



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RAMON LOPES DE SOUSA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DO
BRASIL**

FORTALEZA – CE

2021

RAMON LOPES DE SOUSA

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DO BRASIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.

FORTALEZA – CE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S698a Sousa, Ramon Lopes de.
Análise da eficiência do sistema de iluminação pública do Brasil / Ramon Lopes de Sousa. – 2021.
78 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.
1. Iluminação pública. 2. Lâmpadas. 3. Eficiência energética. 4. Eficiência energética. I. Título.
CDD 621.3
-

RAMON LOPES DE SOUSA

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DO BRASIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 31/08/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Breno Bezerra Freitas
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho aos meus pais, Terezinha e Pedro, que de todas as formas possíveis acreditaram em mim, e a todos aqueles que, assim como eles, acreditam na transformação a partir da educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a quem eu sempre fiz questão de recorrer quando nada parecia dar certo e quando tudo funcionava.

Agradeço a toda minha família, que em momento algum duvidou do meu potencial. Com toda certeza, posso afirmar que eu só cheguei nessa etapa porque eu tive em casa todo o suporte necessário. Cada vez que alguém falava que eu estudava demais, eu só pensava que no final tudo valeria a pena. Ainda não sei exatamente o que é esse final, mas sei que essa pesquisa é um grande passo.

Agradeço a todos os meus amigos da UFC, cujas trajetórias me inspiraram, possibilitando que eu mantivesse o foco necessário para realizar essa pesquisa. A alegria deles ao saber que eu tinha chegado na fase final da graduação me motivou e me deu confiança.

Agradeço ao PACCE, programa da UFC na qual fui bolsista por dois anos. Além das pessoas maravilhosas que conheci e de tudo o que aprendi, foi a partir do PACCE que adquiri um maior conhecimento sobre a estrutura de um trabalho científico, o que facilitou muito a elaboração da minha pesquisa.

Agradeço à Enactus UFC, organização de empreendedorismo social que fiz parte por três anos e que me fez amadurecer como profissional e ser humano. Foi a partir dessa experiência que pude entender mais sobre sustentabilidade. Eu tinha em mente que, independentemente do tema que eu escolhesse para o meu TCC, eu iria falar sobre sustentabilidade. Essa foi uma das razões pelas quais escolhi a eficiência energética como grande área da minha pesquisa. Outro grande aprendizado da minha experiência na Enactus foi a importância dos indicadores de resultado, foco da minha pesquisa.

Agradeço a oportunidade que tive de trabalhar em um escritório que tinha a iluminação pública como principal área de atuação. Sem dúvidas, só desenvolvi uma pesquisa com esse tema por conta dessa experiência. Todos os meus insights para essa pesquisa vieram a partir das minhas vivências no estágio.

Agradeço ao professor Raphael, meu orientador nesta pesquisa, por aceitar meu convite. Seu interesse na área de sustentabilidade e eficiência energética me faz ter a certeza de que fiz a escolha certa. Agradeço também ao Breno e ao professor Raimundo, que aceitaram fazer parte da minha banca examinadora.

Agradeço a UFC e a todos aqueles que lutam diariamente pela continuidade da pesquisa, do ensino e da extensão. Viva a educação.

“A luz tem uma função estrutural a desempenhar; ela é, em efeito, o componente fundamental do olhar do cidadão. A luz orienta, destaca, esconde, transforma, integra, isola.”
(Lamas, 2014, p. 171)

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo a análise da eficiência do sistema de Iluminação Pública do Brasil a partir da criação de um indicador geral de desempenho das lâmpadas, visto que elas são o principal elemento da iluminação pública e, portanto, podem contribuir de forma efetiva com a melhoria da eficiência energética através da redução do consumo e da demanda na ponta e da diminuição de desperdícios, atendendo às necessidades da população e não onerando o sistema. A análise individual dos parâmetros de desempenho não permite definir qual tipo de lâmpada é mais eficiente, o que também dificulta o entendimento acerca de como o Brasil tem evoluído e quais as perspectivas de crescimento do sistema de iluminação pública do país. Dessa forma, a partir da definição dos principais parâmetros técnicos e através da coleta dos dados de diferentes modelos de lâmpadas, foi adotado um valor médio para cada parâmetro de desempenho, que em seguida foi normalizado em uma escala de 0 a 5. A partir da atribuição de diferentes pesos para cada parâmetro, foi criado o indicador geral de desempenho das lâmpadas e, tendo como base os levantamentos dos pontos de iluminação pública do Brasil, foi criado também um indicador geral de eficiência do sistema. Os resultados mostraram que as lâmpadas de LED são realmente as mais eficientes do mercado, seguidas pelas lâmpadas de vapor de sódio, predominantes no sistema de Iluminação Pública do Brasil. Além disso, a pesquisa revelou que as mudanças promovidas ao longo das últimas décadas foram positivas, mas o ritmo de modernização é lento e o impacto ainda é insuficiente para que o sistema atinja níveis mais satisfatórios de eficiência. Assim, o desempenho do sistema estará sempre vinculado à sua capacidade de absorver novas tecnologias com rapidez.

Palavras-chave: iluminação pública; lâmpadas; eficiência energética; indicador de desempenho.

ABSTRACT

This research aims to analyze the efficiency of the Public Lighting system in Brazil through the creation of a general indicator of the performance of lamps, since they are the main element of public lighting and, therefore, can effectively contribute to the improving energy efficiency by reducing consumption and demand at the peak and reducing waste, attending the needs of the population, and not burdening the system. The individual analysis of performance parameters does not allow defining which type of lamp is more efficient, which also makes it difficult to understand how Brazil has evolved and what are the prospects for growth in the country's public lighting system. Thus, from the definition of the main technical parameters and by collecting data from different models of lamps, an average value was calculated for each parameter, which was then normalized on a scale from 0 to 5. From the assignment of different weights to each parameter, the general indicator of performance of lamps was created and based on surveys of public lighting points in Brazil, a general indicator of system performance was also created. The results showed that LED lamps are the most efficient on the market, followed by sodium vapor lamps, which are predominant in the Brazilian public lighting system. In addition, the survey revealed the changes promoted over the last decades were positive, but the pace of modernization is slow, and the impact is still insufficient for the system to reach more satisfactory levels of efficiency. Thus, the performance of the system will always be linked to its ability to absorb new technologies quickly.

Keywords: public lighting; lamps; energy efficiency; performance indicator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Comparativo entre duas fontes luminosas com diferentes IRCs.....	27
Figura 2 - Escala de variação da temperatura de cor	27
Figura 3 - Aparência de um mesmo local iluminado por lâmpadas de temperaturas de cor diferentes	28
Figura 4 - Ilustração do conceito da eficiência luminosa	29
Figura 5- Representação gráfica da iluminância	29
Figura 7 - Aplicação de lâmpadas de vapor de sódio em IP.....	33
Figura 8 - Aplicação de lâmpadas de vapor de mercúrio em IP.....	34
Figura 9 - Aplicação de lâmpadas de vapor metálico em IP	35
Figura 10 - Aplicação de lâmpadas incandescentes em IP	36
Figura 11 - Aplicação de lâmpadas mistas em IP.....	37
Figura 12 - Aplicação de lâmpadas fluorescentes em IP.....	39
Figura 13 - Aplicação de lâmpadas de LED em IP	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matriz Elétrica Mundial 2018	16
Gráfico 2 - Tecnologias de lâmpadas utilizadas no sistema de IP brasileiro em 2012.....	18
Gráfico 3 - Distribuição dos pontos de IP no Brasil em 1999.....	24
Gráfico 4 - Distribuição dos pontos de IP do Brasil em 2008.....	25
Gráfico 5 - Composição do indicador geral de cada lâmpada.....	50
Gráfico 6 - Eficiência luminosa normalizada excluindo lâmpadas de LED.....	57
Gráfico 7 - Eficiência luminosa normalizada incluindo lâmpadas de LED	58
Gráfico 8 – Vida mediana normalizada excluindo lâmpadas de LED	59
Gráfico 9 - Vida mediana normalizada incluindo lâmpadas de LED.....	60
Gráfico 10 – IRC normalizado	61
Gráfico 11 – Temperatura de Cor normalizada	62
Gráfico 12 – Manutenção do fluxo luminoso normalizado.....	64
Gráfico 13 – Perda nos reatores normalizada.....	65
Gráfico 14 – THD normalizada.....	66
Gráfico 15 - Indicador geral excluindo lâmpadas de LED.....	67
Gráfico 16 - Indicador geral incluindo lâmpadas de LED.....	68
Gráfico 17- Evolução histórica do indicador geral de eficiência	70
Gráfico 18 - Projeção de crescimento do indicador geral de eficiência	71
Gráfico 19 - Panorama geral do Indicador de eficiência do sistema de IP do Brasil	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Pontos de IP no Brasil em 1999	23
Tabela 2- Pontos de IP no Brasil em 2008	24
Tabela 3- Indicadores de desempenho das lâmpadas de vapor de sódio.....	33
Tabela 4- Indicadores de desempenho de lâmpadas de vapor de mercúrio.....	35
Tabela 5 - Indicadores de desempenho de lâmpadas de vapor metálico	36
Tabela 6- Indicadores de desempenho de lâmpadas incandescentes.....	37
Tabela 7- Indicadores de desempenho de uma lâmpada mista.....	38
Tabela 8- Indicadores de desempenho de lâmpadas fluorescentes.....	39
Tabela 9 - Indicadores de desempenho das lâmpadas de LED.....	41
Tabela 10 - Levantamento dos pontos de IP no Brasil	43
Tabela 11 - Projeção de atualização do sistema de IP	43
Tabela 12 - Quantidade de lâmpadas pesquisadas.....	44
Tabela 13- Valores médios das lâmpadas de Vapor de Sódio.....	52
Tabela 14 - Valores médios das lâmpadas de Vapor de Mercúrio	53
Tabela 15 - Valores médios das lâmpadas de Vapor Metálico.....	53
Tabela 16 - Valores médios das lâmpadas de LED	54
Tabela 17 - Valores médios das lâmpadas fluorescentes	54
Tabela 18 - Valores médios das lâmpadas mistas	55
Tabela 19 - Valores médios das lâmpadas incandescentes.....	56
Tabela 20 – Valores da eficiência luminosa normalizados	57
Tabela 21 - Valores da vida mediana normalizados.....	59
Tabela 22 - Valores do IRC normalizados	61
Tabela 23 - Valores da temperatura de cor normalizados	62
Tabela 24 - Valores da manutenção do fluxo luminoso normalizados	63
Tabela 25 – Valores das perdas nos reatores normalizados	64
Tabela 26 – Valores de THD normalizados	66
Tabela 27 – Indicador geral de desempenho das lâmpadas.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
HID	<i>High Intensity Discharge</i>
IP	Iluminação Pública
IRC	Índice de Reprodução de Cores
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
NBR	Norma Brasileira
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Objetivos.....	19
1.3	Justificativa	19
1.4	Estrutura do trabalho	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Um panorama sobre a iluminação pública brasileira	21
<i>2.1.1</i>	<i>As barreiras e os avanços da eficiência energética no sistema de IP brasileiro</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2</i>	<i>A evolução das tecnologias de lâmpadas na iluminação pública brasileira</i>	<i>22</i>
2.2	Parâmetros técnicos de desempenho das lâmpadas	26
<i>2.2.1</i>	<i>Índice de Reprodução de Cores</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Temperatura de Cor</i>	<i>27</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Fluxo luminoso.....</i>	<i>28</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Eficiência Luminosa</i>	<i>28</i>
<i>2.2.5</i>	<i>Iluminância.....</i>	<i>29</i>
<i>2.2.6</i>	<i>Fator de uniformidade</i>	<i>30</i>
<i>2.2.7</i>	<i>Tempo de vida</i>	<i>30</i>
<i>2.2.8</i>	<i>Fator de depreciação e depreciação do fluxo luminoso.....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.9</i>	<i>Perdas nos reatores.....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.10</i>	<i>Distorção Harmônica Total</i>	<i>32</i>
2.3	Tecnologias das lâmpadas utilizadas na iluminação pública	32
<i>2.3.1</i>	<i>Lâmpadas de vapor de sódio</i>	<i>32</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Lâmpadas de vapor de mercúrio</i>	<i>34</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Lâmpadas de vapor metálico</i>	<i>35</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Lâmpadas incandescentes</i>	<i>36</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Lâmpadas mistas</i>	<i>37</i>
<i>2.3.6</i>	<i>Lâmpadas fluorescentes</i>	<i>38</i>
<i>2.3.7</i>	<i>Lâmpadas de LED</i>	<i>39</i>
3	METODOLOGIA	42
3.1	Caracterização da pesquisa	42
3.2	Coleta de dados.....	42
3.3	Criação do indicador geral de desempenho das lâmpadas.....	45

3.3.1	<i>Valor médio dos parâmetros de desempenho</i>	45
3.3.2	<i>Normalização dos parâmetros de desempenho</i>	46
3.3.3	<i>Composição do indicador geral de desempenho das lâmpadas</i>	48
3.4	Composição do indicador geral de eficiência de sistemas de IP.....	50
3.5	Limitações da pesquisa	51
4	RESULTADOS	52
4.1	Valores médios dos padrões de desempenho por tipo de tecnologia	52
4.1.1	<i>Lâmpadas de vapor de sódio</i>	52
4.1.2	<i>Lâmpadas de vapor de mercúrio</i>	53
4.1.3	<i>Lâmpadas de vapor metálico</i>	53
4.1.4	<i>Lâmpadas de LED</i>	54
4.1.5	<i>Lâmpadas fluorescentes</i>	54
4.1.6	<i>Lâmpadas mistas</i>	55
4.1.7	<i>Lâmpadas incandescentes</i>	55
4.2	Normalização dos indicadores de desempenho.....	56
4.2.1	<i>Eficiência luminosa</i>	56
4.2.2	<i>Vida mediana</i>	58
4.2.3	<i>IRC</i>	60
4.2.4	<i>Temperatura de Cor</i>	62
4.2.5	<i>Manutenção do fluxo luminoso</i>	63
4.2.6	<i>Perda nos reatores</i>	64
4.2.7	<i>Taxa de Distorção Harmônica</i>	65
4.3	Indicador geral de desempenho das lâmpadas	67
4.4	Indicador geral de eficiência do sistema de IP brasileiro	69
5	CONCLUSÕES	73
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos relacionados à eficiência energética em sistemas de iluminação pública (IP), bem como um panorama geral do Brasil quanto aos tipos de tecnologias empregadas na IP, suas características e seus padrões de desempenho.

