

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



**Em busca da eficiência energética:
Perspectivas do LED na iluminação do Brasil**

Gustavo Cellet Marques

Trabalho de Graduação

2015

Civil

GUSTAVO CELLET MARQUES

**EM BUSCA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA:
PERSPECTIVAS DO LED NA ILUMINAÇÃO DO BRASIL**

Orientador
Prof. Dr Alessandro Vinícius Marques de Oliveira

Divisão de Engenharia Civil

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Marques, Gustavo Cellet

Em busca da eficiência energética: Perspectivas do LED na iluminação do Brasil/Gustavo Cellet Marques.

São José dos Campos, 2015.

70f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2015. Orientador: Prof. Dr Alessandro Vinícius Marques de Oliveira.

1. Econometria; 2. Difusão de Tecnologia; 3. Iluminação; 4. Inovação; 5. Sustentabilidade; I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARQUES, Gustavo Cellet; **Em busca da eficiência energética: Perspectivas do LED na iluminação do Brasil**. 2015. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gustavo Cellet Marques

TÍTULO DO TRABALHO: Em busca da eficiência energética: Perspectivas do LED na iluminação do Brasil

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação/2015

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Gustavo Cellet Marques

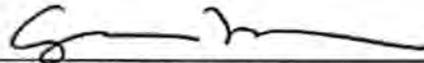
Pça Mal-do-Ar Eduardo Gomes, 50 – VI. Acácias

12228-900 – São José dos Campos – SP

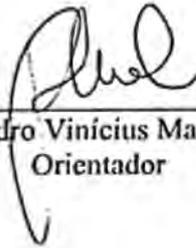
EM BUSCA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA:

PERSPECTIVAS DO LED NA ILUMINAÇÃO DO BRASIL

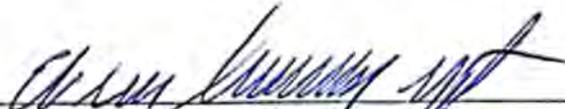
Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Gustavo Cellet Marques
Autor



Prof. Dr. Alessandro Vinicius Marques de Oliveira
Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto
Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 23 de novembro de 2015

Dedico esse trabalho à minha mãe, Lúcia, e minha madrinha, Rosana,
que sempre me incentivaram a estudar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em especial, os ensinamentos: da minha mãe, sobre o que é determinação; do meu pai, sobre valorizar minhas origens; da minha madrinha, sobre fazer sempre o bem; do meu irmão, sobre o que é amizade; da minha avó, sobre sempre sorrir. Aos meus 18 tios e mais de 40 primos, pelo incentivo. À minha namorada, pelos sorrisos, apoio, amor e carinho. À minha segunda família, os amigos do ITA, pelas histórias e pelos anos incríveis que compartilhamos. Sem vocês, não teria graça. Em particular, amigos do 113, da Turma 14 e da Civil 15. Aos meus queridos alunos do CASDVest e Casdinho, pelos ensinamentos valiosos que não aprenderia em nenhuma aula da faculdade. Aos amigos do intercâmbio, pelo ano inesquecível e pelas amizades que superam a distância. Aos professores do Colégio Montessori Santa Terezinha, Colégio ETAPA, ITA, UC Berkeley e MIT, pela inspiração e pelos incentivos. Muito obrigado!

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação,
não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz.”

(Ayrton Senna)

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo comparar as diferentes tecnologias de iluminação existentes, projetar um cenário para a adoção do LED (Diodo Emissor de Luz) no Brasil e calcular os ganhos associados até 2030. Para isso, foi construído um modelo econométrico Logit, que leva em consideração melhorias na eficiência e no preço, em conjunto com uma curva de difusão de Bass, para prever a penetração dessa tecnologia. Em 2030, é esperado que o LED domine as vendas, representando 87% do mercado. O consumo energético projetado foi contrastado com o do cenário hipotético onde o LED nunca existiu, resultando em uma redução de 48% do consumo com iluminação nesse ano. No acumulado, a economia chega a 431 TWh, equivalente três vezes o consumo energético do estado de São Paulo em 2014, a cinco vezes a geração média anual da usina hidrelétrica de Itaipu, representando uma redução de custo final dessa energia para o consumidor equivalente a R\$ 29 Bilhões.

Palavras chave: Econometria, Difusão de Tecnologia, Iluminação, Inovação, Sustentabilidade.

ABSTRACT

The aim of this study is to compare different lighting technologies, to provide a comprehensive overview of the expected path of LED (Light Emitting Diode) adoption within Brazil and to estimate the energy savings offered out to year 2030. In order to do that, an econometric Logit model, which takes into account improvements in efficiency and price, was used in concert with a Bass diffusion curve to predict market penetration of this technology. At the end of the analysis period, LEDs are anticipated to dominate lighting sales, comprising 87% of the market. The projected energy consumption was contrasted with a counter-factual scenario where LEDs never existed, resulting in 48% reduction in energy consumption within the lighting segment this year. The cumulative savings amount to 431 TWh of electricity over the entire analysis, which is nearly three times the energy consumption of the state of São Paulo in 2014, five times Itaipu's (second largest power station in the world) average annual generation, this equates to cost savings of nearly R\$ 29 billion.

Keywords: Econometrics, Technology Diffusion, Lighting, Innovation, Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: População Residente (Milhões) no Brasil. IBGE.	15
Figura 1-2: Quantidade de domicílios (Milhões) e Habitantes por domicílio. IBGE	15
Figura 1-3: Domicílios com Iluminação (Milhões) e Penetração da Iluminação. IBGE.	16
Figura 1-4: IDH e Renda domiciliar per capita média. PNUD/IBGE.	16
Figura 1-5: Composição de Classes Econômicas. Crescimento projetado de 2010 a 2014. FGV/PNAD/IBGE.	17
Figura 1-6: Vendas Nominais – Varejo – Materiais de construção (2003 = 100). IBGE/PMC	17
Figura 1-7: Consumo de Energia Elétrica (TWh) por Setor e Consumo per capita (kWh). MME e IBGE.....	18
Figura 1-8: Banimento de Lâmpadas incandescentes pelo mundo. McKinsey, 2012	19
Figura 1-9: Eficiência energética, programas de etiquetagem.....	19
Figura 1-10: Políticas de eficiência energética no Brasil.	20
Figura 2-1: Espectro visível convencional.	22
Figura 2-2: Iluminância, Fluxo Luminoso, Intensidade Luminosa e Curva de distribuição da luz.	23
Figura 2-3: Temperatura de cor.....	24
Figura 2-4: Índice de reprodução de cores. EMPALUX.	25
Figura 2-5: Triângulo retângulo que representa a relação entre as potências aparente, ativa e reativa.	25
Figura 2-6: Breve história de Iluminação.	27
Figura 2-7: Comparação das tecnologias Incandescente, Fluorescente e LED (Autor).	28
Figura 2-8: Lâmpada incandescente. Adaptado de: openclipart.com/wikipedia.com/inhabitat.com	29
Figura 2-9: Lâmpada fluorescente. Adaptado de Panasonic.com/redicitylar.com.br/laureanojg.blogspot.com	29
Figura 2-10: Lâmpada LED. Adaptado de: light.aitherslight.com/ambienteenergia.com.br	31
Figura 2-11: Benefícios da iluminação LED. Fonte: Avant.	33
Figura 2-12: Benefícios da iluminação LED. Fonte: FLC Lâmpadas.	34
Figura 2-13: Benefícios da iluminação LED. Fonte: FLC Lâmpadas.	34
Figura 3-1: Função Logit.....	37
Figura 3-2: Difusão da Inovação – Teoria de Rogers.....	38
Figura 3-3: Difusão da Inovação – Teoria de Rogers.....	38
Figura 3-4: Adoção acumulada. Modelo de Bass.....	39
Figura 4-1: Metodologia Bottom-Up para composição anual da base instalada.....	42
Figura 4-2: Metodologia para estimativa das modificações anuais na base instalada (Autor).	43
Figura 4-3: Composição estimada da base instalada (Milhões de lâmpadas) nos últimos 15 anos (Autor).	43
Figura 4-4: Mix de tecnologias na base instalada – excluindo outras tecnologias (Autor).	44
Figura 4-5: Consumo de energia elétrica nos segmentos Residencial, Industrial e Comercial (Autor/EPE/Procel). .	44

Figura 4-6: Evolução da eficiência média das lâmpadas de LED (lm/W) – projeções (Autor).....	45
Figura 4-7: Evolução da eficiência média das lâmpadas de LED (Horas) – projeções (Autor).	46
Figura 4-8: Evolução do preço médio das lâmpadas de LED no Brasil (R\$) – Histórico. Fonte: FLC Lâmpadas.	47
Figura 4-9: Evolução do preço médio das lâmpadas de LED (R\$) – projeções (Autor).	47
Figura 4-10: Penetração de diversas tecnologias (%) – Anos desde o lançamento.	49
Figura 4-11: Market Share de LED (em volume). Resultado da regressão logit e do Modelo de Bass (Autor).....	50
Figura 4-12: Premissas de crescimento da base instalada (Autor).	50
Figura 4-13: Mix de tecnologias na base instalada (Autor).....	51
Figura 4-14: Crescimento da base instalada (Milhões de lâmpadas) nos próximos 15 anos (Autor).	51
Figura 4-15: Metodologia Bottom-Up para determinar o consumo de energia nos próximos anos (Autor).....	52
Figura 4-16: Consumo energético (TWh) com iluminação projetado (Autor).	52
Figura 5-1: Consumo energético (TWh) com iluminação projetado (Autor).	53
Figura 5-2: Base instalada nacional (Milhões de lâmpadas) e eficiência média (Autor).....	54
Figura 5-3: Fluorescente vs LED – Comparação do coeficiente de utilização devido ao direcionamento da Luz.	56
Figura 5-4: Análise de sensibilidade – Economia Potencial (TWh) e Taxa de Renovação das lâmpadas (Autor).....	57
Figura 5-5: Análise de sensibilidade – Economia Potencial (TWh) e Erosão média anual do preço.....	58
Figura 5-6: Análise de sensibilidade – Economia Potencial (TWh) e Ganho de Eficiência médio anual	59
Figura 5-7: Modelos de difusão – Comparação modelo de Bass e resultado da regressão	60
Figura 6-1: Eficiência energética, o último recurso.....	63
Figura 6-2: Benefícios proporcionados pela adoção do LED (Autor).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Aumento da eficiência do LED - benchmark com outros estudos internacionais.	46
Tabela 4-2: Redução do preço do LED - benchmark com outros estudos internacionais.....	47
Tabela 4-3: Curva de Bass. Coeficiente de inovação (p) e imitação (q).....	48
Tabela 5-1: Resultados – Economia de energia (Autor).....	54
Tabela 5-2: Modelo de previsão – Comparação do Market Share LED	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
2	ILUMINAÇÃO E TECNOLOGIA	22
2.1	Conceitos de iluminação	22
2.2	Comparação das tecnologias	27
2.3	Vantagens e desvantagens do LED	31
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
3.1	Modelo Logit	36
3.2	Roger's Theory	37
3.3	Modelo de Bass	39
4	METODOLOGIA	41
4.1	Composição da base instalada nacional	41
4.2	Modificações na base instalada	42
4.3	Projeção das melhorias na tecnologia LED	45
4.4	Modelagem do Market share para a tecnologia LED	48
4.5	Cálculo da economia de energia	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1	Resultados das projeções	53
5.2	Discussão e Limitações	56
6	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O Brasil passou, nos últimos 50 anos, por transformações relevantes – a população cresceu, se concentrou em centros urbanos (Figura 1-1) e aumentou seu padrão de vida (Figura 1-4 e Figura 1-5). Nas décadas seguintes, espera-se que a demanda por recursos continue a crescer precipitadamente ainda que as restrições na oferta se multipliquem, estabelecendo desafios para o crescimento econômico, meio-ambiente e o bem-estar social (MCKINSEY – Sustainability & Resource Productivity, 2012).

A crise energética atual é um dos indícios desse fenômeno. A nova classe de consumidores que agora ocupa os grandes centros consome diretamente (iluminação e eletrodomésticos) e indiretamente (produtos e serviços) muito mais energia (Figura 1-7). Ao mesmo tempo, a oferta energética já apresenta limitações relevantes. No início do ano, o volume d'água disponível nos reservatórios estava extremamente baixo e as usinas térmicas operavam em plena carga. O suprimento de energia elétrica apresenta, portanto, pouca flexibilidade e total dependência do regime hidrológico (VALOR ECONÔMICO – Eficiência Energética, o nosso último recurso, 2015).

Para reduzir o risco de racionamento e não comprometer o desenvolvimento é, portanto, fundamental que tecnologias modernas e eficientes sejam priorizadas. A iluminação, que contribui com cerca de 15% do consumo de energia elétrica (ABILUX, 2015), e é realizada majoritariamente com tecnologia antiga e de alto consumo, é apontada como uma das alavancas para redução da demanda. A penetração de tecnologia LED, mais econômica e com tempo de vida bem mais longo, pode significar ganhos econômicos e ambientais relevantes – nos EUA, por exemplo, estima-se uma redução de até 40% no consumo de energia elétrica até 2030 (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

O objetivo deste trabalho é comparar as diferentes tecnologias existentes (incandescente, fluorescente e LED), projetar através de um modelo econométrico diferentes cenários para a adoção do LED no Brasil (segmentos residencial, comercial e industrial) e calcular os ganhos até 2030.

1.1.1 Contexto econômico e demográfico

1.1.1.1 População, Domicílios e Renda

Desde 1970, a população residente mais do que dobrou – impulsionada pelo aumento da expectativa de vida – crescendo em média 2% ao ano (Figura 1-1). Além disso, observou-se o processo de urbanização – em 1970, cerca de 50 Milhões de brasileiros vivem no meio urbano, em 2014 esse número cresceu para cerca de 170 Milhões.

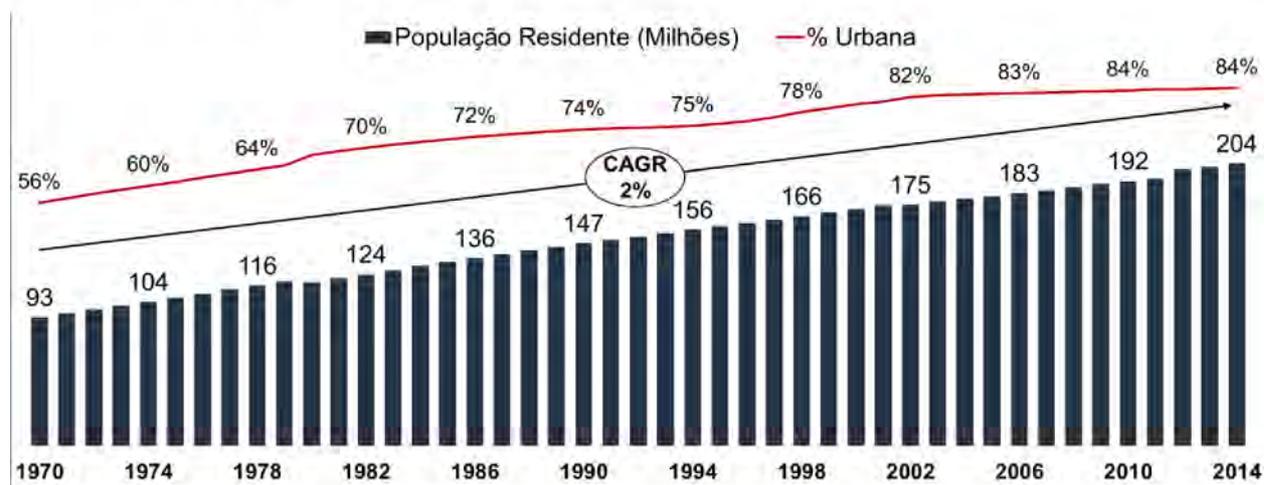


Figura 1-1: População Residente (Milhões) no Brasil. IBGE.

O número de domicílios praticamente quadruplicou – relacionado com a urbanização e a queda da taxa de fecundidade – crescendo em média 3% ao ano no período (Figura 1-2). O número de habitantes por domicílio caiu de 5,3 para 3,1.

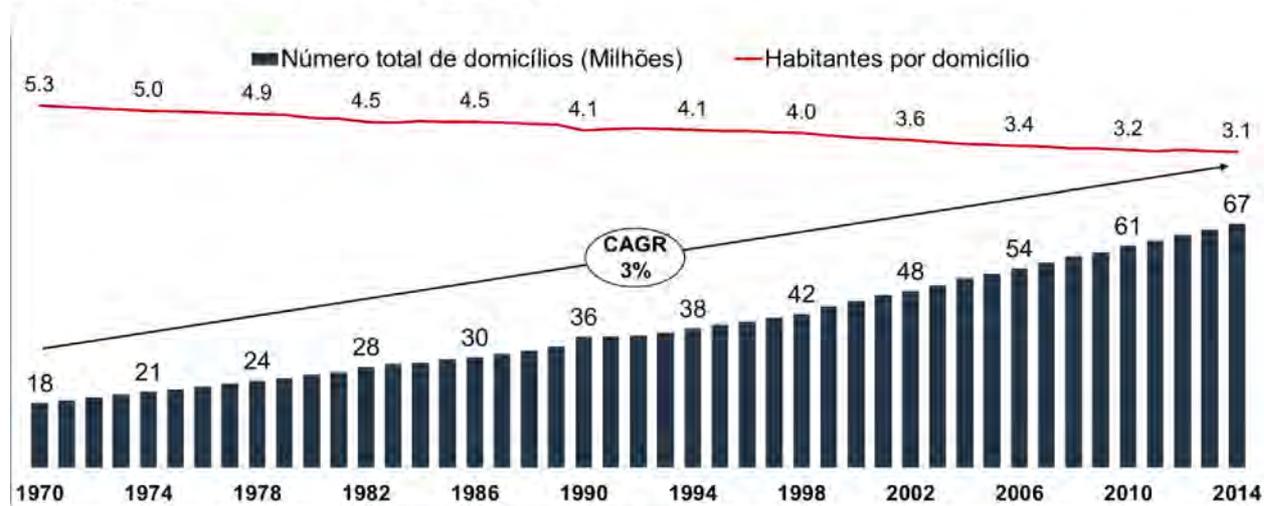


Figura 1-2: Quantidade de domicílios (Milhões) e Habitantes por domicílio. IBGE

À medida que a população migrou para centros urbanos e a cobertura de energia elétrica nas áreas rurais aumentou (através de programas como Luz Para Todos) a penetração da iluminação nos domicílios cresceu de 48% em 1970 para 99% em 2014. Como resultado, a quantidade de domicílios iluminados cresceu praticamente oito vezes – média de 5% ao ano no período (Figura 1-3).

