologia de emissão de luz em estado sólido. Houve uma alteração na cultura de projeto, com necessidade de adoção de fotometria absoluta (e não mais relativa), introdução de novos ensaios de laboratório e de campo. A inovação do LED de luz azul, que trouxe um significativo ganho de eficiência e permitiu aumento da versatilidade de aplicação do LED, vem trazendo também necessidade de pesquisas adicionais em relação a avaliação fotométrica, incluindo desempenho escotópico e mesópico e análises dos efeitos dessa faixa de comprimento de onda sobre saúde (ritmo circadiano) e biodiversidade em geral. A pesquisa identificou cidades que especificam luminárias com temperatura de cor de até 4.000K e pesquisadores e organizações de sociedade civil que pleiteiam que valores devam ser até inferiores a estes e/ou embasados por pesquisas científicas mais aprofundadas.

Dado o potencial desta tecnologia, o bilionário mercado global vem crescendo a taxas bastante expressivas e os Estados Unidos foi identificado como o país onde há mais tempo é dedicado um programa de incentivos e pesquisa para promoção da luz em estado sólido, ou pelo menos que divulga dados e os torna público. O Brasil e América Latina como um todo estão fora deste mapa de inovação.

O estudo de caso de Los Angeles, pioneiro na conversão de seu sistema de IP em LED foi avaliado e reconstruído através de planilha de avaliação econômica/ financeira, que é disponibilizada gratuitamente no site do Departamento de Energia do governo americano. A planilha mostrou-se bastante simples e amigável ao uso, apesar de formulas não serem passíveis de edição, e os resultados da simulação indicaram resultados econômico/ financeiro e ambiental

positivos. Assim como a revisão de diversas outras experiências internacionais indicaram, Los Angeles também se beneficiou com significativa redução de custos de manutenção (superior a 60%), além da redução de custo de energia. O sucesso da implementação deste projeto foi viabilizada por três principais fatores: (i) planejamento e engajamento de diversos departamentos da Prefeitura; (ii) modelagem econômico/ financeira atrativa com destaque para negociação com empresa de distribuição de água e energia que concedeu significativo desconto para cada kwh economizado no sistema e a estruturação de empréstimo, para complementar capital próprio, de tal forma que as economias auferidas amortizariam as parcelas do financiamento e, especialmente, (iii) a capacidade técnica e de liderança do corpo técnico da prefeitura – que já vinha testando lâmpadas LED há 4 anos, e desenvolveu em conjunto com outros atores, um processo bastante robusto de qualificação de fornecedores e luminárias, que incluía avaliação de catálogo, ensaios de laboratório e extensivo programa de testes em campo que contou com ativa participação da população. Os testes em campo foram essenciais, pois nem todos os produtos pré-aprovados em avaliações de catálogo e de laboratório tiveram desempenho adequado em campo.

Importante salientar que o DOE reporta que apesar de toda promessa de longa vida útil do LED, não há uma maneira padrão para avaliar a vida útil e confiabilidade de produtos de LED. Falhas diversas podem ocorrer como na gestão do sistema ótico, gestão térmica e reator. E inclusive deficiências da rede de energia poderão comprometer o caso de investimento do projeto, caso o sistema LED não seja bem configurado e desenhado. Estes pontos podem ser contornados por negociação de garantias com fabricante, contratação de seguros, dentre outras modelagens contratuais.

A partir das análises de estudos de caso internacionais e principalmente pela experiência de Los Angeles, o potencial de economia de energia com a introdução de LED no Brasil foi investigada através da criação de planilhas em Excel. Do potencial técnico calculado (economia de 6.108 MWh), que representa o potencial teórico, caso não houvesse nenhuma restrição técnica e econômica para as substituições, 76% desta economia seria viável de ser alcançada, considerando implementação sob o ponto de vista do município. A região Nordeste, que tem baixas tarifas de energia, no cenário de preço das luminárias adotado e com as simplificações adotadas na modelagem, não se mostrou viável



economicamente. Sob a ótica das concessionárias, utilizando metodologia da ANEEL de cálculo de RCB, os projetos não são viáveis exceto se houver significativa queda de preço da luminária (de R\$ 1.900 para menos de R\$ 1.000). Dada as limitações e simplificações do modelo, não é possível afirmar que em nenhuma cidade do país, o investimento de LED em IP não faça sentido para uma concessionária de energia, mas indica – de forma geral – que este não é atrativo. Um dos fatores que colaboram para esta diferença de atratividade é que as economias com a redução de custos de manutenção não são computadas no cálculo de RCB. Isto sugere que programas de governo que busquem apoiar municípios em projetos de eficiência energética para iluminação devam buscar outros indicadores e critérios para avaliar investimentos, por exemplo os adotados nesta pesquisa (TIR, TR, VPL). A redução de custos de manutenção decorrente de redução de custos de mão-de-obra teve significativo impacto na atratividade do projeto. É recomendável que municípios tenham bastante domínio sobre a gestão de custos e que o impacto de redução de custo de mão-de-obra seja investigado para maximizar benefícios econômicos, garantido também benefícios sociais (eventualmente apoiando capacitação de mão-de-obra para manter empregabilidade de funcionários e contratados em outros setores da economia).

Apesar dos benefícios potenciais da tecnologia LED, existem desafios que dificultam a incorporação em grande escala à nível global e, em especial no Brasil foram identificados: (i) risco tecnológico representado pela falta de especificações mínimas e padrões técnicos em um clima de rápida inovação no mercado de LED, e em aplicação onde há especificações (como sinalização semafórica) foram identificadas lacunas e oportunidades de aperfeiçoamento, se comparadas à normas internacionais; (ii) falta de infraestrutura, laboratórios e capacidade técnica para realizar testes de avaliação sobretudo testes de campo em municípios, especialmente quando se considera que a tecnologia de luz em estado sólido promoveu uma mudança na cultura de projeto; (iii) limitações financeiras (produtos de alto custo, baixa escala de produção local); (iv) falta de linha de financiamento específica para LED em IP ou mesmo semafórica e (v) desafios que vão além da tecnologia LED, que independem desta tecnologia, mas que necessitam ser investigados para maximizar a aplicação do LED. Dentre estes últimos, foram destacados (v.a) a necessidade que cidades otimizem sistema de gestão de IP e adequem projeto à norma NBR 5101:2012; (v.b) criação,

manutenção e atualização de inventários de lâmpadas de IP no Brasil, cuja resolução ANEEL nº 414 de 2010 trouxe como um desafio, (v.c) implantação de um efetivo programa de rastreamento e reciclagem de lâmpadas que contém mercúrio, que serão substituídas pelo LED.

A criação de regulamentação do mercado (com normas e especificações técnicas de LED em IP), a intensificação de programas de capacitação técnica e disseminação de informações (com reuniões virtuais, presenciais, ferramentas computacionais), a criação de um ecossistema colaborativo entre municípios, agentes de fomento de políticas de eficiência energética no país, centros de pesquisa e universidade e iniciativa privada, além de programas de apoio ao financiamento de projetos foram algumas das sugestões abordadas para reduzir os desafios para introdução da tecnologia no país.

Por fim e, não menos importante, são incluídas reflexões sobre o grau de interdependência e conexão entre indivíduos entre si e entre indivíduos e o planeta. Esta interdependência foi evidenciada nesta pesquisa com a discussão e análise do uso da tecnologia LED para IP, a importância da luz e suas tecnologias e seu papel central na promoção do desenvolvimento sustentável. Estas demonstram, de forma inequívoca, que soluções efetivas para os grandes desafios da humanidade (eficiência energética e mudança climática, por exemplo) serão eficazes a partir da utilização de uma abordagem integral e não fragmentada. Ou seja, quando a solução contemplar todas as esferas e dimensões da sustentabilidade, social, econômica e ambiental, numa visão integrada que considere todos os aspectos do projeto em todo o seu ciclo.

A complexidade da ciência de iluminação que, para ser eficaz, necessita envolver diversas áreas do saber. As inovações de eficiência energética que não precisariam ser contraditórias onde uma solução ocorra às custas por exemplo da saúde humana ou de prejuízos ambientais e à biodiversidade, atendendo apenas a um requisito. A solução otimizada atenderia a todas as esferas e dimensões da sustentabilidade, não excluindo a econômica.

O desenvolvimento e utilização da tecnologia LED vem provocando uma aceleração destas reflexões em torno da possível integração das diferentes condições de contorno, que tem se percebido como aparentemente contraditórias. A potencial experiência bem sucedida de integração destas diferentes condições

de contorno - ambiental, social e econômica - pode servir para potencializar a replicação do processo em outras áreas tecnológicas.

## 6.1

### Sugestões de Futuros Trabalhos

Para acelerar a transição para um cenário de inovação tecnológica de iluminação em IP de baixo carbono no Brasil, são apresentadas sugestões de desenvolvimento de futuros trabalhos:

- (i) Investigar viabilidade da inserção do país na indústria de reciclagem de lâmpadas e luminárias LED, pois esta pesquisa não identificou linhas de trabalho voltada a recuperação de metais nobres contidos nestas lâmpadas;
- (ii) Aprofundar estudo das barreiras que impedem a maximização da taxa de reciclagem de lâmpadas que contém mercúrio (que precisarão ser destinadas após a substituição por LED). Seria recomendável que o mesmo contemplasse as barreiras psico-comportamentais que impedem a reciclagem. Apesar de haver vários trabalhos acadêmicos nesta área de reciclagem, não há pesquisas que façam um estudo aprofundado com propostas de solução práticas e efetivas;
- (iii) Investigar como a balança comercial brasileira e a indústria local estão sendo afetadas pelas importações das luminárias e/ ou lâmpadas e seus componentes e quais seriam políticas públicas para fortalecer a indústria local e geração de empregos, e, em específico, quais seriam os nichos de mercado para o Brasil no setor de microeletrônica e semicondutor;
- (iv) Realizar pesquisas para desenvolvimento de programas de treinamento e capacitação a municípios, não só em termos de gestão, mas também, em capacitação técnica específica a tecnologia LED. Por exemplo, um estudo para adaptar a ferramenta SEAD e/ ou a ferramenta de análise financeira do Departamento de Energia dos Estados Unidos para o Brasil e o desenho de rede colaborativa para fortalecer troca de experiências e informações entre os diversos atores do mercado, especialmente municípios;
- (v) Aprofundar avaliação dos atuais sistemas de financiamento de programas de eficiência energética no país e verificar possíveis melhorias para otimização do uso do recurso financeiro e maximizar o impacto dos

recursos. Investigar a aplicação do recurso em IP não como doação ao município, mas como empréstimo, pago com as economias do projeto. Estas poderiam ser reinvestidas em projetos de baixa renda;

- (vi) Investigar o tema de poluição luminosa no Brasil e o desenho de políticas públicas de mitigação. Por exemplo, investigar a criação de regulamentação para evitar o uso de luminárias de distribuição não limitada, garantir o emprego de quantidade e tipo apropriados de luz de acordo com sua função, apenas em local necessário e apenas durante o tempo necessário e promover pesquisas que mensurem o desperdício de energia elétrica perdida como poluição luminosa em grandes cidades para aumentar consciência sobre este desafio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABILUX - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO. Guia LED. Terceira edição. Mar 2015. Disponível em [http://www.abilux.com.br/portal/pdf/gua\\_led.pdf](http://www.abilux.com.br/portal/pdf/gua_led.pdf) Acesso em 20 de jun 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.1991. **NBR 5461**. Iluminação. Rio de Janeiro, 1991.

———. 2010. **ABNT NBR 15889**. Sinalização semafórica – Foco semafórico com base em diodos emissores de luz (LED). 25 de outubro de 2010.

———. 2012 **NBR 5101:2012**. Iluminação pública Procedimento. Rio de Janeiro, 4 de abril de 2012. 35 páginas.

———. 2013 **ABNT IEC/TS 62504:2013**. Termos e Definições para LEDs e os módulos de LED de iluminação geral. Rio de Janeiro, 2013.

ALMEIDA, A; SANTOS, B; PAOLO, B; QUICHERON, M. Solid state lighting review – potential and challenges in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 34 p.30-48, 2014. Disponível em <http://bit.ly/1Os04Vm>. Acesso em 2 de novembro de 2014.

ALMR - Association of Lighting and Mercury Recyclers. 2004. **National mercury-lamp recycling rate and availability of lamp recycling services in the US**, Nov. Disponível em: [www.lamprecycle.org/public/images/docs/ALMR\\_capacity\\_statement.2004.%20pdf.pdf](http://www.lamprecycle.org/public/images/docs/ALMR_capacity_statement.2004.%20pdf.pdf) , acesso em October 4, 2015.

———. 2016. Panorama da Reciclagem Lâmpadas que Contém Mercúrio [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por [cm.cristinamendonca@gmail.com](mailto:cm.cristinamendonca@gmail.com) em 16 jan 2016.

ALVARENGA, D. Mesmo sem chip local, indústria de LED cresce com a crise energética. **G1** (on line). 17 maio 2015. Disponível em <http://glo.bo/1Vjokbu>. Acesso em, 17/06/2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. 2010. Resolução Normativa nº 414 de 9 de Setembro de 2010. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414comp.pdf>. Acesso em 03 de Jan. de 2015.

———. 2012. Resolução Normativa nº 479 de 3 de Abril de 2012. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/049/resultado/ren2012479.pdf> Acesso em 03 de Jan. de 2015.

\_\_\_\_\_. 2013a. Resolução Normativa nº 569 de 23 de julho de 2013. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/resultado/ren2013569.pdf>. Acesso em 24 de abril de 2015.

\_\_\_\_\_. 2013b. Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE. 10 Módulos. Brasília – DF. ANEEL, 2013. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/arquivos/zip/PROPEEv1.zip> . Acesso em 9 jan 2015.

\_\_\_\_\_. 2015a. Relatórios do Sistema de Apoio a Decisão. Disponível em <http://bit.ly/1SZ4gZB>. Acesso em 30 de dezembro de 2015.

\_\_\_\_\_. 2015b. Relação de Projetos de Eficiência Energética cadastrados na ANEEL. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/arquivos/Excel/PEE%20Projetos.xls>. Acesso em 10 jan 2016.

ATKINSON, B.; DENVER, A.; McMAHON, J.; CLEAR, R. Energy-Efficient Lighting Technologies and their Applications in the Commercial and Residential Sectors. In: KREITH, F.; GOSWAMI, Y. **Energy Management and Conservation Handbook**. CRC Press. Cap 7. 2008. Disponível em <http://bit.ly/1UYSJvC>. Acesso em 8 de novembro de 2014.

BASULTO, D. Why the graphene light bulb could switch on a new era of innovation. **The Washington Post**. Washington, DC, 2 Apr 2015. Disponível em <http://www.washingtonpost.com/blogs/innovations/wp/2015/04/02/why-the-graphene-light-bulb-could-switch-on-a-new-era-of-innovation/> . Acesso em 03 de Abril de 2015.

BECCALI, M. BONOMOLO, M. CIULLA, G; GALATIOTO, A. BRANO, V. L. Improvement of energy efficiency and quality of street lighting in South Italy as an action of Sustainable Energy Action Plans. The case study of Comiso (RG). **Energy** 92 (2015) p.394-408 Disponível em <http://bit.ly/1rBDVKc> Acesso em 31 jan 2016.

BEHURA, N.S. The New ITE Light-Emitting Diode. Traffic Signal Specifications. A Guide for purchases. **ITE Journal**. p 38-40, Novembro 2005. Disponível em <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.376.4647&rep=rep1&type=pdf> Acesso em 4 de outubro de 2014.

BESSHO, M; SHIMIZU, K. Latest Trends in LED Lighting. **Electronics and Communications in Japan**, Vol. 95, No. 1, 2012. Translated from Denki Gakkai Ronbunshi, Vol. 131-A, No. 5, May 2011, pp. 315–320. Disponível em <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecj.10394/pdf>. Acesso em 04 de Out. 2014.

BETTERMANN, O. **Guide: Lightning and surge protection for LED lighting**. 08/ 2014. Disponível em <http://bit.ly/1T6aAnA>. Acesso em 31 jan 2016.

BIERMAN, A. Will switching to LED outdoor lighting increase sky glow? **Lighting Res. Technol.** 2012; 44: 449–458. Disponível em <http://bit.ly/1J6EyTE>. Acesso em 1 de setembro de 2015.

BIERMAN, A; FREYSSINIER, J.P; ZHU, Y.; NARENDRAN, N. **LED Testing Standards Overview**. In: Capturing the Lighting Edge – Aug 13, 2012, New York, N.Y. Disponível em [http://www.lrc.rpi.edu/education/outreachEducation/pdf/CLE4/PM3\\_Photometry.pdf](http://www.lrc.rpi.edu/education/outreachEducation/pdf/CLE4/PM3_Photometry.pdf) Acesso em 31 jan 2016.