Além disso, são abordados os objetivos gerais e específicos deste trabalho, a justificativa para o estudo e a estrutura geral da pesquisa.

1.1 Contextualização

A IP é o nome designado ao serviço que tem como objetivo iluminar os espaços de uso público como ruas, avenidas, túneis, viadutos, monumentos, parques e praças. A iluminação de espaços públicos durante o período noturno deve contribuir com a segurança de todos aqueles que utilizam o serviço. Isso significa que ela deve ser, em primeiro lugar, acessível.

A acessibilidade, nesse contexto, refere-se à capacidade de atender toda a população independentemente da localização geográfica, densidade populacional, classe social, dentre outros fatores. Ser um sistema acessível pressupõe não só instalar pontos de IP, mas também garantir um baixo índice de falhas para todos e um curto tempo para manutenção. Assim, além de acessível, tanto o serviço como o produto devem ter qualidade.

A qualidade de um sistema de IP envolve os parâmetros técnicos de desempenho das lâmpadas utilizadas, como o Índice de Reprodução de Cores (IRC), o fluxo luminoso, a eficiência luminosa, a gama de potência e o tempo de vida. Atender padrões de desempenho é essencial para garantir uma iluminação que, além de acessível, esteja adequada aos requisitos do local. Todavia, além da viabilidade técnica, a operação do sistema de IP deve ser economicamente viável.

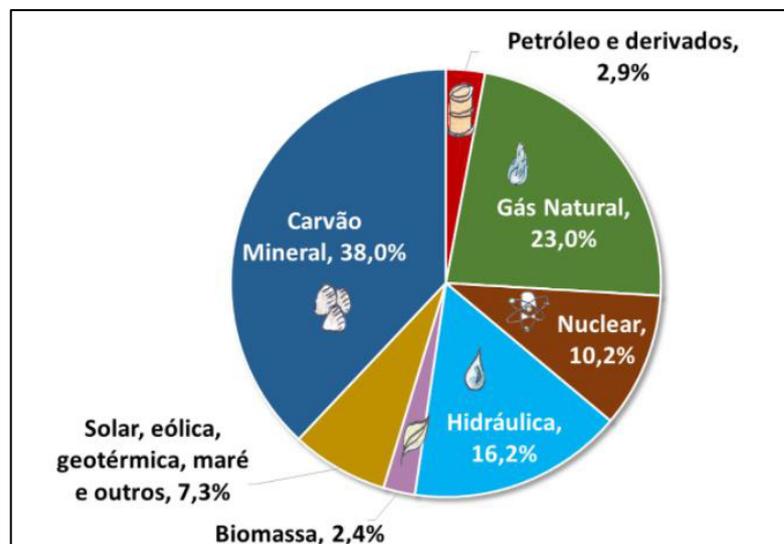
O custo para projeto, instalação, operação e manutenção do sistema de IP, assim como em qualquer outro tipo de serviço, é um fator determinante para a tomada de decisão acerca da modernização e adequação do sistema às necessidades da população. Assim, quando se trata de planejamento e operação da IP, deve-se haver uma convergência entre acessibilidade, qualidade e custo. Nesse sentido, o sistema necessita ser, em todos os seus aspectos, eficiente.

A ciência da Administração define a eficiência, de maneira genérica, como fazer algo adequadamente, utilizando o mínimo de recursos possíveis, isto é, executar da melhor forma sem gerar perdas ou desperdícios.

O conceito de eficiência está, portanto, atrelado à definição de sustentabilidade, que, nesse contexto, se refere à interdependência entre os pilares econômico, social e ambiental que norteiam o debate acerca do uso consciente dos recursos naturais.

Nesse sentido, é impossível dissociar a produção e o consumo de energia elétrica do campo da Sustentabilidade. Isso porque, de acordo com dados da *International Energy Agency* (IEA), mais de 63 % da matriz elétrica mundial de 2018 era proveniente de fontes não renováveis (carvão, gás natural e derivados do petróleo), conforme mostra o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Matriz Elétrica Mundial 2018



Fonte: IEA, 2020

A Agenda 2030, proposta pela Organização das Nações Unidas (ONU), em seu Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 7: Energia Acessível e Limpa, ressalta a importância da transição energética, de fontes não renováveis para fontes renováveis limpas. Ela também estabelece como metas a expansão da infraestrutura, modernização das tecnologias para o fornecimento de serviços de energia e a melhoria da taxa global de eficiência energética.

A partir da definição de eficiência tanto sob a ótica da Administração como através dos conceitos ligados ao Desenvolvimento Sustentável, é possível definir que a eficiência energética se refere à utilização racional da energia, levando em consideração aspectos econômicos, sociais e ambientais. A eficiência energética envolve tanto a criação de novas práticas do uso de energia elétrica como o estímulo ao desenvolvimento de novas tecnologias, com foco na economia de energia e na demanda evitada.

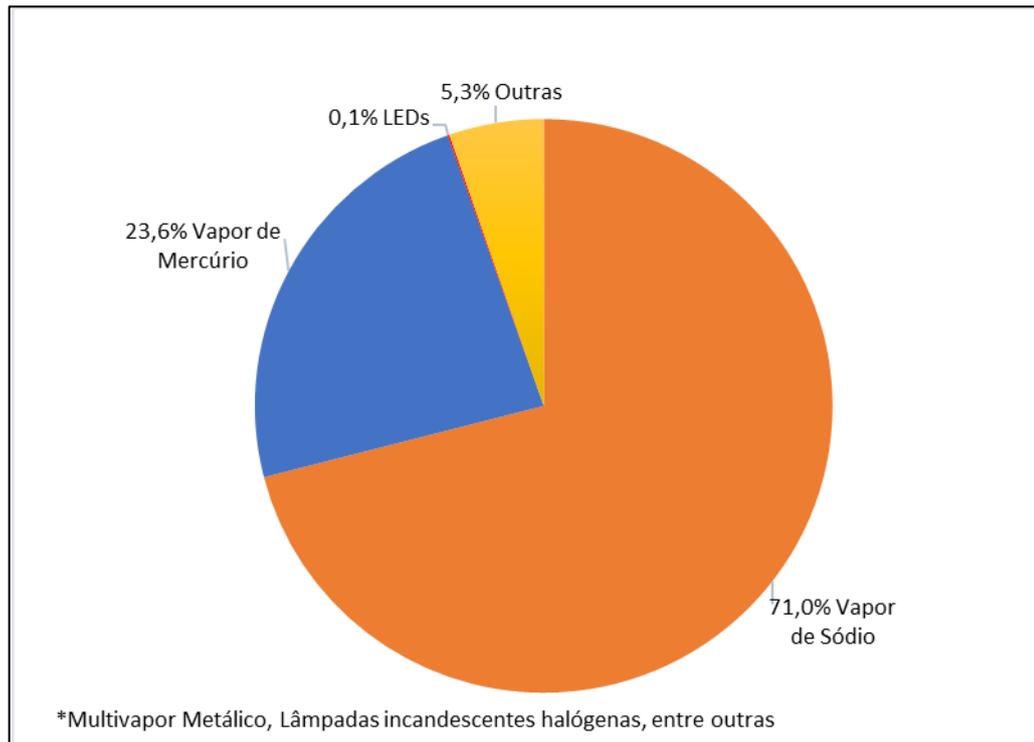
As principais ações para a melhoria da eficiência energética na iluminação estão relacionadas à substituição de lâmpadas. A tecnologia incandescente, por exemplo, utilizada em larga escala desde o século XIX, é conhecida por apresentar uma eficiência baixíssima, já que apenas 5% da potência requerida é transformada em luz, sendo o restante dissipado na forma de calor. Além do baixo rendimento, seu tempo de vida útil é de cerca de 1000 horas, o que aumenta a frequência de manutenção do sistema.

Esses são os parâmetros mais básicos a serem analisados, mas não os únicos. Em lâmpadas de descarga de alta pressão, que substituíram as lâmpadas incandescentes, a presença de reatores eletromagnéticos também é uma fonte de perdas. Comparando as lâmpadas de vapor de mercúrio e as de vapor de sódio, dois tipos de lâmpadas de descarga, elas diferem na eficiência, no IRC e no fluxo luminoso.

A tecnologia de lâmpadas de Diodo Emissor de Luz (LED – sigla em inglês), por sua vez, mostra-se como uma boa alternativa para ser aplicada em sistemas de IP por apresentar bons índices de eficiência, além de uma excelente durabilidade. Contudo, como seus custos ainda são bem elevados quando comparados a outros tipos de lâmpadas, nem sempre essa opção é viável economicamente. Nesse sentido, percebe-se que não é possível analisar os parâmetros de desempenho de forma independente. Portanto, a substituição de lâmpadas deve ser bem planejada.

De acordo com um estudo do Banco Mundial divulgado em 2017, estima-se que existem no Brasil cerca de 18 milhões de pontos de IP, o que representa cerca de 4,3 % de todo o consumo de energia elétrica do país. A pesquisa ainda revela que, em 2012, mais de 70 % das lâmpadas eram de vapor de sódio de alta pressão. Em conjunto com as lâmpadas de vapor de mercúrio, elas formavam quase 95 % de toda a tecnologia de lâmpadas utilizadas no sistema de IP brasileiro, conforme mostrado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Tecnologias de lâmpadas utilizadas no sistema de IP brasileiro em 2012



Fonte: Banco Mundial, 2017

Apesar de a predominância de lâmpadas de descarga de alta pressão no cenário da IP brasileira não ser um fato recente, visto que o levantamento cadastral de lâmpadas do sistema realizado pela Eletrobrás em 1999 já mostrava que mais de 80% das lâmpadas instaladas apresentavam essa tecnologia, houve uma grande mudança em sua distribuição, já que naquela época as lâmpadas de vapor de mercúrio eram maioria, representando 71,5 % de todos os quase 13 milhões de pontos cadastrados na época.

Em termos de eficiência energética, tal mudança trouxe bons resultados, uma vez que a eficiência luminosa em lâmpadas de vapor de sódio varia entre 80 e 150 lm/W, enquanto em lâmpadas de vapor de mercúrio esse valor geralmente não ultrapassa 60 lm/W. Isso significa que uma lâmpada de vapor de mercúrio pode ser substituída por uma lâmpada de vapor de sódio com metade da potência sem qualquer prejuízo ao fluxo luminoso. Por outro lado, a qualidade da iluminação é afetada, uma vez que as lâmpadas de vapor de sódio têm um IRC inferior ao das lâmpadas de vapor de mercúrio.

Ainda de acordo com o estudo do Banco Mundial (2017), as lâmpadas de LED, apesar de o custo para cada 1000 lumens produzidos ter caído de US\$ 32 para US\$ 3,45 entre os anos de 2007 e 2012, ainda encontram no aspecto financeiro o principal obstáculo para seu uso em larga escala na IP. Com essa tendência de redução do custo, a difusão de lâmpadas de

LED pode se tornar uma realidade em alguns anos, mas atualmente essa tecnologia representa apenas 3,28 % do total de lâmpadas instaladas no Brasil.

Os LEDs já são muito comuns em aplicações como semáforos. No município de João Pessoa/PB, com a substituição de lâmpadas incandescentes por LED, houve uma redução de 59 % do consumo anual de energia elétrica utilizada nos semáforos entre 2009 e 2010. Isso mostra que há um grande retorno econômico quando se investe em estratégias de eficiência energética.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) da Eletrobrás, que tem um programa com o objetivo de promover o desenvolvimento de sistemas eficientes de IP através de financiamentos, gerou uma economia de 12,53 GWh de energia elétrica em 2016. Já os projetos de modernização da iluminação pública do Programa Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tiveram, em 2020, um custo de quase 77 milhões de reais e uma energia economizada estimada em 62,4 GWh/ano. Apesar disso, os projetos de IP representaram apenas 3,34 % do investimento total em projetos de eficiência energética inscritos no programa.

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral analisar a eficiência do sistema de IP do Brasil a partir do desempenho das tecnologias de lâmpadas utilizadas, com o intuito de avaliar a situação do país no contexto da IP, entendendo suas necessidades prioritárias e fornecendo novas perspectivas para a modernização do sistema.

Como objetivos específicos, o trabalho tem a finalidade de criar um indicador geral de desempenho das lâmpadas, com o intuito de mensurar como as diferentes tecnologias impactam o sistema, fornecendo informações sobre como cada um de seus parâmetros influenciam em seu desempenho geral. Além disso, o trabalho pretende relacionar o desempenho das lâmpadas com as mudanças ocorridas na IP brasileira nas últimas décadas através da criação de um indicador geral de eficiência do sistema, com o propósito de investigar se os esforços para sua modernização foram bem direcionados.