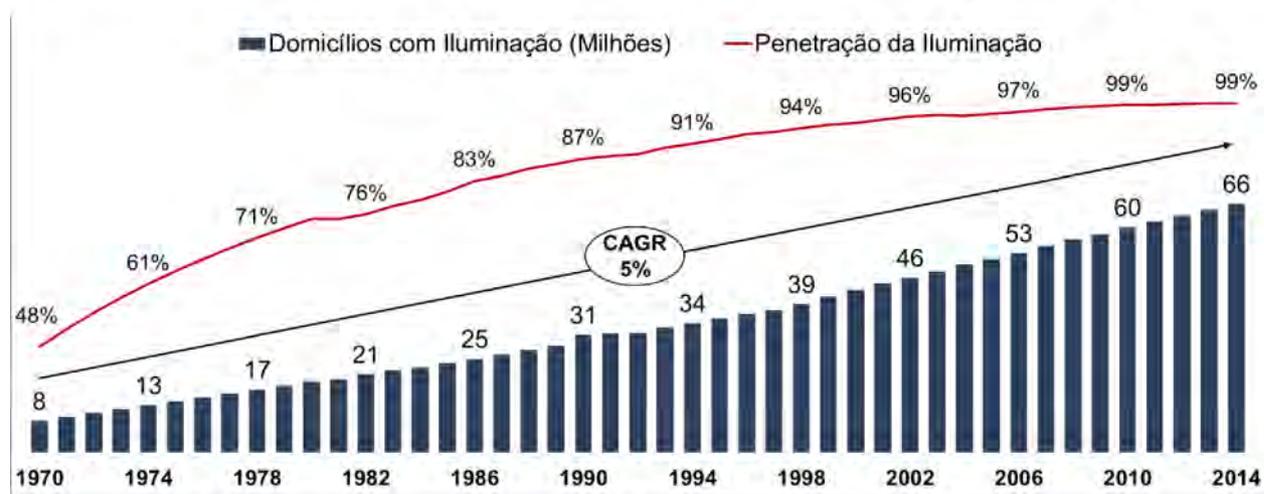


Figura 1-3: Domicílios com Iluminação (Milhões) e Penetração da Iluminação. IBGE.

O índice de desenvolvimento (IDH) melhorou sobremaneira – 0,545 em 1980 para 0,744 em 2014, uma vez indicadores de educação, renda e longevidade também evoluíram no período. A renda per capita média, por exemplo, cresceu de R\$ 574 em 1980 para R\$1.408 em 2014 (Figura 1-4).

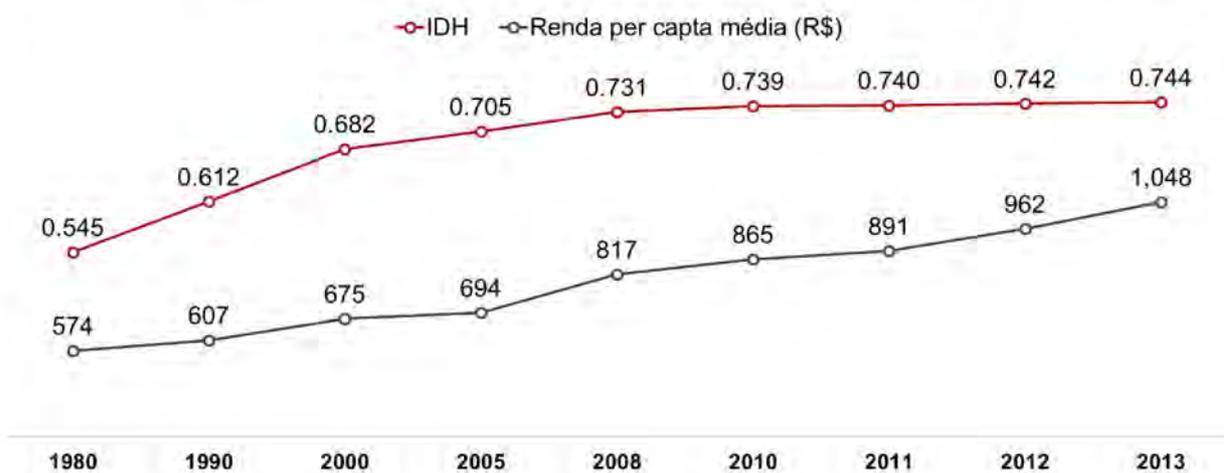


Figura 1-4: IDH e Renda domiciliar per capita média. PNUD/IBGE.

Na última década notou-se uma transformação relevante na composição de classes econômicas – a chamada ascensão da nova classe média. A classe C, que representava 38% da população em 2003, representa cerca de 60% em 2014 (Figura 1-5).

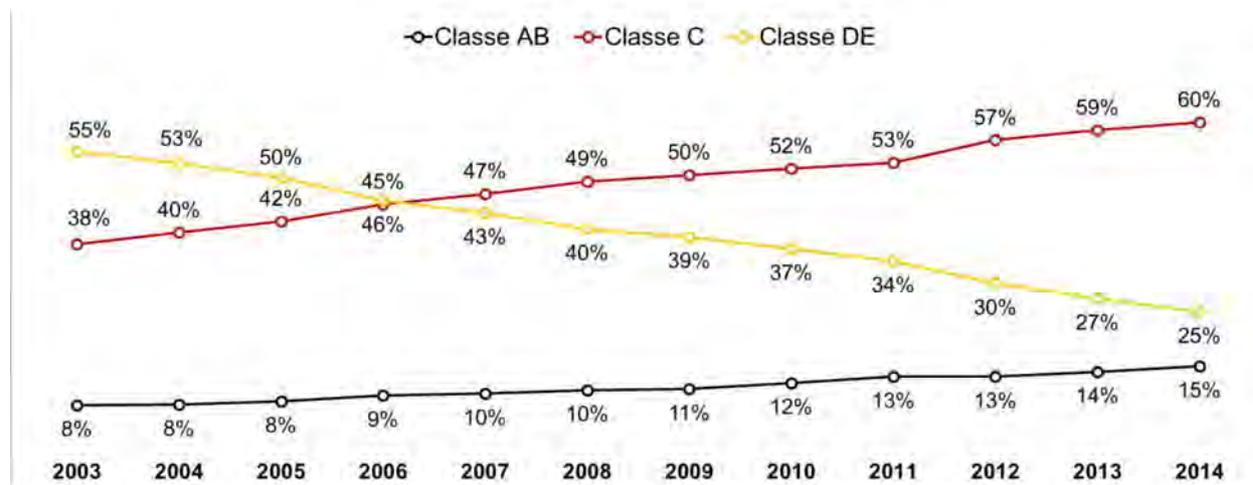


Figura 1-5: Composição de Classes Econômicas. Crescimento projetado de 2010 a 2014. FGV/PNAD/IBGE.

1.1.1.2 Construção Civil

Uma das alavancas do mercado de iluminação é a construção civil. Esse mercado representa, atualmente, cerca de 5% do PIB. O mercado de construção civil apresentou crescimento relevante nos últimos anos. O segmento de varejo de materiais de construção, por exemplo, apresentou crescimento médio de 11% ao ano desde 2003 (Figura 1-6).

Vendas Nominais - Varejo materiais de construção (2003 = 100)

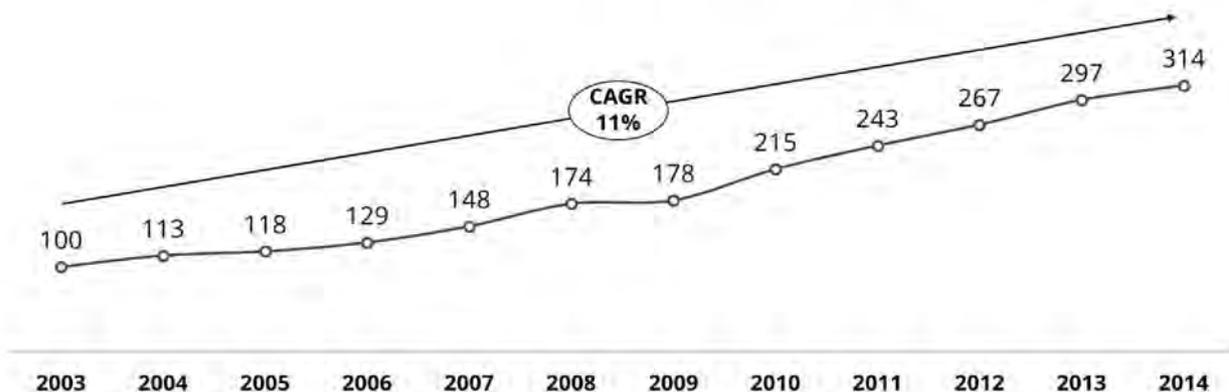


Figura 1-6: Vendas Nominais – Varejo – Materiais de construção (2003 = 100). IBGE/PMC

1.1.2 Quadro energético

É impossível imaginar a vida na sociedade moderna sem energia elétrica. Grande parte do desenvolvimento se deu a partir do advento da eletricidade e hoje ela está presente na maior parte das nossas atividades. No entanto, a demanda de energia elétrica no Brasil está superando a capacidade de oferta dessa energia (FERREIRA, TOMIOKA, 2014).

O consumo de energia elétrica cresceu mais de treze vezes desde 1970, média de 6% ao ano, resultado do crescimento e envelhecimento da população que convergiu para áreas urbanas e aumentou seu poder aquisitivo, da penetração de eletrodomésticos e do desenvolvimento da indústria e comércio (Figura 1-7). Os segmentos residencial, comercial e industrial representaram, em média no período de 1970 a 2014, 22%, 13% e 49% do consumo respectivamente. A categoria “outro” inclui os segmentos Energético, Público, Agropecuário e Transportes.

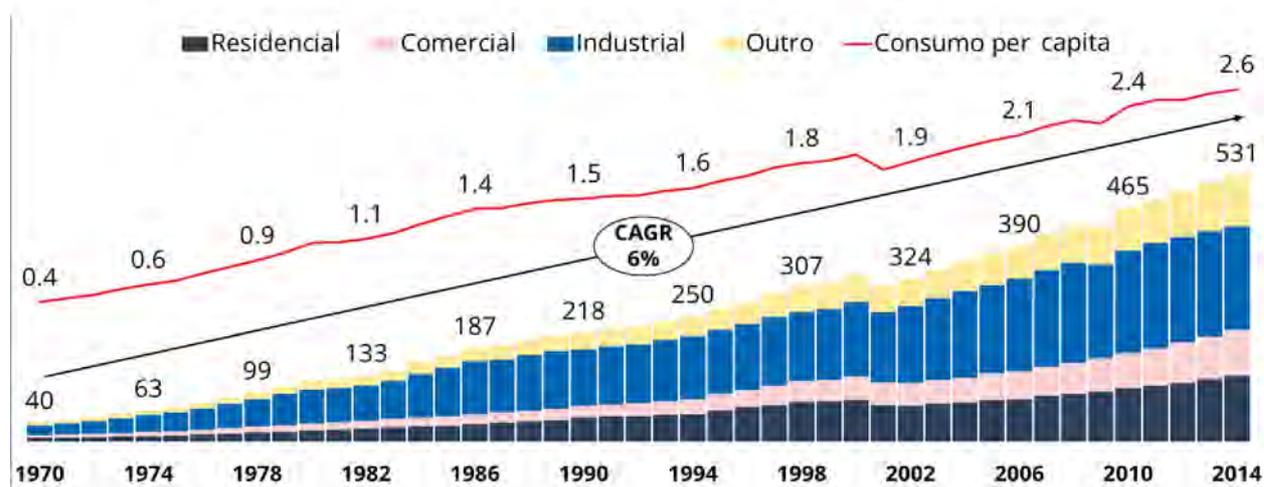


Figura 1-7: Consumo de Energia Elétrica (TWh) por Setor e Consumo per capita (kWh). MME e IBGE.

Estima-se que a iluminação represente 24% do consumo residencial, 5% do consumo industrial e 40% da demanda comercial (Coeficientes Destinação BEU, 2005). Em conjunto, a iluminação nesses três segmentos é responsável por cerca de 15% (Eletrobrás/Procel) de toda energia elétrica consumida no país, o equivalente a 80TWh. Como as incandescentes ainda representam uma parcela significativa da base instalada, com cerca de 300 Milhões de importações em 2014 (Aliceweb), a adoção de tecnologia LED apresenta grande potencial de impacto no consumo de energia elétrica.

1.1.3 Políticas de eficiência energética, uma tendência global

Diversos países têm se planejado, seguindo as recomendações da International Energy Agency (IEA), para a adoção de políticas energéticas que incluem, entre outras ações, a retirada da lâmpada incandescente do mercado (BASTOS, 2011). A Figura 1-8, por exemplo, apresenta o movimento global de banimento das lâmpadas incandescentes.

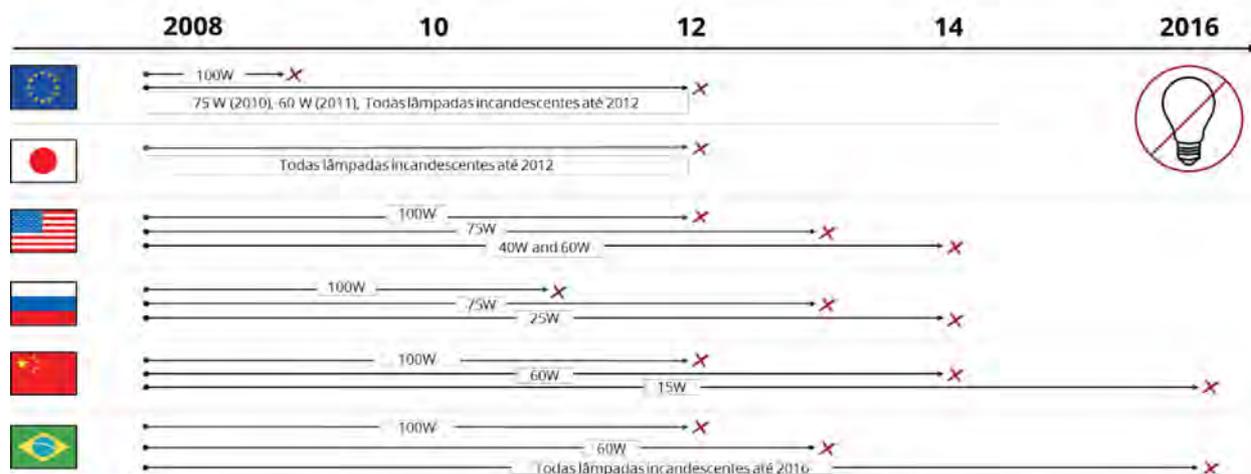


Figura 1-8: Banimento de Lâmpadas incandescentes pelo mundo. McKinsey, 2012

Os programas de etiquetagem – que classificam a eficiência energética de equipamentos dando classificação que varia de A (mais eficiente) a G (menos eficientes) – mostraram-se também como uma importante iniciativa para garantir a eficiência energética.

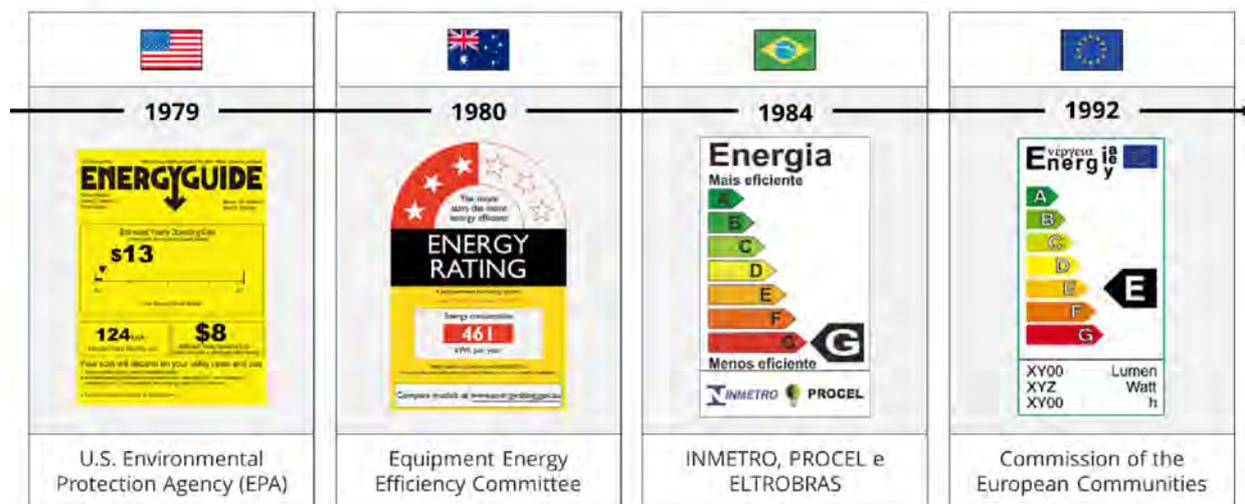


Figura 1-9: Eficiência energética, programas de etiquetagem. COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, EQUIPMENT ENERGY EFFICIENCY COMMITTEE, ENERGY STAR, INMETRO, PROCEL e ELETROBRAS.

Nos EUA as etiquetas começaram a ser usadas em 1979 (Figura 1-9), mas somente em 1994 o programa começou a ser aplicado em lâmpadas. Na Austrália um programa semelhante começou a ser aplicado na década de 80, mas não é utilizado para lâmpadas, que são vendidas com a etiqueta europeia. No Brasil, em 1984, o INMETRO lançou o Programa Brasileiro Etiquetagem (PBE). Outra ferramenta para promover a venda de equipamentos eficientes é o Selo Procel, criado pelo Ministério de Minas e Energia em 1993. Na União Europeia a etiquetagem foi oficializada em 1992, seis anos depois lâmpadas também passaram a ser etiquetadas (incandescentes com nota E, F ou G e fluorescentes A ou B) (BASTOS, 2011).



Figura 1-10: Políticas de eficiência energética no Brasil.

1.1.3.1 Lei da eficiência energética

A lei nº 10.295, aprovada em 17 de outubro de 2001, visa a alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente estabelecendo níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia com base em indicadores técnicos fixados no Decreto nº 4.059, sob responsabilidade e coordenação do Ministério de Minas e Energia (MME).

1.1.3.2 Banimento das Lâmpadas incandescentes no Brasil

A portaria nº 1.007, publicada em 31 de dezembro de 2010, estabelece o cronograma para o banimento gradativo das lâmpadas incandescentes do mercado brasileiro, regulamentando a lei 10.295 de 2001. Definiram-se índices mínimos de eficiência energética tecnicamente inatingíveis para que

as lâmpadas incandescentes sejam banidas gradativamente do mercado (BASTOS, 2011). Elas serão banidas entre junho de 2012 e junho de 2016, dando espaço para tecnologias mais eficientes.

1.1.3.3 Regulamentação do LED

A portaria nº 389, publicada em 25 de agosto de 2014, aprovou o regulamento técnico da qualidade para lâmpadas LED cujo objetivo é estabelecer os requisitos que devem ser atendidos, visando à eficiência energética, segurança e compatibilidade eletromagnética das mesmas. Esse regulamento vem para proteger o consumidor de produtos de baixa qualidade uma vez que todos os produtos deverão ser testados nos requisitos definidos (LUMIERE, 2015).

2 ILUMINAÇÃO E TECNOLOGIA

Esse capítulo apresenta a história e os conceitos de iluminação, e a definição de luz e suas características para embasar a comparação entre as principais tecnologias de iluminação existentes. Por fim, apresenta-se um quadro comparativo das tecnologias e as respectivas vantagens e desvantagens.