BNDES. Credenciamento de Luminárias. Disponível em [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/credenciamento\\_iluminacao\\_Evento\\_Fabricantes.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/credenciamento_iluminacao_Evento_Fabricantes.pdf) Acesso em 1 de out de 2015.

BOMMEL, W. Combustion Lamp. In: Encyclopedia of Color Science and Technology 2014, pp 1-13. Editors: Ronnier Luo ISBN: 978-3-642-27851-8 (Online). Disponível em <http://bit.ly/1HPkDEV> . Acesso em: 30 de Nov. 2014

BOSTON PUBLIC WORKS DEPARTMENT. 2012. Boston’s LED Street Lighting Initiative, 2012. Disponível em [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/cooper\\_boston\\_pittsburgh2012.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/cooper_boston_pittsburgh2012.pdf). Acesso em 7 de setembro de 2015.

———. 2014. **Case Study of Boston Maintenance Practices**. In: DOE Webcast “Maintenance Practices for LED Street Light. 14 abril. Disponível em <http://energy.gov/eere/ssl/maintenance-practices-led-streetlights>. Acesso em 1 jan 2015.

BRASIL. 2002. Emenda Constitucional Nº 39, de 19 de Dezembro. Presidência da República. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/emendas/emc/emc39.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc/emc39.htm). Acesso em 3 jan de 2015.

BRASIL, 2010a. Lei nº 12.212, de 20 de Janeiro de 2010. Presidência da República. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12212.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12212.htm) Acesso em 15 julho de 2015.

BRASIL. 2010b. Ministério de Meio Ambiente. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Decreto nº 7.404 de 23 de Dezembro de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em [http://www.mma.gov.br/estruturas/253/\\_arquivos/decreto\\_n\\_74042010\\_253.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_arquivos/decreto_n_74042010_253.pdf) Acesso em 2 de mai 2015.

BRASIL. 2010c. Ministério de Minas e Energia. Portaria Interministerial nº 1.007/ 2010 de 31 de Dezembro de 2010. Regulamentação Específica de Lâmpadas Incandescentes. Disponível em [http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139097/Portaria\\_Interministerial\\_nx\\_1007\\_2010.pdf/d6e061ba-0d2f-41e1-9928-fb40cd7984d7](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139097/Portaria_Interministerial_nx_1007_2010.pdf/d6e061ba-0d2f-41e1-9928-fb40cd7984d7) Acesso em 03 de Jan. de 2015.

BRASIL. 2013 Lei Nº 12.783, de 11 de Janeiro. Presidência da República. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2013/lei/L12783.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/L12783.htm) Acesso em 15 julho de 2015.

BRASIL. 2015. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada**. 27 de setembro. Disponível em [http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf) Acesso em 19 de outubro de 2015.

BRASIL ENGENHARIA. Fábrica de LED no Brasil não existe. 12/11/2014 Disponível em <http://www.brasilengenharia.com/portal/industriatecnologia/10826-qfabrica-de-led-no-brasil-nao-existeq-diz-executivo-da-celena>. Acesso em, 17/06/2015.

BUENOS AIRES, G.C. La Ciudad moderniza su alumbrado público con tecnología LED. 17 nov 2014. Disponível em <http://www.buenosaires.gob.ar/noticias/plan-de-reconversion-del-alumbrado-publico-luminarias-led> Acesso em 2 jan 2015.

C40 – C40 Cities Climate Leadership Group. 2011. New data strengthens business case for led lighting-retrofits. Blog post Jun. [http://www.c40.org/blog\\_posts/new-data-strengthens-business-case-for-led-lighting-retrofits](http://www.c40.org/blog_posts/new-data-strengthens-business-case-for-led-lighting-retrofits). Acesso em 2 dezembro de 2014.

———. 2012. **New Tool Empowers Cities to Assess, Finance Outdoor Lighting Projects**. Blog post. Março 2012. Disponível em [http://www.c40.org/blog\\_posts/new-tool-empowers-cities-to-assess-finance-outdoor-lighting-projects](http://www.c40.org/blog_posts/new-tool-empowers-cities-to-assess-finance-outdoor-lighting-projects) Acesso em 1 de dezembro de 2014.

———. 2014. **Climate Action in Megacities**. C40 Cities Baseline and Opportunities. Vol 2.0. Feb 2014. Disponível em [http://issuu.com/c40cities/docs/c40\\_climate\\_action\\_in\\_megacities](http://issuu.com/c40cities/docs/c40_climate_action_in_megacities) Acesso em 1 de outubro de 2014.

CAIXA. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Preço de Referência de Insumos no Rio de Janeiro em dezembro de 2015. 16 jan 2016. Disponível em <http://bit.ly/1NrAzMT> Acesso em 20 de jan 2015.

CAMPOS, S.J.F. Iluminação Urbana: Um Estudo da Eficiência Energética de Luminárias LED Controladas por Sistema de Telegestão. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Metodista de Piracicaba, SP, 2014. Disponível em <https://www.unimep.br/phpg/bibdig/aluno/down.php?cod=1159> Acesso em 31 jan 2016.

CAVALLO, C. Pós-graduação em Iluminação. In: Lume Arquitetura págs. 66 a 69. Edição 21. Ago set 2006. Disponível em [http://www.lumearquitectura.com.br/pdf/ed21/ed\\_21\\_Capacitacao.pdf](http://www.lumearquitectura.com.br/pdf/ed21/ed_21_Capacitacao.pdf) Acesso em 01 fev 2016.

CCAC – CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION. **Scientific Advisory Panel Briefing: Kerosene Lamps and SLCPS**. 12 Nov, 2014. Disponível em



<http://www.unep.org/ccac/Portals/50162/docs/ccac/NOV2014-SAP%20Kerosene%20briefing.pdf> Acesso em: 7 de Dez. 2014.

CCI – CITY OF LOS ANGELES. **Led Street Lighting Case Study**. March 2009. **Disponível em** [http://www.dvrpc.org/energyclimate/eetrafficstreetlighting/pdf/CCI\\_Los\\_Angeles\\_LED\\_Streetlighting\\_Retrofit\\_Program\\_Report.pdf](http://www.dvrpc.org/energyclimate/eetrafficstreetlighting/pdf/CCI_Los_Angeles_LED_Streetlighting_Retrofit_Program_Report.pdf). Acesso em 1 de Outubro de 2014.

CEA, R.V. **Research on the Best Market Applications for LightLab Energy-Saving Lamps. Degree Project**. Department of Management and Engineering Division of Energy Systems. Linköping University, Sweden. 2010. Cap. 4, p.35. Disponível em <http://bit.ly/1D0IEYV> . Acesso em 20 de Dez. 2014.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Contaminação de Mercúrio no Estado de São Paulo. São Paulo. 2014. Disponível em <http://cetesb.sp.gov.br/home/wp-content/uploads/sites/11/2015/06/relatorio-contaminacao-mercurio-estado-sp-2014.pdf> Acesso em 2 de maio de 2015.

CHEPESIUK, R. Missing the Dark: Health Effects of Light Pollution. **Environ Health Perspect**. 2009 Jan; 117(1): A20–A27. Disponível em <http://1.usa.gov/1Oy9gXD>. Acesso em 20 de outubro de 2015.

CHINDRES, M; SUDRIA-ANDREU, A. Lighting. In: SUMPER, A; BAGGINI, A. **Electrical Energy Efficiency: Technologies and Applications**, 1ª ed. John Wiley, 2012. cap. 8. Disponível em <http://bit.ly/1QYB3jg> Acesso em 15 de abril de 2015.

CITY OF LOS ANGELES. 2009. **Bureau of Street Lighting**. LED Equipment Evaluation Pilot Project – Phase I. Disponível em [http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalitiesutilities/LED\\_evaluation\\_report\\_phase\\_1.pdf](http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalitiesutilities/LED_evaluation_report_phase_1.pdf) Acesso em 28 de junho de 2014.

CITY OF LOS ANGELES. 2011a. **Bureau of Street Lighting**. LED Equipment Evaluation– Phase 5. Disponível em [http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED\\_evaluation\\_report\\_phase\\_5\\_310W.pdf](http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED_evaluation_report_phase_5_310W.pdf) Acesso em 28 de junho de 2014.

———. 2011b. **Bureau of Street Lighting**. Requirements for Solid State Lighting LED Roadway Luminaires 70 and 100 W Equivalent without control. Disponível em [http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED\\_General\\_Specs\\_70w\\_100w\\_072811.pdf](http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED_General_Specs_70w_100w_072811.pdf) Acesso em 27 de setembro de 2015.

———. 2011c. **Bureau of Street Lighting**. Requirements for Solid State Lighting LED Roadway Luminaires 150 W Equivalent without control. Disponível em [http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED\\_General\\_Specs\\_150w\\_012811.pdf](http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED_General_Specs_150w_012811.pdf) Acesso em 27 de setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. 2012a. **Bureau of Street Lighting**. Requirements for Solid State Lighting LED Roadway Luminaires 200 W Equivalent without control. Disponível em [http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED\\_General\\_Specs\\_200w\\_030112.pdf](http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED_General_Specs_200w_030112.pdf) Acesso em 27 de setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. 2012b. **Bureau of Street Lighting**. Requirements for Solid State Lighting LED Roadway Luminaires 310 W Equivalent without control. Disponível em [http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED\\_General\\_Specs\\_310w\\_030112.pdf](http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED_General_Specs_310w_030112.pdf) Acesso em 27 de setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. 2012c. **Bureau of Street Lighting**. Requirements for Solid State Lighting LED Roadway Luminaires 400 W Equivalent without control. Disponível em [http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED\\_General\\_Specs\\_400w\\_030112.pdf](http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/LED_General_Specs_400w_030112.pdf) Acesso em 27 de setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. 2012d. Jun 18. Press Release, Mayor Villaraigosa Announces Completion of Largest Led Street Light Replacement Program, Disponível em <http://bit.ly/1a3cv4Z> Acesso em 13 Out 2014.

\_\_\_\_\_. 2012e. **Bureau of Street Lighting**. Changing our Glow for Efficiency. In: Municipal Solid State Lighting Consortium - LED Workshop. Disponível em <http://1.usa.gov/1Ree0kK> Apresentação atualizada de 2013 [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ebrahimian\\_glow\\_longbeach2013.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ebrahimian_glow_longbeach2013.pdf) Acesso em 13 de out de 2014.

\_\_\_\_\_. 2012 f. **Bureau of Street Lighting**. Minimum Requirements for Testing and Evaluation of LED Equipment. Disponível em [http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/Minimum\\_Requirements.pdf](http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/Minimum_Requirements.pdf) Acesso em 27 de setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. 2015. **Bureau of Street Lighting**. LED Energy Efficiency Program. Total Savings By Council District. Disponível em [http://bsl.lacity.org/downloads/led/LED\\_Energy\\_Savings\\_092315.pdf](http://bsl.lacity.org/downloads/led/LED_Energy_Savings_092315.pdf). Acesso em 25 de setembro de 2015.

COELHO, C.A.S.; OLIVEIRA, C.P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M.S.; CARPENEDO, C.B.; CAMPOS, J.L.P.S.; TOMAZIELLO, A.C.N.; PAMPUCH, L.A.; CUSTÓDIO, M.S.; DUTRA, L.M.M.; ROCHA, R.P.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics** p 1-16. 15 Ago 2015. Disponível em <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00382-015-2800-1.pdf>. Acesso em 20 de outubro de 2015.

COSTA, M.T. Viracopos ganha iluminação por LED. **Correio Popular**. 25 abr 2013. Disponível em [http://correio.rac.com.br/\\_conteudo/2013/04/capa/campinas\\_e\\_rmc/52301-viracopos-ganha-iluminacao-por-led.html](http://correio.rac.com.br/_conteudo/2013/04/capa/campinas_e_rmc/52301-viracopos-ganha-iluminacao-por-led.html)

DEGRA, A; GOBI, E. **Logística Reversa**. Meta de acordo setorial é recolher e reciclar 60 milhões de lâmpadas com mercúrio em 2019. In: Lume Arquitetura págs. 20 a 25. Edição 73. Abr maio 2015. Disponível em [http://lumearquitectura.com.br/pdf/ed73/ed\\_73%20Es%20-%20Log%C3%ADstica%20reversa.pdf](http://lumearquitectura.com.br/pdf/ed73/ed_73%20Es%20-%20Log%C3%ADstica%20reversa.pdf) Acesso em 5 de jan 2016.

DOE - US Department of Energy. 2005. **Federal Register**/Vol. 70, No. 200/Tuesday, October 18, /Rules and Regulations. Disponível em [https://www1.eere.energy.gov/buildings/appliance\\_standards/pdfs/technical\\_amendment\\_101805.pdf](https://www1.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/pdfs/technical_amendment_101805.pdf) Acesso em 07 de abril de 2015.

\_\_\_\_\_. 2007. **Energy Information Administration**. Appendix F. Electricity Emission Factors.. Disponível em [http://www.eia.gov/oiaf/1605/pdf/Appendix%20F\\_r071023.pdf](http://www.eia.gov/oiaf/1605/pdf/Appendix%20F_r071023.pdf) Acesso em 20 de outubro de 2015.

\_\_\_\_\_. 2009. Sep. **Lifetime of White LEDs**. Disponível em [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime\\_white\\_leds.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime_white_leds.pdf) Acesso em 07 de Abril de 2015.

\_\_\_\_\_. 2010. Nov **Light at Night: The Latest Science**. Disponível em <http://1.usa.gov/1PmsNYC>. Acesso em 15 de junho de 2015.

\_\_\_\_\_. 2012a. April **Solid-State Lighting Research and Development**. Multi-Year Program Plan. Prepared by: Bardsley Consulting, Navigant Consulting, Inc., Radcliffe Advisors, Inc., SB Consulting, and Solid State Lighting Services Inc. Disponível em: <http://1.usa.gov/1AkUfgw> . Acesso em: 24 Nov. 2014.

\_\_\_\_\_. 2012b. Jun. **Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 2: LED Manufacturing and Performance**. Prepared by: Pacific Northwest National Laboratory N14 Energy Limited. Disponível em [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012\\_led\\_lca-pt2.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012_led_lca-pt2.pdf) Acesso em 25 Nov. 2014.

\_\_\_\_\_. 2013a. **Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 3: LED Environmental Testing**. Prepared by: Pacific Northwest National Laboratory N14 Energy Limited.. Disponível em [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2013\\_led\\_lca-pt3.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2013_led_lca-pt3.pdf) Acesso em 25 Nov. 2014.

\_\_\_\_\_. 2013b **Retrofit Financial Analysis Tool**, Versão 1.1.01, 20 ago. Disponível em <http://energy.gov/eere/ssl/retrofit-financial-analysis-tool>. Acesso em 01 junho 2015.

\_\_\_\_\_. 2013c. **Director's Update**. In: The Light Post – Official Municipal Solid-State Street Lighting, Vol2 N7. Disponível em <http://bit.ly/1N110Cw> Acesso em 1 de dezembro de 2014.

———. 2014a. Janeiro. **Solid-State Lighting: Early Lessons Learned on the Way to Market**. Prepared by: Pacific Northwest National Laboratory. Disponível em: <http://1.usa.gov/1KIT6Ha> . Acesso em: 24 Nov. 2014.

———. 2014b. Fevereiro **Solid-State Lighting: Early Lessons Learned on the Way to Market**. Prepared by: Pacific Northwest National Laboratory. DOE SSL Webinar. Disponível em: <http://1.usa.gov/1M5vFXn> . Acesso em: 24 Nov. 2014.

———. 2014c. **Solid-State Lighting Research and Development**. Multi-Year Program Plan. Prepared by: Bardsley Consulting, Navigant Consulting Inc, SB Consulting, SSLS Inc., Radcliffe Advisors Inc. April 2014 (Updated May 2014). Disponível em <http://1.usa.gov/1GtW0Nx> . Acesso em: 25 Nov. 2014.

———. 2014d. Aug. **Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications**. Prepared by Navigant Consulting Inc.. Disponível em <http://1.usa.gov/1zn299e>. Acesso em: 24 Nov. 2014.

———. 2014e. Sep. **Public Street and Area Lighting Inventory Phase 1: Survey Results** Municipal Solid-State Street Lighting Consortium.. Disponível em [http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/pdfs/msslc\\_inventory-phase1.pdf](http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/pdfs/msslc_inventory-phase1.pdf) Acesso em 04 de outubro de 2015.

———. 2014f. Dez. **Trial Demonstration of Area Lighting Retrofit Host Site: Yuma Border Patrol, Yuma, Arizona**. Disponível em <http://1.usa.gov/1mxSega> Acesso em 2 de maio de 2015.

———. 2015a. **Solid-State Lighting Research and Development**. Multi-Year Program Plan. Prepared by: Bardsley Consulting, Navigant Consulting Inc, SB Consulting, SSLS Inc., Radcliffe Advisors Inc. Disponível em <http://1.usa.gov/1ZZNXyL> . Acesso em: 25 Nov. 2015.