1.3 Justificativa

A eficiência da IP é bastante trabalhada principalmente sob o olhar do impacto causado no sistema a partir da substituição das tecnologias das lâmpadas. Esse impacto

geralmente se refere à redução de consumo e da demanda. Este trabalho, contudo, se propõe a criar um indicador geral de desempenho das lâmpadas, e essa abordagem não é recorrente em trabalhos que têm a IP como eixo central.

A relevância do trabalho se justifica também por ser um tema que abrange diversos atores sociais. Analisar o sistema de IP é importante para que concessionárias adotem novas práticas; prefeituras destinem melhor seus recursos; agentes reguladores definam pautas prioritárias; novos programas de financiamento sejam criados ou modificados para atender as demandas; empresas do setor privado invistam em projetos de modernização; institutos de pesquisa investiguem novas tecnologias e, principalmente, para que cada cidadão tenha acesso ao conhecimento desse bem público e reconheça a necessidade da modernização do sistema.

1.4 Estrutura do trabalho

No segundo capítulo deste trabalho é feito um panorama sobre a IP no Brasil através do ponto de vista de outros autores. Também é realizado um detalhamento sobre os principais parâmetros de desempenho das lâmpadas e as diferentes tecnologias utilizadas no Brasil.

No terceiro capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para a criação de um indicador geral de desempenho das lâmpadas e de eficiência do sistema de IP.

No quarto capítulo são apresentados os resultados que permitem avaliar como as tecnologias se classificam quanto aos diferentes parâmetros de desempenho, como a IP tem se modernizado sob o ponto de vista da eficiência e quais são as perspectivas de crescimento.

Por fim, nos capítulos cinco e seis são mostradas as principais conclusões, os aprendizados, as contribuições e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, é realizado um estudo mais aprofundado sobre o cenário da IP brasileira a partir da perspectiva de outros autores, com o intuito de confrontar diferentes pontos de vista, delimitando-os em um contexto temporal, para facilitar a análise sobre a evolução do sistema de IP brasileiro. Além disso, são detalhados os principais parâmetros de desempenho das lâmpadas, bem como as principais tecnologias utilizadas no Brasil.

2.1 Um panorama sobre a iluminação pública brasileira

Nesta seção, são discutidas as concepções de diferentes autores sobre os principais avanços e barreiras da eficiência energética no sistema de IP brasileiro, com foco em analisar quais problemas ainda não foram solucionados e quais as perspectivas de crescimento, para identificar possíveis padrões de repetição nas mudanças do sistema de IP brasileiro.

2.1.1 *As barreiras e os avanços da eficiência energética no sistema de IP brasileiro*

De acordo com Sobral (2008), a eficiência, no âmbito da administração, tem foco na utilização adequada dos recursos. Para o autor, uma organização eficiente tem como principais características a preocupação com os meios, a minimização dos recursos utilizados, a ênfase nos processos e a ausência de desperdícios. Essas características se adequam com a definição de eficiência energética, que tem como objetivo o uso dos recursos de forma consciente.

A busca pela eficiência energética parte de dois princípios. O primeiro é o reconhecimento de que existe um problema: o desperdício de recursos. O segundo é a necessidade de enfrentá-lo, o que significa, em outras palavras, o benefício que a solução do problema proporcionará. Em sistemas de IP, essa afirmação é confirmada a partir de Barbosa (2000), que afirma que as oportunidades para a eficiência energética não têm a mesma repercussão ou não acontecem simultaneamente para cada um dos atores. Assim, a eficiência energética depende de como cada elo da cadeia que envolve a produção e o consumo de energia elétrica aplicada à IP enxerga os problemas e até que ponto eles sentem a necessidade de enfrentá-los.

Barbosa (2000) comenta que o desperdício e a ineficiência presentes em toda a cadeia de produção e consumo de energia elétrica podem ser reduzidos através da identificação de tecnologias que satisfaçam as necessidades energéticas ao menor custo.

Sobre a implementação de ações de eficiência energética, Luiz (2016, p. 37) afirma: “o Brasil vem passando por uma sensível melhora na qualidade de prestação do serviço de iluminação pública, com o desenvolvimento de novas tecnologias que reduzem o consumo de energia elétrica nesse segmento”.

Um impasse presente no contexto da modernização da IP abordado por Barbosa (2000) é que, apesar de as ações de eficiência energética apresentarem uma relativa simplicidade técnica e operacional, a sensibilidade ao custo inicial dos equipamentos é um fator impeditivo para a modernização do sistema.

Ainda sobre as ações de eficiência energética, Silva (2006, p. 124) afirma que:

Existe potencial significativo para melhoria da IP no Brasil. Diversas ações já foram tomadas neste sentido, no entanto, parece ser profícuo integrar-se as ações no planejamento da expansão do setor elétrico nacional, de forma que os esforços possam ser direcionados de forma mais eficaz.

Tanto a melhoria sensível observada por Luiz (2016) como o potencial de melhoria visualizado por Silva (2006) são verificados a partir da maneira como o sistema tem evoluído ao longo das décadas.

2.1.2 A evolução das tecnologias de lâmpadas na iluminação pública brasileira

De acordo com Silva (2006), as lâmpadas de descarga, que ainda predominam no sistema de IP brasileiro, começaram a ser estudadas na primeira década do século XX, de modo que suas primeiras aplicações foram feitas na década de 1930. Não levou muito tempo até que lâmpadas de vapor de mercúrio e de vapor de sódio se tornassem maioria no sistema de IP brasileiro. De acordo com Castro (2012), 71,5 % das lâmpadas de IP no Brasil em 1999 eram de vapor de mercúrio, e 15,8 % eram lâmpadas de vapor de sódio, quase a totalidade dos pontos do sistema de IP brasileiro. A Tabela 1 mostra a quantidade de pontos de IP no Brasil por tipo de tecnologia em 1999.

Tabela 1- Pontos de IP no Brasil em 1999

Tipo de lâmpada	Quantidade de pontos	Quantidade Percentual
Vapor de mercúrio	9.262.800	71,5 %
Vapor de sódio	2.051.091	15,8 %
Mista	983.968	7,6 %
Incandescente	504.043	3,9 %
Outras	152.219	1,2 %
Total	12.954.121	100 %

Fonte: Castro, 2012, p. 02

Apesar de as lâmpadas de vapor de mercúrio serem maioria na época, elas eram menos eficientes do que as lâmpadas de vapor de sódio. Nesse sentido, o uso em larga escala dessas últimas proporcionaria uma redução do consumo. Essa tecnologia, contudo, era mais cara quando comparada às lâmpadas de vapor de mercúrio.

Os programas de eficiência energética naquela época reforçavam a importância de substituir a tecnologia predominante por outra mais eficiente. Uma das substituições propostas, conforme Silva (2006), era a de lâmpadas de vapor de mercúrio de 400 W por lâmpadas de vapor de sódio de 250 W, que proporcionam um consumo menor sem alterar o fluxo luminoso emitido. Apesar da necessidade de analisar outros parâmetros de desempenho, a substituição proposta pelos programas foi uma boa estratégia em prol da eficiência energética.

Os resultados dos incentivos dos programas de eficiência energética começaram a ser percebidos a partir da primeira década do século XXI, uma vez que, de acordo com Castro (2012), 62,83 % dos pontos de IP em 2008 apresentavam a tecnologia de vapor de sódio, se tornando predominante no país, conforme mostra a Tabela 2.

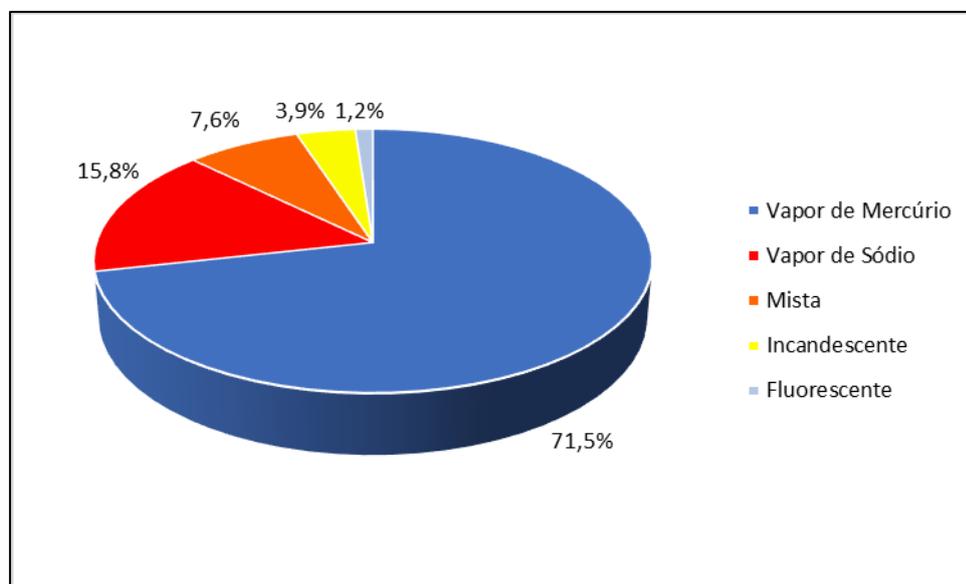
Tabela 2- Pontos de IP no Brasil em 2008

Tipo de lâmpada	Quantidade de pontos	Quantidade Percentual
Vapor de sódio	9.294.611	62,93 %
Vapor de mercúrio	4.703.012	31,84 %
Mista	328.427	2,22 %
Incandescente	210.417	1,42 %
Fluorescente	119.535	0,81 %
Multivapor metálico	108.173	0,73 %
Outras	5.134	0,03 %
Total	14.769.309	100 %

Fonte: Castro, 2012, p. 02

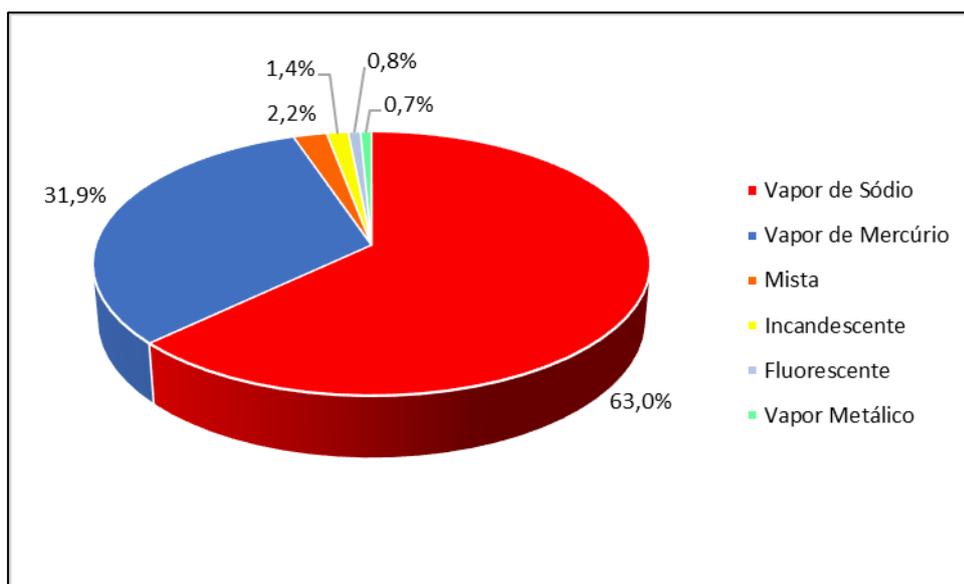
Os Gráficos 3 e 4 ilustram, respectivamente, a distribuição de pontos de IP no Brasil em 1999 e 2008.

Gráfico 3 - Distribuição dos pontos de IP no Brasil em 1999



Fonte: Castro, 2012

Gráfico 4 - Distribuição dos pontos de IP do Brasil em 2008



Fonte: Castro, 2012

Até 2008, as lâmpadas de LED não eram uma tecnologia comercialmente aplicável, já que, de acordo com Silva (2006), elas apresentavam uma eficiência limitada e um custo elevado.

Conforme estudo realizado pelo *World Bank Group* (2017), durante os anos de 2007 a 2012 a eficiência das lâmpadas de LED quase dobrou, indo de 70 lm/W para 130 lm/W, o que reduziu o custo por lumen em nove vezes, evidenciando a modernização dessa tecnologia.

Sobre a evolução das tecnologias, Silva (2006) ainda afirma que a evolução do sistema é contínua e que a modernização se inicia a partir da evolução de parâmetros básicos como a eficiência, a vida útil e a qualidade, o que foi observado nas lâmpadas de LED.

Esse, em geral, é o ciclo de desenvolvimento de todas as tecnologias. Elas se iniciam bem caras e, portanto, inacessíveis, até que o aperfeiçoamento de seus processos permitem que elas sejam barateadas. Esse mesmo ciclo já havia acontecido com as lâmpadas de vapor de sódio, que, a princípio, não eram viáveis economicamente, mas que se tornaram bastante populares com o aperfeiçoamento da tecnologia.

Outro ponto que evidencia uma mudança no sistema de IP brasileiro é o fato de que as lâmpadas de vapor de sódio, que a uma década se destacavam como a tecnologia mais eficiente, já estão sendo substituídas por outras mais eficientes. Isso mostra a importância de continuar desenvolvendo novas tecnologias para tornar o sistema ainda mais eficiente.

2.2 Parâmetros técnicos de desempenho das lâmpadas

De acordo com Barbosa (2000), para que um sistema de IP seja eficiente, ele deve satisfazer requisitos mínimos luminotécnicos definidos em normas técnicas. Os principais requisitos de qualidade abordados na Norma Brasileira (NBR) 5101:2012, que trata sobre os procedimentos de IP, são o nível de iluminância média e o fator de uniformidade.