2.1 Conceitos de iluminação

2.1.1 Conceito de Luz

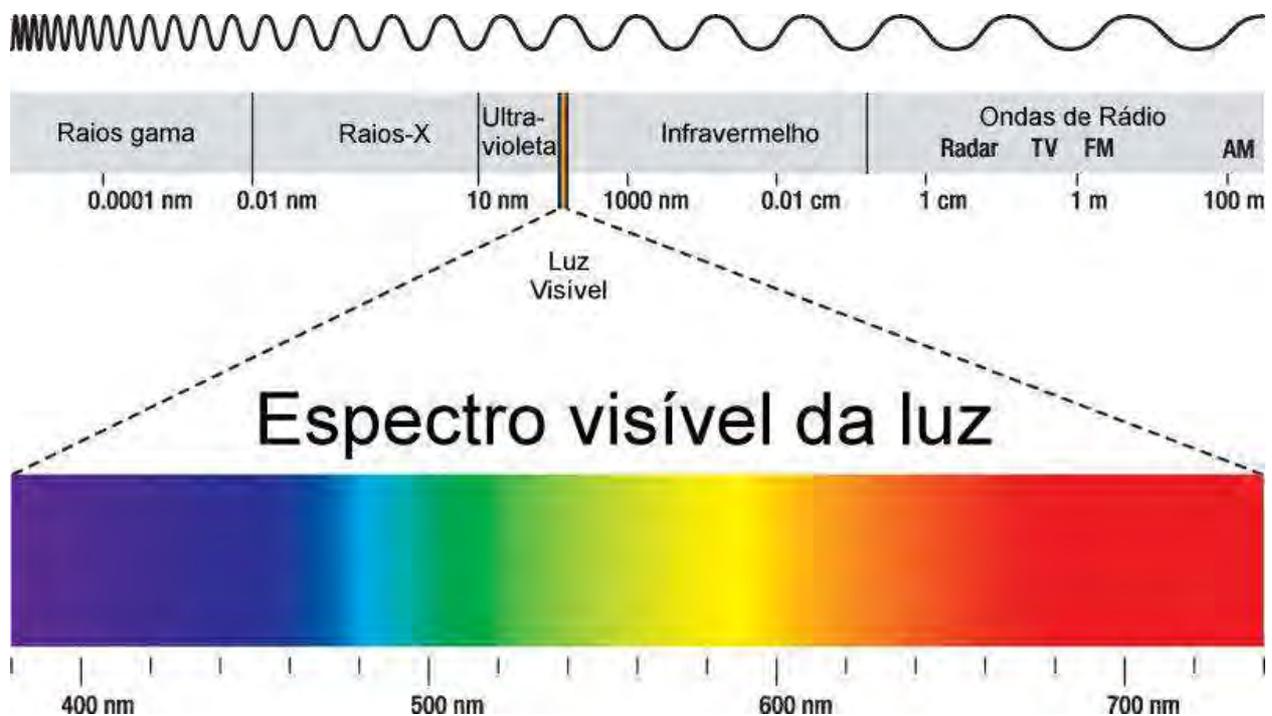


Figura 2-1: Espectro visível convencional.

A luz é um conjunto de ondas eletromagnéticas que, quando penetra os olhos, pode sensibilizar a retina. Essa sensibilidade depende do comprimento de onda da radiação e também da luminosidade. A faixa visível se situa entre a radiação ultravioleta e a radiação infravermelha (Figura 2-1). Tratando-se de uma onda, pode-se medir intensidade (ou amplitude – identificada pelo brilho), frequência (identificada pela cor) e polarização (ângulo de vibração).

2.1.2 Características da Luz

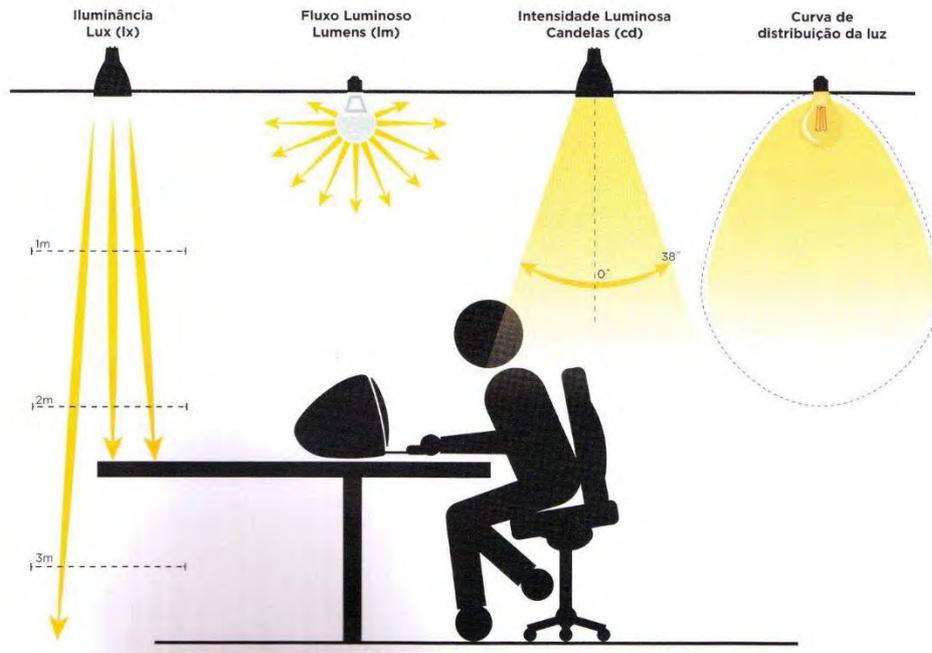


Figura 2-2: Iluminância, Fluxo Luminoso, Intensidade Luminosa e Curva de distribuição da luz.

2.1.2.1 Fluxo Luminoso

Radiação total emitida por uma fonte luminosa por segundo em todas as direções, em forma de luz, capaz de estimular a retina ocular à percepção da luminosidade e sua unidade é o lúmen (lm). (FERREIRA, TOMIOKA, 2014).

2.1.2.2 Iluminância

Iluminância é o limite da razão do fluxo luminoso recebido pela superfície em torno de um ponto considerado, para a superfície quando esta tende para zero (ABNT NBR ISO CIE 8995, 2013). Em outras palavras, é uma medida da razão do fluxo luminoso que incide na direção perpendicular a uma superfície e a sua área. Sua unidade é o Lux (lx), equivalente a um lúmen por m^2 .

2.1.2.3 Intensidade luminosa

Medida de percepção da potência emitida por uma fonte luminosa em uma dada direção. Unidade é a candela (cd), uma unidade base do SI.

2.1.2.4 Curva de distribuição da luz

Se for representado o diagrama polar da intensidade, num plano transversal à lâmpada, obtém-se a Curva de Distribuição Luminosa (CDL). Isto é, trata-se da representação da Intensidade Luminosa em todos os ângulos em que ela é direcionada num plano (Figura 2-2).

2.1.2.5 Eficiência luminosa

Razão entre a quantidade de luz emitida (fluxo luminoso) em lúmens e a potência do dispositivo em watts. Um dos parâmetros mais importantes na avaliação de uma lâmpada.

2.1.2.6 Temperatura de cor

Característica relacionada com a aparência de cor da luz emitida – medida em Kelvin (K) – é definida como a relação entre a temperatura de um corpo negro radiador e a distribuição de energia da luz emitida à medida que a temperatura é elevada a partir do zero absoluto. Isto é, a cor da luz emitida por um corpo negro aquecido até a temperatura especificada em Kelvin. A Figura 2-3 apresenta as diferentes temperaturas de cor observadas, para lâmpadas o ideal é que estejam na faixa de 2.000 e 6.000 K.



Figura 2-3: Temperatura de cor.

Não existe relação, no entanto, entre eficiência energética e cor da luz. A impressão de que luzes mais claras são mais potentes também não é válida. Quanto mais alta a temperatura, mais fria será a luz – adequada para escritórios e cozinhas, por exemplo. Temperaturas baixas são adequadas para ambientes mais aconchegantes, como salas de estar e quartos.

2.1.2.7 Vida Útil

A vida útil é o período de tempo durante o qual uma lâmpada fornece uma porcentagem (70%, por exemplo) do seu fluxo luminoso inicial, sob condições normais de ensaio. A vida mediana corres-

ponde à vida em horas quando, em uma determinada amostra, 50% das lâmpadas falham. As lâmpadas LED não estão sujeitas a falha súbita, mas normalmente diminuem o fluxo luminoso ao longo do tempo, de forma gradual, sendo esta a característica de final de vida útil da mesma, diferentemente do que ocorre com as lâmpadas convencionais (INMETRO, Portaria 389, 2014)

2.1.2.8 Índice de reprodução de cor (IRC)

É a medida da capacidade de uma fonte luminosa de reproduzir com fidelidade as cores dos objetos iluminados. Quanto maior esse índice (IRC) – que varia de 0 a 100 – melhor a reprodução de cores (Figura 2-4). A lâmpada incandescente, por exemplo, possui IRC máximo (100) já que se aproxima do Sol com relação à reprodução de cores.



Figura 2-4: Índice de reprodução de cores. EMPALUX.

2.1.2.9 Fator de Potência

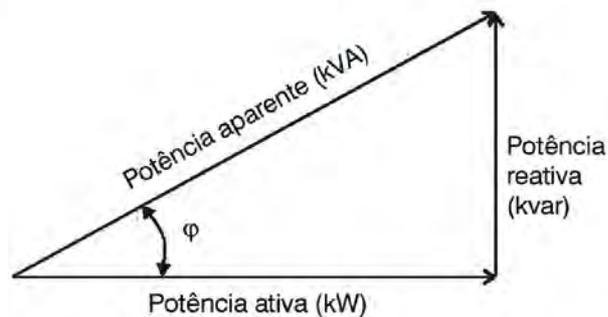


Figura 2-5: Triângulo retângulo que representa a relação entre as potências aparente, ativa e reativa.

Em circuitos de corrente alternada puramente resistivos, as ondas de tensão e de corrente elétrica estão em fase. Quando cargas reativas estão presentes, o armazenamento de energia nessas cargas resulta em uma diferença de fase entre essas ondas (φ). O Fator de potência (FP) é a relação entre potência ativa e a potência aparente ($\cos \varphi$). Potência ativa é a capacidade do circuito de produzir

trabalho em um determinado período de tempo. Devido aos elementos reativos de carga (capacitores, condensadores ou indutores) parte da energia fornecida pela concessionária não é utilizada para produzir trabalho e sim para produzir os campos elétrico e magnético necessários para o funcionamento desses elementos. Quanto maior for o índice, maior será o aproveitamento de energia pelo consumidor, podendo variar de 0% a 100%.

Um baixo índice de fator de potência pode provocar vários problemas, como variação de tensão, diminuição do aproveitamento da capacidade dos transformadores e dos circuitos elétricos, aquecimentos dos condutores, entre outros. O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) determina que o fator de potência deve estar o mais próximo de 100%, com um valor mínimo especificado de 92% (CERVELIN, 2010) (FERREIRA, TOMIOKA, 2014).

2.2 Comparação das tecnologias

O fogo foi o primeiro recurso utilizado para iluminação. A produção de luz passa, historicamente, por quatro fases (Figura 2-6), a primeira é a do fogo, que perdura até 1878, quando a iluminação ainda estava restrita ao processo de queima de materiais como madeira, gás, querosene, óleo animal e vegetal. A descoberta das chamadas lâmpadas incandescentes deu início a segunda fase.

Embora muitos cientistas tenham contribuído com o desenvolvimento do bulbo de luz incandescente atual, Thomas Edison (Figura 2-6) é frequentemente creditado pela invenção. Ele experimentou com uma variedade de materiais de filamentos, mas, por fim, resolveu utilizar uma haste de carbono. O primeiro teste bem-sucedido foi em 1879 e durou 13,5 horas. Depois de melhorar o projeto, entrou com pedido de patente nos EUA em novembro – "a carbon filament or strip coiled and connected ... to platinum contact wires. ". Outros cientistas continuaram a desenvolver a lâmpada incandescente, resultando em melhorias na eficiência e produção. A primeira lâmpada de Edison durou apenas 13.5 horas, mas uma lâmpada incandescente moderna (60 watts) pode durar mais de 1.000 horas. Em 1964, os ganhos de escala e eficiência reduziram o custo de lâmpadas incandescentes por um fator de trinta (EMPSON, 2012).

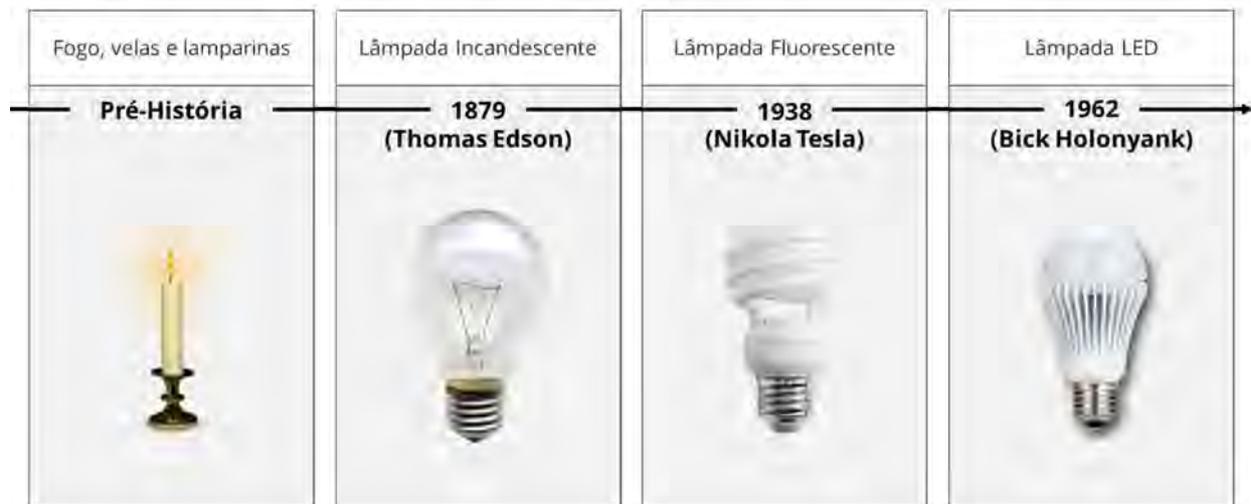


Figura 2-6: Breve história de Iluminação.

No meio do século 20, no entanto, uma nova tecnologia surgiu, a lâmpada fluorescente. Contudo, somente na década de 90 – terceira fase – essa tecnologia ganhou escala e foi adotada no mercado de iluminação. O LED representa a quarta fase e promete ganhos – em eficiência e vida útil – ainda maiores que os alcançados com a tecnologia fluorescente (Figura 2-7).

Tecnologia	Vida útil (h)	Potência (W)	Eficiência (lm/W)	Funcionamento	Vantagens	Desvantagens
Incandescente 	1.000	60	10	Filamento de tungstênio aquecido torna-se incandescente	<ul style="list-style-type: none"> • Manufatura • Preço • Sem tóxicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Ineficiente • Queima • Energia
Fluorescente 	8.000	25	50	Gás ionizado excita vidro à base de fósforo que emite radiação	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência • Conversão 	<ul style="list-style-type: none"> • Hg e P • Ultravioleta
LED 	25.000	10	80	Diodo semicondutor que, quando energizado, emite luz	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidade • Flexibilidade • Eficiência 	<ul style="list-style-type: none"> • Preço • Ultravioleta

Figura 2-7: Comparação das tecnologias Incandescente, Fluorescente e LED (Autor).

2.2.1 Incandescente

Inventada em 1879, por Thomas Edison, a lâmpada incandescente (Figura 2-8) substituiu o uso de materiais combustíveis para a iluminação. Seu funcionamento é simples, trata-se de um filamento de tungstênio (antes usava-se uma haste de carvão) que se torna incandescente, produzindo luz (energia luminosa) e calor (energia térmica), quando aquecido pela passagem de corrente elétrica. Com esse método, menos de 10% de energia é convertida em luz, o resto é perdido na forma de calor:

Incandescent light bulbs, as the name suggests, are bulbs that work by incandescence. Incandescence is the emission of light from a hot body due to its temperature. A thin filament in the bulb is heated by an electric current until it produces light. Only 10 percent of the energy used by incandescent lights is converted to visible light, the other 90 percent is lost in the form of heat (EMPSON, 2012).

A vida mediana de uma incandescente é geralmente de 1000 horas (consequência da temperatura elevada). Embora seu custo de produção seja baixo, as lâmpadas incandescentes são extremamente ineficientes energeticamente – eficiência é de aproximadamente 10 lm/W. Devido à pouca eficiência e baixa vida útil das lâmpadas incandescentes, elas estão em processo de banimento (phase-out) no Brasil (Seção 1.1.3.2).

As lâmpadas incandescentes são fáceis e baratas de produzir, tem índice de reprodução de cor (IRC) elevado – lembrando a luz natural – e não contém material tóxico, no entanto, as desvantagens (vida útil e eficiência) mais do que descompensam sua utilização.

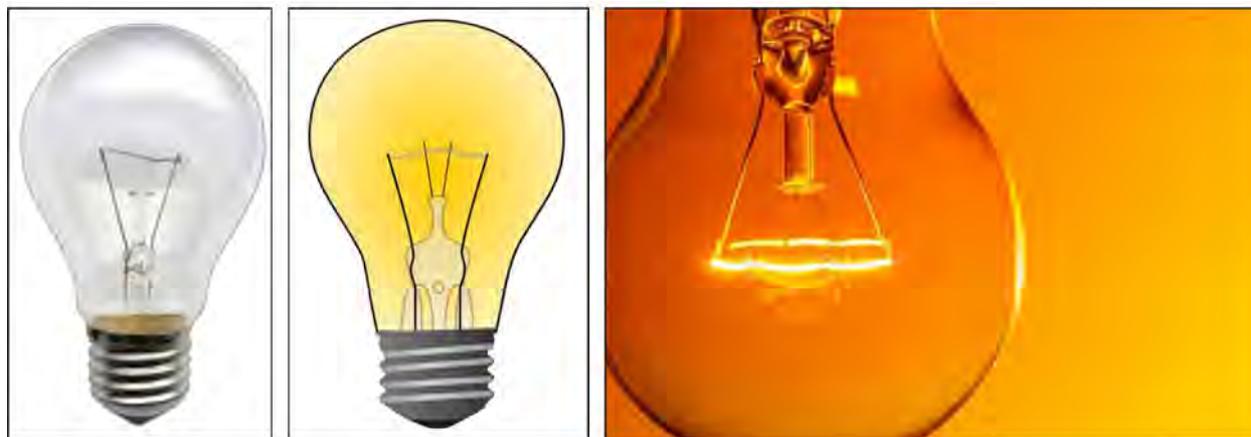


Figura 2-8: Lâmpada incandescente. Adaptado de: openclipart.com/wikipedia.com/inhabitat.com

2.2.2 Fluorescente

Inventada em 1938, por Nikola Tesla, a lâmpada fluorescente (Figura 2-9), também conhecida como lâmpada econômica, apresenta eficiência luminosa superior à da incandescente (até cinco vezes mais, chegando a 50 lm/W) – por emitir mais energia eletromagnética em forma de luz do que de calor. Sua vida útil pode ultrapassar 8.000 horas de uso.



Figura 2-9: Lâmpada fluorescente. Adaptado de Panasonic.com/redicitylar.com.br/laureanojg.blogspot.com

O gás (inerte, geralmente argônio), misturado com vapor de mercúrio, no seu interior é ionizado, produzindo radiação ultravioleta que excita o todo de vibro coberto com material a base de fósforo.

Esse processo libera luz visível. Além disso, uma cápsula de mercúrio líquido também é colocada dentro do tubo, essa mistura garante uma boa conversão de energia elétrica em energia luminosa.

Fluorescent light bulbs consist of a glass tube filled with a gas containing mercury vapor and argon. *The inner surface of the tube is coated with phosphor coating. The bulb's electrode, through which electricity flows, is typically made of coiled tungsten.* Fluorescent lamps must use a device called a ballast to regulate the electric current flow through the tube. [...] Fluorescence is a form of luminescence or light not generated by high temperatures alone. This means that a higher percentage of the energy consumed by a fluorescent light is converted to light as opposed to heat. Whereas an incandescent bulb only converts 10 percent of its energy to light and loses 90 percent in the form of heat, fluorescent bulbs convert 85 percent of energy to light and lose only 15 percent to heat (EMPSON, 2012).