———. 2015b. **Investing in Their Future: Portland's Purchase and Conversion of an LED Street Lighting System**. Disponível em: <http://1.usa.gov/1Vx4gRo> Acesso em: 3 de Out. 2015.

DURISCOE, D.M.; LUGINBUHL, C.B.; ELVIDGE, C.D. The relation of outdoor lighting characteristics to sky glow from distant cities. **Lighting Res. Technol.** 2014; Vol 46: p. 35-49. Disponível em <http://bit.ly/1SCusKE> Acesso em 20 de outubro de 2015.

ELC/ CELMA. **The European Lighting Industry's Considerations Regarding the need for an EU Green Paper on Solid State Lighting**. Brussels, 2011, version 2.7. Disponível em [http://www.elcfed.org/celma/presentations/files/6.ELC\\_CELMA\\_input\\_to\\_EU\\_SL\\_Green\\_Paper\\_V27\\_24062011\\_FINAL.pdf](http://www.elcfed.org/celma/presentations/files/6.ELC_CELMA_input_to_EU_SL_Green_Paper_V27_24062011_FINAL.pdf) Acesso em 3 de maio 2015.

ELETROBRAS. 2005. PROCEL-RELUZ. **Manual de Instruções**. 2005. Disponível em <http://bit.ly/1OsBIca>. Acesso em 10 de novembro de 2014.

ELETROBRAS. 2014. PROCEL. **Relatório de resultados do Procel 2015** - ano base 2014. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em [http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2015/docs/rel\\_procel2015\\_web.pdf?1](http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2015/docs/rel_procel2015_web.pdf?1). Acesso em 01 de out de 2015.

EPE – Empresa de Planejamento de Energia. 2006. **Balanco Energético Nacional**. Ano Base 2005. Disponível em [https://ben.epe.gov.br/downloads/BEN2006\\_Cap01.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/BEN2006_Cap01.pdf) Acesso em 1 de outubro de 2014.

\_\_\_\_\_. 2007. **Plano Nacional de Energia** – 2007. Disponível em [bit.ly/1IXxYiv](http://bit.ly/1IXxYiv) Acesso em 30 de maio de 2015.

\_\_\_\_\_. 2014a. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. 2014. Ano Base 2013. Disponível em <http://bit.ly/1PMtPwY> (formato PDF) e <http://bit.ly/1Sfr8U4> (formato Excell). Acesso em 13 de junho de 2015.

\_\_\_\_\_. 2014b. (2). **Balanco Energético Nacional**. 2014, Ano Base 2013. Disponível em <http://bit.ly/1FmSUYE> Acesso em 30 de maio de 2015.

\_\_\_\_\_. 2014c. (3). **Demanda de Energia – 2050**. Agosto 2014. Disponível em <http://bit.ly/1nYWOu> Acesso em 30 de maio de 2015.

EPEC – European PPP Expertise Center. Energy Efficient Street Lighting . Junho 2013. Disponível em <http://bit.ly/1K1dju7>. Acesso em 20 de outubro de 2014.

ESMAP – Energy Sector Management Assisting Program. World Bank.2011. **Energy Efficient Cities. Good Practices In City Energy Efficiency. Los Angeles, USA-** Light Emitting Diode (LED) Street Lighting Retrofit Oct 2011 Disponível em [https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/LosAngeles\\_LED\\_final\\_edited\\_11-9-11.pdf](https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/LosAngeles_LED_final_edited_11-9-11.pdf) Acesso em 01 de out de 2014

\_\_\_\_\_. 2014. **Realizing Energy Efficiency Opportunities in Rio de Janeiro**. Disponível em <https://databox.worldbank.org/download/dmpy-3bqe/application/pdf> Acesso em 15 de outubro de 2015.

EUROPEAN COMMISSION. **Lighting the Cities. Accelerating the Deployment of Innovative Lighting in European Cities**. June 2013. Disponível em [http://cordis.europa.eu/fp7/ict/photonics/docs/ssl-cip/lighting-the-cities\\_en.pdf](http://cordis.europa.eu/fp7/ict/photonics/docs/ssl-cip/lighting-the-cities_en.pdf) Acesso em 04 de maio 2015.

FALCHI, F; CINZANO P; ELVIDGE, C., KEITH, D. ; HAIM, A Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. **Journal of Environmental Management**. Vol. 92, Issue 10, 2011, p 2714-2722. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971100226X/pdf?md5=179a293dad3eba0d1c638f0edf869f10&pid=1-s2.0-S030147971100226X-main.pdf> Acesso em 1 Nov 2015.

FERREIRA, R.A.F. **Manual de Luminotécnica**. Apostila Auxiliar para o Curso de Engenharia Elétrica da UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora. 2010. Disponível em <http://www.ufjf.br/ramoieec/files/2010/08/Manual-Luminotecnica.pdf>. Acesso em 2 de abril de 2015.

FRAUNHOFER, 2015. **Economic LED recycling**. In: Research News 11, 2015. Topic 2. Disponível em [https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/press-media/2015/november/research-news/rn11\\_2015\\_NOVEMBER.pdf](https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/press-media/2015/november/research-news/rn11_2015_NOVEMBER.pdf). Acesso em 20 Dez 2015.

FRAUNHOFER ISI. **How Energy Efficiency Cuts Costs For A 2-Degree Future**. Disponível em <http://www.climateworks.org/report/how-energy-efficiency-cuts-costs-for-a-2c-future/>. 24 Nov 2015. Acesso em 26 de março de 2016.

FRIEDLINGSTEIN, P; ANDREW, R.M.; ROGELJ, J.; PETERS, G.P.; CANADELL, J.G.; KNUTTI, R.; LUDERER, G.; RAUPACH, M.R.; SCHAEFFER, M.; VAN VUUREN, D.P.; LE QUÉRÉ, C. Persistent growth of CO<sub>2</sub> emissions and implications for reaching climate targets. **Nature Geoscience** 7, 709–715 (sep. 2014). Disponível em <http://www.nature.com/ngeo/journal/v7/n10/pdf/ngeo2248.pdf>. Acesso em 1 de Dez de 2014.

G1 Amazonia - Avenida das Torres em Manaus recebe iluminação de LED, diz Prefeitura. 2 jun 2015. Disponível em <http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2015/08/avenida-das-torres-em-manaus-recebe-iluminacao-de-led-diz-prefeitura.html>. Acesso em 15 dez 2015.

GALLAWAY, T.; OLSEN R.N.; MITCHELL, D.M. The economics of global light pollution. **Ecological Economics** 69 (2010) 658–665. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800909004121/pdf?md5=3ac44bc11f61abd00f1e4e78ff0234&pid=1-s2.0-S0921800909004121-main.pdf>. Acesso em 1 de março de 2014.

GERDES, J. Los Angeles Saves Millions With LED Street Light Deployment. **Forbes** 25/01/2013. Disponível em <http://www.forbes.com/sites/justingerdes/2013/01/25/los-angeles-saves-millions-with-led-street-light-deployment/#12a633f9caad>. Acesso em 2 de maio de 2015.

GIL-DE-CASTRO, A; MORENO-MUNOZ, A; PHDA, LARSSON, A; DE LA ROSA JJG BOLLEN, MHJ. LED street lighting: A power quality comparison among street light technologies **Lighting Res. Technol.** 2013; 45: 710–728. Disponível <http://bit.ly/1NNvhwp> em Acesso em 01 de maio 2015.

GOBI, E. 2012. Lagoa Rodrigo de Freitas. Ciclovia do ponto turístico carioca recebe nova iluminação com luminárias LED. **Lume Arquitetura Magazine**. Edição 56, jun/jul 2012. Disponível em [http://lumearquitectura.com.br/pdf/ed56/ed\\_56%20Lagoa%20Rodrigo%20de%20Freitas.pdf](http://lumearquitectura.com.br/pdf/ed56/ed_56%20Lagoa%20Rodrigo%20de%20Freitas.pdf). Acesso 20 de dezembro de 2015.

GRIENEISEN, H.P. **Fotometria de Luminárias**. In: SIMPOLUX 2006 - X Simpósio Brasileiro de Iluminação Eficiente. Disponível em [http://abilux.com.br/pdf\\_simpo/fotometriadeluminarias.pdf](http://abilux.com.br/pdf_simpo/fotometriadeluminarias.pdf) Acesso em 20 de outubro de 2015.

HABEL, J.; ŽAK, P. The Present and Future of Lighting Engineering. **Light & Engineering** Vol. 20, No. 2, pp. 5-11, 2012. Disponível em <http://www.sveto-tehnika.ru/files/2012/LE22012.pdf> Acesso em 8 de abr 2015.

HALONEN, L.; TETRI, E.; BHUSAL, P. Lighting Technologies. In: **Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme. Annex 45. Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings**. Espoo, 2010. 348 p. cap. 5. Disponível em [http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user\\_upload/docs/EBC\\_Annex\\_45\\_Guidebook.pdf](http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/docs/EBC_Annex_45_Guidebook.pdf). Acesso em: 26 nov 2014.

HALONEN, L.; PUOLAKKA, M. CIE and Mesopic Photometry. Newsletter CIE, Oct 2010. Disponível em [http://us2.campaign-archive.com/?u=e25bed896798c7b36ce96e44d&id=1cb4ea7114&e=\[UNIQID\]](http://us2.campaign-archive.com/?u=e25bed896798c7b36ce96e44d&id=1cb4ea7114&e=[UNIQID]). Acesso em 08 de Abr 2015.

HALONEN, L.; PUOLAKKA, M. Development of Mesopic Photometry – The New Cie Recommended System. **Light & Engineering**, Vol. 20, No. 2, pp. 56-61, 2012. Disponível em <http://www.sveto-tehnika.ru/files/2012/LE22012.pdf> Acesso em 8 de abr 2015.

HAN, N.; CUONG, T.V.; HAN, M.; RYU, B.D.; CHANDRAMOHAN, S.; PARK, J.B.; KANG, J.H. Improved heat dissipation in gallium nitride light-emitting diodes with embedded graphene oxide pattern. **Nature Communications**, DOI: 10.1038/ncomms2448. Disponível em <http://www.nature.com/ncomms/journal/v4/n2/pdf/ncomms2448.pdf>. Acesso em 2 de abr 2015.

HARROLD, R.; MENNIE, D. **IESNA Lighting Ready Reference (RR-03): A compendium of materials from the IESNA lighting handbook, 9th edition**. New York IESNA 4TH ed. C2003 apud RODRIGUES 2012.

HISCOCKS, P.D.; GUDMUNDSSON, S. The Contribution of Street Lighting to Light Pollution. **JRASC - Journal of the Royal Astronomical Society of Canada**, vol 104, nº5 p. 191-193, out. 2010. Disponível em: [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=2010JRASC.104..190H&link\\_type=ARTICLE&db\\_key=AST&high=](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2010JRASC.104..190H&link_type=ARTICLE&db_key=AST&high=). Acesso em: 29 mar. 2016.

HU, Y.; CHENG, H. Mercury risk from fluorescent lamps in China: Current status and future perspective. **Environment International** 44 (2012) p. 141-150. Disponível em <http://bit.ly/1WojCJj> Acesso em 01 de maio 2015.

HUANG, B-J.; HSU, P-C.; TANG, C-W. Study of system dynamics model and control of a high-power LED lighting luminaire. **Energy** **32**, **2007**, p. 2187–2198. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054420700093X>. Acesso em 31 jan 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sinopse do Censo Demográfico 2010. Disponível em <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8> Acesso em 22 de junho de 2015.

———. Sinopse do Censo Demográfico 2010. Tabela 1.8 - Moradores em domicílios particulares permanentes, por grupos de idade, segundo as características do entorno - Brasil – 2010 Disponível em [ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo\\_Demografico\\_2010/Entorno\\_dos\\_Domicilios/xls/Brasil.zip](ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Entorno_dos_Domicilios/xls/Brasil.zip). Acesso em 22 de junho de 2015.

———. Números-Índices dos Indicadores Econômicos – Mão-de-obra. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. 2015. Disponível em <http://bit.ly/1VifhqU>. Acesso em 18 de jan 2016.

IDA - IES (International Dark Sky Association – Illuminating Engineering Society). Model Lighting Ordinance (MLO). 15 jun 2011. Disponível em <http://bit.ly/1KPYqvd> Acesso em 24 de julho de 2015.

IEA - International Energy Agency. 2006. **Light's Labour Lost: Policies for Energy-Efficient Lighting, in Support of the G8 Plan of Action**. International Energy Agency, OECD, 2006 Disponível em <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/light2006.pdf>. Acesso em 19 de Outubro de 2014.

———. 2009. **Innovations In Multi-Level Governance For Energy Efficiency**, Disponível em <http://bit.ly/18xa7Bi> . Acesso em 19 de Outubro de 2013.

———. 2011. **25 Energy Efficiency Policy Recommendations**. Disponível em [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/25recom\\_2011.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/25recom_2011.pdf). Acesso em 22 mar 2015.

———. 2013. **Redrawing the Energy Climate Map**. World Energy Special Report Outlook, 10 de Junho de 2013. Disponível em <http://bit.ly/106eBNy>. Acesso em dia 18 de Junho 2013.

———. 2014a. **Key World Energy Statistics**, 2014. Disponível em <http://bit.ly/1czjKVd> Acesso em 19 de Outubro de 2014.

———. 2014b. **World Energy Outlook 2014**. Executive Summary. 2014. Disponível em <https://www.iea.org/Textbase/npsum/WEO2014SUM.pdf> Acesso em 10 de julho de 2015.



IEA - International Energy Agency, WB - World Bank. Sustainable Energy For All Initiative – Global Tracking Framework 2015 – Summary Report . 18 de Maio de 2015. Disponível em <http://bit.ly/1ed1WR6>. Acesso em 18 de Outubro de 2015.

ILUME – Prefeitura de São Paulo. Consulta Pública do Edital da PPP da Iluminação. 14 out 2015. Disponível em [http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/servicos/ilume/chamamento\\_publico/index.php?p=182594](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/servicos/ilume/chamamento_publico/index.php?p=182594). Acesso em 30 de dez 2014.

INMETRO – 2010. Portaria no. 489, de 08 de dezembro de 2010 Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001644.pdf> acesso em 24 de abril de 2015.

INMETRO – 2013a. Portaria no. 471, de 23 de setembro de 2013. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002029.pdf> acesso em 24 de abril de 2015.

INMETRO – 2013b. Consulta Pública - Regulamento Técnico da Qualidade para Luminárias para Lâmpadas de Descarga e LED – Iluminação Pública Viária Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002031.pdf> Acesso em 04 de jan 2015.

IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: **The Physical Science Basis. Summary for Policymakers**, Setembro, 2013. <http://bit.ly/18uhd7n>

ISA – International SSL Alliance. Global Solid State Lighting Outlook 1. Apr 2013. Disponível em <http://www.efchina.org/News-en/EF-China-News-en/news-efchina-20130403-en> Acesso em 02 de maio 2015.

ITE - Institute of Transportation Engineers. Vehicle Traffic Control Signal Heads - Light Emitting Diode (LED) Circular Signal Supplement. Jun 27, 2005.

JIAO, J. Understanding the difference between LED rated life and lumen-maintenance life. **Leds Magazine**. Oct 2011. Disponível em <http://bit.ly/1hu89Hs>. Acesso em 10 de abril 2015.

JÚNIOR, A.G.T.; KOPTE, G.A.; FEITOSA, M.A. **Aplicação de Sistema Fuzzy na Redução do Consumo de Energia na Iluminação Pública com Lâmpadas Vapor de Sódio**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012. p. 5161-5166. Disponível em <http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2012/Artigos/99847.pdf> Acesso em 31 jan 2016.

KAVEHRAD, M. Sustainable Energy-Efficient Wireless Applications Using Light. **IEEE Communications Magazine**. Pag. 66 – 73. December 2010. Disponível em <http://bit.ly/28T3wZK>. Acesso em 17 de Dez 2014.

KYBA, C.C.M.; HÄNEL, A.; HÖLKER, F. Redefining efficiency for outdoor lighting. **Energy Environ. Sci.**, 2014, 7 p.1806-1809. Disponível em <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2014/ee/c4ee00566j> Acesso em 10 jan 2016.

KITSINELIS, S. Mapping the World of Light Sources Research. **J. Light & Vis. Env.** Vol 35, No.3, 2011. Disponível em <http://bit.ly/22q0UGj.pdf>. Acesso em 24 de abril de 2015.

KIVIMÄKI, S.E.E. **Sustainable infrastructure development: Assessing LED street lighting as a tool for sustainable development in São José dos Campos, Brazil.** Dissertação (Mestrado em Ciência de Desenvolvimento Sustentável). Faculdade de Geociência. Universiteit Utrecht. The Netherlands October 2013. Disponível em <http://bit.ly/213dx8E> . Acesso em 6 de jan 2015.

KOSIFAJ, M.; AUBÉ, M. Editorial: Special Issue on Light Pollution. **Lighting -** 10 jan 2016.