Essa determinação justifica, em certo modo, a escolha de lâmpadas de vapor de sódio na iluminação de vias públicas, apesar de não apresentar uma boa reprodução de cores. Silva (2006) afirma que o IRC deficiente é admitido, já que a elevada eficiência dessas lâmpadas é priorizada. Essa característica garante níveis mais adequados de iluminância, que é um padrão de qualidade mais importante do que o IRC, de acordo com a NBR 5101:2012.

Apesar de essa norma considerar o nível de iluminância média e o fator de uniformidade como principais parâmetros de qualidade, é necessário entender que outros indicadores de desempenho devem ser considerados, quais seus impactos e como eles se relacionam entre si.

2.2.1 *Índice de Reprodução de Cores*

A cor de um objeto enxergada pelo olho humano pode variar de acordo com o tipo de lâmpada, de modo que o objeto seja visto com mais ou menos nitidez. Essa característica é representada através do IRC.

Rosito (2009) define o IRC como a relação entre a cor de um objeto quando iluminado por uma luz artificial e sua cor quando iluminado pela luz solar. Como a radiação emitida pelo sol contempla todo o espectro de luz visível ao olho humano, o IRC mensura a capacidade de uma lâmpada de reproduzir uma luz fiel à solar. A Figura 1 ilustra um objeto sendo iluminado por duas fontes de luz diferentes. No cenário mostrado à direita, o ambiente é iluminado por uma fonte luminosa que apresenta IRC deficiente, uma vez que não é possível distinguir com nitidez a cor real de cada objeto.

Figura 1: Comparativo entre duas fontes luminosas com diferentes IRCs



Fonte: Paredes, 2019, p. 40

2.2.2 *Temperatura de Cor*

Para o entendimento acerca da temperatura de cor, é necessário, primeiramente, conceituar um corpo negro. Esse é um objeto ideal que, de acordo com a definição de EDP Distribuição (2016), é capaz de absorver toda a radiação eletromagnética e emitir comprimentos de luz visível à medida que sua temperatura aumenta.

Assim, a temperatura de cor é aquela na qual um corpo negro irradiaria a mesma cor da fonte luminosa. Isso significa que se temperatura de cor de uma lâmpada for de 5000 K, um corpo negro ideal precisaria estar a essa mesma temperatura para emitir uma luz na mesma tonalidade da luz emitida pela lâmpada.

Quanto menor a temperatura de cor, mais quente ela é. É importante ressaltar que os termos “quente” e “frio” não têm relação com o calor físico da lâmpada, apenas com sua tonalidade. Vale salientar que, conforme Lindinho (2015), a temperatura de cor também não interfere na eficiência da lâmpada e que, portanto, não é válida a impressão de que quanto mais clara, mais potente é a lâmpada. A Figura 2 mostra uma escala da temperatura de cor, indo das cores mais quentes às mais frias, da esquerda para a direita.

Figura 2 - Escala de variação da temperatura de cor



Fonte: EDP Distribuição, 2016, p. 20

Tanto o IRC como a temperatura de cor não necessariamente estão associados à eficiência energética da lâmpada, mas refletem sobre a sensação que se deseja transmitir. A luz branca, por exemplo, proporciona uma sensação maior de conforto quando comparada àquelas com tonalidade mais alaranjada. A Figura 3 mostra um local iluminado por lâmpadas com temperaturas de cor diferentes.

Figura 3 - Aparência de um mesmo local iluminado por lâmpadas de temperaturas de cor diferentes



Fonte: EDP Distribuição, 2016, p. 21

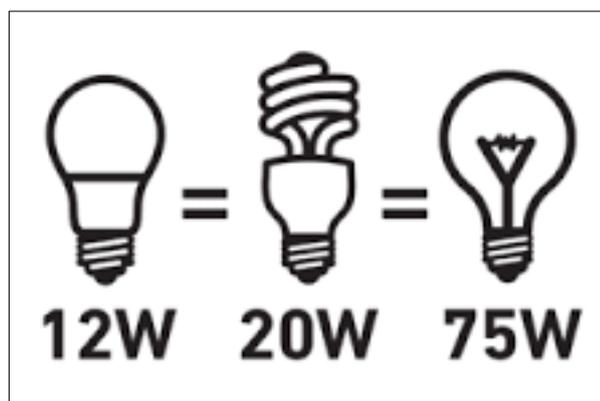
2.2.3 Fluxo luminoso

É a quantidade de luz emitida em todas as direções por uma fonte de luz, sua unidade é o Lúmen (lm). Em sistemas de IP, as lâmpadas, em geral, estão contidas em luminárias. Com isso, nem todo o fluxo emitido é aproveitado. A Razão de Saída do Fluxo Luminoso mede o quanto desse fluxo total presente em todas as direções da lâmpada está sendo direcionado para baixo. Esse parâmetro mostra que a eficiência do sistema depende não só da lâmpada, mas também dos equipamentos auxiliares, como as luminárias, que devem garantir que parte do fluxo emitido para cima seja refletido e direcionado para baixo.

2.2.4 Eficiência Luminosa

A eficiência luminosa é a relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte e a potência por ela absorvida. Ela mede quantos lumens são emitidos para cada Watt absorvido. Esse é um dos principais parâmetros de desempenho das lâmpadas no que se refere à eficiência energética, já que revela a quantidade de luz que pode ser emitida a partir de determinada potência elétrica. A Figura 4 ilustra o conceito da eficiência luminosa. São mostradas, da esquerda para a direita, uma lâmpada de LED, uma fluorescente e uma incandescente, que emitem o mesmo fluxo luminoso, mas que absorvem uma potência distinta.

Figura 4 - Ilustração do conceito da eficiência luminosa



Fonte: Lumanti, 2021

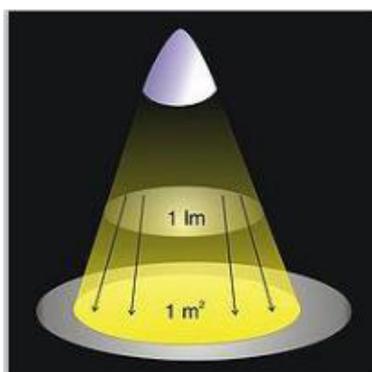
A eficiência luminosa é bastante útil para a tomada de decisão sobre a substituição de lâmpadas, já que, ainda que o fluxo total emitido por duas lâmpadas seja o mesmo, aquela que proporcionar o menor consumo será a melhor escolha.

2.2.5 Iluminância

Uma das grandezas mais importantes quando se trata de projetos luminotécnicos, a iluminância descreve a quantidade de luz incidente sobre uma área.

Luiz (2006, p. 49), a define como “a densidade de luz necessária para a realização de uma tarefa visual.” Isso porque ela se refere à quantidade de fluxo luminoso que atravessa um elemento de área. A Figura 5 ilustra o conceito de iluminância. Em normas técnicas que versam sobre a iluminação de ambientes, a iluminância é o critério utilizado para a definição dos requisitos de iluminação, e varia de acordo com o tipo de atividade a ser desempenhada no ambiente.

Figura 5- Representação gráfica da iluminância



Fonte: Paredes, 2019, p. 36

2.2.6 Fator de uniformidade

Esse conceito está atrelado ao da iluminância, uma vez que o fator de uniformidade é a relação entre o valor de iluminância mínima e média de um ambiente. Ele é fundamental para garantir que a luz seja emitida de forma equilibrada em todo o local. Sua importância reside no fato de que um dos principais objetivos de um sistema de IP é providenciar uma boa iluminação na superfície das ruas e estradas, de modo que os obstáculos sejam facilmente identificáveis e não ocorra o aparecimento de áreas negras.

Com o fator de uniformidade é possível definir, por exemplo, qual deve ser o distanciamento máximo entre dois postes que permita a iluminância adequada do local.

2.2.7 Tempo de vida

Existe mais de uma metodologia para o cálculo do tempo de vida de uma lâmpada, conforme descrito por Rosito (2009):

- Vida útil: tempo que uma lâmpada leva para atingir 70 % de seu fluxo luminoso inicial;
- Vida média: média aritmética do tempo em que cada lâmpada ensaiada permaneceu acesa;
- Vida mediana: tempo em horas em que 50 % das lâmpadas ensaiadas permaneceram acesas.

Independentemente de qual metodologia utilizada, o tempo de vida é uma das características mais relevantes das fontes luminosas, uma vez que influencia os custos de manutenção do sistema e de aquisição de novas lâmpadas. Esse padrão de desempenho é muito importante para o cálculo da viabilidade e do retorno econômico de projetos de modernização de sistemas de IP.

Lindinho (2015) afirma que o tempo de vida normalmente utilizado pelos fabricantes é aquele que indica o número de horas após as quais 50 % de um lote significativo de lâmpadas acesas deixa de emitir fluxo luminoso.

De acordo com Rosito (2009), que também afirma que o conceito de vida mediana é o mais utilizado em IP, a manutenção do sistema está relacionada ao número de queimas. Assim, uma manutenção preventiva pode ser realizada, substituindo todas as lâmpadas quando estas se aproximam de seu limite de vida mediana. Contudo, ele também ressalta a importância

da utilização do tempo de vida útil, já que leva em consideração a depreciação do fluxo luminoso, que é essencial em um projeto de iluminação.

2.2.8 Fator de depreciação e depreciação do fluxo luminoso

A depreciação do fluxo luminoso representa percentual de redução do fluxo luminoso de uma lâmpada durante seu período de operação. Quando a lâmpada perde mais de 30 % de seu fluxo inicial, é dito que ela ultrapassou seu tempo de vida útil.

O fator de depreciação surge da necessidade de compensar a depreciação do fluxo luminoso. Em projetos luminotécnicos, é feita uma relação entre o fluxo luminoso em determinado momento e o fluxo luminoso inicial. Com esse indicador, também conhecido como fator de manutenção da luminosidade, é possível realizar a compensação de valores para que os requisitos de iluminação continuem sendo atendidos mesmo com a depreciação das lâmpadas. Ou seja, sabendo que uma lâmpada perde uma parcela de seu fluxo luminoso ao longo de seu tempo de vida, deve-se haver um sobredimensionamento do fluxo inicial aplicando uma correção equivalente ao fator de depreciação.

2.2.9 Perdas nos reatores

Os reatores são equipamentos auxiliares utilizados em conjunto com as lâmpadas de descarga com o objetivo de controlar e estabilizar a corrente de partida.

As perdas nos reatores, inerentes às lâmpadas de descarga de alta pressão, se referem à potência dissipada no núcleo (circuito magnético) e nos enrolamentos (circuito elétrico) desses equipamentos. Assim, nem toda potência entregue pela rede é absorvida pela lâmpada.

De acordo com Castro (2012), em uma lâmpada de vapor de sódio de 400 W, as perdas nos reatores totalizam, em média, 40 W, cerca de 10 % da potência nominal da lâmpada, de modo que é necessária uma potência de 440 W para alimentar o conjunto lâmpada reator.

As perdas dependem do tipo de material contido no núcleo do reator. Assim, uma das possibilidades de melhoria da eficiência energética dessas lâmpadas é a troca do material convencional utilizado no núcleo por outros, como ligas amorfas.

2.2.10 Distorção Harmônica Total

A Distorção Harmônica Total (THD – sigla em inglês) representa as não linearidades das formas de onda da tensão e da corrente e é ocasionada devido à presença de equipamentos que exigem a presença de componentes de corrente e de tensão diferentes da componente de frequência fundamental, como reatores e circuitos eletrônicos.

Em relação aos problemas causados pelas distorções harmônicas, Cattaneo (2017) considera que elas são a causa de problemas como sobrecarga nos sistemas de distribuição, sobrecarga no condutor de neutro, envelhecimento prematuro de equipamentos, entre outros.

2.3 Tecnologias das lâmpadas utilizadas na iluminação pública

As tecnologias de lâmpadas existentes divergem principalmente por conta de seu princípio de funcionamento e materiais utilizados em sua composição. Essas características peculiares a cada tipo de lâmpada têm efeito sobre o modo como a luz é emitida e, conseqüentemente, sobre a qualidade e a eficiência do ponto de luz. A seguir, é realizada uma discussão sobre as tecnologias de lâmpadas usualmente utilizadas na IP, caracterizando-as de acordo com os padrões de desempenho descritos anteriormente.

2.3.1 Lâmpadas de vapor de sódio

As lâmpadas de vapor de sódio fazem parte do grupo das lâmpadas de Descarga de Alta Intensidade (HID – sigla em inglês). Assim como as demais desse grupo, as lâmpadas de vapor de sódio apresentam um tubo de descarga com a presença de uma mistura de elementos que são vaporizados. Em cada extremidade do tubo existem eletrodos através dos quais é formado um arco elétrico.

No interior de uma lâmpada de vapor de sódio, uma mistura de mercúrio e sódio é vaporizada quando uma tensão é aplicada sobre os eletrodos, o que provoca um arco elétrico no tubo de descarga, permitindo a condução e conseqüente emissão de luz visível. Além da pequena quantidade de sódio e mercúrio, o tubo de descarga é preenchido com um gás nobre, geralmente o xenônio. A formação do arco elétrico se dá inicialmente a partir da ionização desse gás. Tendo em vista que as lâmpadas de descarga contêm elementos diferentes, a emissão da luz varia de acordo com as características das misturas presentes. A Figura 6 mostra a aplicação de lâmpadas de vapor de sódio em sistemas de IP.

Figura 6 - Aplicação de lâmpadas de vapor de sódio em IP



Fonte: RBA Iluminação, 2021

A Tabela 3 resume as principais características de uma lâmpada de vapor de sódio.