Embora seja mais eficiente, o uso da lâmpada fluorescente pode resultar em impactos ambientais relevantes. Se um dos seus principais componentes, o mercúrio, não for descartado da forma correta, pode contaminar aterros sanitários e lençóis freáticos. As lâmpadas desse tipo contêm, em média, 5 mg de mercúrio (FERREIRA, TOMIOKA, 2014). A exposição excessiva ao mercúrio, nos estados líquido ou vapor (rapidamente absorvido através das vias respiratórias), pode causar no sistema nervoso perda de memória, demência, Alzheimer, mal de Parkinson, perda de visão e audição. Além disso, pode causar efeitos adversos nos sistemas imunológico, renal, cardiovascular, reprodutor, nervoso, na glândula tireoide e até causar câncer (BASTOS, 2011).

De modo a mitigar esse impacto, algumas alternativas são apontadas: disposição em aterros (com ou sem tratamento), incineração dos resíduos, moagem simples, moagem com tratamento químico, tratamento por sopro, solidificação/encapsulamento. Para isso, no entanto, é preciso que as lâmpadas sejam devidamente descartadas, separadas e direcionadas (logística reversa).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (nº. 12.305) prevê a criação de Grupos de Trabalho para formatação de resoluções que regulem as atividades de coleta, transporte, tratamento e destinação final para cada tipo de resíduo sólido (lâmpadas eletrônicas fazem parte da lista). Além disso, as empresas e o governo ficam incumbidos de implementar planos de manejo de resíduos de longo prazo, criar sistemas de logística reversa e incentivar a reciclagem. No entanto, esse processo ainda não está consolidado no Brasil, representando um risco à saúde pública.

2.2.3 LED

Inventada em 1962, por Bick Holonyank, a tecnologia LED (Figura 2-10) consiste em um diodo semicondutor que, quando energizado, emite luz visível. Essa transformação de energia elétrica em luz ocorre na matéria, por isso é chamado de estado sólido (Solid State).

A semiconductor with extra electrons is called N-type material, since it has extra negatively charged particles. A semiconductor with extra holes is called P-type material, since it effectively has extra positively charged particles. A diode comprises a section of N-type material bonded to a section of P-type material, with electrodes on each end. When the negative end of a circuit is hooked up to the N-type layer and the positive end is hooked up to P-type layer, electrons and holes start moving. As free electrons moving across a diode fall into empty holes from the P-type layer, they release energy in the form of light. The color of the light depends on how far the electrons fall (EMPSON, 2012).

A performance dessa tecnologia evoluiu bastante nos últimos anos, atualmente sua eficiência chega a 80 lm/W (oito vezes mais que lâmpadas incandescentes, resultando em uma economia com energia elétrica de até 90%) e sua vida útil chega a 30.000 horas dependendo do produto (30 vezes mais que as lâmpadas incandescentes e 4 vezes mais que as lâmpadas fluorescentes). No entanto, o preço elevado e a falta de conhecimento ainda representam uma barreira para a adoção.



Figura 2-10: Lâmpada LED. Adaptado de: light.aitherslight.com/ambienteenergia.com.br

2.3 Vantagens e desvantagens do LED

A lâmpada LED apresenta diversas vantagens quando comparada às outras tecnologias:

- i) Versatilidade** – o tamanho (reduzido) do chip permite sua utilização em diversas aplicações.
- ii) Vida útil** – sua durabilidade, muito estendida quando comparada às tecnologias convencionais, reduz sobremaneira o custo de manutenção.
- iii) Eficiência luminosa** – sua elevada eficiência (80 lm/W atualmente, projetada para 130 lm/W em 2030 – Figura 4-6) garante economia de até 90% com energia elétrica.
- iv) Direcionamento** – o tamanho (reduzido) do chip garante maior precisão ao direcionar a luz, sem necessidade de acessórios ou refratores.
- v) Sustentável** – além de não possuir mercúrio em sua composição, o ciclo longo de reposição garante um consumo menor, em volume, e, portanto, reduz o uso de recursos naturais. Além disso, a economia energética garante redução na demanda energética, o que equivale a reduzir a emissão de CO₂ (Figura 5-1).
- vi) Dimerização** – O fluxo luminoso é variável, função da corrente elétrica aplicada, permitindo, com isto, um ajuste preciso da intensidade de luz.
- vii) Acionamento instantâneo** – mesmo quando opera em tecnologias baixas, essa tecnologia é acionada de modo instantâneo, diferente das lâmpadas convencionais.
- viii) Ausência de ultravioleta** – Não há emissão de radiação ultravioleta (presente nas lâmpadas fluorescentes), indesejável em uma série de aplicações.
- ix) Robustez** – Ao contrário das lâmpadas incandescentes, que se partem com facilidade, as LED, baseadas em semicondutores, são resistentes ao choque.

As principais desvantagens do LED estão listadas abaixo:

- i) Custo inicial** – a baixa difusão da tecnologia, acompanhada da escala reduzida na produção e distribuição, da falta de conhecimento por parte dos consumidores, distribuidores e varejistas, explica os custos ainda elevados. No entanto, espera-se que, à medida que a penetração dos LEDs aumentar, seu preço será reduzido significativamente (Figura 4-9).
- ii) Regulamentação** – as portarias nº 389 e 144 definiram o prazo de 24 meses a partir da publicação, março de 2015, para atacadistas e varejistas se adaptarem ao regulamento. Até lá, lâmpadas

LED de baixa qualidade, não regulamentadas, continuaram sendo vendidas – representando um risco para o consumidor.

iii) IRC, índice de reprodução de cor – as lâmpadas de LED ainda apresentam Índice de Reprodução de Cor (IRC) na faixa de 80, distante das incandescentes e halógenas que consegue atingir até 100 (Figura 2-4).

iv) Dependência de produtos importados – O chip de LED e outros componentes são produzidos fora do Brasil. A forte dependência de importação significa um risco para a adoção, uma vez que os custos de importação e o aumento da taxa de câmbio podem resultar em repasses relevantes para o consumidor.

v) Mão de obra especializada – Um bom projeto demanda atenção à aspectos como dissipação de calor, lentes de conversão, fonte de alimentação (drivers) e circuitos eletrônicos (dimmer de efeito).

vi) Compatibilidade – Nem sempre a substituição imediata de uma lâmpada convencional por uma solução de LED é direta, embora existam, no mercado, soluções de retrofit.

As Figura 2-11, Figura 2-12 e Figura 2-13 – produzidas por fabricantes e distribuidores – a seguir apresentam, de forma esquemática, as vantagens da tecnologia LED.



Figura 2-11: Benefícios da iluminação LED. Fonte: Avant.



Figura 2-12: Benefícios da iluminação LED. Fonte: FLC Lâmpadas.

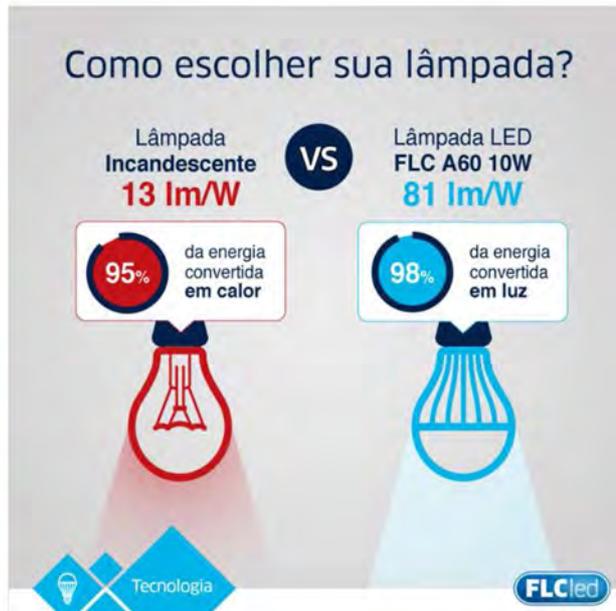


Figura 2-13: Benefícios da iluminação LED. Fonte: FLC Lâmpadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entender a velocidade de adoção de tecnologias eficientes e os fatores que influenciam esse processo é do interesse de entes privados (empresas ligadas a manufatura, importação e distribuição, comerciantes e investidores) e públicos (órgãos governamentais relacionados com planejamento energético, por exemplo). Esse interesse levou a elaboração de diversos estudos e projeções da adoção de tecnologia LED (MCKINSEY, 2012; JP MORGAN, 2013; IMS, 2013)

No entanto, a maior parte desses trabalhos não apresenta a metodologia teórica utilizada e sequer menciona a utilização de um modelo econométrico. Única exceção encontrada é o relatório do Departamento de Energia dos EUA (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014) que projeta os cenários de difusão do LED nos diversos segmentos a partir de três componentes: um modelo econométrico logístico que considera fatores econômicos, uma curva de difusão (Modelo de Bass) que considera a presença de mercado existente e um fator de aceitação para fatores não-econômicos.

While the conditional logit model provides a probability of purchase for each technology under perfect competition, the lighting market model also recognizes that newer technologies are at a relative disadvantage compared with well-established incumbent technologies. The rate of market penetration is subject to certain market barriers, including, but not limited to, acceptance and availability of the technology. Typically, these barriers only apply to new market entrants, such as LED technologies, as technologies may initially be unknown to consumers or may not be readily available to purchase. However, as a product establishes itself on the market, benefits are communicated by word-of-mouth to the consumer base, manufacturers are able to ramp up production capacity, and stocking distribution channels emerge. To simulate this lag effect on newer technologies, the lighting market model applies a Bass technology diffusion model to the logit model market share predictions. The Bass diffusion model is a widely recognized marketing tool used in technology forecasting that effectively slows the rate of technology adoption based on the time necessary for consumers to become aware of and adopt a new lighting technology. The econometric model used to forecast market share relies entirely on economic metrics and is therefore a simplification of consumer rationale. In reality, consumers consider other factors, such as color quality, dimmability, or aesthetics in their lighting decisions (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

3.1 Modelo Logit

Adotar ou não o LED como tecnologia de iluminação caracteriza-se por uma situação típica de uma escolha binária. Essa decisão é influenciada por algumas variáveis, por exemplo, o preço do produto e seu custo de operação e manutenção (custo com energia e reposição – função da vida média da lâmpada, horas de funcionamento, preço da lâmpada, preço da eletricidade e custo de instalação). O modelo logístico, portanto, pode ser utilizado para prever a resposta binária de adotar essa tecnologia a partir de variáveis independentes mais previsíveis.

The conditional logit model is a widely recognized method of forecasting *a product's market penetration* based on several quantitative or categorical explanatory variables. The result of the conditional logit is a probability of purchase, which represents an aggregation of a large number of individual consumer purchasing decisions. The logit model is predicated on the assumption that these individual decisions are governed by consumer utility (i.e., the relative value) that consumers place on the various technology attributes of an alternative. For example, consumers may be *strongly influenced by a product's first cost, but may also place some lesser value on a product's efficacy*. In the lighting market model, it is assumed that lighting purchasing decisions are primarily governed by two economic parameters, both of which are expressed in dollars per kilolumen, for comparison among technologies (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

A probabilidade $p(z)$ de um determinado consumidor adotar a tecnologia LED é dada pela equação abaixo, onde z é a relação linear com as variáveis independentes. X_i representa uma variável independente e β_i o coeficiente da regressão. A Figura 3-1 ilustra a representação gráfica da função Logit.

$$p(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

$$z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

$$\text{logit}(p(z)) = \ln\left(\frac{p(z)}{1 - p(z)}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

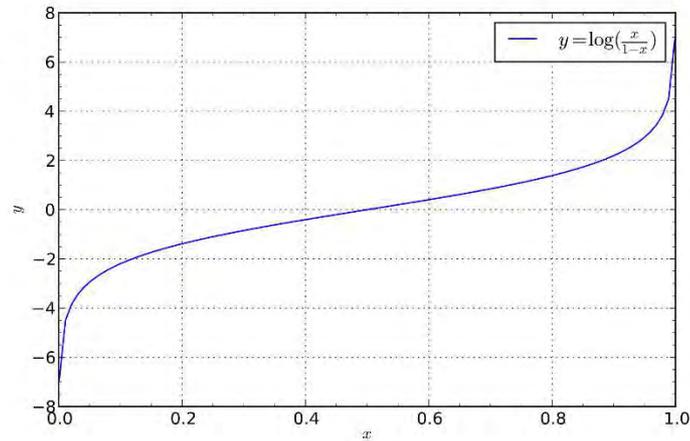


Figura 3-1: Função Logit.

3.2 Roger's Theory

A teoria de Rogers define difusão como o processo pelo qual uma inovação espalha-se entre os membros de um sistema social. A inovação seria adotada em cinco etapas, cada uma com perfil diferente (ROGERS, 2003) (Figura 3-2).

Os inovadores (Innovators) são um grupo seletivo de pessoas que adotam tecnologias em seus primeiros estágios, são formadores de opinião e lançadores de tendência. Os primeiros a adotar (Early Adopters) não possuem a mesma disposição para risco que os inovadores, mas ainda assim adotam tecnologias em seus estágios preliminares. A maioria inicial (Early Majority) é um segmento mais amplo, quando a inovação atinge esse ponto a sua difusão pelo restante da sociedade é muito mais fácil. A maioria tardia é um segmento amplo que apresenta maior resistência à inovação e retarda sua adoção até o ponto em que esta já demonstrou claramente suas vantagens. Por fim, os retardatários (Laggards) são o último segmento a adotar a inovação, e isso só ocorre quando ela se encontra em uma fase madura de implantação e os riscos são bem menores.

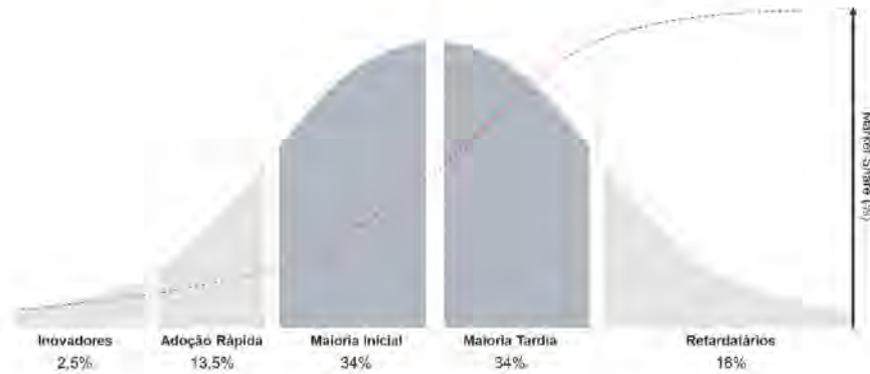


Figura 3-2: Difusão da Inovação – Teoria de Rogers.

Cinco fatores são apontados como críticos na difusão da inovação: (i) Vantagem relativa: probabilidade de adotar a inovação à medida que essa apresenta vantagens evidentes; (ii) Compatibilidade: quanto mais compatível com o contexto atual maior a probabilidade de adoção; (iii) Complexidade: quanto mais complexa for a transição, menor a probabilidade de adoção; (iv) Experimentação: a possibilidade de testar aumenta a probabilidade de adoção; e (v) Observabilidade: quanto mais evidentes as vantagens, maior a chance de adoção (Figura 3-3).

Nearly as important as price, income is also examined due to its relevance in the adoption process. [...] *income distribution has been cited by several authors as the driver of the S shape*’ famously associated with Roger’s diffusion of innovation theory. In brief, Roger’s theory espouses that the adoption process is successively made up of groups of adopters. The adoption groups typically have similar socioeconomic characteristics and behavioral/risk characteristics within group, but are heterogeneous between groups. The earlier groups of adopters, such as the Innovators, typically have higher disposable incomes, higher education, and higher risk tolerance than later groups of adopters. As a result, it is possible for an innovation to never reach full market saturation if the benefits do not outweigh the risks for the later groups. The most commonly cited reason for failure of market adoption progress is inadequate price decline. (HOLLAND, 2014)



Figura 3-3: Difusão da Inovação – Teoria de Rogers.

3.3 Modelo de Bass

Frank Bass (1969) desenvolveu um modelo de difusão assumindo que os consumidores potenciais de uma inovação são influenciados por dois processos: a comunicação em massa (mass media) e comunicação interpessoal (word of mouth).

Another aspect of diffusion research which may provide analytical insights into new lighting products are the coefficient of imitation and the coefficient of innovation, two parameters of the Bass model (Bass 1969). The coefficient of imitation accounts for internal influences or 'word of mouth' effects, while the coefficient of innovation is widely viewed as the effect of external or advertising effects. These coefficients influence the shape of the curve. The coefficient of innovation has a greater impact on the front end of the curve. A purely innovative diffusion curve creates a more aggressive exponential shape. Alternatively, a more imitative process creates the S curve shape (HOLLAND, 2014).

O modelo se baseia na seguinte hipótese comportamental: durante o processo de difusão do uso de um novo produto, dois tipos de consumidores (Figura 3-4) irão determinar o padrão de crescimento da demanda: (i) inovadores: corresponde àqueles que decidem adotar de forma independente e não recebem influência direta de outros consumidores (mas podem ser influenciados por outros meios, como comunicação em massa); (ii) imitadores: consumidores potenciais que são influenciados pela pressão social do meio e que são susceptíveis à influência de outros consumidores que já adquiriram os produtos (FIGUEIREDO, 2010).

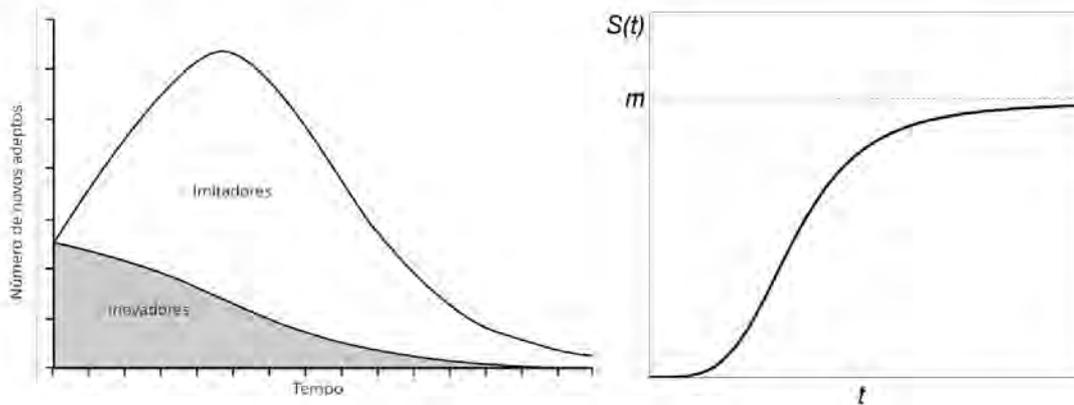


Figura 3-4: Adoção acumulada. Modelo de Bass.

$$P(t) = p + q \cdot \frac{S(t)}{m} \quad e \quad S(t) = \frac{m(1 - e^{-(p+q)t})}{1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}}$$

$P(t)$: probabilidade de compra no instante t , por um consumidor aleatório;

p : coeficiente de inovação – tendência autônoma do indivíduo em adotar o novo produto;

q : parâmetro de imitação, tendência de adoção motivada pelo meio social;

$S(t)$: total acumulado no instante t de consumidores que já adquiriram um determinado produto;

m : número total de consumidores potenciais no mercado.