KOSTIC, A.M.; KREMIC, M.M.; DJOKIC, L.S.; KOSTIC, M.B. Light-emitting diodes in street and roadway lighting – a case study involving mesopic effects. **Lighting Res. Technol.** 2013; 45: 217–229. Disponível em <http://bit.ly/213doC2> . Acesso em 6 de jan 2015.

KUSHWAHA, S. A Comprehensive Study of Various Lamps Through Energy Flow Diagrams (EFDs). In ETEEE - Emerging Trends in Electrical and Electronics Engineering, 2011, Sultanpur, India. **Proceedings** organised by KNIT – Kamla Nehru Institute of Technology. Volume – 1. Disponível em <http://bit.ly/1wvF4AN> Acessado em 26 de Nov 2014.

LEDinside. 2014. Global LED lighting market to reach US \$25.7 billion in 2015. Disponível em <http://bit.ly/20zEoXC> Acesso em 23 de maio de 2015.

LEDinside. 2015. Asian Manufacturers Spur Low Priced Lighting Era. In 2015 DOE SSL R&D Workshop. Disponível em <http://1.usa.gov/1QDZJKa>. Acesso em 01 de Jun de 2015.

LIGHTSAVERS CANADA. Ready for Prime Time: A Guide to LED Scale-up Tools and Resources. Mar 2013. Disponível em <http://bit.ly/1R3pXJ0> Acesso em 01 de junho de 2015.

LIU, S.; LUO, X. **Led Packaging for Lighting Applications.** Design, Manufacturing and Testing. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltda. Cap1 – Introduction. 2011.

LLNL - Lawrence Livermore National Laboratory. 2007 **Estimated International Energy Flows**, publicado em Março de 2011. Lawrence Livermore National Laboratory and the U.S. Department of Energy. Disponível em <http://1.usa.gov/17X5RvS>. Acesso em 18 de Junho de 2014.

LONG, S.; GOSAVI A.; QIN, R.; NOLL, C. Evaluating Useful Life and Developing Replacement Schedules for LED Traffic Signals: Statistical Methodology and a Field Study. **Engineering Management Journal** Vol. 24 No. 3 September 2012. Disponível em <http://bit.ly/1mATLIT>. Acesso em 3 de jun de 2015.

LRC - Lighting Research Center. **Lighting Answers. Power Quality**. Volume 2. Number 2. National Lighting Product Information Program. 1995. Disponível em <http://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/lightinganswers/pdf/view/LAPQ.pdf> Acesso em 21 de Abril de 2015.

LSRC - LED Systems Reliability Consortium. **LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting**. 3<sup>rd</sup> ed Sep 2014. Disponível em [https://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/pdfs/led\\_luminaire\\_lifetime\\_guide\\_sept2014.pdf](https://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/pdfs/led_luminaire_lifetime_guide_sept2014.pdf) Acesso em 31 jan 2016.

LUGINBUHL, C.B.; BOLEY, P.A.; DAVIS, D.R. The impact of light source spectral power distribution on skyglow. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer** Volume 139, May 2014, Pages 21-26. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407313004792> Acesso em 1 de maio de 2015.

LUO, W. Outdoor lighting – Mesopic photometry, adaptation conditions and user preferences in pedestrian way lighting. Tese de Doutorado. Aalto University. School of Electrical Engineering. Department of Electrical Engineering and Automation. 2014. Disponível em <http://bit.ly/1TJYkER>. Acesso em 9 de abril de 2015.

LYYTIMÄKI, J. Nature's Nocturnal services: Light pollution as a non-recognised challenge for ecosystem services research and management. **Ecosystem Services** **3 (2013)** p. 44-48. Disponível em <http://bit.ly/1PLpw3j> Acesso em 20 de novembro de 2014.

MAURER, L.; MEYER, M. Untapped Opportunity – Public Private Partnerships (PPP) for Energy Efficiency. Modernization of Street Lighting Systems. IN: International Esco Finance Conference. International Finance Corporation. South Africa, Out 2014. Disponível em <http://bit.ly/1S9GzQy>. Acesso em 20 de dezembro de 2015.

McCARNEY, P.; BLANCO, H.; J. CARMIN, COLLEY, M. 2011: **Cities and climate change. Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network**, C. Rosenzweig, W. D. Solecki, S. A. Hammer, S. Mehrotra, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 249-269. Disponível em <http://uccrn.org/publications/> Acesso em 25 de Jan 2015.

MCKINSEY & COMPANY. Lighting the Way: Perspectives on Global Lighting Market. 2nd Edition, 2012. Disponível em <http://bit.ly/1eIG78E>. Acesso em 28 de Novembro de 2014.

MCTI – Ministério de Ciência e Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**, 2ª edição, Versão 1.1. Nov.2014.

Disponível em:

<http://www.mcti.gov.br/documents/10179/35540/Estimativas+Anuais+de+Emiss%C3%B5es+de+Gases+do+Efeito+Estufa+no+Brasil/aab059b1-8f09-4f1f-a06d-14a4b01896a8> Acesso em 26 Dez 2014.

MCT – Fatores de Emissão de CO2 pelo Sistema Nacional Interligado de Energia Elétrica do Brasil. 2015. Disponível em

<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>. Acesso em 10 de Julho de 2015.

MEDINA, C.; ZAMBRANO, M.; NAVARRO, K. Led based visible light communication: technology, applications and challenges – a survey.

**International Journal of Advances in Engineering & Technology**, Aug., 2015.

Vol. 8, Issue 4, pp. 482-495. Disponível em <http://www.ijaet.org/media/4I28-IJAET0828241-v8-iss4-482-495.pdf>. Acesso em 17 de setembro de 2015.

MEIER, S.; TORDERA, D.; PERTEGAS, A.; ROLDAN-CARMONA, C.; ORTI, E.; BOLINK, H.J. Light-emitting electrochemical cells: recent progress and future prospects.

**Materials Today**, v 17, n 5, p. 217-223, jun. 2014. Disponível em

<http://bit.ly/1vwRnOb>. Acesso em 30 nov. 2014.

MELO, L. Philips indenizará funcionários intoxicados em R\$ 20 milhões. **Exame**.

23 abr, 2015. Disponível em <http://abr.ai/28R0arp> Acesso em 01 de maio de 2015.

MENDONÇA, C.; BORBOREMA, R. Vantagens da Tecnologia LED em Sinalização Semafórica nos Esforços de Mitigação às Mudanças Climáticas.

Cidades Podem Alcançar Eficiência Energética e Benefícios Financeiros. Estudo de Caso na Cidade do Rio de Janeiro. In: 18º Congresso Brasileiro de Trânsito e Transporte, Rio de Janeiro, 2011. **Comunicação Técnica 51**, págs 371 a 375.

MORGAN-TAYLOR, M. Regulating Light Pollution In Europe: Legal Challenges And Ways Forward. In: **Urban Lighting Pollution and Society**. New York and London. Routledge, 2015. Cap 9 p.159 - 176

MORAN, M. Light-emitting diodes and their applications in energy-saving lighting. Proceedings of the ICE **Energy**, vol 164 feb. 2011, Issue 1, p: 17-24.

Disponível em <http://bit.ly/1FI9Uu5> . Acesso em: 16 de Nov 2014.

MOREIRA, V.A. **Iluminação Elétrica**. São Paulo, Edgard Blucher, 1999. 3ª edição 2008.

MUTMANSKY, M.; GIVLER, T.; CLANTON, N. **Street Lighting Survey for Commercial Areas in the Municipality of Anchorage**. Clanton & Associates, Final Report, October 02, 2009.

NASA. **The Fading Milky Way**. Nov, 1, 2001. Disponível em

[http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast01nov\\_1/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast01nov_1/). Acesso em 20 de Outubro de 2014.

NAVIGANT Research. **Smart Street Lighting**. 2º Sem. 2014. Disponível em <https://www.navigantresearch.com/wp-assets/brochures/SSL-14-Executive-Summary.pdf> Acesso em 02 de Jan. 2015.

NOGUEIRA, F.; SILVA, E.; CAMPOS, M.; CARREIRA, T.; GOUVEIA, L.H.; CASAGRANDE, C.G.; BRAGA, A.C. **Projeto Piloto de Iluminação Pública empregando LEDs em Substituição a Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte, MG, 20 a 24 de Setembro de 2014. Páginas 3075 a 3082. Disponível em <http://bit.ly/1QXEJBQ> Acesso em 02 Jan 2015.

ONU – Organização das Nações Unidas. Resolução 68/ 221, Adotada pela Assembleia Geral de 20 de Dezembro de 2013. 12 de Fevereiro de 2014. Disponível em [http://www.light2015.org/dam/About/Resources/Resolution/Resolution\\_EN.pdf](http://www.light2015.org/dam/About/Resources/Resolution/Resolution_EN.pdf) Acesso em 19 de Dezembro de 2014.

OSLER, S. (2009). **LED vs. Sodium Lamps**. American LED and Energy Corporation, 2009, Apud KIVIMÄKI, 2013.

OSRAM. **Overvoltage protection for LED street lighting** jun 2015. Disponível em <https://www.osram.com/media/resource/HIRES/612095/overvoltage-protection-for-led-street-lighting-en.pdf> Acesso em 31 jan 2016.

PAINTER, K. The influence of street lighting improvements on crime, fear and pedestrian street use, after dark. **Landscape and Urban Planning** 35 (1996) 193-201. Disponível em <http://bit.ly/1Qg6UIb> Acesso em 20 de Dezembro de 2014.

PAWSON, S.M.; BADER, M.K.-F. LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. **Ecological Applications**, 24(7), 2014, pp. 1561–1568\_ 2014 by the Ecological Society of America. Disponível em <http://www.esajournals.org/action/showCitFormats?doi=10.1890%2F14-0468.1> Acesso em 5 de julho de 2015.

PORTAL BRASIL. Selo Procel chega às lâmpadas LED. 23 de dezembro de 2014. Disponível em <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/12/selo-procel-chega-as-lampadas-led>. Acesso em 03 de maio 2015.

PUN, C.S.J.; SO, C.W.; LEUNG, W.Y.; WONG, F.C. Contributions of artificial lighting sources on light pollution in Hong Kong measured through a night sky brightness monitoring network. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer** 139 (2014) 90-108. Disponível em Acesso em 01 jan 2016.

RESEARCH and MARKETS. **Free sample - United States Smart Infrastructure: LED and Smart Street Lighting**. Outubro de 2012. Disponível [http://www.researchandmarkets.com/research/2kqdn/united\\_states](http://www.researchandmarkets.com/research/2kqdn/united_states) Acesso em 14 de novembro de 2014.

REUTER, M.A.; SCHAIK, A. Product-Centric Simulation-Based Design for Recycling: Case of LED Lamp Recycling. **J. Sustain. Metall.** (2015) 1:4–28. Disponível em <http://bit.ly/1O5oRrj> Acesso em 6 de julho 2015.

RIFKIN, J. A Terceira Revolução Industrial – **Como o poder lateral está transformando a energia, economia e mundo.** São Paulo, 2012. M Books do Brasil Editora Ltda, 319 p.

RIOLUZ. Empresa pública do município do Rio de Janeiro responsável pela implantação e manutenção do sistema de iluminação pública da cidade, ligada a Secretaria de Conservação. Reunião com Julio Morandi, Chefe de Gabinete da Presidência em 27 jan 2016.

RODRIGUES, C.R.B.S. **Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública.** 2012. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2012. Disponível em <http://www.ufjf.br/nimo/files/2013/06/TESE-Cláudio-Rodrigues.pdf> . Acesso em 1 de dezembro de 2014.

ROSENZWEIG, C.; SOLECKI, W.; HAMMER, S.; MEHROTA, S. Cities Lead the Way in Climate-Change Action. **21 October 2010, vol 467, Nature, p 909-911.** Disponível em [http://ccrun.org/sites/ccrun/files/attached\\_files/2010\\_Rosenzweig\\_etal\\_2.pdf](http://ccrun.org/sites/ccrun/files/attached_files/2010_Rosenzweig_etal_2.pdf) . Acesso em 19 de Dezembro de 2014.

ROSSINI, S.R.G.; REIMÃO, R.; LEFÈVRE; MEDRADO-FARIA, M.A. Chronic insomnia in workers poisoned by inorganic mercury psychological and adaptive aspects. **Arq Neuropsiquiatr** 2000; 58(1): 32-38. Disponível em : <http://www.scielo.br/pdf/anp/v58n1/1254.pdf> Acesso em 01 de maio de 2015.

ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES (RSAS) - Efficient Blue Light-Emitting Diodes Leading To Bright And Energy-Saving White Light Sources. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2014. 7 Outubro de 2014. Disponível em <http://1.usa.gov/1KIXKox> Acesso em 05 de julho de 2015.

RTI, International. Collaborating for Success: LED Systems Reliability. In DOE SSL R&D Workshop January 30, 2013. Disponível em <http://1.usa.gov/1KIXKox> Acesso em 05 de julho de 2015.

SALES, R.P. **LED, o Novo Paradigma da Iluminação Pública.** 2011. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia), do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), e Instituto de Engenharia do Paraná (IEP). 2011. Curitiba. 117p. Disponível em <http://bit.ly/1Uhu84k> . Acesso em 1 de dezembro de 2014.

SANDERSON, S.; SIMONS, K. Light emitting diodes and the lighting revolution: The emergence of a solid-state lighting industry. **Research Policy** 43(2014) p. 1730-1746. Disponível em <http://bit.ly/1ohNvQy> . Acesso em 26 de Dezembro de 2014.

SCHREUDER, D. **Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception**. Springer, 2008. Disponível em <http://ltjds.jinr.ru/record/51799/files/Outdoor%20Lighting%20Physics,%20Vision%20and%20Perception.pdf> Acesso em 06 de Abril de 2015.

SCHUBERT, E.F. Cap 1 – History of Light Emitting Diode. Cap 16 - Human eye sensitivity and photometric qualities. In: **Light-Emitting Diodes**. Second Edition. Cambridge University Press. 2006. Disponível em <http://bit.ly/1QX3H49> Acesso em 6 de Abril de 2015.

SEATTLE C.L. An LED Conversion Story. In: DOE Webcast “Maintenance Practices for LED Street Light. 14 abril 2014. Disponível em <http://energy.gov/eere/ssl/maintenance-practices-led-streetlights>. Acesso em 1 jan 2015.

SILVA, F.M.D. **Análise do descarte de lâmpadas fluorescentes na cidade do Recife**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco. 2010. Disponível em <http://bit.ly/1zGjz5M> Acesso em 02 de maio 2015.

SILVA, L.C.E. **Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa**. Capítulo 2, págs 40 a 46. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), UNESP, Ilha Solteira, SP, 2008. Disponível em <http://bit.ly/28NS3XF> Acesso em 21 de abril de 2015.

SILVA, L.L.F. **Iluminação Pública No Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais**. Dissertação (Mestrado Programa de Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE. 2006. Disponível em <http://bit.ly/1ZGLKKn>. Acesso em 14 outubro de 2014.

SILVEIRA, M.C.F.; MALDONADO, O.A.A.; CARVALHO, S.G.P.; SILVEIRA, J.L. Benefícios Ambientais e Energéticos da Utilização da Tecnologia LED em Sistema de Iluminação Pública. Anais XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Págs 954-958. 12 a 16 Setembro 2010, Bonito-MS. Disponível em [http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2010/Artigos/66237\\_1.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2010/Artigos/66237_1.pdf) Acesso 1 de fev 2016.

SIQUEIRA, M.C. Cadastro de IP – 2012 [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por cmendonca@c40.org em 23 dez 2015.

SIQUEIRA, M.C. Procel Reluz – Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes In: 3º SIPEQE – Seminário de Sistemas em Iluminação pública eficiente e qualidade de energia. Guaratinguetá, 29 de outubro de 2010. Disponível em <http://bit.ly/1TjCdXD> acesso em 14 novembro 2014.

SMITH, M.; HARGROVES, K.; STASINOPOULOS, P.; STEPHENS, R.; DESHA, C. and HARGROVES, S. (2007) Chapter 4: Responding To Increasing Demand For Electricity - Engineering Sustainable Solutions Program: Sustainable Energy Solutions Portfolio, The Natural Edge Project. Disponível em <http://bit.ly/245IF9X> . Acesso em 20 de outubro de 2014.

SOARES, G. Cadastro de IP – 2012 [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por cmendonca@c40.org em 23 jan 2016.

STASIAK, F. A Física dos LEDs. **Revista da SET – Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão**. Nº 136, Set 2013, págs. 74-76. Disponível em [http://www.set.org.br/artigos/ed136/136\\_revistadaset\\_74.pdf](http://www.set.org.br/artigos/ed136/136_revistadaset_74.pdf) Acesso em 29 de Dez 2014.

STONE, E.; JONES, G.; HARRIS S. Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. **Global Change Biology** (2012) 18, 2458–2465. Disponível em <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2012.02705.x/epdf> Acesso em 29 de Dez 2014.