Tabela 3- Indicadores de desempenho das lâmpadas de vapor de sódio

Potência disponível	50 - 1000 (W)
Eficiência luminosa	70 - 140 (lm/W)
Temperatura de Cor	2000 - 3300 (K)
IRC	20 – 40 (%)
Duração de vida média	16000 horas

Fonte: Lindinho, 2015, p. 36

Para entregar sua potência nominal, as lâmpadas de vapor de sódio precisam de um período de aquecimento necessário para aumentar a pressão do vapor e, conseqüentemente, diminuir sua resistência elétrica. “Elas demoram cerca de 10 minutos para atingir o seu fluxo luminoso máximo e têm um tempo de reacendimento de aproximadamente 1 minuto” (EDP Distribuição, 2016, p. 34).

Para a partida dessas lâmpadas de descarga, mediante criação de arco elétrico, é necessária uma tensão de cerca de 4500 V. Conforme Rosito (2008), essa tensão é alcançada através do ignitor, que gera pulsos de alta tensão na partida e fica inativo no restante do tempo.

2.3.2 *Lâmpadas de vapor de mercúrio*

As lâmpadas de vapor de mercúrio também estão inseridas no grupo de lâmpadas HID. Os dois eletrodos estão imersos em uma atmosfera de Argônio, com uma pequena quantidade de mercúrio.

O princípio de funcionamento é bem semelhante ao das lâmpadas de vapor de sódio, com a diferença de que as lâmpadas de vapor de mercúrio não necessitam de ignitor, uma vez que possuem um eletrodo auxiliar onde o arco elétrico é inicialmente formado. O aquecimento provocado pela formação do arco é responsável pela ionização do argônio, que permite que o arco elétrico se forme também entre os eletrodos principais. A Figura 7 ilustra um exemplo de aplicação de lâmpadas de vapor de mercúrio em IP.

Figura 7 - Aplicação de lâmpadas de vapor de mercúrio em IP



Fonte: Lumanti, 2021

As lâmpadas de vapor de mercúrio eram consideradas, na década de 80, uma das mais importantes da IP. Contudo, elas foram sendo gradativamente substituídas por lâmpadas de vapor de sódio. Entre as desvantagens das lâmpadas de vapor de mercúrio, que justificam sua substituição, elas possuem uma alta depreciação ao longo da sua vida e, muitas vezes, “permanecem acesas emitindo um fluxo luminoso extremamente baixo quando comparado ao fluxo inicial” (Rosito, 2009, p. 25).

A Tabela 4 resume as principais características de uma lâmpada de vapor de mercúrio.

Tabela 4- Indicadores de desempenho de lâmpadas de vapor de mercúrio

Potência disponível	50 - 1000 (W)
Eficiência luminosa	20 - 50 (lm/W)
Temperatura de Cor	3000 - 5000 (K)
IRC	40 – 60 (%)
Duração de vida média	16000 horas

Fonte: Lindinho, 2015, p. 36

2.3.3 Lâmpadas de vapor metálico

As lâmpadas de vapor metálico também fazem parte das lâmpadas HID, mas, ao contrário das lâmpadas de vapor de mercúrio e de vapor de sódio, nunca predominaram no sistema de IP brasileiro. Contudo, elas apresentam características que justificariam seu uso em larga escala. Rosito (2009) afirma que esse tipo de tecnologia estava sendo muito difundido na última década, visto que seu IRC é superior ao das lâmpadas de vapor de sódio.

De acordo com a EDP Distribuição (2016), essa tecnologia é um aperfeiçoamento das lâmpadas de vapor de mercúrio. Devido à presença de iodetos metálicos, possuem IRC e eficiência luminosa muito superiores quando comparadas às lâmpadas de vapor de mercúrio.

Contudo, elas apresentam um tempo de vida menor do que as lâmpadas de vapor de mercúrio. E, além disso, necessitam da presença de um ignitor, assim como as lâmpadas de vapor de sódio. Para sua ignição, “é necessário que se atinja picos de tensão de até 5 kV” (EDP Distribuição, 2016, p. 35) e seu período de acendimento é o maior entre as tecnologias já descritas, cerca de 15 minutos.

A Figura 8 mostra a aplicação de lâmpadas de vapor metálico em sistemas de IP.

Figura 8 - Aplicação de lâmpadas de vapor metálico em IP



Fonte: Lumanti, 2021

Em relação à sua eficiência luminosa, as lâmpadas de vapor metálico apresentam desempenho superior ao das lâmpadas de vapor de mercúrio, mas inferior ao das lâmpadas de vapor de sódio.

Assim, as lâmpadas de vapor metálico têm ótimos pontos positivos, principalmente por conta de um elevado IRC. Em contrapartida, perdem em eficiência e em tempo de vida para as lâmpadas de vapor de sódio, suas principais concorrentes. A Tabela 5 traz informações sobre os padrões de desempenho das lâmpadas de vapor metálico.

Tabela 5 - Indicadores de desempenho de lâmpadas de vapor metálico

Potência disponível	35 - 3500 (W)
Eficiência luminosa	65 -110 (lm/W)
Temperatura de Cor	3300 - 5500 (K)
IRC	80 – 90 (%)
Duração de vida média	12000 - 16000 horas

Fonte: Lindinho, 2015, p. 39

2.3.4 *Lâmpadas incandescentes*

As lâmpadas incandescentes foram as primeiras lâmpadas utilizadas na IP. Foram substituídas exatamente pelas lâmpadas de vapor de mercúrio. Elas têm seu princípio de funcionamento baseado na incandescência, na qual um corpo emite luz devido à sua elevada temperatura. Por conta disso, a maior parcela da potência absorvida é perdida na forma de calor.

A Figura 9 mostra um exemplo de aplicação das lâmpadas incandescentes em sistemas de IP.

Figura 9 - Aplicação de lâmpadas incandescentes em IP



Fonte: Prefeitura de Corumbá, 2017

Apenas o fato de a maior parcela da energia consumida ser transformada em calor, já demonstra a razão de essas lâmpadas terem perdido espaço na IP, já que isso revela que sua eficiência luminosa é baixa. Além disso, ela apresenta um tempo de vida baixo e uma grande degradação do fluxo luminoso por conta da disposição das partículas de tungstênio na parede interior da lâmpada.

A Tabela 6 traz algumas características sobre o desempenho de lâmpadas incandescentes.

Tabela 6- Indicadores de desempenho de lâmpadas incandescentes

Potência disponível	15 - 1000 (W)
Eficiência luminosa	10 - 20 (lm/W)
Temperatura de Cor	2700 (K)
IRC	100 (%)
Duração de vida média	1000 horas

Fonte: Lindinho, 2015, p. 31

2.3.5 Lâmpadas mistas

As lâmpadas mistas exibem características tanto das lâmpadas incandescentes como das lâmpadas de vapor de mercúrio. Elas apresentam um filamento ligado em série com um tubo de descarga e não necessitam de reator, já que o filamento atua como limitador da corrente da lâmpada ao mesmo tempo em que emite luz. Dessa forma, essa tecnologia emite luz através da incandescência e da formação de arco elétrico.

A Figura 10 traz um exemplo de aplicação de lâmpadas mistas em sistemas de IP.

Figura 10 - Aplicação de lâmpadas mistas em IP



Fonte: Glight, 2021

Rosito (2009) sugere a substituição de lâmpadas mistas utilizadas em IP por lâmpadas de vapor de sódio. De acordo com o autor, é possível substituir uma lâmpada mista de 500 W por uma lâmpada de vapor de sódio de 150 W sem qualquer prejuízo para a iluminação. Essa recomendação demonstra que a eficiência luminosa das lâmpadas mistas é bem inferior quando comparada às lâmpadas de vapor de sódio.

A Tabela 7 traz as principais características das lâmpadas mistas.

Tabela 7- Indicadores de desempenho de uma lâmpada mista

Potência disponível	15 - 1000 (W)
Eficiência luminosa	28 (lm/W)
Temperatura de Cor	4000 (K)
IRC	60 (%)
Duração de vida média	8000 horas

Fonte: Rosito, 2009, p. 20

2.3.6 Lâmpadas fluorescentes

O princípio de funcionamento das lâmpadas fluorescentes ocorre por meio da transformação da radiação ultravioleta em luz visível. As lâmpadas fluorescentes contêm dois eletrodos em suas extremidades, assim como as lâmpadas de descarga de alta pressão. O interior da lâmpada é composto por gases inertes e uma pequena quantidade de mercúrio. Devido à diferença de potencial entre as extremidades, alguns dos elétrons dos eletrodos se desprendem e migram para o polo positivo. Nesse percurso, eles se chocam com os átomos de mercúrio, que ganham energia. Ao voltar para seu estado natural, os átomos de mercúrio emitem energia na forma de luz ultravioleta, que está fora do espectro visível ao olho humano. Contudo, a parede interna da lâmpada é revestida por uma camada de fósforo. A luz emitida pelos átomos desse elemento após serem atingidos pela luz ultravioleta e voltar para seu estado natural está dentro do espectro de luz visível. A Figura 11 traz um exemplo de aplicação de lâmpadas fluorescentes em sistemas de IP.

Figura 11 - Aplicação de lâmpadas fluorescentes em IP



Fonte: Archiexpo, 2021

As lâmpadas fluorescentes são uma boa escolha quando se deseja uma elevada eficiência, um baixo custo e um valor baixo de lúmens à saída. Isso porque ela não trabalha em altas potências. Por conta disso, em sistemas de IP, elas são utilizadas quase exclusivamente nos parques e jardins ou em zonas para efeitos decorativos.

A Tabela 8 mostra os principais parâmetros de desempenho das lâmpadas fluorescentes.

Tabela 8- Indicadores de desempenho de lâmpadas fluorescentes

Potência disponível	5 - 55 (W)
Eficiência luminosa	45 - 87 (lm/W)
Temperatura de Cor	2700 - 6000 (K)
IRC	85 - 98 (%)
Duração de vida média	10000 horas

Fonte: Lindinho, 2015, p. 34

2.3.7 Lâmpadas de LED

As lâmpadas de LED têm um princípio de funcionamento totalmente distinto das outras tecnologias abordadas anteriormente. Primeiramente, essas lâmpadas necessitam de uma alimentação especial, o driver, que converte a tensão alternada da rede em tensão contínua.

Essa tecnologia de lâmpada é constituída por diversos LEDs, que podem ser colocados lado a lado em uma mesma direção, o que contribui para um bom direcionamento do fluxo luminoso. Isso é uma grande vantagem das lâmpadas de LED em relação às demais, que emitem luz em todas as direções, de modo que parte dela não é direcionada para baixo, afetando seus padrões de desempenho.

O fluxo direcionado, contudo, produz um ângulo de abertura baixo. Quanto a esse problema, Santos (2011) comenta que ele tem sido resolvido a partir do uso de LEDs com orientações diferentes. A Figura 12 traz uma aplicação de luminárias de LED em sistemas de IP.

Figura 12 - Aplicação de lâmpadas de LED em IP



Fonte: Philips, 2021

Como essas lâmpadas apresentam características bem peculiares, o desenvolvimento das tecnologias necessárias para o funcionamento tornou seu custo, a princípio, bem caro. Contudo, conforme Lindinho (2015), com o desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação e materiais, os LEDs passaram a ser produzidos com custos cada vez menores, proporcionando uma gama cada vez maior de aplicações, como sinalização, iluminação de interiores e IP.

Rosito (2009) afirmava que o uso de LED na IP era extremamente complicado, pois ele acreditava que, caso não houvesse o acréscimo de mais postes, não era possível alcançar o nível de uniformidade da iluminância nas ruas apenas substituindo as lâmpadas já utilizadas por LED. A visão do autor mostra que há poucos anos os níveis de iluminância das lâmpadas de LED não eram suficientes para competir com os das lâmpadas de vapor de sódio e que seria

necessário instalar novos postes intercalados com os já existentes para garantir um fator de uniformidade adequado. Com as tecnologias existentes atualmente, a preocupação de Rosito (2009) deixou de ser um problema.

A Tabela 9 mostra as principais características das lâmpadas de LED.

Tabela 9 - Indicadores de desempenho das lâmpadas de LED

Potência disponível	1 - 50 (W)
Eficiência luminosa	120 - 160 (lm/W)
Temperatura de Cor	2700 - 5000 (K)
IRC	60 – 98 (%)
Duração de vida média	30000 - 100000 horas

Fonte: Lindinho, 2015, p. 34

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, a pesquisa é caracterizada quanto aos seus objetivos, sua abordagem e seus procedimentos. Além disso, são mostradas todas as etapas da coleta e do tratamento de dados. Com isso, é possível entender como o indicador de desempenho de eficiência foi criado, permitindo sua reprodução em outros cenários. Ao final deste capítulo são mencionadas as principais limitações da pesquisa quanto à coleta e ao tratamento dos dados.

3.1 Caracterização da pesquisa

Do ponto de vista do objetivo, a pesquisa se classifica como descritiva, já que é analisado como diferentes variáveis já existentes se relacionam, a fim de criar um indicador que caracterize a eficiência do sistema de IP do Brasil.

Nesse sentido, a pesquisa tem uma abordagem quantitativa, uma vez que a criação do indicador em questão depende exclusivamente de parâmetros de desempenho quantitativos específicos de cada tecnologia de lâmpada, que são analisados através de recursos matemáticos e estatísticos.

Para tanto, são utilizados relatórios de empresas, dados de fabricantes, bem como resultados obtidos por outros pesquisadores, caracterizando a pesquisa como documental quanto aos seus procedimentos.

No que se refere à população da pesquisa, são estudadas as principais tecnologias de lâmpadas presentes na IP brasileira, com ênfase em suas principais características e padrões de desempenho.