4 METODOLOGIA

O modelo econométrico do mercado de iluminação no Brasil – utilizado para projetar o consumo, a penetração da tecnologia LED e a economia de energia resultante – foi desenvolvido através das seguintes etapas:

- 1 – Composição da base instalada nacional;
- 2 – Modificações na base instalada;
- 3 – Projeção das melhorias na tecnologia LED;
- 4 – Modelagem do Market share para a tecnologia LED;
- 5 – Cálculo da economia de energia;

4.1 Composição da base instalada nacional

Não há, no Brasil, registro da quantidade de lâmpadas e luminárias instaladas, tampouco sua segmentação por tecnologia ou aplicação. Portanto, esses números foram estimados a partir de outros dados demográficos e sociais disponibilizados publicamente e verificados a partir de números de importação (a maior parte dos dispositivos de iluminação são fabricados na Ásia) e de consumo de energia elétrica destinado à iluminação.

O número de lâmpadas/luminárias instaladas nas diversas aplicações (residencial, comercial e industrial) e sua segmentação por tecnologia (incandescente, fluorescente, LED e outras) foi determinado a partir de dados demográficos do IBGE/IPEA Data – População residente, número total de domicílios, domicílios com iluminação; EPE – Número de estabelecimentos comerciais e número de indústrias; MME/EPE – consumo final de energia elétrica; Aliceweb – Importação de lâmpadas; Procel 2005 (“Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso – PPH”) – número de lâmpadas por estabelecimento/domicílio e mix de tecnologia; Ecoluz/Procel/Eletróbrás 2010 – distribuição do consumo por uso final; Catálogo de fabricantes – eficiência média, vida útil e potência. O ano base para a análise foi 2000.

A Figura 4-1 a seguir apresenta a metodologia utilizada de modo esquemático. Para se validar as estimativas de quantidade e composição da base instalada, os números foram analisados e comparados com os registros de importação e com o consumo energético destinado à iluminação – através das horas de uso e da eficiência para o mix estimado.

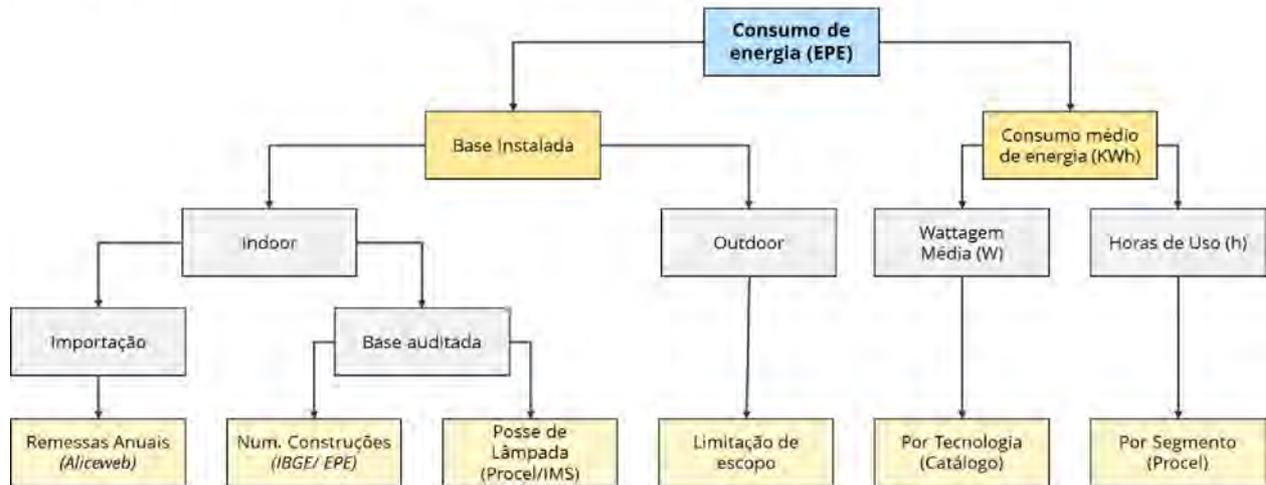


Figura 4-1: Metodologia Bottom-Up para composição anual da base instalada e estimativa do consumo energético (Autor).

Em outras palavras, o modelo foi construído de maneira dinâmica, de modo que as variáveis estimadas traduzissem de modo fiel o que é verificado a partir dos poucos dados públicos relacionados ao setor.

4.2 Modificações na base instalada

Para as modificações ocorridas anualmente na base instalada, consideram-se os seguintes eventos: (i) Construção/novas instalações que resultam em novos pontos de luz; (ii) Reposição de lâmpadas queimadas; (iii) Reposição por tecnologias mais eficientes (retrofit). A quantidade de lúmens devido às novas instalações foi projetada de modo a manter a iluminância (fluxo luminoso por área – medido em Lux) constante. A quantidade de lâmpadas queimadas é estimada a partir da vida útil e das horas de operação. Por fim, a renovação da tecnologia ultrapassada é estimada como constante e igual a 5% da base instalada (ciclo de reposição de 20 anos). A Figura 4-2 apresenta as três alavancas de modificação na base instalada.

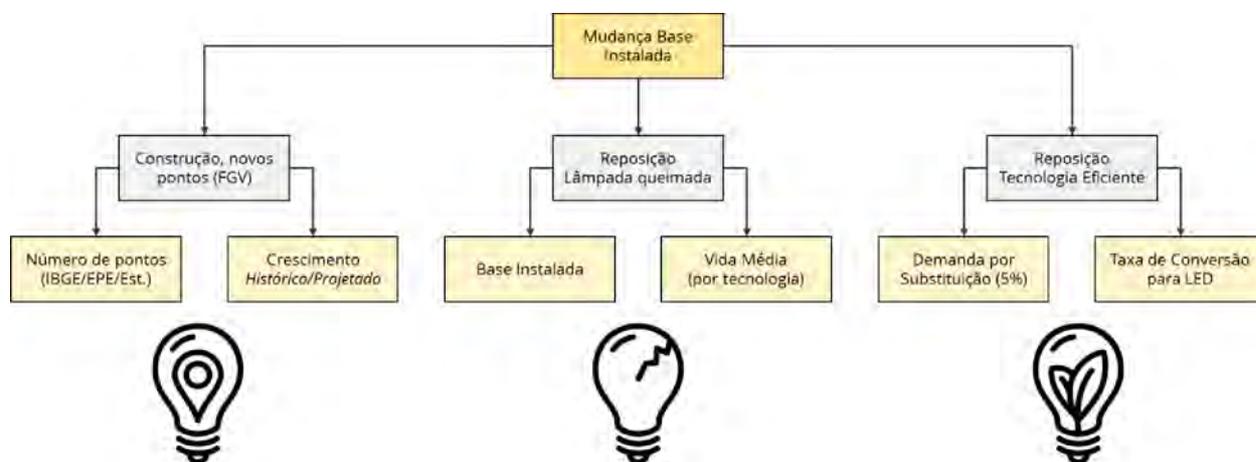


Figura 4-2: Metodologia para estimativa das modificações anuais na base instalada (Autor).

A partir dessas duas metodologias (Figura 4-1 e Figura 4-2), a base instalada foi estimada para os anos de 2000 até 2015 (Figura 4-3). No ano 2000, estimou-se que havia, no Brasil, 484 Milhões de lâmpadas. Dessas, 384 Milhões eram incandescentes (77%) e 100 Milhões eram fluorescentes (20%). Nos últimos 15 anos a quantidade de lâmpadas mais do que dobrou, crescendo em um ritmo de 6% ao ano.

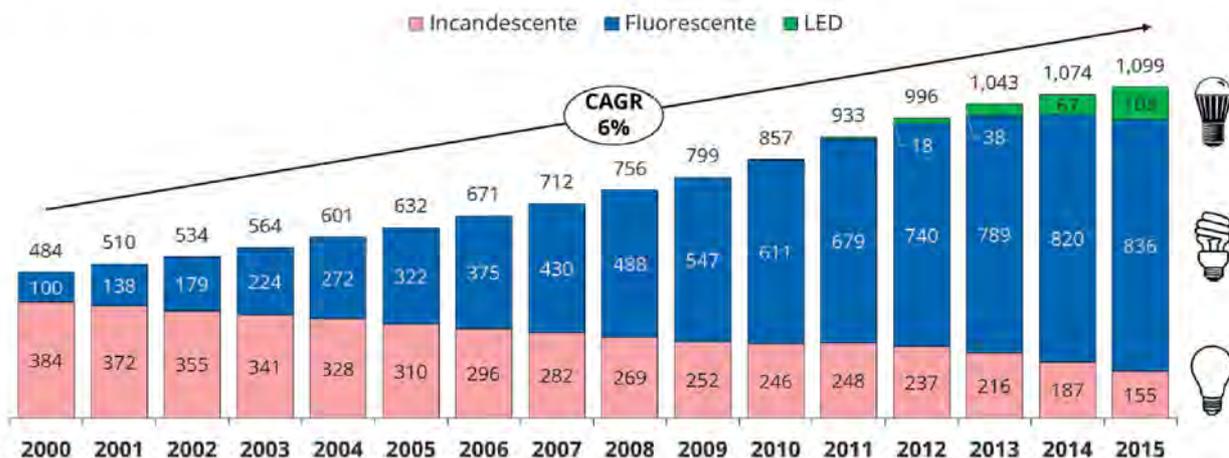


Figura 4-3: Composição estimada da base instalada (Milhões de lâmpadas) nos últimos 15 anos (Autor).

Além disso, o mix de tecnologia mudou consideravelmente (Figura 4-4), as lâmpadas incandescentes foram gradualmente substituídas pelas fluorescentes (episódios como o apagão de 2001 contribuíram para acelerar esse processo), por serem mais econômicas e durarem até três vezes mais. Estima-se que, em 2005, as lâmpadas incandescentes deixaram de ser maioria, representando

48% da base instalada versus 49% de lâmpadas fluorescentes. Em 2010, o LED aparece no mercado como sinônimo de inovação tecnológica, mas os preços elevados representavam uma grande barreira para o consumidor. A queda nos preços aumentou a adoção dessa tecnologia e a população (ao menos parte dela) ganhou conhecimento das suas vantagens. Estima-se que em 2015 ela representará 10% da base instalada e 20% do volume de vendas anuais do setor.

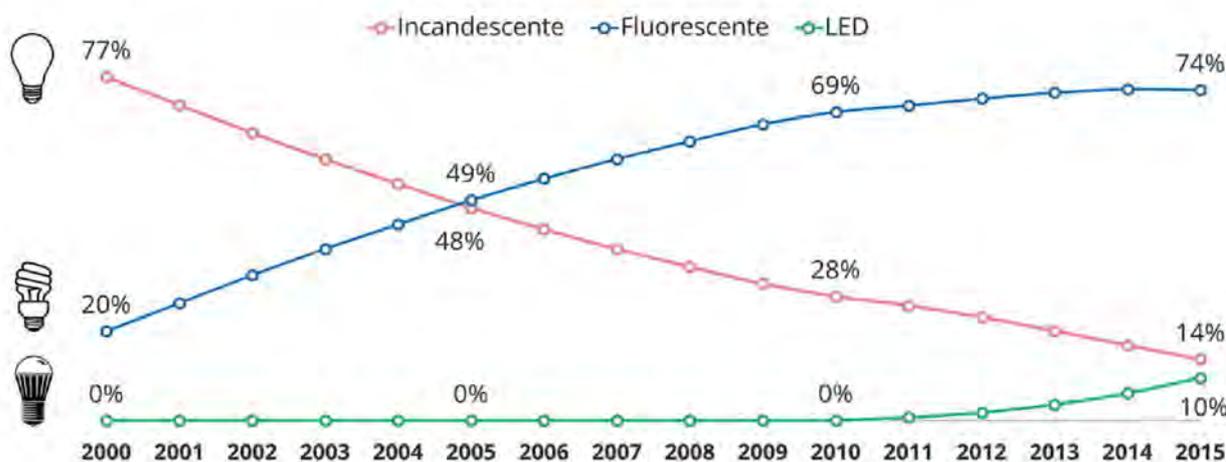


Figura 4-4: Mix de tecnologias na base instalada – excluindo outras tecnologias (Autor).

O consumo energético (Figura 4-5) cresceu mais devagar – 4% ano. As lâmpadas foram substituídas por tecnologias mais eficientes, aumentando a eficiência média da base instalada.

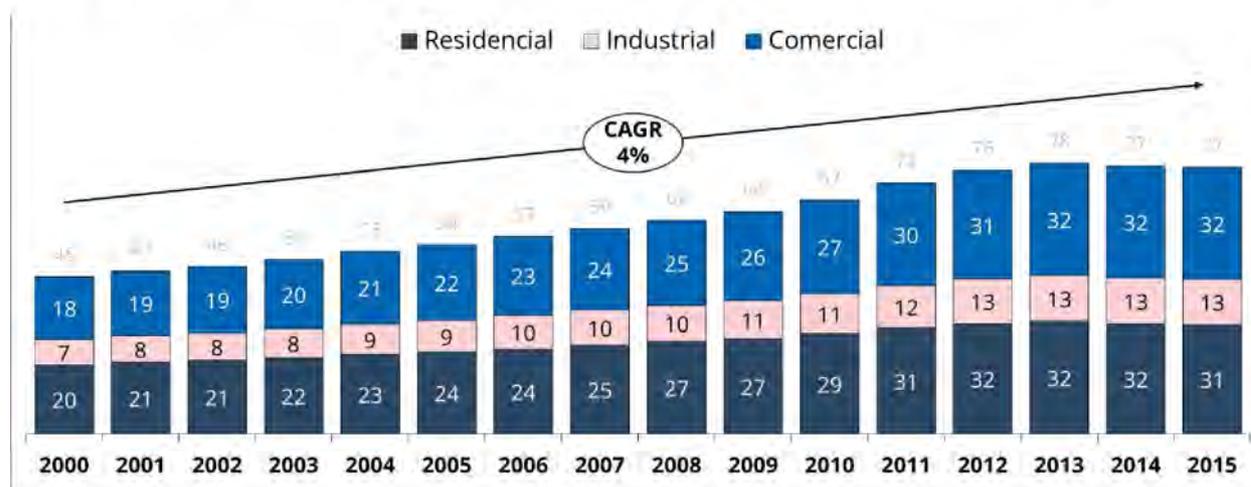


Figura 4-5: Consumo de energia elétrica nos segmentos Residencial, Industrial e Comercial (Autor/EPE/Procel).

4.3 Projeção das melhorias na tecnologia LED

A difusão da tecnologia LED no mercado de iluminação vai ocorrer à medida que suas características (eficiência, vida útil e preço) resultarem em uma vantagem competitiva frente às tecnologias já existentes, uma vez que essas características são determinantes na decisão do consumidor (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014; McKinsey, 2012; JP Morgan, 2013). Como a tecnologia LED é comercializada internacionalmente, existem diversos estudos e projeções para essas grandezas que foram usados como referência.

A eficiência luminosa, por exemplo, foi projetada para aumentar linearmente e dobrar até 2030 (Figura 4-6). Em 2010, a eficiência média de um LED comercializado no Brasil foi estimada em 64 lm/W – semelhante a uma lâmpada fluorescente convencional. Em 2015, as lâmpadas comercializadas já apresentam eficiência 24% maior, com 79 lm/W. De 2015 até 2020 espera-se que a eficiência cresça mais 20% para 95 lm/W. Por fim, de 2020 até 2030, espera-se um crescimento de 33%, chegando a 126 lm/W – duas vezes mais eficiente que a lâmpada fluorescente convencional e quatro vezes mais que uma lâmpada incandescente.

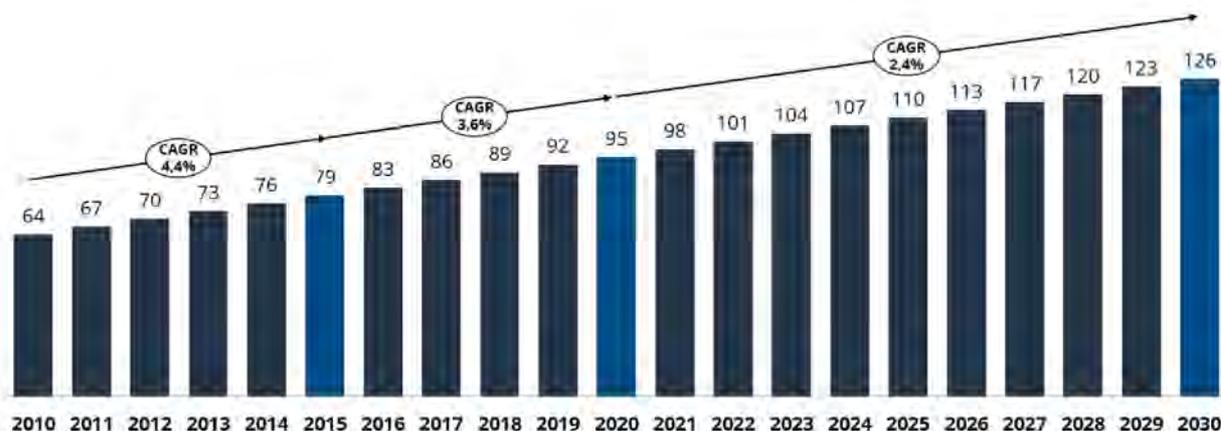


Figura 4-6: Evolução da eficiência média das lâmpadas de LED (lm/W) – projeções (Autor).

Esses valores estão em linha com as projeções internacionais (Tabela 4-1). O Departamento de Energia dos EUA (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014), por exemplo, projeta que a eficiência vai crescer 62% a partir de 2015, estimada em 81 lm/W, até 2030, quando deve chegar a 131 lm/W.

Tabela 4-1: Aumento da eficiência do LED - benchmark com outros estudos internacionais.

Aumento da eficiência – Histórico e Projeções	Unidade	10-15	15-20	20-30
US Department of Energy 2014	lm/W	7%	5%	3%
Strategies Unlimited 2013	lm/W	9%	-	-
US Department of Energy 2012	lm/W	19%	8%	1%
Média		12%	6%	2%

A vida útil das lâmpadas LED já é consideravelmente superior às outras tecnologias. Estima-se que durem cerca de 40 mil horas – ou seja, cinco vezes mais que as fluorescentes convencionais e até trinta vezes mais que as lâmpadas incandescentes. Estima-se que essa vida útil não aumente muito nos próximos anos (Figura 4-7). Embora o diodo tenha vida útil teórica infinita, o calor degrada os componentes, causando uma depreciação do brilho.

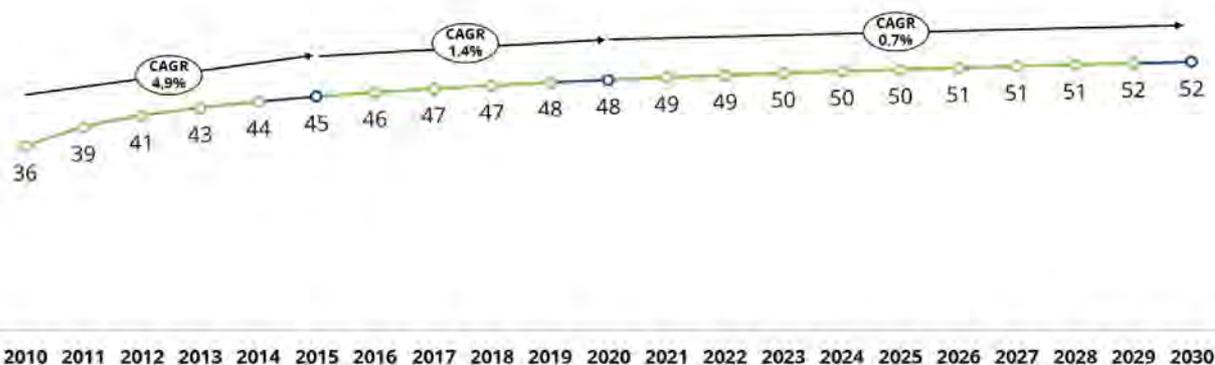


Figura 4-7: Evolução da eficiência média das lâmpadas de LED (Horas) – projeções (Autor).