STRATEGIES UNLIMITED. LED Lighting Global Market Trends. In 2014 DOE Solid-State Lighting Manufacturing R&D Workshop, San Diego, May 2014. Disponível em <http://energy.gov/eere/ssl/2014-solid-state-lighting-manufacturing-rd-workshop-presentations-and-materials> Acesso em 01 de maio de 2015.

TAHKAMO, L.; HALONEN, L. Life cycle assessment of road lighting luminaires - Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies. **Journal of Cleaner Production** 93 (2015) 234-242. Disponível em <http://bit.ly/1MAKiA0>. Acesso em 15 de dezembro de 2015.

TAUB, A.; ZACHI, E.C.; TEIXEIRA, R.A.A.; FARIA, M.A.M.; VENTURA, D.F. A Aplicação da Neuropsicologia na Pesquisa Experimental: o Exemplo da Intoxicação por Vapor de Mercúrio. **Psicologia USP**, 2006, 17(4), 287-300. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/pusp/v17n4/v17n4a15.pdf> Acesso em 01 de maio de 2015.

THE CLIMATE GROUP. 2012. Global Outdoor LED Trials: Analysis for Lighting Managers. 2012. Disponível em [http://www.theclimategroup.org/\\_assets/files/LED-Report-Full-FINAL-low-res\(1\).pdf](http://www.theclimategroup.org/_assets/files/LED-Report-Full-FINAL-low-res(1).pdf). Acesso em 02 de Abr de 2015.

\_\_\_\_\_. 2014. **No Need to Wait: Accelerating Adoption of LED Street Lighting**. 2014. Disponível em [http://www.theclimategroup.org/\\_assets/files/LED-Consultation-Handout.pdf](http://www.theclimategroup.org/_assets/files/LED-Consultation-Handout.pdf) Acesso em 02 de Abr de 2015.

UNEP – United Nations Environment Program. 2010. **Brazil On Grid Country Lighting Assessment**. 2010 v1.1. Disponível em [http://www.app.olela.net/infomap/files/clas/CLA\\_BRA.pdf](http://www.app.olela.net/infomap/files/clas/CLA_BRA.pdf) Acesso em 15 Novembro de 2014.

\_\_\_\_\_. 2012. **Achieving the Global Transition to Energy Efficient Lighting Toolkit**. 2012. Disponível em [http://www.app.olela.net/infomap/files/clas/CLA\\_BRA.pdf](http://www.app.olela.net/infomap/files/clas/CLA_BRA.pdf) Acesso em 15 Novembro de 2014.



———. 2014. **Green Paper. Policy Options to Accelerate the Global Transition to Advanced Lighting**. Preparado para o Global Efficient Lighting Forum. Nov 2014. Disponível em <http://bit.ly/1JiZzEB> Acesso em 26 de Dez 2014.

———. 2015. **Global Energy Efficiency Accelerator Platform – Lighting**. 2015 Disponível em [http://www.se4all.org/wp-content/uploads/2014/09/Accelerator\\_Lighting-0615.pdf](http://www.se4all.org/wp-content/uploads/2014/09/Accelerator_Lighting-0615.pdf) Acesso 1 de julho de 2015.

UN HABITAT. **The State of the World's Cities 2012/ 2013**, Prosperity of Cities. 2012. Acesso em 25 de Setembro 2013: <http://bit.ly/1WnQjqk>

VASCONCELLOS, L.E.M.; LIMBERGER, M.A.C. (Org.). **Iluminação Eficiente: Iniciativas da Eletrobras Procel e Parceiros**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2013. Disponível em <http://bit.ly/16nIX11>. Acesso em 14 de Outubro de 2014.

WORLD BANK. **Prefeasibility Study Municipal Energy-Efficient Public Street Lighting Project in the City of Rio de Janeiro**. Ago 2014. Disponível em [http://www.theclimategroup.org/\\_assets/files/World-Bank---Rio-LED-street-lighting-pre-feasibility-study---FULL-REPORT---ENGLISH---AUG-2014-\(1\).pdf](http://www.theclimategroup.org/_assets/files/World-Bank---Rio-LED-street-lighting-pre-feasibility-study---FULL-REPORT---ENGLISH---AUG-2014-(1).pdf). Acesso em 2 de jan 2016.

YACOBI, B.G. **Semiconductor Materials** : An Introduction to Basic Principles. Páginas:239 Editor: Kluwer Academic Publishers Local: Secaucus, NJ, USA Data de Publicação: 11/2002. Disponível em <http://bit.ly/1KICcrH> Acesso em 30 Dez 2014.

ZHANG, Q.; SETO K.C. Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data. **Remote Sensing of Environment** 115 (2011) 2320–2329 Disponível em <http://bit.ly/1MrCzEv> Acesso em 1 de novembro de 2015.

ZIMMERMAN, S.; ESBJÖRN-HARGENS, M. **Integral Ecology. Uniting Multiple Perspectives on the Natural World**. Integral Books. Boston & London. 2009. Págs 224, 285, 286.

# ANEXO

## A. Metodologia para Avaliação de PEE segundo ANEEL

A metodologia descrita abaixo é a adotada pelos Programas de Eficiência Energética da ANEEL de iluminação (ANEEL, 2013b).

Tabela 38 – Cálculos de Eficiência Energética em Sistemas de Iluminação.

Sistema Atual					
Item		Sistema 1, Sistema 2...		Total	Nº equação
1	Tipo de lâmpada				
2	Potência (lâmpada + reator) (W)	$pa1$			
3	Quantidade	$qa1$			
4	Potência Instalada (kW)	$Pa1$	$= \frac{pa1 \times qa1}{1000}$		(eq. 1)
5	Funcionamento (h/ano)	$ha1$			
6	FCP (fator de coincidência na ponta)	$FCPa1$	$= \frac{Da1}{Pa1}$		(eq. 2)
7	Energia consumida (MWh/ano)	$Ea1$	$= \frac{Pa1 \times ha1}{1000}$	$Ea = \sum Eai$	(eq. 3)
8	Demanda média na ponta (kW)	$Da1$		$Da = \sum Dai$	(eq. 4)
Sistema Proposto					
9	Tipo de lâmpada				
10	Potência (lâmpada + reator) (W)	$pp1$			
11	Quantidade	$qp1$			
12	Potência Instalada (kW)	$Pp1$	$= \frac{pp1 \times qp1}{1000}$		(eq. 5)
13	Funcionamento (h/ano)	$hp1$			
14	FCP (fator de coincidência na ponta)	$FCPp1$	$= \frac{Dp1}{Pp1}$		(eq. 6)
15	Energia consumida (MWh/ano)	$Ep1$	$= \frac{Pp1 \times hp1}{1000}$	$Ea = \sum Epi$	(eq. 7)
16	Demanda média na ponta (kW)	$Dp1$		$Da = \sum Dpi$	(eq. 8)
Resultados Esperados					
17	Redução de Demanda na Ponta (kW)	$RDP1$	$= Da1 - Dp1$	$RDP = \sum RDPi$	(eq. 9)
18	Redução de Demanda na Ponta (%)	$RDP1\%$	$= \frac{RDP1}{Da1}$	$RDP\% = \frac{RDP}{Da}$	(eq. 10)
19	Energia Economizada (MWh/ano)	$EE1$	$= Ea1 - Ep1$	$EE = \sum EEi$	(eq. 11)
20	Energia Economizada (%)	$EE1\%$	$= \frac{EE1}{Ea1}$	$EE\% = \frac{EE}{Ea}$	(eq. 12)

Fonte: ANEEL, 2013b – Módulo 4

Onde:

$$ha1 = hp1 = 12\text{h/dia} \times 365 \text{ dias/ ano} = 4.380 \text{ h/ano}$$

$$EE = [\sum_{sistema\ i}(qa_i \times pa_i \times ha_i) - \sum_{sistema\ i}(qp_i \times pp_i \times hp_i)] \times 10^{-6} \text{ (eq.13)}$$

$$RDP[\sum_{sistema\ i}(qa_i \times pa_i \times FCpa_i) - \sum_{sistema\ i}(qp_i \times pp_i \times FCpp_i)] \times 10^{-3} \text{ (eq.14)}$$

Fator de Coincidência na Ponta (FCP) é o fator que considera a relação (a/b) entre (a) as horas de utilização do sistema para o qual se promoverá a eficiência energética em um ano e (b) o número máximo de horas no período de ponta em um ano (LIGHT, 2014)<sup>114</sup>.

O valor do fator de coincidência na ponta deverá ser menor ou igual a 1 (um)

O cálculo do FCP é dado por:  $\frac{nhp \times nd \times nm}{792}$  (eq.15)

Onde:

- denominador igual a 792 é o número de horas disponíveis em um ano (3 horas diárias  $\times$  22 dias mensais  $\times$  12 meses), no segmento de ponta, do sistema para o qual se promoverá a eficiência energética;
- nhp: número de horas por dia de utilização do sistema para o qual se promoverá a eficiência energética no horário de ponta.
- nd: número de dias úteis (segunda-feira a sexta-feira) ao longo do mês em que se utiliza o sistema para o qual se promoverá a eficiência energética no horário de ponta. Esta pesquisa considerou um mês padrão com 22 (vinte e dois) dias úteis mensais;
- nm: número de meses, no período de um ano, em que se utiliza o sistema para o qual se promoverá a eficiência energética. Considerou-se 12 (doze) meses.

Tabela 39 – Vida útil de materiais e equipamentos de Iluminação Pública.

Materiais e equipamentos	Vida Útil (anos)
Relés Fotoelétricos	3
Economizadores	5
Lâmpadas VSAP de 70W	3
Lâmpadas VSAP a partir de 100 W	5
Lâmpadas a LED	20
Reatores e Ignitores	10
Luminárias abertas	15
Luminárias fechadas	20
Braços e Acessórios	20

Fonte: ANEEL, 2013b (Módulo 4).

<sup>114</sup> Disponível no website [http://www.light.com.br/Repositorio/Eficiencia-Energetica/Light\\_Edital\\_CPP\\_PEE\\_rev05\\_21\\_10\\_2014.pdf](http://www.light.com.br/Repositorio/Eficiencia-Energetica/Light_Edital_CPP_PEE_rev05_21_10_2014.pdf) Acesso em 10 jan 2016.

- **Cálculo do RCB e critério de avaliação e viabilidade**

$$RCB = \frac{CA_T}{BA_T}, \text{ (eq.16)}$$

onde:

$CA_T$ : custo anualizado total (R\$/ano)

$BA_T$ : benefício anualizado (R\$/ano)

O benefício apurado com a valoração da energia e da demanda reduzidas ao custo unitário marginal de expansão do sistema deve ser no mínimo 25% maior que o custo do projeto. Em outras palavras, a relação custo benefício do projeto deve ser igual ou inferior a 0,8 (oito décimos). ANEEL, 2013b (Módulo 4).

$$CA_T = \sum_n CA_n \text{ (eq.17)}$$

$CA_n$ : custo anualizado de cada equipamento incluindo custos relacionados (mão de obra, etc) (R\$/ano)

$$CE_T = \sum_n CE_n \text{ (eq.18)}$$

$CE_T$ : custo total em equipamentos (R\$)

$CE_n$ : custo anualizado de cada equipamento (R\$)

$$CA_n = CE_n \times \frac{CT}{CE_T} \times FRC_u \text{ (eq. 19)}$$

$CE_T$ : custo total em equipamentos (R\$)

$CE_n$ : custo anualizado de cada equipamento (R\$)

$CT$ : custo total do projeto (R\$)

$FRC_u$ : Fator de recuperação do capital para u anos (1/ano)

u: vida útil dos equipamentos (ano)

- **Fator de recuperação do capital,  $FRC_u$**

$$FRC_u = \frac{i(1+i)^u}{(1+i)^u - 1} \text{ (eq.20)}$$

i: taxa de desconto considerada (1/ano)

u: u anos (ano)

Onde taxa de desconto i será a mesma especificada no Plano Nacional de Energia vigente na data de submissão do projeto, conforme publicado pela EPE. No caso, 8% ao ano (EPE, 2007).

- **Benefícios anualizados,  $BA_T$**

$$BA_T = (EE \times CEE) + (RDP \times CED) \text{ (eq.21)}$$

$BA_T$ : benefício anualizado (R\$/ano)

$EE$ : energia annual economizada (MWh/ano)

$CEE$ : custo unitário evitado de energia (R\$/MWh)

$RDP$ : demanda evitada na ponta(kW ano)

$CED$ : custo unitário evitado da demanda (R\$/kW ano)

Onde CEE (custo evitado de energia) e CED (custo evitado da demanda) serão definidos a seguir.

- **Custo evitado de energia**

$$CEE = \frac{(C_p \times LE_p) + (C_{fp} \times LE_{fp})}{LE_p + LE_{fp}} \text{ (eq.22)}$$

$$LE_p = \frac{(7 \times LE_1) + (5 \times LE_2)}{12} \text{ (eq.23)}$$

$$LE_{fp} = \frac{(7 \times LE_3) + (5 \times LE_4)}{12} \text{ (eq.24)}$$

Onde:

$C_p$ : custo unitário da energia no horário de ponta na bandeira verde (R\$/MWh)

$C_{fp}$ : custo unitário da energia no horário fora de ponta na bandeira verde (R\$/MWh)

$LE_p$ : constante de perda de energia no posto de ponta considerando 1 KW de perda de demanda no horário de ponta

$LE_{fp}$ : constante de perda de energia no posto for a de ponta considerando 1 KW de perda de demanda no horário fora de ponta

$LE_1$ : constante de perda de energia no posto de ponta de períodos secos considerando 1 KW de perda de demanda no horário de ponta

$LE_2$ : constante de perda de energia no posto de ponta de períodos úmidos considerando 1 KW de perda de demanda no horário de ponta

**LE<sub>3</sub>**: constante de perda de energia no posto fora de ponta de períodos secos considerando 1 KW de perda de demanda no horário fora de ponta

**LE<sub>4</sub>**: constante de perda de energia no posto fora de ponta de períodos úmidos considerando 1 KW de perda de demanda no horário fora de ponta

Para projetos em Baixa Tensão de Sistema Aéreo

A distribuidora que já possua tarifa horária branca homologada, conforme estabelecido no Módulo 7 dos Procedimentos de Regulação Tarifária (PRORET), deverá adotar os custos referentes a esta tarifa para projetos em consumidores em baixa tensão. Serão considerados somente os custos dos horários de ponta e fora de ponta para o cálculo dos Custos Evitados de Demanda e Energia unitários. Os projetos da Tipologia Iluminação Pública deverão utilizar a modalidade tarifária Branca, subgrupo B3 – Demais Classes. O Custo da Energia Evitada (CEE) unitário será calculado pelo método descrito acima.

Já o Custo da Demanda Evitada (CED) unitário será calculado pelo método abaixo descrito:

$$CED = (12 \times C_1 \times h_p \times F_C \times 10^{-3}) + (12 \times C_2 \times h_{fp} \times F_C \times 10^{-3} \times LP) \text{ (eq.25)}$$

**C<sub>1</sub>**: custo unitário do uso do Sistema de Distribuição no horário de ponta (R\$/ MWh)

**C<sub>2</sub>** : custo unitário do uso do Sistema de Distribuição no horário fora de ponta (R\$/ MWh)

**LP**: constante de perda de demanda no posto fora de ponta, considerando 1 Kw de perda de demanda no horário de ponta (1)

**h<sub>p</sub>**: número de horas de ponta em um mês (horas)

**F<sub>C</sub>** : Fator de carga do segmento elétrico imediatamente a montante daquele considerado ou que sofreu a intervenção, ou ainda, na falta deste, admitir-se-á o médio da distribuidora dos últimos 12 meses

Custo do uso do sistema de distribuição: Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição no horário de ponta - TUSD

LP e os demais fatores LE1, LE2, LE3, LE4 podem ser obtidos no quadro a seguir:

Quadro 2 – Fatores para cálculo do CED.

Fator de carga	LP	LE1	LE2	LE3	LE4
0,30	0,2500	0,27315	0,19121	0,35166	0,24832
0,35	0,2809	0,28494	0,19946	0,52026	0,36738
0,40	0,3136	0,29727	0,20809	0,71014	0,50146
0,45	0,3481	0,31014	0,21710	0,92130	0,65057
0,50	0,3844	0,32355	0,22649	1,15375	0,81472
0,55	0,4225	0,33750	0,23625	1,40748	0,99389
0,60	0,4624	0,35199	0,24639	1,68249	1,18808
0,65	0,5041	0,36950	0,25865	1,97632	1,39557
0,70	0,5476	0,38516	0,26961	2,29381	1,61977

Em projetos cooperativos, é adotada a média em cada posto tarifário entre as distribuidoras participantes ponderada pela participação nos custos do projeto, ou na energia evitada.

## APÊNDICES

### A. Conceitos sobre parâmetros luminotécnicos e qualidade de energia

Abaixo, são definidos alguns conceitos básicos de luminotécnica e fotometria e qualidade de energia<sup>115 116</sup>.