3.2 Coleta de dados

O principal objetivo da pesquisa é a caracterização da eficiência do sistema de IP brasileiro do ponto de vista das tecnologias de lâmpadas utilizadas. Dessa forma, a primeira informação levantada foi a quantidade de pontos de iluminação presentes no país e sua distribuição de acordo com cada tipo de lâmpada.

A quantidade de pontos de IP no Brasil é divulgada pela Eletrobrás, através do PROCEL. Contudo, esse levantamento não é realizado anualmente, o que dificulta uma análise dos acréscimos, substituições e retiradas de lâmpadas. O levantamento anterior ao do ano de 2018 havia sido realizado em 2008, uma diferença de 10 anos entre os dois.

Os dados apresentados na Tabela 10 mostram a quantidade percentual de lâmpadas por tipo de tecnologia dos últimos 5 levantamentos realizados pelo PROCEL.

Tabela 10 - Levantamento dos pontos de IP no Brasil

Lâmpada	1995	1999	2004	2008	2018
Vapor de Sódio	7,25 %	15,83 %	40,31 %	62,93 %	70,51 %
Vapor de Mercúrio	80,68 %	71,50 %	51,97 %	31,84 %	10,63 %
Vapor Metálico	-	-	0,49 %	0,73 %	5,40 %
LED	-	-	-	-	3,28 %
Mista	6,99 %	7,60 %	3,98 %	2,22 %	2,27 %
Fluorescente	1,22 %	1,17 %	0,77 %	0,81 %	1,92 %
Incandescente	3,84 %	3,89 %	2,10 %	1,42 %	0,32 %
Outras	0,01 %	0,01 %	0,38 %	0,03 %	5,68 %
Total de Pontos	8.781.800	12.954.121	13.041.455	14.769.309	16.133.095

Fonte: Adaptado de Eletrobrás, 2021¹

Com os dados da Tabela 10, foi possível avaliar o peso de cada tipo de tecnologia e com isso entender a evolução do indicador de eficiência do sistema ao longo do tempo.

Além disso, a pesquisa tem o intuito de realizar projeções sobre o indicador de eficiência ao longo dos próximos anos. Com isso, tendo como base um estudo de outros autores sobre a projeção de atualização do sistema de IP com a inserção da tecnologia de LED, foi elaborada a Tabela 11, que mostra as perspectivas de mudança na distribuição das lâmpadas ao longo dos próximos anos. Ela foi utilizada como base para examinar as perspectivas de crescimento do indicador de eficiência da IP.

Tabela 11 - Projeção de atualização do sistema de IP

Lâmpada	2022	2024	2026
Vapor de Sódio	38,63 %	23,54 %	10,34 %
Vapor de Mercúrio	18,05 %	11,00 %	4,83 %
LED	43,32 %	65,47 %	84,83 %
Total de Pontos	15.633.216	17.106.558	19.467.665

Fonte: Araujo, 2020

Para simplificação do estudo, foi considerado que todas as tecnologias com participação no cenário nacional inferior a 3 %, seriam incorporadas às lâmpadas de vapor de sódio. Como pode ser observado, o total estimado de pontos de IP para 2022 é inferior à

¹ A elaboração da tabela também incluiu dados de Silva (2006) e Castro (2012)

quantidade de lâmpadas existentes em 2018. Ocorre que a pesquisa foi realizada tendo como base os dados do levantamento de 2008, o que justifica essa inconsistência.

Uma vez definida a caracterização do sistema de IP brasileiro quanto à distribuição dos pontos por tipo de tecnologia, foi dado início à etapa de classificação das lâmpadas quanto aos seus padrões de desempenho.

Os dados sobre os principais padrões de desempenho das lâmpadas foram coletados tanto através de estudos realizados previamente na área de IP, como por meio de dados fornecidos pelos fabricantes através de seus catálogos. As informações sobre os padrões de desempenho são importantes, pois é a partir delas que o desempenho geral das lâmpadas é quantificado. A Tabela 12 indica a quantidade de modelos e de fabricantes pesquisados por tipo de tecnologia.

Tabela 12 - Quantidade de lâmpadas pesquisadas

Lâmpada	N° de Modelos	N° de Fabricantes
Vapor de Sódio	43	8
Vapor de Mercúrio	18	6
Vapor Metálico	47	8
LED	53	6
Mista	18	5
Fluorescente	30	4
Incandescente	17	5

Fonte: O próprio autor

O número de modelos pesquisados depende principalmente da aplicabilidade de cada tecnologia na IP. As lâmpadas de vapor de mercúrio, as mistas e as incandescentes não têm seu uso incentivado na IP, de modo que a quantidade de modelos disponíveis é inferior quando comparada a outras tecnologias. Os LEDs, por exemplo, por apresentarem um potencial de crescimento bem elevado, apresentam uma ampla variedade de modelos. As lâmpadas de vapor de sódio e de vapor metálico também se destacam, pois são mais acessíveis quando comparadas às luminárias de LED, apresentando uma grande variedade de modelos.

É válido destacar que nem todos os fabricantes disponibilizam as mesmas informações. Isso significa que, apesar de serem pesquisados 43 modelos de lâmpadas de vapor de sódio, não necessariamente foram coletadas 43 informações sobre o IRC, por exemplo.

Ademais, além dos indicadores encontrados a partir da análise dos dados dos fabricantes, existem alguns parâmetros de desempenho relevantes que não são encontrados com facilidade nos catálogos. Para esses casos, recorreu-se a pesquisas bibliográficas.

3.3 Criação do indicador geral de desempenho das lâmpadas

Nesta seção, é exposto o passo a passo para a criação do indicador geral de desempenho das lâmpadas, que se inicia com a coleta dos dados e, em seguida, passa pelas etapas de cálculo do valor médio, normalização em uma escala de 0 a 5, atribuição de pesos a cada um dos parâmetros analisados e cálculo do indicador geral de eficiência do sistema de IP.

3.3.1 Valor médio dos parâmetros de desempenho

O indicador geral de desempenho das lâmpadas é constituído por 7 parâmetros diferentes: eficiência luminosa, vida mediana, IRC, temperatura de cor, perda nos reatores, manutenção do fluxo luminoso e THD.

Dentre esses parâmetros, apenas os quatro primeiros foram encontrados com maior facilidade nos catálogos dos produtos. Já os três últimos parâmetros foram obtidos a partir de pesquisas de autores que já estudaram sobre o tema.

Para cada um dos padrões de desempenho, foi obtido um número que representasse, de forma satisfatória, a maior parte das lâmpadas de determinado tipo de tecnologia.

Em relação à eficiência luminosa, à temperatura de cor, à vida mediana e ao IRC, o primeiro passo foi elaborar uma média de cada parâmetro a partir dos modelos e fabricantes pesquisados. Em seguida, foi calculado o desvio padrão amostral de cada parâmetro para entender se havia divergência entre os valores da amostra. Após isso, foi calculada a relação entre o desvio padrão amostral e a média, para verificar a relevância do desvio padrão em termos percentuais.

Quanto menor o desvio padrão percentual, mais próximos estavam os valores entre si, o que significa uma amostra mais uniforme e, conseqüentemente, uma maior certeza em relação ao valor escolhido como sendo o mais representativo de cada característica das lâmpadas. Adotou-se que valores de desvio padrão relativo inferiores a 20 % garantiam um maior nível de confiabilidade ao valor médio calculado. Para os casos em que essa condição não fosse satisfeita, seria verificado se o valor adotado estava compatível com os limites mínimos e máximos dos parâmetros apresentados no referencial teórico desta pesquisa. Caso o

valor médio encontrado estivesse distante desses limites, seria adotado um novo valor para esse parâmetro, com base nos valores definidos no referencial teórico.

Dessa forma, se para determinada tecnologia de lâmpada o valor médio calculado para a eficiência luminosa e seu desvio padrão relativo fossem, respectivamente, 100 lm/W e 25 %, esse valor médio seria confrontado com os valores de eficiência luminosa definidos no referencial. Caso os limites mínimos e máximos estabelecidos fossem, por exemplo, de 50 e 70 lm/W, não seria adequado utilizar o valor de 100 lm/W como sendo aquele que representa de forma satisfatória a eficiência luminosa da maior parte desse tipo de lâmpada. Para esse caso, seria adotado um valor entre 50 e 70 lm/W, como 60 lm/W.

Já a perda nos reatores, a THD e a manutenção do fluxo luminoso foram obtidas exclusivamente a partir de valores encontrados por outros autores em pesquisas anteriores.

3.3.2 Normalização dos parâmetros de desempenho

Para construir o indicador geral de eficiência das lâmpadas, os valores dos parâmetros foram normalizados em uma escala que variou de zero a cinco. A normalização foi necessária para colocar todos os parâmetros em uma escala comum, já que não é viável comparar a vida mediana, que pode chegar a mais de 50000 horas, com o IRC, que varia de 0 a 100 %.

Apesar de a escala ser a mesma para todos, a normalização foi realizada seguindo as particularidades de cada um dos padrões de desempenho.

A normalização da eficiência luminosa e da vida mediana foi realizada a partir da Equação 1.

$$P_{\text{norm}} = 5 * (P_o / P_{\text{max}}) \quad (1)$$

Onde P_{norm} é o valor do parâmetro normalizado; P_o é o valor do parâmetro em sua escala convencional e P_{max} representa o valor máximo entre as tecnologias pesquisadas. Isso significa que tanto para a eficiência luminosa como para a vida mediana, a tecnologia com melhor desempenho recebeu nota 5, uma vez que nesse caso $P_o = P_{\text{max}}$.

Como pode ser percebido, a normalização, para esses casos, depende da tecnologia de lâmpada que apresenta o maior desempenho, ou seja, o valor é calculado a partir do comparativo entre duas lâmpadas. Se, por exemplo, para a vida mediana, P_{max} representasse a vida mediana de uma lâmpada de LED, a vida mediana das demais seria obtida tendo como

base as lâmpadas de LED. Contudo, caso as lâmpadas de LED fossem excluídas, P_{\max} passaria a representar a vida mediana da segunda tecnologia com melhor desempenho, interferindo no valor de P_{norm} das demais.

O IRC e manutenção do fluxo luminoso, parâmetros que variam de 0 a 100 %, foram calculados a partir da Equação 2.

$$P_{\text{norm}} = 5 * P_o \quad (2)$$

As variáveis da Equação 2 têm o mesmo significado daquelas apresentadas na Equação 1. Quanto mais o P_{norm} se aproxima de 5, melhor o IRC da lâmpada.

Já a THD e as perdas nos reatores, apesar de também serem dadas em termos percentuais, são calculadas de maneira contrária ao IRC, conforme Equação 3, uma vez que quanto maior o valor desses parâmetros menor é o desempenho da lâmpada.

$$P_{\text{norm}} = 5 * (1 - P_o) \quad (3)$$

A temperatura de cor seguiu uma regra de normalização específica, isso porque não há uma relação direta entre esse parâmetro e o desempenho da lâmpada. Contudo, os projetos de modernização de sistemas de IP geralmente recomendam que a temperatura de cor esteja entre 3000 K e 5000 K. As Equações 4 e 5 mostram, respectivamente, a normalização da temperatura de cor para valores inferiores a 3000 K e superiores a 5000 K.

$$P_{\text{norm}} = 5 * (P_o/3000) \quad (4)$$

$$P_{\text{norm}} = 5 * [1 - (P_o - 5000)/P_o] \quad (5)$$

A Equação 4 mostra a relação entre a temperatura de cor da lâmpada e a temperatura mínima recomendada. Quanto mais esse parâmetro se aproxima de 3000 K, mais a sua nota se aproxima de 5. Já a Equação 5 mede o quanto a temperatura de cor ultrapassa o valor máximo recomendado. Nesse caso, quanto mais próximo de 5000 K, mais próxima sua nota estará do valor máximo normalizado. Para as situações em que o valor médio encontrado já está dentro dos limites recomendados, o valor do parâmetro normalizado é igual a 5.

3.3.3 *Composição do indicador geral de desempenho das lâmpadas*

Com a devida normalização de cada um dos parâmetros de desempenho analisados individualmente, foi criado um indicador para representar cada tecnologia de lâmpada de maneira geral.

Cada um dos parâmetros analisados interfere de maneira diferente na eficiência das lâmpadas. Portanto, não seria prudente realizar apenas uma média aritmética simples dos valores normalizados. Com isso, foi adotado um peso para cada um dos parâmetros, definido a partir da relevância de cada parâmetro no desempenho da lâmpada. A premissa inicial foi de que 70 % do indicador seria composto por parâmetros que envolvessem diretamente aspectos econômicos (vida mediana e eficiência luminosa). Os demais 30 % incluiriam os parâmetros relacionados à qualidade da luz (IRC, temperatura de cor e manutenção do fluxo luminoso) e à qualidade de equipamentos auxiliares (perda nos reatores e THD). A justificativa para o peso individual de cada parâmetro é descrita a seguir:

- **Eficiência luminosa (40 %):** Considerando que duas lâmpadas emitam o mesmo fluxo luminoso, mas que a lâmpada 1 tem o dobro da eficiência da lâmpada 2, isso significa que ao substituir a lâmpada 2 pela 1, o consumo passa a ser metade do inicial, diminuindo bastante o faturamento. Além do retorno econômico, a troca de lâmpadas por outras mais eficientes reduz a demanda por energia na ponta. Dessa forma, esse é o indicador que apresenta o maior peso.
- **Vida mediana (30 %):** A utilização de lâmpadas com maior vida mediana reduz tanto os custos de aquisição de novas lâmpadas como os custos de manutenção do sistema de IP, sendo essencial para o cálculo de viabilidade econômica dos projetos de modernização.
- **IRC (10 %):** Não possui relação direta com os aspectos econômicos, mas é um parâmetro fundamental para avaliar a qualidade de uma fonte luminosa, já que revela sua capacidade de reproduzir em um objeto uma cor fiel à sua cor real, permitindo uma visualização mais nítida do ambiente.
- **THD (10 %):** Apesar de não estar diretamente relacionada às lâmpadas e sim aos equipamentos auxiliares, também é um parâmetro relevante sob o aspecto da qualidade de iluminação, já que tem efeito sobre as formas de onda da tensão e da corrente e podem causar efeitos negativos como sobrecargas.