O preço dessa tecnologia, por sua vez, tem diminuído significativamente nos últimos anos. De 2010 até 2015, estima-se que os preços tenham reduzido 20% por ano, em média (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014; McKinsey, 2011; JP Morgan, 2013; Holland, 2014). A Figura 4-8 mostra a evolução do preço de alguns produtos LED no Brasil nos últimos 24 meses (FLC, 2015) – que também comprova esse fenômeno.

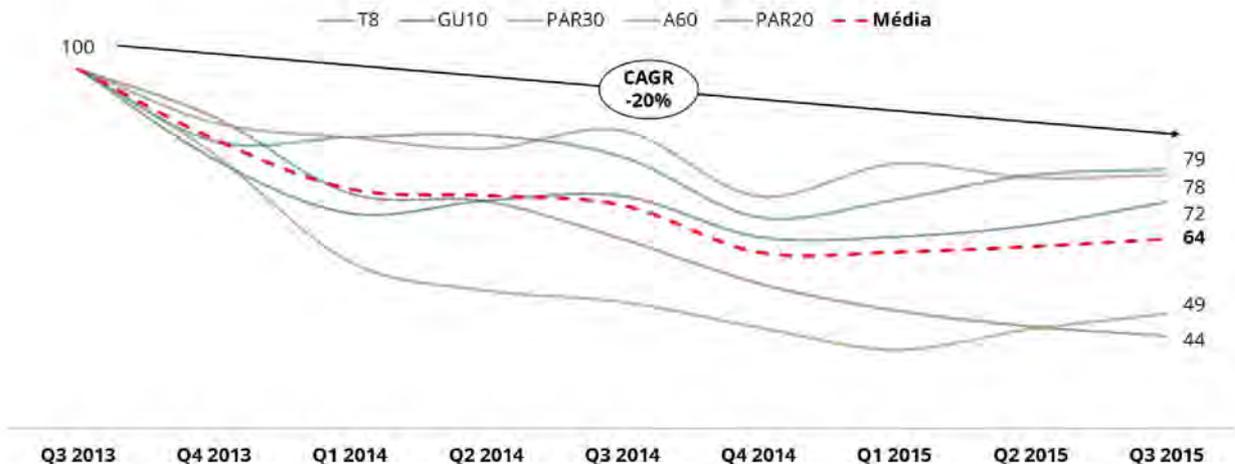


Figura 4-8: Evolução do preço médio das lâmpadas de LED no Brasil (R\$) – Histórico. Fonte: FLC Lâmpadas.

Estima-se que, em 2015, o preço médio de uma lâmpada LED seja equivalente a R\$ 34,00. Nos próximos cinco anos, o preço deve cair mais 32%, chegando a R\$ 23,00. Por fim, até 2030, os preços devem cair mais 43%, se estabilizando em cerca de R\$ 13,00 (Figura 4-9).

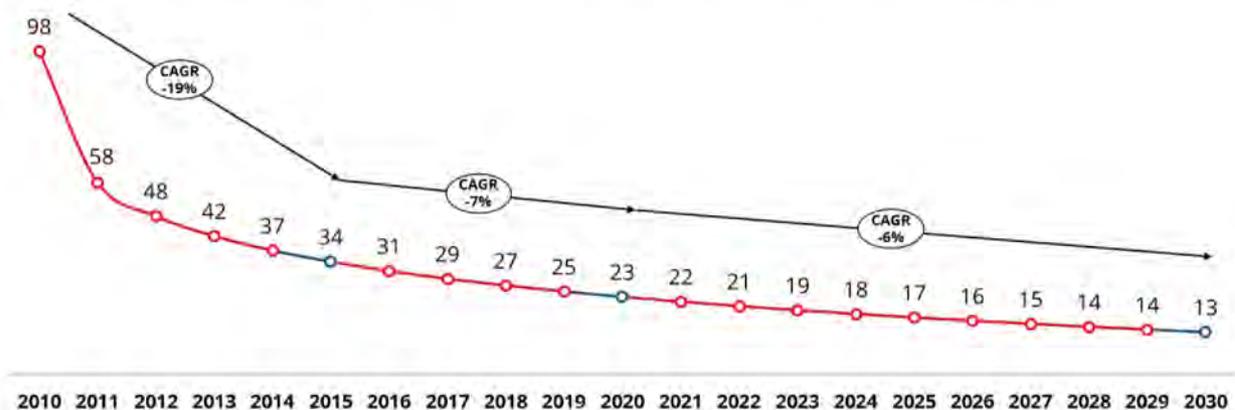


Figura 4-9: Evolução do preço médio das lâmpadas de LED (R\$) – projeções (Autor).

As projeções são menos agressivas que as apresentadas na Tabela 4-2 (benchmark internacional) de modo a acomodar variações na taxa de câmbio e inflação nacional.

Tabela 4-2: Redução do preço do LED - benchmark com outros estudos internacionais.

Redução do preço do LED	Unidade	10-15	15-20	20-30
Holland 2014	USD	-16%	-7%	-
JP Morgan 2013	Euro	-20%	-9%	-
US Department of Energy 2012	USD/klm	-25%	-11%	-6%
McKinsey 2011	USD/klm	-22%	-13%	-
Média		-21%	-10%	-6%

4.4 Modelagem do Market share para a tecnologia LED

O modelo econométrico (Logit) utilizado para projetar a penetração da tecnologia LED no mercado de iluminação é função do preço inicial de aquisição, da vida útil e da eficiência e fornece a probabilidade de o consumidor comprar esse produto (decisão binária). Além disso, o modelo de difusão de Bass também foi utilizado como parâmetro para a adoção dessa tecnologia a partir das curvas de adoção de tecnologia fluorescente (Holland, 2014), para considerar as barreiras de mercado inerentes à adoção de uma nova tecnologia – como aceitação, conhecimento das vantagens e disponibilidade da tecnologia (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

Typically, these barriers only apply to new market entrants, such as LED technologies, as it is these technologies that may initially be unknown to consumers or may not be readily available to purchase. As a product establishes itself on the market, however, benefits are communicated by word-of-mouth to the consumer base, manufacturers are able to ramp up production capacity, and stocking distribution channels emerge (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

O market share do LED, em volume, nos primeiros cinco anos (2010-2015) é estimado através de uma curva de Bass com coeficientes típicos de produtos domésticos e eletrônicos para consumo (Holland, 2014). A Tabela 4-3 a seguir apresenta os coeficientes para alguns produtos (KOHLI, LEHMANN AND PAE, 2009). Para o LED, adotou-se o coeficiente de inovação $p = 0,0120$, similar ao coeficiente para produtos domésticos – devido ao preço baixo e à menor complexidade quando comparado aos eletrônicos e eletrodomésticos – e coeficiente de imitação $q = 0,3200$, inferior ao índice para eletrônicos, cujo valor para o consumidor aumenta com o número de adeptos (KOHLI, LEHMANN AND PAE, 2009)

Tabela 4-3: Curva de Bass. Coeficiente de inovação (p) e imitação (q) para diversas tecnologias.
Fonte: Kohli, Lehmann, and Pae (1999) e Holland (2014)

Produto	Lançamento	p	q	m
Freezer	1929	0,0030	0,1325	0,6000
TV Preto e Branco	1939	0,0057	0,1477	0,8000
TV a cores	1954	0,0001	0,6396	0,8000
Liquidificador	1946	0,0001	0,3476	1,0000
Video Cassette	1975	0,0022	0,3576	0,6500
PC	1975	0,0031	0,2532	0,7000
Telefone Celular	1983	0,0009	0,4960	0,9500
Lâmpada Fluorescente	1990	0,0010	0,4800	0,7200
Lâmpada LED	2010	0,0120	0,3200	0,9000
Média		0,0031	0,3528	0,7911

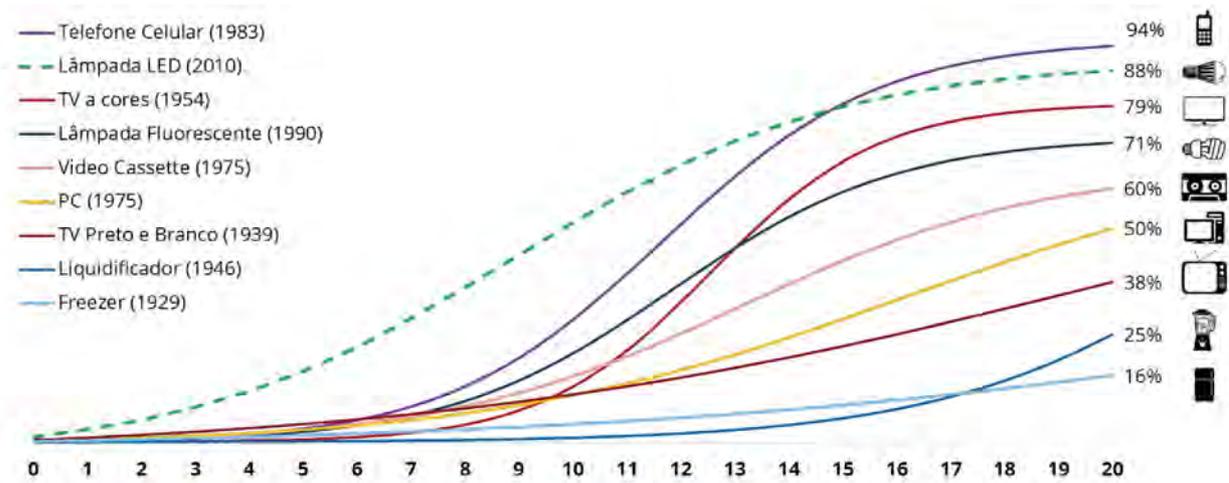


Figura 4-10: Penetração de diversas tecnologias (%) – Anos desde o lançamento.

Fonte: Holland, 2014 e Kohli, Lehmann, and Pae (1999), Holland (2014) e Estimativas (LED)

Os valores para os cinco primeiros anos, calculados a partir da curva de Bass, foram utilizados na construção do modelo econométrico (Logit). Os resultados da regressão estão indicados na Figura 4-11 a seguir. Como o histórico era restrito, somente 5 anos, a regressão pode não ser representativa do comportamento de difusão dessa tecnologia e sua penetração pode estar super ou subestimada.

O market share da tecnologia LED, calculado através da probabilidade $p(z)$ de um consumidor escolher esse produto, foi estimada através da equação abaixo, onde: X_1 é a eficiência da lâmpada, X_2 é a vida útil e X_3 é o preço médio. Para 2015, estima-se $p(z) = 20\%$. Em 2030, essa função chega a 87%.

$$\text{logit}(p(z)) = \ln\left(\frac{p(z)}{1 - p(z)}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3$$

$$z = 14,347 - 0,113X_1 - 0,087X_2 + 0,001X_3, R^2 = 1,0$$

Outras variáveis foram testadas, no entanto, essa combinação foi a que produziu resultados mais consistentes. A curva obtida (Figura 4-11) pode ser aproximada para uma curva de Bass, os coeficientes implícitos são $p = 0,0139$ e $q = 0,3000$ – muito próximos aos valores estimados anteriormente.

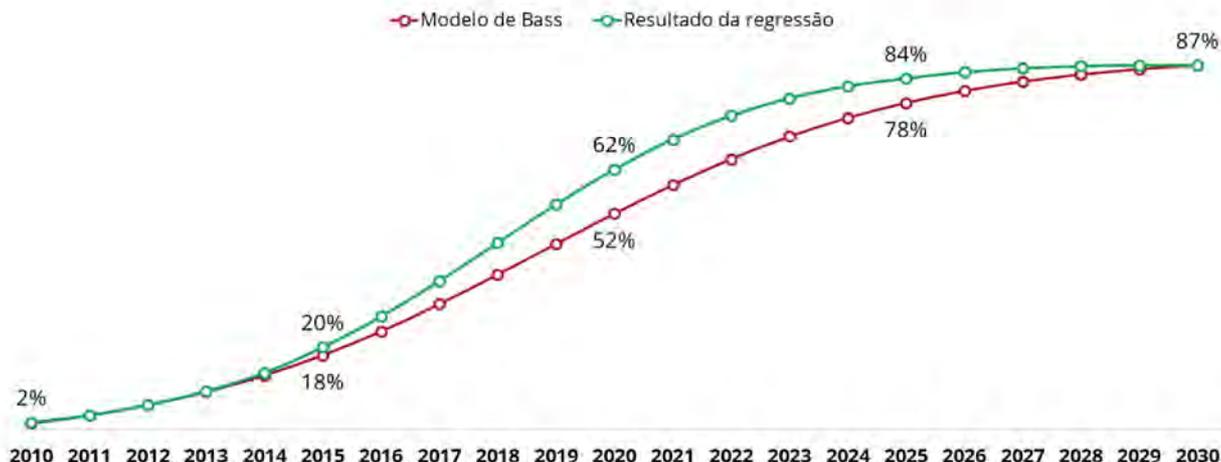


Figura 4-11: Market Share de LED (em volume). Resultado da regressão Logit e do Modelo de Bass (Autor).

4.5 Cálculo da economia de energia

Uma vez projetado o market share dos LEDs, resta projetar o tamanho da base nos próximos anos para se determinar o consumo energético. A estimativa do consumo energético, que considera o crescimento da base de lâmpadas, o aumento da presença do LED e evolução na eficiência, pode ser comparada ao cenário sem LED, que não considera a adoção dessa tecnologia. O número de pontos luminosos dos segmentos residencial, comercial e industrial foi estimado para crescer 3,6% ao ano (Figura 4-12), alavancado pelo crescimento da população, redução da quantidade de habitantes por domicílio e aumento da quantidade de estabelecimentos comerciais e industriais.

Residencial	Comercial	Industrial	TOTAL
População residente (+0,8% a.a.)			Residencial (+3,5% a.a.)
Habitantes p/ Domicílio (-0,7% a.a.)	Estab. Comerciais (+1,8% a.a.)	Estab. Industriais (+1,5% a.a.)	Comercial (+3,8% a.a.)
Pontos p/ Domicílio (+1,9% a.a.)	Pontos p/ Comércio (+1,9% a.a.)	Pontos p/ Indústria (+1,9% a.a.)	Industrial (+3,5% a.a.)
-----	-----	-----	-----
(+3,5% a.a.)	(+3,8% a.a.)	(+3,5% a.a.)	(+3,6% a.a.)
			

Figura 4-12: Premissas de crescimento da base instalada (Autor).

Como resultado, a partir da metodologia de composição da base instalada descrita anteriormente, estimou-se a penetração da tecnologia LED nessa base para os anos de 2015 até 2030. Em 2015, estimou-se que cerca de 10% das lâmpadas instaladas seriam de tecnologia LED. Em 2020, cerca de 44%, e em 2030, cerca de 92%. Projetou-se a redução gradual da presença das lâmpadas incandescentes, uma vez que ela está em processo de banimento. Por fim, a tecnologia fluorescente ficou com o restante do mercado (excluindo outras tecnologias, que correspondem a menos de 3% da base instalada no modelo). O resultado está ilustrado nas Figura 4-13 e Figura 4-14 a seguir.

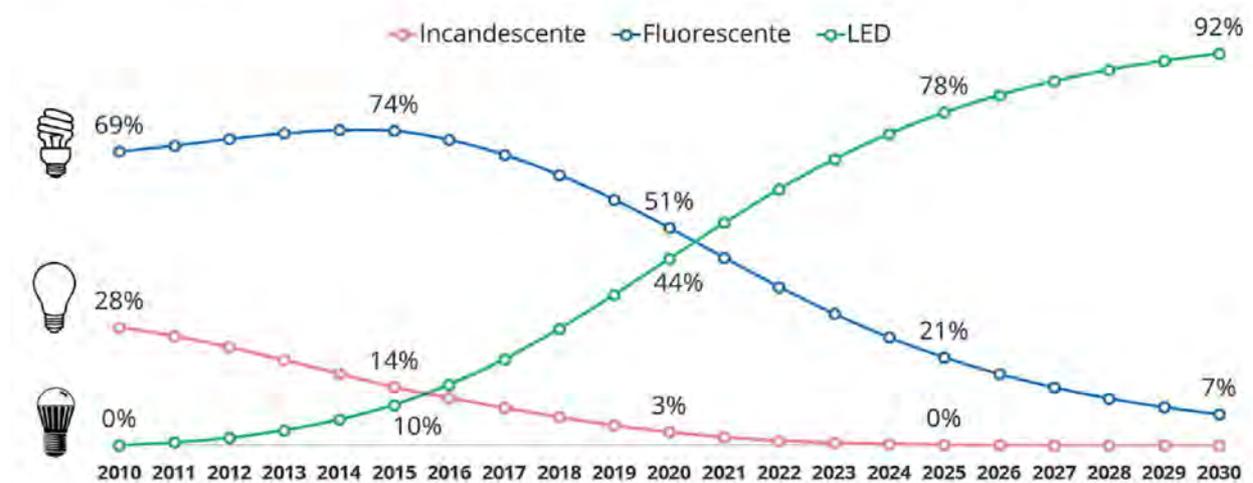


Figura 4-13: Mix de tecnologias na base instalada (Autor).

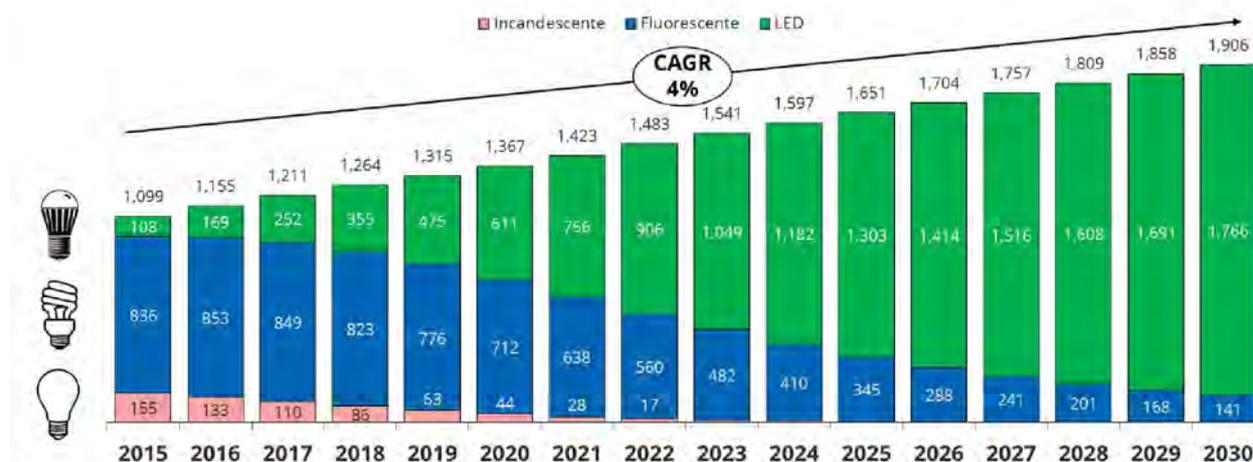


Figura 4-14: Crescimento da base instalada (Milhões de lâmpadas) nos próximos 15 anos (Autor).