- Fluxo Luminoso:  $\Phi_v, \Phi$  (lm)

Quantidade derivada do fluxo radiante  $\Phi_e$  através da medição da radiação de acordo com sua ação conforme o observador fotométrico padrão CIE. Fluxo luminoso é expresso em lumens (lm) e está definido para visão fotópica e escotópica (ABNT, 2013).

Ou seja, a radiação eletromagnética emitida pela fonte luminosa, conforme ilustrado na figura 48, é ponderada de acordo com o espectro de sensibilidade do sistema visual (a curva de eficiência do espectro luminoso) e fornece então a quantidade de luz na faixa visível ao olho humano (SCHREUDER, 2008).



Figura 48 – Ilustração Radiação Emitida pela Fonte.  
Fonte: FERREIRA, 2010.

- Intensidade luminosa:  $I_v, I$  (cd = lm/sr)

Praticamente todos os tipos de luz (naturais e artificiais) emitem luz a diferentes taxas em diferentes direções. Isso fica claro nas luzes criadas pelo homem, pois as mesmas necessitam de uma ignição para prover energia (gás, parafina, eletricidade) e além disso necessitam estar suportadas. Daí a importância e necessidade de distinguir a ação da fonte em diferentes direções. A intensidade luminosa significa então a intensidade de luz que é emitida pela fonte em uma determinada direção (SCHREUDER, 2008). Ou seja, duas fontes luminosas podem ter a mesma potência, mas uma delas pode emitir muito mais energia, numa dada direção, que a outra (Moreira, 2008). A intensidade luminosa de uma fonte, em uma dada direção, é então definida como o

---

<sup>115</sup> Sempre que possível, foi utilizada a definição oficial adotada pela ABNT (e CIE). No entanto muitas delas são apenas descrições de fórmulas matemáticas, ausentes de uma explicação conceitual do parâmetro. Durante o desenvolvimento da pesquisa, foi observado que em alguns municípios não só no Brasil, como no exterior, técnicos de Prefeituras não possuíam entendimento prático de muitos destes conceitos, o que indica uma potencial lacuna para aperfeiçoamento de normas. A norma não prescindiria de ter o rigor matemático e científico, mas poderia em um curto parágrafo explicar o conceito facilitando a aplicação e sendo mais uma referência para promover disseminação de conhecimento.



quociente do fluxo luminoso,  $d\Phi_v$ , deixando a fonte e propagado no elemento de ângulo sólido  $d\Omega$  (ABNT, 2013).

Ângulo sólido, por sua vez, é definido como um ângulo formado por um cone tal que a área da esfera de raio unitário interna ao cone tenha o valor de um metro quadrado. A unidade do ângulo sólido é esferorradiano (sr)<sup>117</sup> (BREALEY, 2005).



Figura 49 – Representação Intensidade Luminosa e Ângulo Sólido.  
Fonte: BREALEY, 2005

- Iluminância:  $E_v$ ,  $E$  (lux)

Quando a luz atinge uma superfície de forma constante, uma quantidade de fluxo luminoso é incidente na mesma. Se a superfície é iluminada uniformemente, a iluminância é expressa como uma densidade de área do fluxo luminoso incidente na superfície. Uma outra possível definição seria densidade do fluxo luminoso. A unidade de iluminância é lux (SCHREUDER, 2008).

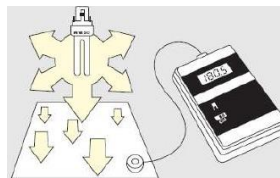


Figura 50 – Representação Iluminância.  
Fonte: FERREIRA, 2010.

- Luminância:  $L_v$ ,  $L$  ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

Luminância é uma medida de "brilho de superfície", a quantidade de luz que atinge o olho do observador, e é medido em unidades de intensidade luminosa (candela) por unidade de área ( $\text{m}^2$ ). Como a luz percebida pelo olho humano inclui a refletida por objetos que não emitem luz, faz-se necessário incluir conceito de fator de luminância, para indicar a característica refletiva de uma superfície. (SCHREUDER, 2008)

<sup>117</sup> Fonte: BREALEY, R. Mecânica Clássica, disponível em Google Books, páginas 569 e 570.

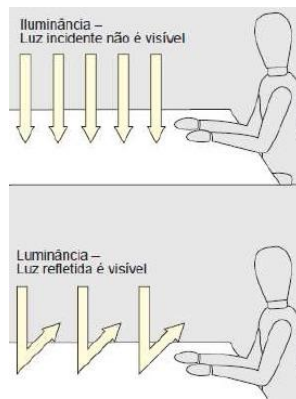


Figura 51 – Representação Luminância.  
Fonte: FERREIRA, 2010.

- Eficácia da fonte luminosa:  $\eta$  (lm/W)

As fontes de iluminação convertem energia elétrica em energia eletromagnética. A eficiência desta conversão, entretanto, não é diretamente relevante a eficiência visual da lâmpada. A eficiência visual implica em ponderar a radiação eletromagnética de acordo com o espectro de sensibilidade do sistema visual.

Do ponto de vista de eficácia da fonte de iluminação, esta é definida como a razão entre o fluxo luminoso em lumens (lm) gerado pela lâmpada e a energia ou trabalho em Watts (W) consumido pela lâmpada. A eficácia é então expressa em (lm/W) e não em percentual (%). Em termos de energia, lm/W é adimensional, porque tanto lumens quanto watt representam “trabalho”.

- Vida útil (de uma lâmpada):  $L_{\% \text{fluxo luminoso inicial}}$  (horas)

Tempo durante o qual a lâmpada funciona até se tornar inútil, ou ser considerada inútil de acordo com critérios especificados. A vida útil é geralmente expressa em horas (ABNT, 1991).

Importante salientar que lâmpadas com tecnologia LED não falham como lâmpadas tradicionais. Mesmo após anos de funcionamento não “apagam”, no entanto, têm seu fluxo luminoso depreciado. Assim, especificamente para lâmpadas LED, é especificado o tempo durante o qual uma lâmpada completa fornece mais de 50% (ou 70%) do fluxo luminoso inicial, sob condições normais de ensaio. A lâmpada de LED tem, portanto, atingido o seu fim de vida, quando ela já não fornece 50% (ou 70%, alternativamente) do fluxo luminoso inicial. A Norma ABNT IEC/ PAS 62612:2013 adota um valor de 50% ( $L_{50}$ ) como um exemplo que é frequentemente utilizado para aplicações de consumo. Para aplicações profissionais, um fator de manutenção do fluxo de 70% ( $L_{70}$ ) pode ser escolhido. A vida útil é sempre informada em combinação com a taxa de falha (ver definição abaixo) (ABNT, 2013).

Já nos Estados Unidos, recomendação que vem sendo dada é que o tempo de vida considere uma depreciação máxima de até 70% do fluxo luminoso inicial para as aplicações gerais de iluminação (iluminação de interiores, exteriores, etc) e de 50% apenas para o caso do uso de LED como efeito decorativo (DOE, 2009).

- “Rated life”, Vida Útil considerando taxa de falha

Taxa de falha é o percentual de um número de lâmpadas ensaiadas, do mesmo tipo, que atingiram o fim de suas vidas individuais. Para lâmpada LED com dispositivo de controle integrado, a taxa de falha expressa o efeito combinado de falha do LED e do

dispositivo de controle. Normalmente, uma taxa de falha de 10% e/ ou 50% está sendo aplicada, indicada como  $F_{10}$  e/ ou  $F_{50}$  (ABNT, 2013).

Assim a taxa de falha é um dado estatístico, enquanto a vida útil é um dado de durabilidade. Ao se considerar a taxa de falha, aumenta-se a confiabilidade no produto que está sendo adquirido. Por exemplo, um produto que tem  $F_{10}$  de 1.000h comparado com um que tem  $F_{50}$  de 1000 horas, o produto  $F_{10}$  (10% da amostra analisada apresentou falha) é mais confiável e deve durar bem mais que um avaliado como  $F_{50}$  (50% da amostra analisada apresentou falha). O ideal é que os dois parâmetros sejam informados conjuntamente (JIAO, 2011).

Assim por exemplo, um produto com “rated life”  $F_{50L_{70}}$  de 30,000 horas, implica que 50% das amostras testadas devem ter manutenção de fluxo luminoso por 30.000 horas.

- Índice de Reprodução de Cor (IRC ou  $R_A$ )

É a medida de correspondência entre a cor real de um objeto, iluminado por uma fonte de luz de referência (iluminante de referência) e sua aparência diante de uma fonte de luz sob ensaio (iluminante de ensaio). Corresponde a um número abstrato, variando de 0 a 100, que indica aproximadamente como a iluminação artificial permite o olho humano perceber as cores com maior ou menor fidelidade. Lâmpadas com IRC próximos de 100 reproduzem as cores com fidelidade e precisão (ABNT, 1991; MOREIRA, 2008).

Tabela 40 – Índice de Reprodução de Cor.

$R_A$	Nível	Classificação/ nível	Reprodução
100	1	1a: $90 < R_A < 100$	Excelente
		1b: $80 < R_A < 90$	Muito boa
80	2	2a: $70 < R_A < 80$	Boa
		2b: $60 < R_A < 70$	Razoável
60	3	$40 < R_A < 60$	Regular
40	4	$20 < R_A < 40$	Insuficiente
20			

Fonte: MOREIRA, 2008

- Distorção Harmônica Total (DHT)

A qualidade de uma rede de distribuição elétrica é a extensão em que a curva de tensão é uma onda senoidal de amplitude constante. Distorções (desvios da curva senoidal fundamental) podem ser causadas por exemplo por equipamentos ligados a rede, gerando “poluição elétrica” (harmônicas) a rede com sérios danos conforme quadro abaixo.

Harmônicas são tensões e correntes com freqüências correspondentes a múltiplos inteiros da freqüência fundamental.

A figura a seguir ilustra uma forma de onda distorcida (a) resultante da soma de uma curva senoidal (b, em preto) com uma segunda curva senoidal de menor amplitude e com freqüência três vezes maior que a primeira (b, em azul).

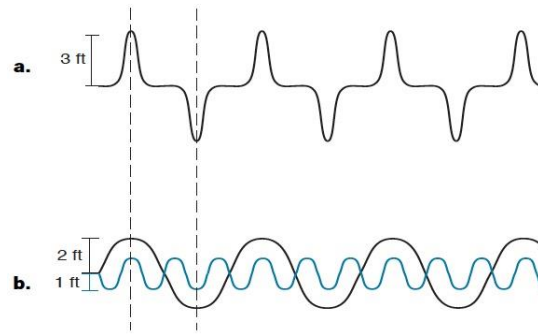


Figura 52 – Ilustração de onda fundamental, harmônica e onda total distorcida.  
Fonte: Lighting Research Center (1995).

As correntes harmônicas são geradas por cargas não-lineares conectadas na rede de distribuição de energia elétrica. A circulação das correntes harmônicas gera tensões harmônicas, e então uma deformação da tensão de alimentação. No passado predominavam cargas lineares (iluminação incandescente, cargas de aquecimento, motores sem controle de velocidade). Atualmente, com o advento da eletrônica, tem-se uma enorme quantidade de cargas não-lineares geradoras de poluição elétrica (harmônicas) (SILVA, 2008).

A distorção harmônica total de corrente ou tensão é então a razão do conteúdo de uma onda harmônica em seu componente fundamental, expresso como percentual. Também chamado de “fator harmônico” é uma medida da extensão em que uma forma de onda é distorcida por conteúdo harmônico (LRC, 1995).

O quadro 3 abaixo ilustra os inúmeros danos causados pelas harmônicas, por deteriorarem a qualidade da energia (SILVA, 2008).

#### Quadro 3 – Danos causados pelas harmônicas.

- Sobrecarga dos condutores de neutro;
- Sobrecarga, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores, motores, ruídos dos transformadores;
- Sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa;
- Deformação da tensão de alimentação pode perturbar receptores sensíveis;
- Perturbação das redes de comunicação ou das linhas telefônicas.

A presença de harmônicos em um sistema pode não necessariamente causar danos imediatos, mas no decorrer do tempo, equipamentos expostos a correntes harmônicas podem vir a apresentar sérios problemas. As harmônicas têm um impacto econômico considerável, resultando em:

- Envelhecimento precoce do material, levando a substituí-lo mais cedo, a menos que seja sobre dimensionado;
- Sobrecargas da rede obrigam a aumentar a potência necessária, e implicam, a menos que haja um sobre dimensionamento das instalações, perdas suplementares;
- Deformações da corrente provocam disparos intempestivos e a parada das instalações da produção.

Fonte: SILVA, 2008

Esse aspecto é especialmente importante pois a iluminação em LED, dependendo do fabricante e da tecnologia, pode influir negativamente na qualidade da energia e sua performance pode ser também afetada pela baixa qualidade da energia da rede. Diversas outras tecnologias de iluminação como lâmpadas fluorescentes, de descarga também podem contribuir negativamente com DHT.

- Potencia reativa

É uma medida relacionada ao quão em fase estão as ondas de corrente e de tensão.

A figura abaixo ilustra uma curva de corrente defasada da curva de tensão. Durante parte do ciclo, a corrente é positiva enquanto a tensão é negativa (ou vice-versa), como mostrado nas áreas hachuradas. Nestas situações, corrente e tensão trabalham uma contra a outra, criando *potencia reativa*. O aparelho produz trabalho apenas durante o tempo representado pelas partes não hachuradas do ciclo, que representa a *potencia ativa* do circuito. Apesar da potencia reativa não distorcer a tensão, é um parâmetro importante de qualidade da rede de energia, pois os sistemas de distribuição de energia elétrica devem ter capacidade de transmitir potencia reativa, apesar de não produzir nenhum trabalho útil (LRC, 1995). Ou seja, embora não afete o consumidor diretamente, impacta negativamente a rede produzindo “lixo” – potência não útil.

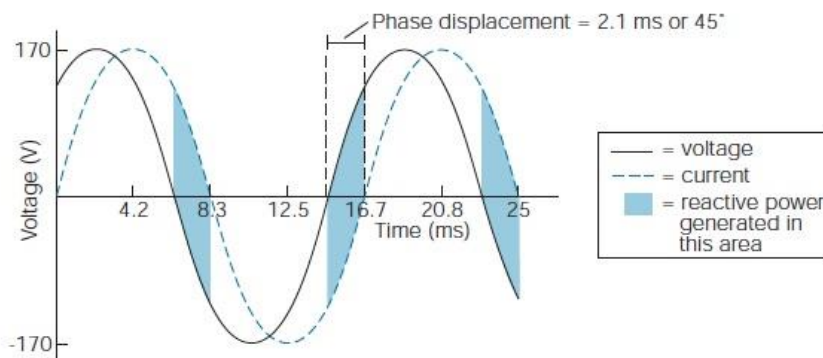


Figura 53 – Deslocamento de Fase e Potência Reativa.  
Fonte (LRC 1995).

- Fator de Potência

Fator de potência é uma medida do quão efetivamente um equipamento converte a entrada de corrente e voltagem (tensão) em potência elétrica. Descreve o efeito combinado de DHT e potência reativa por deslocamento de fase.

Um equipamento que tenha fator de potência de uma unidade (1.0) tem 0% de DHT e consumo de corrente que é sincronizada com a tensão. Cargas resistivas como as lâmpadas incandescentes têm fator de potência de unidade. Um equipamento é dito ter alto fator de potência se o fator for 0,92 ou maior, sendo inclusive parâmetro mínimo para grandes consumidores (ANEEL, 2013a). Dependendo do tipo de reatores usados, lâmpadas fluorescentes podem ter fatores de potência alto ou bem menores que 0,9. As lâmpadas de alto fator de potência normalmente usam filtros para reduzir harmônicos e capacitores para reduzir deslocamento de fase (LRC, 1995). Segundo nota de reunião na ANEEL<sup>118</sup>, algumas distribuidoras citam que a qualidade de energia da rede piorou com a introdução de lâmpadas compactas fluorescentes e o fato se agrava pois consumidores

<sup>118</sup> ANEEL - Nota Técnica nº 0154/2013-SRD/ANEEL, 20 junho de 2013. Disponível em [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/resultado/nt\\_0154-2013-srd-aneel\\_-\\_ap-65.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/resultado/nt_0154-2013-srd-aneel_-_ap-65.pdf), Acesso em 24 de Abril de 2015.

não compreendem este parâmetro de eficiência, de tal modo que a ANEEL regulamentou interrupção da cobrança de residência por baixo valor de fator de potencia (ANEEL, 2013a). Em setembro de 2013, o INMETRO instituiu regulamentação técnica para aumentar o padrão de qualidade das lâmpadas fluorescentes, de modo que para potencia maior que 25 W, a lâmpada deve ter fator de potencia maior que 0,92 e para potencias menores que 25 W, é aceitável fator de potencia mínimo de 0,52 (INMETRO, 2013a).

## B. Princípios Básicos do LED

Neste apêndice, são apresentados os fundamentos e princípios básicos da física dos semicondutores, que constituem o LED, bem como seu processo de fabricação.