- Perdas nos reatores (5 %): Está relacionada a aspectos econômicos, uma vez que quanto menores as perdas nos reatores, menor será o consumo. Contudo, elas representam, em média, menos de 15% da potência total (lâmpada e reator). Dessa forma, o peso das perdas nos reatores deve ser inferior a 15% do peso da eficiência luminosa. Com isso, o peso definido foi de 5%, que representa 12,5% do peso do parâmetro da eficiência luminosa.
- Fluxo luminoso residual (3 %): Apesar de proporcionar uma diminuição da eficiência luminosa, a redução do fluxo luminoso só passa a ser percebida à medida em que a lâmpada se aproxima de sua vida útil. Dessa forma, como essa característica não tem uma relevância uniforme durante todo o período de operação da lâmpada, foi dado a ela um peso de apenas 3 %.
- Temperatura de cor (2 %): Como já exposto anteriormente, não existe uma relação direta entre a temperatura de cor e o desempenho da lâmpada. Essa característica é muito mais voltada à sensação que a luz passa, seja a de transmitir um maior conforto ou uma maior atenção. Apesar de esse parâmetro não ser tão relevante, há uma recomendação de que a temperatura de cor para projetos de modernização de sistemas IP esteja dentro de uma faixa específica.

A Equação 6 mostra a composição do indicador geral de desempenho das lâmpadas.

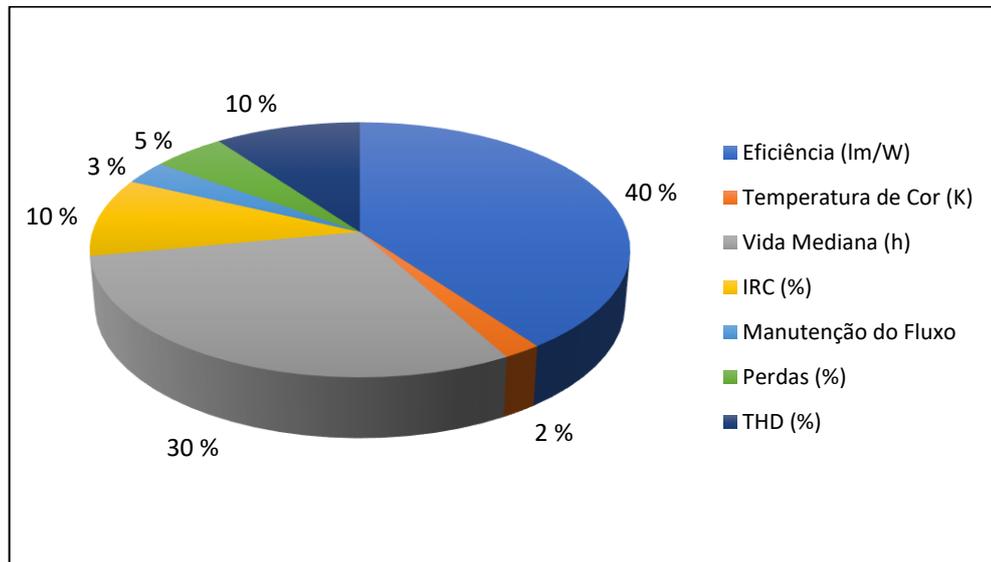
$$P_{lamp} = 0,4 \cdot E_f + 0,3 \cdot V_{med} + 0,1 \cdot THD + 0,1 \cdot IRC + 0,05 \cdot P_{ret} + 0,03 \cdot F_{res} + 0,02 \cdot T_c \quad (6)$$

Onde:

- P_{lamp} é o indicador geral de cada lâmpada;
- E_f é a eficiência luminosa;
- V_{med} é a vida mediana;
- THD é a taxa de distorção harmônica;
- IRC é o índice de reprodução de cores;
- P_{ret} é o percentual de perda nos reatores;
- F_{res} é o fluxo luminoso residual;
- T_c é a temperatura de cor.

Todas as variáveis que constituem o indicador de desempenho de cada lâmpada são dadas em valores normalizados. O Gráfico 5 ilustra a composição do indicador geral de desempenho.

Gráfico 5 - Composição do indicador geral de cada lâmpada



Fonte: O próprio autor

3.4 Composição do indicador geral de eficiência de sistemas de IP

Uma vez coletando os dados sobre a distribuição dos pontos de IP no Brasil por tipo de tecnologia e a partir da criação do indicador geral de desempenho de cada tipo de lâmpada, chegou-se à etapa final da pesquisa, a criação do indicador geral de eficiência do sistema de IP.

A Equação 7 mostra como esse indicador foi construído.

$$P_{geral} = \%_{VS} \cdot P_{VS} + \%_{VM} \cdot P_{VM} + \%_{ME} \cdot P_{ME} + \%_{LED} \cdot P_{LED} + \%_{FL} \cdot P_{FL} + \%_{INC} \cdot P_{INC} + \%_{MIS} \cdot P_{MIS} \quad (7)$$

Onde:

- P_{geral} é o indicador geral de eficiência da IP;
- P_X é o indicador de desempenho de cada lâmpada. O subscrito X representa o tipo de tecnologia;
- $\%_X$ é a quantidade percentual de cada tipo de lâmpada na IP brasileira. O subscrito X representa o tipo de tecnologia.
- VS, VM, ME, LED, FL, INC, MIS representam, respectivamente, as lâmpadas de vapor de sódio, vapor de mercúrio, vapor metálico, LED, fluorescente, incandescente e mista.

As lâmpadas classificadas na categoria “outras” nos levantamentos elaborados pelo PROCEL não foram consideradas no cálculo do indicador geral.

A aplicação do indicador geral de eficiência do sistema de IP foi dividida em duas etapas: evolução histórica e projeções de crescimento.

Como exposto anteriormente, o penúltimo levantamento realizado pelo PROCEL foi em 2008. Naquela época, a tecnologia de lâmpadas de LED não era comercialmente aplicável. Também já foi mencionado que a normalização dos dois principais parâmetros de desempenho das lâmpadas (eficiência luminosa e vida mediana) depende da tecnologia que apresenta os melhores parâmetros de desempenho.

Dessa forma, para tornar a pesquisa mais coerente, foram criados dois cenários para a construção dos indicadores de desempenho das lâmpadas, um deles levou em consideração as lâmpadas de LED e o outro não. Para o cálculo do indicador geral de eficiência dos anos de 1995, 1999, 2004 e 2008, as lâmpadas de LED não foram levadas em consideração. Já para o levantamento realizado em 2018 e para as projeções de crescimento, foi utilizado um cenário que incluiu as lâmpadas de LED.

3.5 Limitações da pesquisa

Uma das principais limitações da pesquisa é a impossibilidade de verificar a evolução anual do indicador geral de eficiência do sistema, já que o levantamento de pontos de IP no Brasil não é realizado frequentemente.

Quanto aos parâmetros de desempenho das lâmpadas, nem sempre os fabricantes divulgam todas as informações necessárias. Além disso, como algumas lâmpadas já não são mais indicadas para aplicações em sistemas de IP, a quantidade de modelos encontrados foi bem menor quando comparada às lâmpadas mais usuais. Além disso, para fazer um estudo mais completo seria necessário entender, por exemplo, se as lâmpadas pesquisadas são uma amostra representativa da população e que tipo de distribuição mais se assemelha com cada um dos parâmetros de desempenho. Certamente, isso aumentaria o nível de confiabilidade, já que o tratamento de dados utilizado nesta pesquisa ocorreu com o uso de cálculos estatísticos básicos.

Em relação à composição do indicador geral de desempenho das lâmpadas, a escolha do peso de cada um dos parâmetros, apesar de ter sido justificada, não necessariamente é a composição mais adequada. Isso revela a dificuldade em se trabalhar com variáveis independentes entre si.

Por fim, com o surgimento de novas tecnologias e o aprimoramento das características das lâmpadas atuais, o indicador é alterado, evidenciando uma limitação temporal da pesquisa.

4 RESULTADOS

Neste tópico, são exibidos os principais resultados da pesquisa. Inicialmente, são mostrados os valores médios dos parâmetros de desempenho por tipo de lâmpada. Em seguida, é analisado o desempenho de cada lâmpada por parâmetro, ressaltando as diferenças e similaridades entre as tecnologias estudadas. Após isso, é evidenciado qual tipo de lâmpada apresenta os melhores resultados e, por fim, a partir do indicador geral de eficiência do sistema de IP, é realizada uma análise sobre a evolução do Brasil no cenário da iluminação e quais as perspectivas de crescimento.

4.1 Valores médios dos padrões de desempenho por tipo de tecnologia

Os valores médios adotados para a eficiência luminosa, a temperatura de cor, a vida mediana e o IRC, obtidos a partir dos dados de fabricantes, estão detalhados neste tópico. Além dos valores médios, também é apresentado o desvio padrão de cada amostra, possibilitando expressar a uniformidade dos dados coletados.

4.1.1 Lâmpadas de vapor de sódio

A Tabela 13 traz os resultados dos valores médios para as lâmpadas de vapor de sódio.

Tabela 13- Valores médios das lâmpadas de Vapor de Sódio

Parâmetro	N° de Amostras	Valor médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Eficiência Luminosa (lm/W)	43	105,91	17,55	16,80 %
Temperatura de Cor (K)	43	2016,28	78,47	3,89 %
Vida Mediana (h)	43	27627,91	3471,13	12,56 %
IRC (%)	25	22,56	2,45	10,86 %

Fonte: O próprio autor

Diante desses resultados, os parâmetros de desempenho das lâmpadas de vapor de sódio atenderam o critério de uniformidade da amostra, já que o desvio padrão relativo foi

inferior a 20 %. Portanto, os valores médios obtidos foram efetivamente utilizados para a normalização dos indicadores de desempenho.

4.1.2 *Lâmpadas de vapor de mercúrio*

A Tabela 14 traz os resultados dos valores médios para as lâmpadas de vapor de mercúrio.

Tabela 14 - Valores médios das lâmpadas de Vapor de Mercúrio

Parâmetro	Nº de Amostras	Valor médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Eficiência Luminosa (lm/W)	18	51,26	3,98	7,77 %
Temperatura de Cor (K)	14	4064,29	100,82	2,48 %
Vida Mediana (h)	16	16250,00	4837,35	29,77 %
IRC (%)	8	53,38	13,97	26,17 %

Fonte: O próprio autor

O número de amostras pesquisadas foi inferior em relação às lâmpadas de vapor de sódio, principalmente por esse tipo de tecnologia já não ser mais indicado para IP. Uma das consequências da baixa quantidade de amostras foi um maior desvio padrão relativo nos parâmetros da vida mediana e do IRC, superior a 20 %. Apesar dessa dispersão, os dois parâmetros se aproximam dos valores adotados por Lindinho (2015), apresentados no referencial teórico.

4.1.3 *Lâmpadas de vapor metálico*

A Tabela 15 traz os resultados dos valores médios para lâmpadas de vapor metálico.

Tabela 15 - Valores médios das lâmpadas de Vapor Metálico

Parâmetro	Nº de Amostras	Valor médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Eficiência Luminosa (lm/W)	47	88,64	25,97	29,30 %
Temperatura de Cor (K)	47	4602,13	584,02	12,69 %
Vida Mediana (h)	27	11481,48	4560,45	39,72 %
IRC (%)	23	74,61	11,17	14,97 %

Fonte: O próprio autor

Para as lâmpadas de vapor metálico, tanto a eficiência luminosa como a vida mediana apresentaram dispersão superior a 20 %. Comparando mais uma vez com os valores adotados por Lindinho (2015), apresentados no referencial teórico, a eficiência luminosa média encontrada está dentro dos limites definidos pelo autor. A vida mediana encontrada através da consulta aos dados dos fabricantes é um pouco menor do que o valor adotado pelo autor. Portanto, os valores médios calculado foram efetivamente utilizados para a normalização.

4.1.4 Lâmpadas de LED

A Tabela 16 traz os resultados dos valores médios para lâmpadas de LED.

Tabela 16 - Valores médios das lâmpadas de LED

Parâmetro	N° de Amostras	Valor médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Eficiência Luminosa (lm/W)	53	122,39	15,74	12,86 %
Temperatura de Cor (K)	53	4886,79	750,91	15,37 %
Vida Mediana (h)	51	50000,00	0,00	0,00 %
IRC (%)	44	70,45	2,11	2,99 %

Fonte: O próprio autor

Em relação às lâmpadas de LED, todos os parâmetros apresentaram desvio padrão relativo inferior a 20 %. Um destaque é o parâmetro da vida mediana, já que os 51 modelos pesquisados apresentaram a mesma estimativa de vida mediana, tornando o desvio padrão nulo.

4.1.5 Lâmpadas fluorescentes

A Tabela 17 traz os resultados dos valores médios para lâmpadas fluorescentes.