A economia de energia é calculada a partir da comparação do cenário sem LED (que considera a eficiência média das lâmpadas de 2014 como constante) com o cenário que inclui a difusão projetada dessa tecnologia. O consumo de energia em TWh para cada segmento (Figura 4-16) é calculado através de três variáveis projetadas: (i) Fluxo luminoso em lúmen-hora/m² – considera o fluxo luminoso (lúmen/m²) constante nos próximos anos; (ii) metragem total (m²) – considera a metragem média dos estabelecimentos constante; (iii) eficiência média (lm/W) – considera a mudança no mix de tecnologias e a eficiência por lâmpada com expectativa de avanço na eficiência LED.

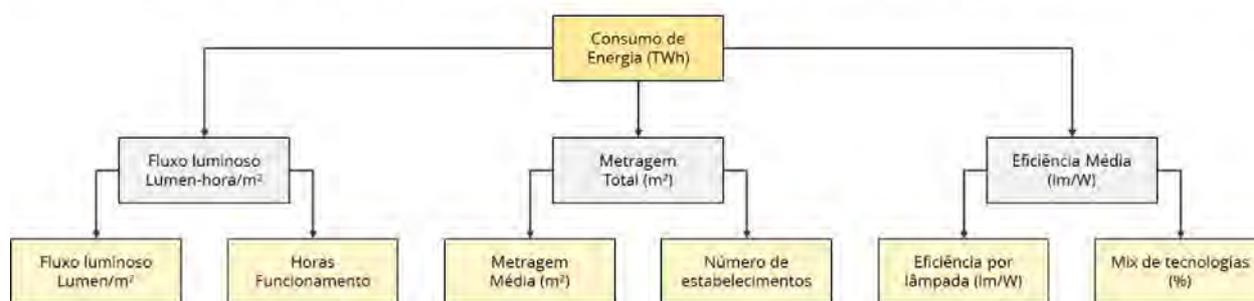


Figura 4-15: Metodologia Bottom-Up para determinar o consumo de energia nos próximos anos (Autor).

Estima-se o consumo de energia elétrica com iluminação igual a 77 TWh em 2015. Em 2020, esse consumo é estimado para reduzir 9,3%, para 70 TWh, no cenário com LED, e para crescer 11,3%, para 88 TWh, no cenário sem LED. Até 2030, deve reduzir 31,9%, chegando a 52 TWh, no cenário com tecnologia eficiente, e crescer 28,3%, até 101 TWh, no cenário sem inovação na base instalada. A Figura 4-16 apresenta a comparação das estimativas nos dois cenários.

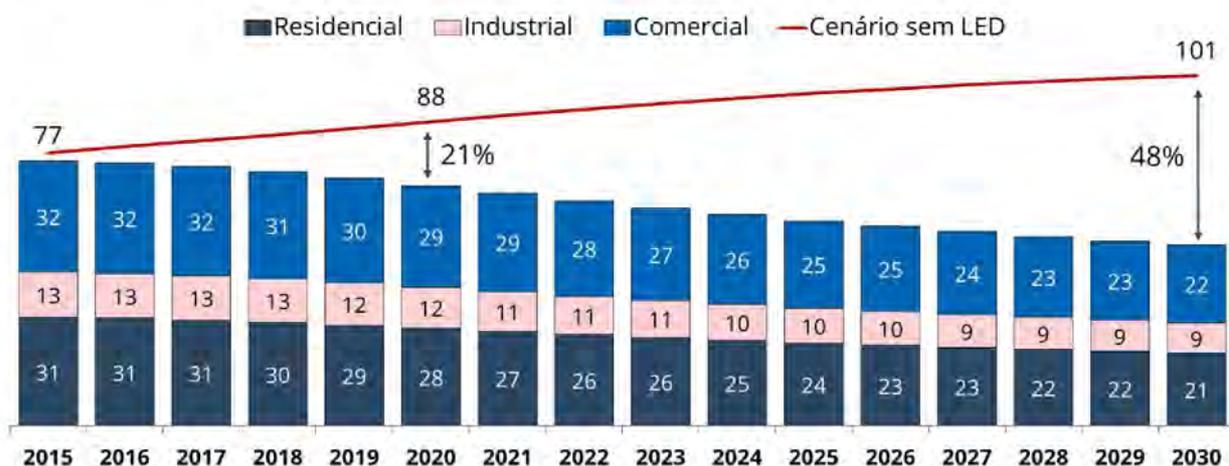


Figura 4-16: Consumo energético (TWh) com iluminação projetado (Autor).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados das projeções

A iluminação é responsável por aproximadamente 15% da demanda nacional de eletricidade, e é indicada como um dos setores que podem alavancar a redução no consumo energético através da adoção de tecnologias mais eficientes. Estima-se que a iluminação representa, em 2014, um consumo de 77 TWh (Figura 4-5) nos segmentos residencial, comercial e industrial. No entanto, o retrofit da base instalada por tecnologias mais eficientes promete reduzir esse consumo (Figura 5-1) para 70 TWh em 2020 (redução de 10%), chegando a 52 TWh (redução de 32%) em 2030.

Quando esses números são comparados com o cenário sem LED, isto é, que não projeta ganhos de eficiência (medida em lm/W), o ganho é ainda maior. Como se pode ver na Figura 5-1, que apresenta as projeções do consumo de energia elétrica com iluminação previsto pelo modelo econométrico, é esperado que a tecnologia de iluminação LED reduza o consumo de energia 21% em 2020 e 48% em 2030, o que represente, em termos absolutos, 49 TWh de energia economizados em 2030 – equivalente ao consumo de 25 Milhões de residências, ou 9% do todo consumo de energia elétrica nacional (MME, 2014).

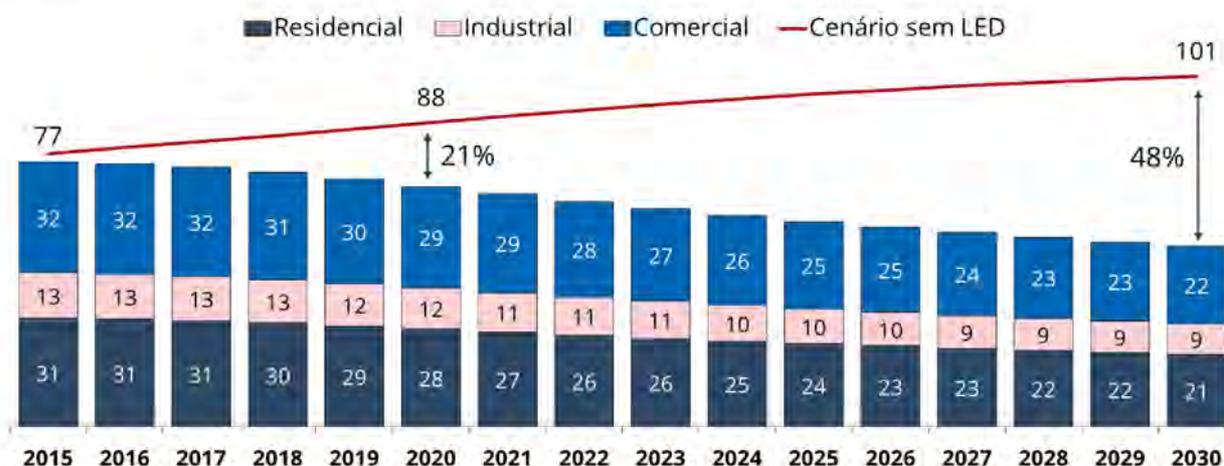


Figura 5-1: Consumo energético (TWh) com iluminação projetado (Autor).

Essa economia é explicada pelo ganho de eficiência. À medida que o LED aumenta sua presença no mercado (Figura 5-2), a eficiência média das lâmpadas cresce consideravelmente. De 2010 até 2015, através da adoção de lâmpadas fluorescentes, a eficiência média estimada avançou 69%

(3,6% a.a.) e chegou a 64 lm/W, no entanto, de 2015 até 2030, o ganho é ainda maior – a eficiência média da base instalada chega a 121 lm/W, o que representa um avanço de 88% (4,3% a.a.) em relação a 2015.



Figura 5-2: Base instalada nacional (Milhões de lâmpadas) e eficiência média (Autor).

O resultado desse avanço está traduzido na economia energética, a Tabela 5-1 resume as premissas do modelo econométrico utilizado (eficiência, vida útil e preço médio), o market share estimado e a economia resultante. Em 2030, projeta-se uma economia de 49 TWh, o que representa uma economia de 48% em relação ao cenário sem LED e uma redução de emissão de 3,9 MtCO₂e. No acumulado, a redução no consumo é equivalente a 431 TWh, representando uma economia acumulada de 23% nos próximos 15 anos, e uma redução de emissão de 32,2 MtCO₂e (equivalente a uma quantidade anualmente produzida por 54 Milhões de carros ou absorvida por 215 Milhões de árvores).

Tabela 5-1: Resultados – Economia de energia (Autor).

Premissas LED	2010	2015	2020	2025	2030	Acumulado
Eficiência (lm/W)	64	79	95	110	126	-
Vida Útil ('000 horas)	36	45	48	50	52	-
Preço Médio (R\$)	98	34	23	17	13	-
Market Share (%)	2%	20%	62%	84%	87%	-
Economia de Energia (TWh)	0	2	18	37	49	431
Residencial	0	1	7	15	20	175
Comercial	0	1	8	16	21	184
Industrial	0	0	3	6	8	72
Economia	0%	3%	21%	38%	48%	23%
Redução de emissão (MtCO₂e)	0,0	0,2	1,3	2,7	3,9	32,2

Até 2030, espera-se que 2,5 bilhões de lâmpadas LED sejam instaladas no Brasil, resultando em uma economia acumulada de 431 TWh, o que é equivalente a cinco vezes a geração média de energia da hidrelétrica de Itaipu, oitenta e seis vezes a geração de energia na Usina Angra I (2014), e três vezes o consumo energético do estado de São Paulo (2014). O custo final, considerando a tarifa de 0,40 R\$/kWh, dessa energia para o consumidor é igual a R\$ 29 Bilhões.

Esses resultados são consistentes com outras análises e estudos realizados. O Ministério de Minas e Energia (MME, 2015) estimou que a retirada das lâmpadas incandescentes do mercado representaria uma economia de cerca de 10 TWh/ano (segmento residencial) nos próximos vinte anos. Outros estudos projetam, no setor residencial, economia de 22 TWh/ano em 2021 (FERREIRA, TOMIOKA, 2014), ou 146 TWh acumulado até 2030 (BASTOS, 2011) considerando a substituição por tecnologias de iluminação mais eficientes.

Esses trabalhos, no entanto, não apresentam estimativas para difusão gradual do LED. A Tabela 4-2 apresenta uma comparação de sete modelos de previsão da adoção de tecnologia LED para contextualizar. Percebe-se que, embora as projeções se diferenciem em diversos aspectos (metodologia, região de cobertura e unidade de medição), as projeções são bastante consistentes – todos concluíram que a tecnologia LED terá um crescimento muito acelerado até o fim dessa década, representando cerca de 60% das vendas em 2020.

Além disso, quanto mais recente a projeção é, para um mesmo estudo, mais otimista são as taxas de penetração da tecnologia – os estudos do US Department of Energy e McKinsey podem ser usados como exemplo. A revisão, para cima, das projeções indica que a difusão do LED se deu de forma mais rápida do que estimavam.

Tabela 5-2: Modelo de previsão – Comparação do Market Share LED

Market Share LED	Região	2015	2020	2030
Estimativas do Autor	Brasil	20%	62%	87%
US Department of Energy 2014	EUA	33%	48%	84%
JP Morgan 2013	Mundo	19%	59%	-
McKinsey 2012	Mundo	40%	69%	-
McKinsey 2012	Brasil	35%	63%	-
US Department of Energy 2012	EUA	10%	36%	74%
McKinsey 2011	Mundo	36%	66%	-
McKinsey 2011	Brasil	31%	60%	-
IMS Research 2011	Mundo	46%	50%	-
Cree 2010	Mundo	33%	75%	-
Média		30%	59%	82%

Essa comparação indica que, em 2015, a adoção do LED no Brasil está atrasada – um ou dois anos de atraso – quando comparada com outras regiões como Estados Unidos e Europa. No entanto, à medida que essa tecnologia rompe as barreiras iniciais de adoção no país, a difusão se dará de forma acelerada até 2020, uma vez que o preço internacional já terá reduzido significativamente.

5.2 Discussão e Limitações

O modelo econométrico foi construído a partir de uma série de hipóteses simplificadoras para acomodar a complexidade do mercado de iluminação no Brasil. Essas premissas estão resumidas abaixo, elas representam as melhores estimativas definidas a partir de dados públicos do governo, de empresas do setor e experts. No entanto, esse conjunto de premissas introduz grande incerteza ao modelo.

5.2.1 Fluxo constante de iluminação por m^2

Para se projetar o consumo energético, considera-se a densidade de fluxo luminoso, medida em lúmen por m^2 , constante – garantindo que a substituição por tecnologia LED não resultará em prejuízo aos níveis de iluminação atuais. Essa simplificação não reflete exatamente a realidade e pode subestimar o potencial de economia. Diversos locais devem possuir projetos de iluminação superdimensionados e a tecnologia LED pode alcançar níveis de iluminação adequados com menos lúmens – por exemplo, devido a uma melhor uniformidade, direcionamento (Figura 5-3) ou desempenho de cor (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

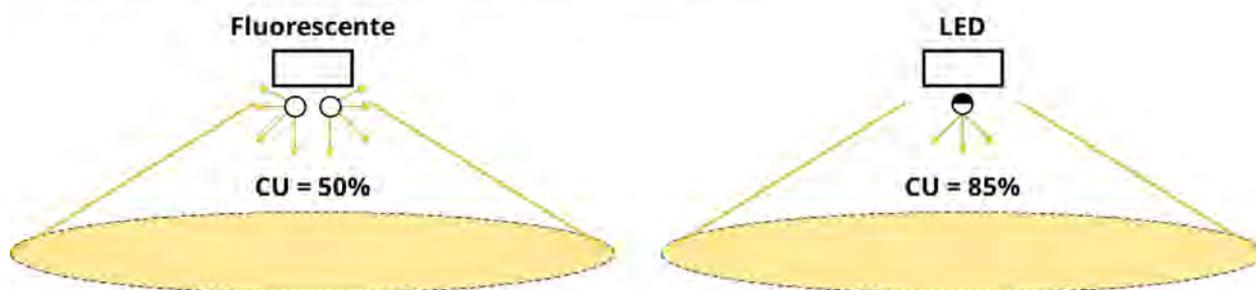


Figura 5-3: Fluorescente vs LED – Comparação do coeficiente de utilização devido ao direcionamento da Luz (Autor).

5.2.2 Taxa constante de renovação

O modelo considera uma taxa constante, 5% por ano (período de 20 anos), de renovação relacionada a instalação de tecnologias mais eficientes antes que o produto chegue a queimar. Essas renovações incluem upgrades, retrofits e reformas – que podem ser realizadas com intenção de reduzir o consumo (retrofit verde) ou também por questões estéticas. Com o aumento da conscientização da população a respeito de mudanças climáticas e impactos ambientais, a frequência desses retrofits tende a aumentar. Caso a renovação ocorra mais rapidamente, acelerando, portanto, a penetração do LED na base instalada em relação às estimativas iniciais, o modelo utilizado deve subestimar o potencial de economia. A análise de sensibilidade, *ceteris paribus*, (Figura 5-4) para esse parâmetro mostra que o incremento de 1% na taxa de renovação resulta em 0,8% de ganho em economia potencial (de 431 TWh para 434 TWh). Para um incremento de 5% (taxa de renovação igual a 10%), a penetração do LED na base instalada em 2030 alcança 95% e a economia cresce 4% em relação ao cenário base, chegando a 447 TWh.

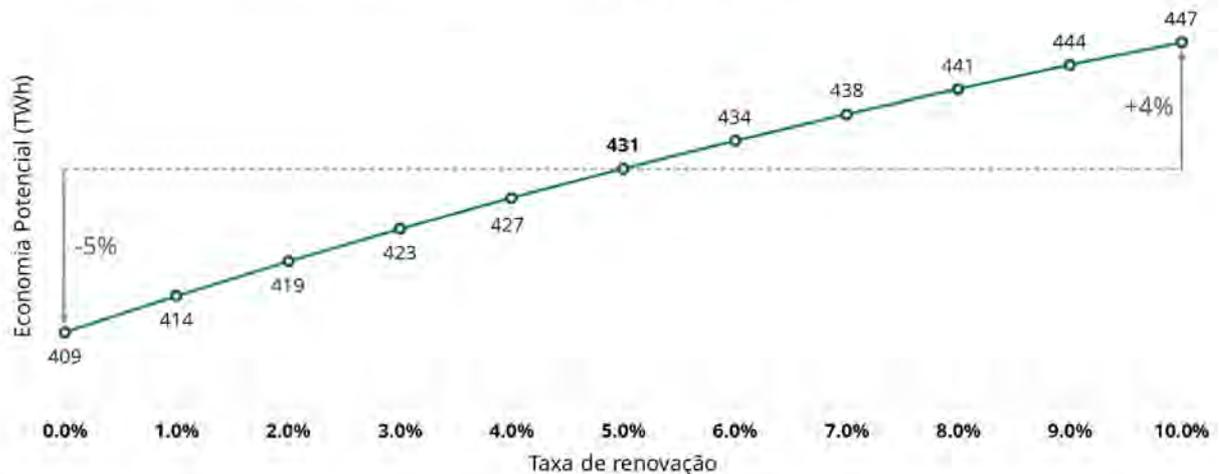


Figura 5-4: Análise de sensibilidade – Economia Potencial (TWh) e Taxa de Renovação das lâmpadas (Autor).

5.2.3 Curva de preço e performance para tecnologia LED

As curvas projetadas para preço e performance da tecnologia LED ao longo do período são variáveis que impactam os resultados de maneira relevante. As curvas projetadas para preço, vida útil e eficiência podem subestimar ou superestimar a penetração do LED no mercado e a economia potencial resultante. Dessas, as que possuem maior impacto na economia projetada são as curvas de preço e eficiência. A análise de sensibilidade (Figura 5-5), *ceteris paribus*, para o preço mostra

que o a queda em 1% na taxa média de erosão do preço (de -7,0% a.a. para -8,0% a.a.), nos próximos 15 anos, resulta em 1,8% de ganho em economia potencial – de 431 TWh para 439 TWh. Para uma queda de 2,5% (de -7,0% a.a. para -9,5% a.a.), a penetração do LED na base instalada, em 2030, alcança 91% e a economia cresce 4% em relação ao cenário base, chegando a 447 TWh. No entanto, para uma queda menos acentuada dos preços, com taxa média de redução igual a -4,5% a.a., a economia potencial resultante é 10% inferior – de 431 TWh para 390 TWh.

Esse resultado é consistente com a realidade, a queda acentuada dos preços implica em uma adoção mais rápida do LED e, portanto, em maior economia no intervalo de estudo. O contrário também é verdade, a queda mais lenta dos preços resulta em uma adoção tardia da tecnologia e, portanto, em uma economia menor. O formato assintótico da curva indica que reduções mais acentuadas dos preços encontrarão um limite teórico de economia energética.