Semicondutores são materiais que estão na faixa entre aqueles que conduzem eletricidade (condutores) e isolam o fluxo de eletricidade (isolantes). A teoria quântica explica a distinção entre a capacidade de condução de carga destes três materiais (YACOBI, 2002).

Os orbitais moleculares numa substância metálica estão localizados por todo o retículo cristalino e podem se reunir numa banda de orbitais moleculares cujas energias são muito próximas. Somente níveis discretos de energia podem ser ocupados por elétrons em suas órbitas. Sendo assim, cada elétron deve absorver ou emitir quantidades certas de energia (ou quanta) para mudar de órbita. Entre cada um destes níveis de energia existem intervalos nos quais nenhum elétron está presente (RODRIGUES, 2012). É denominada energia de *gap* a diferença de energia que separa a mais alta banda de valência (completa com elétrons) e a menor banda de condução (vazia ou com lacunas). A existência dos gaps de energia e de outras propriedades relacionadas pode ser considerada a base da energia requerida para remover um elétron de uma ligação química no material e permitir que este mova livremente através do material (ao ser aplicado uma diferença de potencial). Vale destacar que bandas completas ou vazias não contribuem para a condutividade elétrica de um metal pois os portadores são incapazes de transportar carga uma vez que todos os níveis de energia estão ocupados. Bandas parcialmente completas ao contrário, contém tanto elétrons quanto lacunas. Estas bandas permitem que portadores contribuam para a condutividade elétrica do material.

No caso de metais, a banda de estrutura eletrônica resulta que a mais alta banda de energia é incompleta. A magnitude da diferença de energia entre a mais alta banda completa (valência) e a menor banda incompleta (condução) distingue um semicondutor de um isolante, conforme mostrado na figura 20 a seguir. No caso de um semicondutor intrínseco (constituído de um elemento puro) a banda de valência e a banda de condução é separada por uma estreita faixa de energia. Em temperatura de 0 K não há elétrons na banda de condução. No entanto, como em semicondutores o gap de energia é suficientemente baixo, em temperatura ambiente, elétrons da banda de valência mais elevada são termicamente excitados a banda de condução, onde contribuem para o transporte de carga no material. O estado desocupado na banda de valência que se forma é denominado lacuna e atua como um portador de carga positiva que pode contribuir para o processo de condução. Em isolantes, o gap de energia é tão alto, se comparado ao semicondutor, que em temperatura ambiente a probabilidade de excitação térmica de um elétron da banda de valência para banda de condução é muito baixa (YACOBI, 2002)

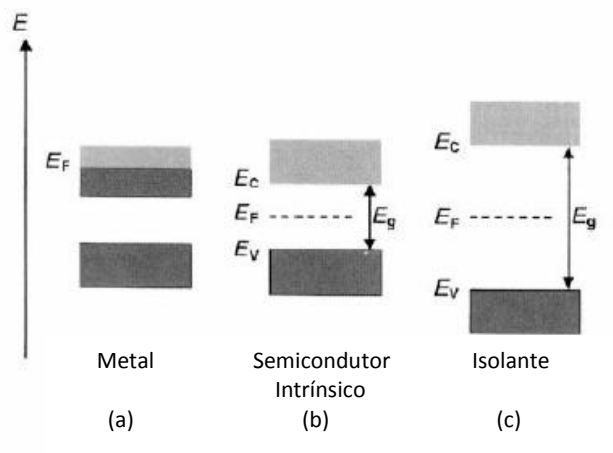


Figura 54 – Diagrama de bandas esquemático  
Fonte: YACOBI, 2002

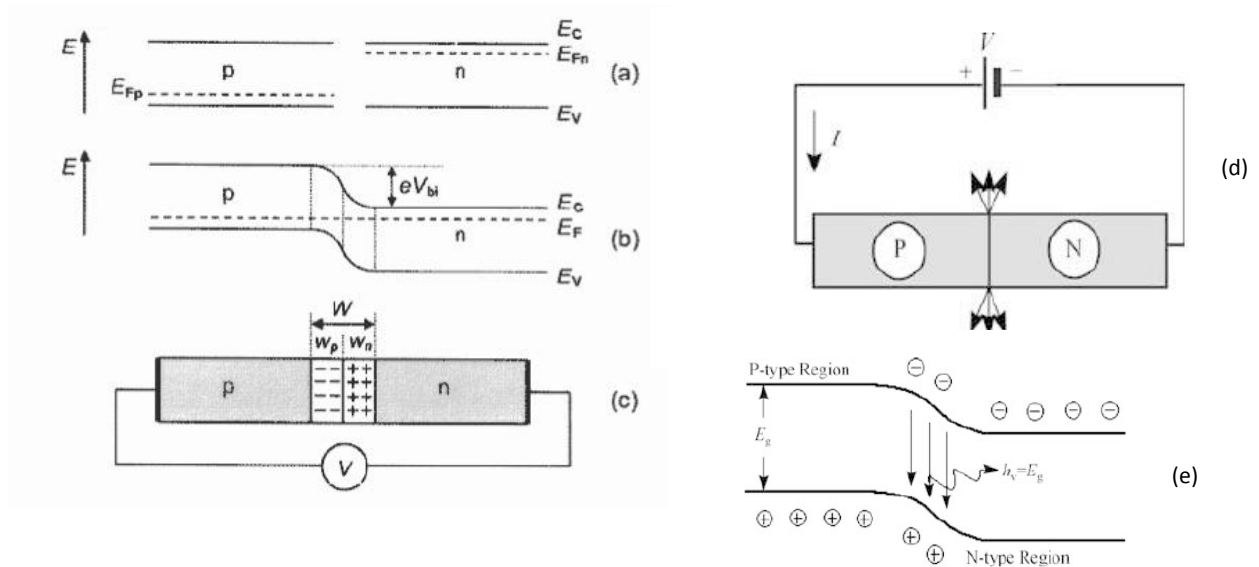
Há diferentes tipos de semicondutores, compostos de diferentes tipos de átomos com propriedades distintas que determinam a estrutura do cristal e propriedades potenciais de emissão de luz. Por exemplo, silício e carbono estão na quarta coluna da segunda e terceira linhas da tabela periódica, o que implica um determinado número de elétrons em seus orbitais (4 elétrons em seu orbital mais externo), de modo que o silício é um semicondutor do chamado grupo IV e carbeto de silício, que combina os dois elementos da quarta coluna, é denominado um composto semicondutor do grupo IV. (SANDERSON e SIMONS, 2014)

Particularmente importantes no desenvolvimento de LED são os semicondutores do grupo III-V, materiais como nitreto de gálio (GaN) que combina átomos da terceira e quinta colunas na Tabela Periódica de elementos. A emissão de luz desde a faixa de ultravioleta ao visível passando pelo infravermelho pode ser alcançada por diferentes combinações de átomos do grupo III e V. As propriedades elétricas dos semicondutores mudam radicalmente quando pequenas quantidades de outros átomos (adição intencional de “impureza”) são incorporadas, uma vez que a disponibilidade de portadores de carga, elétrons e lacunas, é alterada. Quando impurezas são adicionadas e contribuem com elétrons para banda de condução, são denominados doadores e formam um semicondutor tipo-N (excesso de carga negativa). Quando impurezas são adicionadas e contribuem com lacunas para banda de valência, os materiais são denominados aceptores e formam um semicondutor tipo-P. A adição destes componentes é chamada de dopagem, ou seja o semicondutor é dopado com átomos dopantes tipo-N ou tipo-P. (SANDERSON e SIMONS, 2014; YACOBI 2012).

LED é um diodo semicondutor de junção P-N. Duas camadas de semicondutor-P e N- juntos, criam um diodo, conforme mostrado na Figura 21 abaixo. Se as regiões tipo-N e tipo-P são feitas do mesmo material semicondutor, então a junção é chamada homojunção. Se os materiais são distintos, a junção é denominada heterojunção<sup>119</sup>.

<sup>119</sup> Para efeito de simplificação, a figura considera uma homojunção.





- Diagrama de banda de energia antes da formação da junção
- Diagrama de energia após a formação da junção (em equilíbrio termodinâmico)
- Junção P-N mostrando a região de depleção ( $W$ ). A tensão de equilíbrio é a diferença de energia dos dois semicondutores antes da equalização.
- Esquema da junção P-N polarizada e emissão de luz na junção em várias direções
- Detalhe da emissão de fóton pelo deslocamento de elétrons da banda de condução para banda de valência

Figura 55 – Ilustração esquemática junção p-n.

Fonte: LIU e LUO, 2011; YACOBI, 2002.

Quando a junção P-N é inicialmente criada, há difusão de elétrons da região tipo-N (com excesso de elétrons) para região tipo-P (com lacunas). Quando um elétron livre encontra uma lacuna, tanto a lacuna quanto o elétron se recombinam e desaparecem. Para cada lacuna e elétron que se recombinam, um íon dopante positivamente carregado é deixado na região tipo-N e um íon dopante negativamente carregado é deixado na região tipo-P. Quando este processo de recombinação se estende e mais íons são criados, um campo elétrico se desenvolve na zona de depleção (entre a junção p-n) e aumenta a tal ponto que age como uma barreira desacelerando e finalmente interrompendo a recombinação. Em equilíbrio termodinâmico (sem aplicação de polarização), o nível de energia entre a banda de valência na região tipo-P e a banda de condução na região tipo-N deve ser constante ao longo na junção, o que provoca a curvatura da banda de junção (ver Figura 55.b). Ou seja, agora, elétrons têm de vencer uma barreira para atravessar a região de depleção da região tipo-N para o lado tipo-P. O oposto é verdade para as lacunas. Então, portadores de carga necessitam da energia adicional para atravessar a região, presença de elétrons em excesso, e isto pode ser alcançado pela aplicação de uma voltagem (tensão) entre os dois polos do diodo de junção P-N. Dependendo da polaridade (direta ou reversa) isso pode ajudar a remover a barreira ou ao contrário, prejudicar e intensificar ainda mais a barreira.

Com a polarização direta, uma tensão<sup>120</sup> positiva é aplicada na região dopada tipo-P (corrente flui do tipo-P para tipo-N). Neste caso, os elétrons injetados na banda de condução caem para a banda de valência de menor energia, combinam com uma lacuna e liberam o excesso de energia, que é emitida como um fóton causando emissão de luz de forma randômica, em múltiplas direções, daí ser referida como luz incoerente. Este é o princípio da emissão de luz num LED. O comprimento de onda da luz emitida depende dos materiais que formam a junção P-N (LIU e LUO, 2011; YACOBI, 2002).

Vale ressaltar que as reflexões perdidas dentro das paredes internas geram calor (SCHUBERT, 2006). Por sua vez, a operação em maiores correntes, necessária para aumentar luminância também inevitavelmente gera maior quantidade de calor. Tem sido reportado que a eficácia luminosa degrada com o aumento de temperatura de junção. Portanto, a geração de calor pode afetar negativamente o desempenho do LED e até mesmo comprometer sua durabilidade e confiabilidade (HAN, N et al; 2011).

### B.1. Princípios da Produção de Cor e Processo de Fabricação

O LED, ao contrário de tecnologias tradicionais, emite luz monocromática, o que o torna extremamente eficiente em aplicações como semáforos de trânsito e sinalização em geral. Mas, para uso em iluminação em geral, luz branca é necessária, a qual pode ser produzida a partir de três princípios, conforme Figura 56 a seguir.

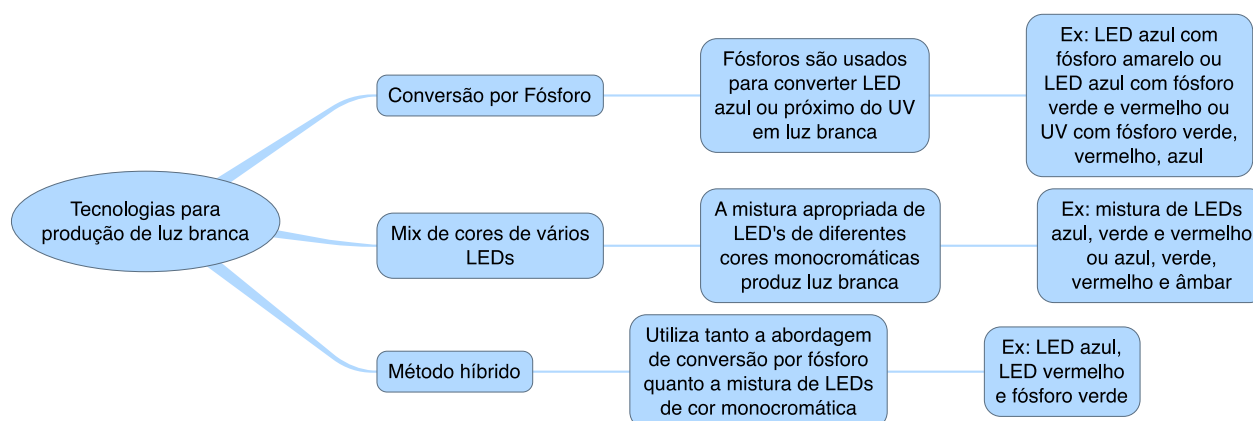


Figura 56 – Princípios de Produção de Luz Branca

Fonte: DOE<sup>121</sup>; CEA, 2010

Como o avanço tecnológico é muito intenso e acentuado, com constantes lançamentos de novas tecnologias, esta tendência tecnológica para produção de luz branca pode ter significativa alteração em curto prazo de tempo. Segundo DOE, em sua revisão de tecnologias do Programa de Luz de Estado Sólido, de Maio de 2014 a tecnologia híbrida tem o melhor potencial de aumento de eficácia no curto prazo (DOE, 2014 – 3). A conversão com fósforo, que é a mais usual e eficiente de acordo com BESSHO e SHIMIZU (2012), pode equiparar a híbrida, contanto que hajam avanços na conversão com fósforo. Já a abordagem de mistura de cores monocromáticas dependerá de melhorias especialmente no LED amarelo/ âmbar e verde (DOE, 2014 – 3).

<sup>120</sup> Vale ressaltar que a corrente aumenta exponencialmente com aplicação de tensão, sendo um parâmetro crítico no funcionamento do LED.

<sup>121</sup> DOE – US Department of Energy. LED Basics. Disponível em <http://energy.gov/eere/ssl/led-basics> Acesso em 02 de Janeiro de 2015.

Para construir os diodos emissores de luz, é necessário um substrato sobre o qual as camadas de semicondutor tipo-P e tipo-N possam ser depositadas. Diversos minérios podem ser utilizados como silício ou mesmo diamante. Atualmente, a maioria utiliza a safira, que é a base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A Tabela abaixo ilustra alguns outros materiais da junção P-N, substratos e efeitos na produção de luz.

Tabela 41 – Materiais Utilizados na Fabricação do LED

Camada Emissor de Luz	Substrato	Método de Produção	Cor da Luz
GaP:ZnO	GaP	LPE <sup>122</sup> (epitaxia em fase líquida)	Infravermelho, vermelho
AlGaAs	GaAs/AlGaAs	VPE <sup>123</sup> (epitaxia em fase vapor)	
GaAsP			
GaP:N	GaP		
AlGaP	GaP		Âmbar, laranja, amarelo
GaN	Safira		
InGaN	Safira/SiC	MOCVD (deposição química de organometálicos em fase vapor)	Verde, verde esmeralda
ZnSe	ZnSe	MOCVD (MOVPE)	Verde azulado, azul, próximo a UV
SiC	SiC	MBE <sup>124</sup> (epitaxia por feixe molecular)	
AlGaN	Safira/SiC	HVPE <sup>125</sup> (epitaxia em fase vapor com hidretos)	
AlN	Safira		

Fonte: LIU e LUO, 2011

O processo de deposição sucessiva de elementos químicos que cria camadas sobrepostas com diferentes elementos químicos inseridos na estrutura cristalina é chamado de crescimento epitaxial e é crítico pois o mau alinhamento pode causar tensão e defeitos na estrutura cristalina do semicondutor e inibir desejadas propriedades eletrônicas e ópticas. Dentre os diversos meios para produzir o crescimento epitaxial, uma abordagem de produção em massa é a de circundar o substrato com um gás quente (vapor), cujas moléculas contêm átomos que serão depositados numa camada tipo-n ou tipo-p. Esta abordagem é denominada epitaxia em fase de vapor (VPE – *Vapor Phase Epitaxy*) ou deposição química em fase vapor (CVD – *Chemical Vapor Deposition*). Quando os vapores contêm elementos químicos especiais do grupo III, o processo é chamado deposição química de organometálicos em fase vapor (MOCVD - do inglês *Metal Organic Chemical Vapor Deposition*). Complexas máquinas de fabricação que contêm o substrato e controlam o fluxo de vapor sobre ele são denominados reatores de MOCVD. Muitas pesquisas buscam substituir os materiais inorgânicos dos grupos III-V de LED com complexos produtos químicos orgânicos condutores elétricos. São as folhas de LEDs orgânicos (OLEDs) que poderão, no futuro, ser impressas de forma contínua nos processos de fabricação a rolo a um custo relativamente baixo (SANDERSON e SIMONS, 2014; STASIAK, 2013).

Recentemente, foi demonstrado que a incorporação de óxido de grafeno em um LED de nitreto de gálio (GaN) reduz sobremaneira os problemas de auto-aquecimento, em virtude da sua capacidade de dissipar calor e reduzir a resistência térmica. O

<sup>122</sup> Do inglês “*liquid phase epitaxy*”.

<sup>123</sup> Do inglês “*vapor phase epitaxy*”.

<sup>124</sup> Do inglês “*molecular beam epitaxy*”.

<sup>125</sup> Do inglês “*hydrid vapor epitaxy*”.

processo de fabricação envolve a geração escalonável de padrões em microescala de óxido de grafeno sobre um substrato de safira, seguido pela sua redução térmica e crescimento lateral epitaxial de nitreto de gálio através de deposição química de organometálicos em fase vapor, tudo isso, num processo em uma única etapa (HAN, N et al; 2011). O resultado é que estes dispositivos oferecem maior luminosidade (podem operar em maiores correntes), sem comprometer limite de temperatura de junção e tem expectativa de ter desempenho cerca de 10% superior que os LED's convencionais, devendo já estar em escala comercial até o final de 2015 (BASULTO, 2015).



Figura 57 – Safira monocristalina.  
Fonte: STASIAK, 2013



Figura 58 – Reator de MOCV.  
Fonte: Veeco Instruments, Inc *apud* DOE, 2014.

#### Quadro 4 – Descrição simplificada do processo de fabricação

A figura 57 mostra o tarugo de Safira mono-cristalino ao fundo e lingotes cilíndricos de onde são fatiados os wafers. Uma vez cortadas, as lâminas (wafers) são levadas para as câmaras de MOCVD (figura 58), onde passam pelas deposições das camadas de semicondutores. Essas lâminas recebem ainda a deposição de uma fina camada metálica, que conduzirá a corrente elétrica para fora do cristal aos terminais metálicos do dispositivo. Os wafers saem das câmaras de plasma e são cortados mecanicamente em minúsculos pedaços por processos automatizados e braços robóticos de grande precisão para formar os chips de LED individuais. Depois é feito o empacotamento onde são soldados sobre um terminal metálico, feitas as conexões a um segundo terminal usando finíssimos filamentos de ouro e, em seguida, feita deposição de material fosfórico no caso de conversão de emissão de luz azul em branca. O processo de fabricação se completa no encapsulamento dessa peça com os elementos ópticos que formarão a lente por onde se irradia a luz (resina epoxi, silicone, vidro etc) e montagem final da lâmpada ou luminária. Esta etapa também requer integração com um reator, dissipador de calor, componentes óticos e estrutura mecânica geral. A cadeia produtiva é ilustrada na figura 60 a seguir.

Fonte: Adaptado a partir de STASIAK, 2013.

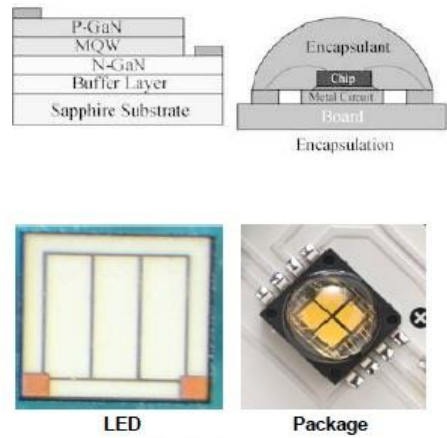


Figura 59 – Chip de LED e pacote (desenho esquemático e produto final).  
 Fonte: LIU, 2011 (desenho esquemático); DOE, 2012a (produto final)

O processo completo de fabricação, envolvendo toda a cadeia produtiva é mostrado na Figura 55 abaixo compreendendo diferentes áreas de conhecimento: eletrônica, elétrica, óptica, ciência térmica, ciência dos materiais, tecnologia de processos e tecnologia de equipamentos.

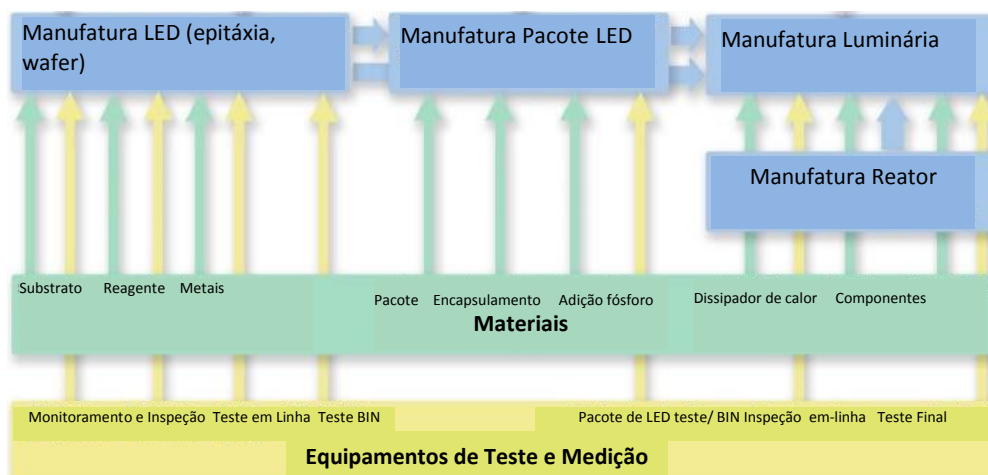


Figura 60 – Cadeia Produtiva de LED.  
 Fonte: DOE, 2015a



## PROJECT OPERATING CASHFLOWS

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313562/CA

Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>O&amp;M Savings</b>												
Maintenance Costs	\$497,132	\$1,014,150	\$1,551,649	\$2,110,243	\$2,690,559	\$2,744,371	\$2,799,258	\$2,855,243	\$2,912,348	\$2,970,595	\$3,030,007	\$3,090,607
Electricity	\$1,155,939	\$2,404,352	\$3,750,790	\$5,201,095	\$6,761,423	\$7,031,880	\$7,313,156	\$7,605,682	\$7,909,909	\$8,226,305	\$8,555,358	\$8,897,572
<b>Total Savings Cashflow</b>	<b>\$1,653,071</b>	<b>\$3,418,502</b>	<b>\$5,302,439</b>	<b>\$7,311,338</b>	<b>\$9,451,983</b>	<b>\$9,776,251</b>	<b>\$10,112,414</b>	<b>\$10,460,925</b>	<b>\$10,822,257</b>	<b>\$11,196,900</b>	<b>\$11,585,365</b>	<b>\$11,988,179</b>
<b>Lebates</b>	<b>\$2,643,975</b>	<b>\$2,643,975</b>	<b>\$2,643,975</b>	<b>\$2,643,975</b>	<b>\$2,643,975</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>
<b>Cash Available For Debt or Equity:</b>	<b>\$1,653,071</b>	<b>\$3,418,502</b>	<b>\$5,302,439</b>	<b>\$7,311,338</b>	<b>\$9,451,983</b>	<b>\$9,776,251</b>	<b>\$10,112,414</b>	<b>\$10,460,925</b>	<b>\$10,822,257</b>	<b>\$11,196,900</b>	<b>\$11,585,365</b>	<b>\$11,988,179</b>
<b>Debt Service Payments</b>												
Interest Payment	(\$418,195)	\$(367,221)	\$(313,572)	\$(257,106)	\$(197,676)	\$(135,125)	\$(69,291)	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Principal Payment	\$(970,919)	\$(1,021,892)	\$(1,075,542)	\$(1,132,008)	\$(1,191,438)	\$(1,253,989)	\$(1,319,823)	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-
Principal Remaining	\$6,994,692	\$5,972,799	\$4,897,257	\$3,765,250	\$2,573,812	\$1,319,823	\$(0)	\$(0)	\$(0)	\$(0)	\$(0)	\$(0)
<b>Loan 1 Total Payments</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>
Interest Payment	\$-	\$(418,195)	\$(367,221)	\$(313,572)	\$(257,106)	\$(197,676)	\$(135,125)	\$(69,291)	\$0	\$0	\$0	\$0
Principal Payment	\$-	\$(970,919)	\$(1,021,892)	\$(1,075,542)	\$(1,132,008)	\$(1,191,438)	\$(1,253,989)	\$(1,319,823)	\$-	\$-	\$-	\$-
Principal Remaining	\$-	\$6,994,692	\$5,972,799	\$4,897,257	\$3,765,250	\$2,573,812	\$1,319,823	\$(0)	\$(0)	\$(0)	\$(0)	\$(0)
<b>Loan 2 Total Payments</b>	<b>\$-</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>
Interest Payment	\$-	\$-	\$(418,195)	\$(367,221)	\$(313,572)	\$(257,106)	\$(197,676)	\$(135,125)	\$(69,291)	\$0	\$0	\$0
Principal Payment	\$-	\$-	\$(970,919)	\$(1,021,892)	\$(1,075,542)	\$(1,132,008)	\$(1,191,438)	\$(1,253,989)	\$(1,319,823)	\$-	\$-	\$-
Principal Remaining	\$-	\$-	\$6,994,692	\$5,972,799	\$4,897,257	\$3,765,250	\$2,573,812	\$1,319,823	\$(0)	\$(0)	\$(0)	\$(0)
<b>Loan 3 Total Payments</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>
Interest Payment	\$-	\$-	\$-	\$(418,195)	\$(367,221)	\$(313,572)	\$(257,106)	\$(197,676)	\$(135,125)	\$(69,291)	\$0	\$0
Principal Payment	\$-	\$-	\$-	\$(970,919)	\$(1,021,892)	\$(1,075,542)	\$(1,132,008)	\$(1,191,438)	\$(1,253,989)	\$(1,319,823)	\$-	\$-
Principal Remaining	\$-	\$-	\$-	\$6,994,692	\$5,972,799	\$4,897,257	\$3,765,250	\$2,573,812	\$1,319,823	\$(0)	\$(0)	\$(0)
<b>Loan 4 Total Payments</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$0</b>	<b>\$0</b>
Interest Payment	\$-	\$-	\$-	\$-	\$(418,195)	\$(367,221)	\$(313,572)	\$(257,106)	\$(197,676)	\$(135,125)	\$(69,291)	\$0
Principal Payment	\$-	\$-	\$-	\$-	\$(970,919)	\$(1,021,892)	\$(1,075,542)	\$(1,132,008)	\$(1,191,438)	\$(1,253,989)	\$(1,319,823)	\$-
Principal Remaining	\$-	\$-	\$-	\$-	\$6,994,692	\$5,972,799	\$4,897,257	\$3,765,250	\$2,573,812	\$1,319,823	\$(0)	\$(0)
<b>Loan 5 Total Payments</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$-</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$0</b>
Interest Payment	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-
Principal Payment	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-
Principal Remaining	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-
<b>Total Debt Payments</b>	<b>(1,389,114)</b>	<b>(2,778,277)</b>	<b>(4,167,341)</b>	<b>(5,556,455)</b>	<b>\$(6,945,569)</b>	<b>\$(6,945,569)</b>	<b>\$(6,945,569)</b>	<b>\$(5,556,455)</b>	<b>\$(4,167,341)</b>	<b>\$(2,778,227)</b>	<b>\$(1,389,114)</b>	<b>\$0</b>
<b>Debt Service Coverage Ratio:</b>	<b>1.19</b>	<b>1.23</b>	<b>1.27</b>	<b>1.32</b>	<b>1.36</b>	<b>1.41</b>	<b>1.46</b>	<b>1.88</b>	<b>2.60</b>	<b>4.03</b>	<b>8.34</b>	<b>N/A</b>
<b>Residual Flows to Equity After Debt Service</b>												
	\$263,957	\$640,275	\$1,135,098	\$1,754,883	\$2,506,414	\$2,830,682	\$3,166,845	\$4,904,470	\$6,654,916	\$8,418,673	\$10,196,251	\$11,988,179

## CASHFLOW SUMMARIES

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313562/CA

Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
<b><u>Project Cash Flows (includes rebates)</u></b>													
Unlevered Project Cash Flow	\$(10,850,754)	\$(6,816,861)	\$(3,055,890)	\$505,020	\$3,927,764	\$9,776,251	\$10,112,414	\$10,460,925	\$10,822,257	\$11,196,900	\$11,585,365	\$11,988,179	\$12,382,000
Levered Project Cash Flow	\$(6,918,232)	\$(4,273,453)	\$(1,901,596)	\$270,200	\$2,303,831	\$2,830,682	\$3,166,845	\$4,904,470	\$6,654,916	\$8,418,673	\$10,196,251	\$11,988,179	\$12,382,000
<b><u>Simple" Cash Flows (does not include rebates)</u></b>													
Simple Flow	\$(13,494,729)	\$(9,460,836)	\$(5,699,865)	\$(2,138,955)	\$1,283,789	\$9,776,251	\$10,112,414	\$10,460,925	\$10,822,257	\$11,196,900	\$11,585,365	\$11,988,179	\$12,382,000
<b><u>Savings Cash Flows (does not include installation costs or rebates)</u></b>													
Savings Flows	\$1,653,071	\$3,418,502	\$5,302,439	\$7,311,338	\$9,451,983	\$9,776,251	\$10,112,414	\$10,460,925	\$10,822,257	\$11,196,900	\$11,585,365	\$11,988,179	\$12,382,000
Savings Flows to Equity after Debt Service	\$263,957	\$640,275	\$1,135,098	\$1,754,883	\$2,506,414	\$2,830,682	\$3,166,845	\$4,904,470	\$6,654,916	\$8,418,673	\$10,196,251	\$11,988,179	\$12,382,000



## D. Resultado Simulações - Ótica das Concessionárias

É apresentada saída do modelo sob a ótica das concessionárias, ilustrando o cálculo de RCB na Região Norte.

### Avaliação REGIÃO NORTE

#### Custo de Equipamentos

Item	Equipamento	Custo (R\$)	Quantidade	Custo Equipamento - CE (R\$)	Vida útil (anos)	Fator de Recup Capital (PMT) x CE	Custo anualizado com indiretos (R\$)
1	lâmpadas LED	1.900	882.623	1.676.807.175	20	\$170.786.515	\$188.252.608
2	relé	30	882.623	26.478.690	3	\$10.274.619	\$11.325.390

**Custo Total de Equipamentos (CEt) 1.703.285.865**

**CAt 199.577.998**

#### Serviços e demais custos indiretos

Item	Descrição	Custo (R\$)	Quantidade	Custo total de serviço
3	transporte e outros indiretos	93.873.924	1	93.873.924
4	mão-de-obra	91	882.623	80.318.693

**Custo total de serviços 174.192.617**

**Custo Total do projeto 1.877.478.482,53**

5	Energia economizada (MWh/ano)	CEE (R\$/MWh)	Benefício energia R\$/ano	Energia economizada/ponto (MWh/ano/ponto)
	324.346	245,60	79.659.314	
6	Demanda reduzida na ponta (kWh.ano)	CDE (R\$/kW.ano)	Benefício de demanda R\$/ano	
	74.052	702,60	52.028.471	

**7 Benefício Total 131.687.785**

**8 RCB - distribuidora 1,52**

## E. Resultado Simulações – Ótica dos Municípios

É apresentada ilustração da saída do modelo para simulação sob a ótica dos municípios para a região Norte, indicando resultados de VPL, TIR, TR e economias.

Premissa: Preço base do LED com redução de 35%, redução de custos de manutenção em 54% e instalação coincidente com depreciação de lâmpadas.

VALOR PRESENTE LÍQUIDO - 12 anos		
257.615.448	1.147.888	(149.637.394)

TEMPO DE RETORNO (Anos)		
<b>Tempo de retorno (anos,VPL)</b>		
Com todas economias de O&M	Sem economias de mão-de-obra	Apenas com economia de energia
9	12	17

TIR (%) - 12 anos		
<b>12 anos (%)</b>		
Com todas economias de O&M	Sem economias de mão-de-obra	Apenas com economia de energia
8,1%	0,0%	-5,0%

ENERGIA E MEIO AMBIENTE		
<b>Economia de Energia (GWh/ano)</b>	<b>Redução CO2 (tCO2eq/ano)</b>	<b>Custo do abatimento (VPL 12anos/ CO2eq evitado)</b>
304	37.804	-R\$681,46

INVESTIMENTO (R\$)		
<b>Equipamento (VP)</b>	<b>Instalação (Mão-de-obra + Veículo, VP)</b>	<b>Total</b>
673.245.100	120.332.946	793.578.046

ECONOMIAS		
<b>Energia (R\$)</b>	<b>O&amp;M (excluindo energia)</b>	<b>Total</b>
69.766.897	44.123.270	113.890.167

<b>% EE</b>	<b>% Economia de Manutenção</b>
52%	54%