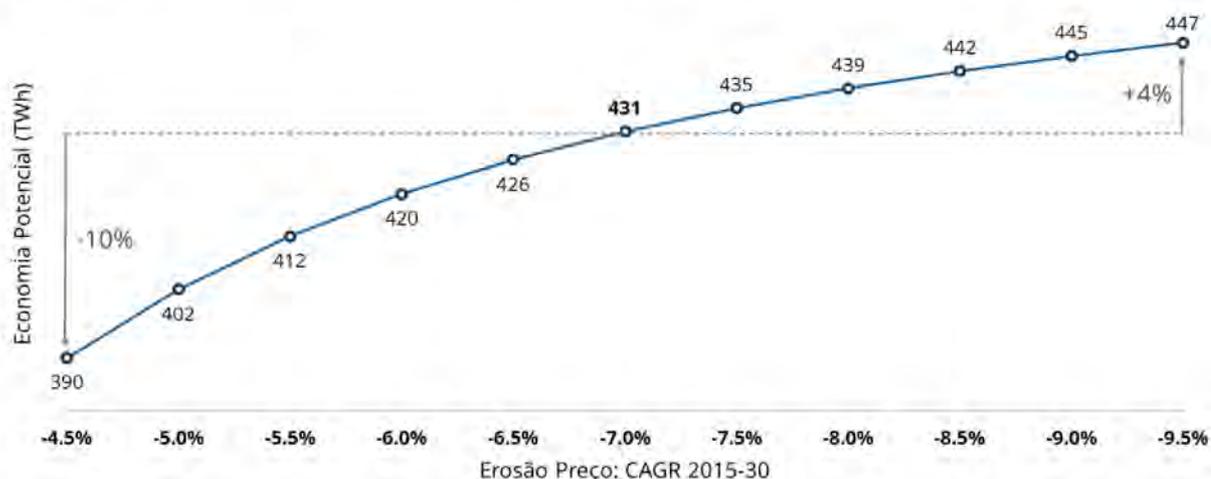


Figura 5-5: Análise de sensibilidade – Economia Potencial (TWh) e Erosão média anual do preço entre 2015 e 2030 (Autor).

A análise de sensibilidade (Figura 5-6), ceteris paribus, para a eficiência mostra que o incremento de 1% na taxa média de ganho de eficiência (de 3,0% a.a. para 4,0% a.a.) nos próximos 15 anos, chegando em 137 lm/W, resulta em 20% mais economia – de 431 TWh para 517 TWh. Para um incremento de 2,5% (de 3,0% a.a. para 5,5% a.a.), com a eficiência luminosa igual a 203 lm/W em 2030, a economia cresce 46% em relação ao cenário base, chegando a 628 TWh. No entanto, para um ganho mais modesto de eficiência, com taxa média igual a 0,5% a.a., a economia potencial é 60% inferior – de 431 TWh para 174 TWh.



Figura 5-6: Análise de sensibilidade – Economia Potencial (TWh) e Ganho de Eficiência médio anual entre 2015 e 2030 (Autor).

5.2.4 Projeção de Market Share

O modelo logit utilizado assume que a decisão binária de se adotar a tecnologia LED depende, a princípio, de três variáveis relacionadas à performance dessa tecnologia: preço, eficiência e vida útil. Como o histórico utilizado para a projeção é bastante limitado, não se relacionou o consumo com outras variáveis macroeconômicas importantes, como PIB, índice de Gini e tarifa de energia elétrica. O modelo pode, portanto, subestimar ou superestimar a penetração do LED no mercado e a economia potencial resultante.

Além disso, sabe-se que tecnologias mais recentes estão em desvantagem relativa em comparação com tecnologias existentes mais bem estabelecidas. A penetração no mercado está sujeita a certas barreiras, incluindo, mas não se limitando, a aceitação e disponibilidade da tecnologia – tais barreiras apenas se aplicam a novos produtos, que podem, inicialmente, ser desconhecidos pelos consumidores ou podem não estar prontamente disponíveis para a compra.

Quando um produto se estabelece no mercado, no entanto, os benefícios são comunicados através do marketing “boca a boca” (word of mouth) para a base de consumidores, os fabricantes e distribuidores são capazes de alavancar a capacidade produtiva e os canais de distribuição (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

Para considerar esses fatores, o modelo assume uma curva de difusão da tecnologia LED tomando como base a taxa histórica de penetração de outras tecnologias de iluminação (Figura 5-7). Dependendo de como LEDs são comercializados essa premissa pode subestimar ou superestimar a penetração do LED no mercado e a economia potencial resultante.

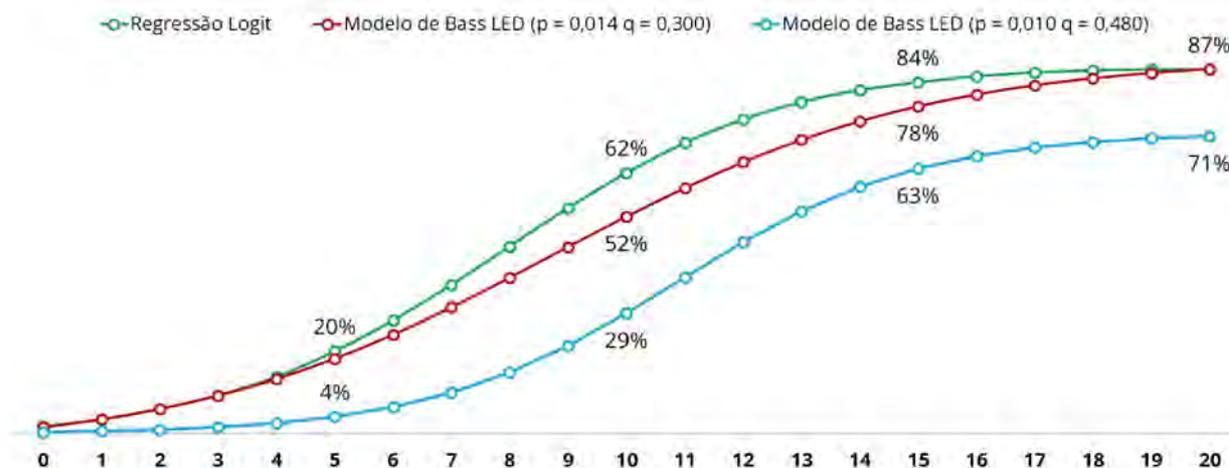


Figura 5-7: Modelos de difusão – Comparação modelo de Bass para LED, Fluorescente e resultado da regressão (Autor).

5.2.5 Ausência de diferenciação para os segmentos e por tipo de produto

Esse modelo assume – por simplicidade, dado a falta de dados sobre cada segmento – que o market share do LED é igual nos mercados residencial, industrial e comercial. Essa premissa, obviamente, não é válida, uma vez que a decisão de se adotar essa tecnologia é diferente em cada um desses setores. Nos segmentos industrial e comercial, por exemplo, a decisão é tomada pelo gerente da unidade (facility manager) que está preocupado com a vida útil e eficiência do produto (como forma de mitigar o efeito de aumento da tarifa), mesmo que isso signifique um custo inicial maior.

Portanto, a penetração da tecnologia LED deve ocorrer de modo diferente nesses segmentos – o Departamento de Energia dos EUA (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014) estima que a penetração dessa tecnologia em 2030 será 83% no segmento residencial, 82% no comercial e 87% no Industrial. Além disso, por limitação de escopo, esse trabalho não faz projeções no segmento Exterior (Outdoor) – isto é, ruas, avenidas, estacionamentos, garagens, e exterior de estabelecimentos – que deve apresentar adoção bastante acelerada do LED nos próximos anos (75% em 2020 e 99% em 2030, segundo o estudo).

Por fim, a penetração da tecnologia é considerada isonômica em todas as linhas de produto. Isto é, a adoção do LED é a mesma para lâmpadas comuns (A-60), lâmpadas direcionais, lâmpadas decorativas, tubulares, luminárias e luminárias industriais, por exemplo. Essa premissa também não é verdadeira e pode subestimar ou superestimar a penetração do LED no mercado e a economia potencial resultante.

5.2.6 Predominância de sistemas de controle

Um dos pontos fortes dos LEDs é a sua compatibilidade com controles de iluminação. A adoção dessa tecnologia deve ser acompanhada por um uso maior de sistemas de controle. O uso de controles de iluminação, como sensores de movimento ou sensores de ocupação, permitirá resposta instantânea para a demanda de iluminação e, desse modo, viabilizar economia de energia, fornecendo luz artificial somente quando e onde for necessário. O modelo não considera esse fenômeno nas projeções. Esta suposição provavelmente subestima as economias de energia previstas, uma vez que controles estão se tornando cada vez mais populares em renovações do sistema de iluminação/retrofits e novas construções, particularmente onde eles podem ser facilmente integrados nas luminárias LED (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

5.2.7 Outras incertezas

Há uma série de avanços e mudanças que podem ocorrer no mercado de iluminação nos próximos anos, podendo afetá-lo de modo relevante ou disruptivo. De forma resumida, o modelo não considera esses eventos uma vez que a probabilidade de vingarem é, atualmente, especulativa. Estudos futuros devem endereçar esses temas, se necessário. Os itens abaixo são apontados pelo Departamento Americano de Energia como incertezas futuras. Devido à grande incerteza associada a cada um deles, a hipótese de não os considerar pode subestimar ou superestimar a penetração do LED no mercado e a economia potencial resultante.

i) Efeito rebote – Os usuários podem aumentar o uso de iluminação diária (em horas), já que o custo associado à tecnologia LED é menor;

ii) Aumento da utilidade LED – A procura de LEDs pode crescer mais rápido devido aos seus atributos não relacionados à iluminação, tais como a sua capacidade de transmitir dados;

iii) Novas tecnologias – a iluminação OLED (organic LED), iluminação laser, ou outra tecnologia imprevista podem ser introduzidos ou ganhar market share significativo;

iv) Ações do governo – As ações do governo, como novos padrões de eficiência ou incentivos fiscais podem afetar a futura adoção de produtos de iluminação LED.

6 CONCLUSÕES

Nas últimas décadas, foi observado, no Brasil, um crescimento acelerado na demanda por energia elétrica (Figura 1-7), impulsionada por questões demográficas e sociais (Figura 1-1 a Figura 1-6). A oferta energética, por sua vez, é pouco flexível e apresenta forte dependência do regime hidrológico – cerca de 70% da geração é hidráulica (EPE/MME). Nesse cenário de demanda crescente e oferta restrita, a utilização de tecnologias eficientes, como o LED, deve contribuir para flexibilizar essa equação e garantir a sustentabilidade (Figura 6-1).



Figura 6-1: Eficiência energética, o último recurso.

Mais eficiente e com vida útil estendida, o LED apresenta vantagens em relação às tecnologias já estabelecidas. Contudo, a falta de conhecimento, a dificuldade para encontrá-lo e o preço ainda são barreiras para sua adoção. Nas próximas décadas, se as projeções de preço e performance forem alcançadas (Tabela 5-1), essa tecnologia promete oferecer economia de energia relevante.

No cenário projetado através do modelo econométrico Logit em conjunto com a curva de Bass, produtos LED vão substituir pontos de luz em todos os segmentos até o final do período de análise (Figura 5-2), representarão cerca de 92% da base instalada de quase 2 bilhões de lâmpadas em 2030, elevando a eficiência média para 121 lm/W (90% superior aos níveis atuais).

O consumo energético com iluminação, devido à difusão dessa tecnologia, é projetado para reduzir 21% em 2020 e 48% em 2030, resultando em uma economia acumulada de 431 TWh (Figura 5-1) – equivalente a três vezes o consumo energético do estado de São Paulo e cinco vezes a geração

da usina hidrelétrica de Itaipu (números de 2014). O custo final dessa energia para o consumidor é equivalente a R\$ 29 Bilhões (Figura 6-2).

A economia de energia mais relevante vai acontecer em aplicações onde os ganhos anuais com eficiência energética impulsionam a tomada de decisão e onde as tecnologias ineficientes permanecem dominantes devido a características como tamanho, forma e restrições de temperatura de cor (que o LED deve atender). Em resumo, os setores comerciais e residenciais têm o maior potencial de poupança de energia já que apresentam a maior estoque de lúmen-hora e ainda possuem uma participação relevante de lâmpadas incandescentes.



Figura 6-2: Benefícios proporcionados pela adoção do LED (Autor).

REFERÊNCIAS

- ABILUMI, **Importação Brasileira de Lâmpadas**, 2007
- ABILUX, **Uso do LED revoluciona o setor de iluminação**, 2015
- ABNT NBR ISO CIE 8995, **Iluminação de ambientes de trabalho**, 2013
- BASS, FRANK, **A new product growth for model consumer durables**, 1969
- BASTOS, F. C., **Análise de Política de banimento de lâmpadas incandescentes do mercado brasileiro**, 2011
- BLEY, F. B., **LEDs versus Lâmpadas Convencionais, Viabilizando a troca**, 2012
- BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION (BPA), **LED market intelligence Report**, 2015
- CAO, X., **The future demand for alternative fuel passenger vehicles, a diffusion of innovation approach**, 2004
- CARDOSO, R. B.; NOGUEIRA, L. A. H., **Avaliação do impacto energético do uso de fluorescentes compactas no setor residencial brasileiro**, 2007
- CEA, R. V., **Research on the Best Market Applications for Light Lab Energy**, 2010
- CERVELIN, SEVERINO, **Instalações Elétricas Prediais**, 2010
- COSTA, D. C., **Estudo e Determinação das Características de Lâmpadas de Diferentes Tipos**, 2010
- CSIL, **LEDs and the worldwide market for lighting fixtures**, 2012
- DELOITTE, **What is the impact of mobile telephony on economic growth**, 2012
- EDSON, **Technology Sector, LED spotlight**, 2013
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Expectativas de Crescimento do Consumo de Energia Elétrica por Classe**, 2012
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Projeção Consumo (2013 2020)**, 2012
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Estudos da demanda de Energia 2050**, 2014

EMPSON, T., **Understanding Light Bulbs**, 2012

ENEDIR, GHISI, **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação**, 1997

EPA, **Next Generation Lighting Programs**, 2011

EXXON MOBIL, **Panorama Energético, Perspectivas para 2040**, 2014

FERREIRA A. R.; TOMIOKA, J., **Illuminação de estado sólido, economia**, 2014

FIGUEIREDO, JULIO CÉSAR BASTOS DE, **Modelo de Difusão de Bass, uma aplicação para a indústria de motocicleta no Brasil**, 2010

FLC, **Preço lâmpadas LED**, 2015

FOLHA UOL, **Japoneses inventores do LED azul ganham o Nobel de física**, 2014

GHISE, E; PESSOA, J. L. N., **Nota Técnica, Eficiência Luminosa de produtos LED encontrados no mercado brasileiro**, 2015

HOLLAND, C., **Are LEDs the Next CFL, a diffusion of Innovation Analysis**, 2014

IEA , **Phase out of Incandescent Lamps Implications for International supply and demand for regulatory compliant lamps**, 2010

IMS, **LED Supply and Demand**, 2013

JP MORGAN, **European Capital Goods Lighting & LED**, 2013

KIJEK, A.; KIJEK, T., **Modelling of innovation diffusion**, 2010

KOHLI, LEHMANN AND PAE, **Extent and Impact of Incubation**, 2009

LEEKLAKULTHANIT, OROSE, **The factors affecting the adoption of LED Lamps**, 2014

LEI 10.295, **Política nacional de conservação e uso racional de energia**, 2001

LUME ARQUITETURA, **Aula 01 Fluorescente**, 2012

LUME ARQUITETURA, **Aula 08 Incandescente**, 2012

LUME ARQUITETURA, **Aula 23 LED**, 2012

LUMICENTER, **Catalogo**, 2014

LUMIERE, **A regulamentação da Lâmpada LED no Brasil**, 2015

MARTELETO, D., **Avaliação do diodo emissor de luz (LED) para iluminação de interiores**, 2011

MCKINSEY, **Lighting the way Perspectives on the global lighting market**, 2011

MCKINSEY, **Lighting the way, a bright future ahead with LED**, 2012

MCKINSEY, **Lighting the way Perspectives on the global lighting market**, 2012

MCKINSEY, **Mckinsey on Sustainability & Resource Productivity**, 2012

MME, **O que fazer para tornar mais eficiente o uso de energia elétrica em prédios públicos**, 2014

MME, **Portaria Interministerial 1007**, 2010

MORGAN STANLEY, **Osram Licht, Look beyond LED**, 2013

NAVIGANT CONSULTING, **U.S. Lighting Market Characterization, National Lighting Inventory and Energy Consumption Estimate**, 2012

NOVICKI, J. M.; MARTINES, R., **LEDs para iluminação Pública**, 2008

OSRAM, **Life Cycle Assessment of Illuminants, A comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps**, 2009

PINTO, R. A., **Projeto e Implementação de Lâmpadas para Iluminação de interiores empregando diodos emissores de luz (LEDS)**, 2008

PNNL, **Methodological Framework for Analysis of Buildings Related Programs**, 2004

PORTARIA 144, **INMETRO**, 2015

PORTARIA 389, **INMETRO**, 2014

PROCEL, **Coeficientes de Destinação BEU**, 2005

PROCEL, **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**, 2005

ROGERS, EVERETT, **Diffusion of Innovations**, 2003

ROIZENBLATT, I., **Contribuição para uma iluminação eficiente**, 2003

SCHULZ, W., **Iluminação Pública**, 2011

SCOPACASA, V. A., **Introdução à Tecnologia LED**, 2012

SOUZA, R. C., **Avaliação de Mercado de Eficiência Energética no Brasil**, 2010

SOUZE, M. DE A., **Estratégias para redução e conservação de energia elétrica em iluminação**, 2010

UBS, **North American Lighting Survey**, 2014

US DEPARTMENT OF ENERGY, **Lighting Market Characterization**, 2010

US DEPARTMENT OF ENERGY, **Energy Savings Forecast of Solid State Lighting in General Illumination Application**, 2012

US DEPARTMENT OF ENERGY, **Residential Lighting Consumption Study, Estimation Framework and Initial Estimates**, 2012

US DEPARTMENT OF ENERGY, **Energy Savings Forecast of Solid State Lighting in General Illumination Application**, 2014

US DEPARTMENT OF ENERGY, **Residential Demand Module of the National Energy Modeling System**, 2013

US DEPARTMENT OF ENERGY, **SSL Pricing and Efficacy Trend Analysis**, 2013

US DEPARTMENT OF ENERGY, **Solid State Lighting Research and Development**, 2014

US DEPARTMENT OF ENERGY, **Adoption of Light -Emitting Diodes in Common Lighting Applications**, 2015

US DEPARTMENT OF ENERGY, **Should all your sockets be filled with LEDs**, 2015

VALOR ECONÔMICO, **Eficiência energética, o nosso último recurso**, 2015

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 17 de novembro de 2015	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-033/2015	4. N° DE PÁGINAS 70
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Em busca da eficiência energética: Perspectivas do LED na iluminação do Brasil			
6. AUTOR: Gustavo Cellet Marques			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Econometria; 2. Difusão de tecnologia; 3. Iluminação; 4. Inovação; 5. Sustentabilidade.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Iluminação elétrica; Desenvolvimento sustentável; Inovações tecnológicas; Econometria; Construção civil; Engenharia Civil.			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Alessandro Vinícius Marques de Oliveira; Publicado em 2015.			
11. RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo comparar as diferentes tecnologias de iluminação existentes, projetar um cenário para a adoção do LED (Diodo Emissor de Luz) no Brasil e calcular os ganhos associados até 2030. Para isso, foi construído um modelo econométrico Logit, que leva em consideração melhorias na eficiência e no preço, em conjunto com uma curva de difusão de Bass, para prever a penetração dessa tecnologia. Em 2030, é esperado que o LED domine as vendas, representando 87% do mercado. O consumo energético projetado foi contrastado com o do cenário hipotético onde o LED nunca existiu, resultando em uma redução de 48% do consumo com iluminação nesse ano. No acumulado, a economia chega a 431 TWh, equivalente três vezes o consumo energético do estado de São Paulo em 2014, a cinco vezes a geração média anual da usina hidrelétrica de Itaipu, representando uma redução de custo final dessa energia para o consumidor equivalente a R\$ 29 Bilhões.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			