Tabela 17 - Valores médios das lâmpadas fluorescentes

Parâmetro	N° de Amostras	Valor médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Eficiência Luminosa (lm/W)	30	60,19	6,70	11,14 %
Temperatura de Cor (K)	30	5112,60	1755,38	34,33 %
Vida Mediana (h)	21	6000,00	0,00	0,00 %
IRC (%)	7	80,00	0,00	0,00 %

Fonte: O próprio autor

Mais uma vez, a vida mediana apresentou desvio padrão igual a zero, o que demonstra a uniformidade dos dados coletados. Embora o IRC também não tenha apresentado nenhuma dispersão, isso pode ser justificado pelo baixo número de amostras coletadas. A temperatura de cor apresentou dispersão superior a 20 %. Conforme já apresentado no referencial teórico, essas lâmpadas apresentam um grande intervalo de temperatura de cor, que vai de 2700 a 6000 K. De fato, nos modelos pesquisados, as temperaturas de cor predominantes alternavam entre quente (2700 K) e fria (6400 K).

4.1.6 *Lâmpadas mistas*

A Tabela 18 traz os resultados dos valores médios para lâmpadas mistas.

Tabela 18 - Valores médios das lâmpadas mistas

Parâmetro	N° de Amostras	Valor médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Eficiência Luminosa (lm/W)	18	21,12	3,59	17,00 %
Temperatura de Cor (K)	15	3573,33	406,14	11,37 %
Vida Mediana (h)	12	7666,67	2146,17	27,99 %
IRC (%)	3	62,33	1,15	1,85 %

Fonte: O próprio autor

O desvio padrão da vida mediana foi superior a 20 %. Contudo, o valor médio se aproxima do valor apresentado no referencial teórico, de 8000 h. Apenas três modelos pesquisados apresentaram informações sobre o IRC. Contudo, o valor médio calculado também se aproxima do valor apresentado no referencial teórico.

4.1.7 *Lâmpadas incandescentes*

A Tabela 19 traz os resultados dos valores médios para lâmpadas incandescentes.

Tabela 19 - Valores médios das lâmpadas incandescentes

Parâmetro	N° de Amostras	Valor médio	Desvio Padrão	Desvio Padrão (%)
Eficiência Luminosa (lm/W)	12	11,39	3,98	34,97 %
Temperatura de Cor (K)	12	2716,67	38,92	1,43 %
Vida Mediana (h)	17	1029,41	384,08	37,31 %
IRC (%)	17	100,00	0,00	0,00 %

Fonte: O próprio autor

As lâmpadas incandescentes têm IRC de 100 % por conta de seu princípio de funcionamento. Assim, o desvio padrão é nulo. A eficiência luminosa apresentou desvio padrão superior a 20 %. Apesar disso, o valor médio está dentro dos limites apresentados no referencial teórico. A vida mediana calculada foi um pouco superior a 1000 h, valor adotado por Lindinho (2015).

4.2 Normalização dos indicadores de desempenho

Os resultados mostrados a seguir são referentes à normalização tanto dos parâmetros cujos valores médios foram calculados anteriormente, como àqueles adotados a partir de revisão bibliográfica. Vale ressaltar que a normalização dos indicadores da eficiência luminosa e da vida mediana leva em consideração dois cenários, um deles inclui as lâmpadas de LED enquanto o outro as exclui.

4.2.1 Eficiência luminosa

A Tabela 20 traz um comparativo entre os valores da eficiência luminosa dos diferentes tipos de tecnologias de lâmpadas. Vale lembrar que a eficiência luminosa é um dos parâmetros que utilizam o valor da lâmpada com melhor desempenho como base. Assim, a normalização leva em consideração dois cenários, um deles inclui as lâmpadas de LED enquanto o outro as exclui.

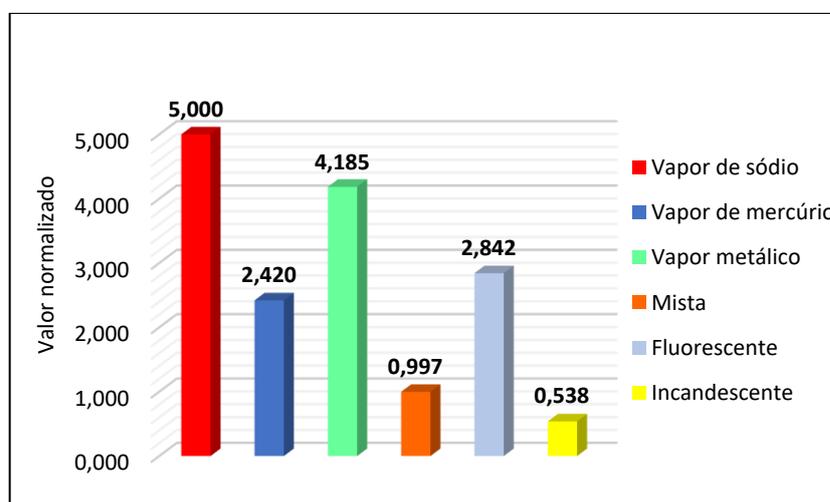
Tabela 20 – Valores da eficiência luminosa normalizados

Tecnologia da lâmpada	Valor médio (lm/W)	Valor normalizado (excluindo LED)	Valor normalizado (incluindo LED)
Vapor de Sódio	105,91	5,000	4,327
Vapor de Mercúrio	51,26	2,420	2,094
Vapor Metálico	88,64	4,185	3,621
LED	122,39	-	5,000
Mista	21,12	0,997	0,863
Fluorescente	60,19	2,842	2,459
Incandescente	11,39	0,538	0,465

Fonte: o próprio autor

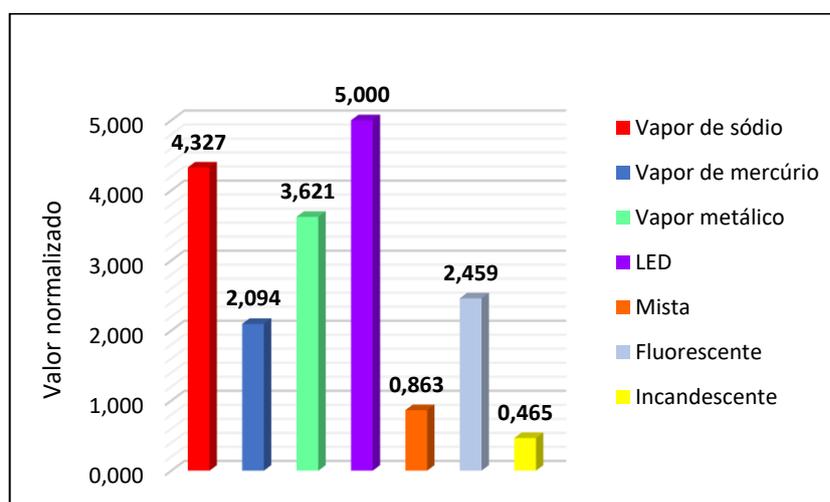
É possível observar que, em um cenário onde as lâmpadas de LED não são incluídas, as lâmpadas de vapor de sódio são as que apresentam o melhor indicador, de modo que todas as outras são normalizadas a partir dele. Com a inclusão das lâmpadas de LED, o cenário se modifica, já que, como a base para a normalização muda, o indicador das outras tecnologias também se altera. Os Gráficos 6 e 7 trazem, respectivamente, um comparativo entre os valores da eficiência luminosa normalizada excluindo e incluindo as lâmpadas de LED.

Gráfico 6 - Eficiência luminosa normalizada excluindo lâmpadas de LED



Fonte: O próprio autor

Gráfico 7 - Eficiência luminosa normalizada incluindo lâmpadas de LED



Fonte: O próprio autor

Apenas analisando a eficiência luminosa já é possível compreender umas das razões pelas quais as lâmpadas de vapor de mercúrio foram sendo gradativamente substituídas pelas lâmpadas de vapor de sódio, já que o valor do parâmetro é quase o dobro. As lâmpadas de vapor metálico apresentaram um bom desempenho, mas não o suficiente para competir com as lâmpadas de vapor de sódio, considerando exclusivamente esse aspecto.

O sistema de IP passa atualmente por uma modernização baseada na troca de lâmpadas de vapor de sódio por lâmpadas de LED, que apresentam eficiência maior. Contudo, o impacto dessa mudança no sistema é menor quando comparado ao impacto causado pela substituição das lâmpadas de vapor de mercúrio por vapor de sódio. Isso porque não há uma grande diferença dos valores de eficiência entre as lâmpadas de vapor de sódio e as de LED.

As lâmpadas mistas e as incandescentes apresentaram um desempenho bem inferior às demais por conta do funcionamento baseado no fenômeno da incandescência.

4.2.2 Vida mediana

A Tabela 21 traz um comparativo entre os valores da vida mediana dos diferentes tipos de tecnologias de lâmpadas. Vale lembrar que a vida mediana é outro parâmetro que utiliza o indicador de maior valor como base de cálculo. Assim, a normalização também leva em consideração dois cenários, um deles incluindo e outro excluindo as lâmpadas de LED.

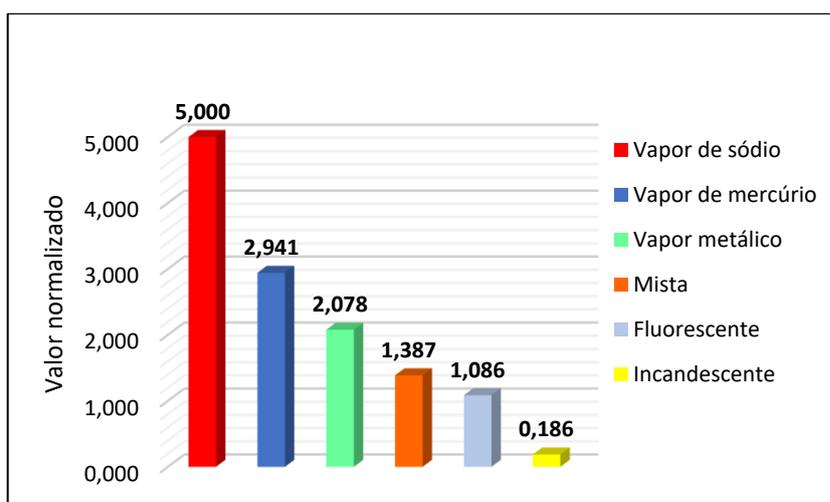
Tabela 21 - Valores da vida mediana normalizados

Tecnologia da lâmpada	Valor médio (h)	Valor normalizado (excluindo LED)	Valor normalizado (incluindo LED)
Vapor de Sódio	27627,91	5,000	2,763
Vapor de Mercúrio	16250,00	2,941	1,625
Vapor Metálico	11481,48	2,078	1,148
LED	50000,00		5,000
Mista	7666,67	1,387	0,767
Fluorescente	6000,00	1,086	0,600
Incandescente	1029,41	0,186	0,103

Fonte: O próprio autor

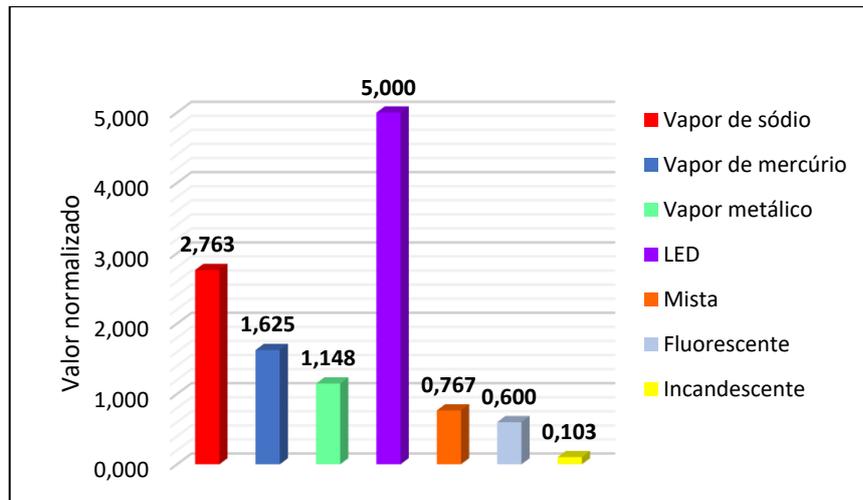
Os Gráficos 8 e 9 trazem, respectivamente, um comparativo entre os valores da vida mediana normalizada excluindo e incluindo as lâmpadas de LED.

Gráfico 8 – Vida mediana normalizada excluindo lâmpadas de LED



Fonte: O próprio autor

Gráfico 9 - Vida mediana normalizada incluindo lâmpadas de LED



Fonte: O próprio autor

Mais uma vez, no cenário que não leva em consideração as lâmpadas de LED, as lâmpadas de vapor de sódio são as que apresentaram o melhor desempenho. Contudo, diferentemente do que foi observado na eficiência luminosa, a vida mediana das lâmpadas de vapor de sódio é muito superior à das demais tecnologias. As lâmpadas de vapor metálico, por exemplo, cuja eficiência luminosa não difere tanto das lâmpadas de vapor de sódio, revela não ser uma boa escolha quando também é levado em consideração a sua vida mediana.

Com a inclusão de lâmpadas de LED, chega-se a uma das principais justificativas para o incentivo desse tipo de lâmpada em sistemas de IP. Nenhuma outra tecnologia sequer se aproxima das lâmpadas de LED quando se trata de vida mediana.

Para esse indicador, o impacto causado pela substituição de lâmpadas de vapor de mercúrio por lâmpadas de vapor de sódio se equipara ao impacto que será causado na medida em que as lâmpadas de LED passarem a ocupar o espaço que hoje é ocupado por lâmpadas de vapor de sódio.

4.2.3 IRC

A Tabela 22 traz um comparativo entre os valores do IRC dos diferentes tipos de tecnologias de lâmpadas. A normalização independe dos valores dos parâmetros das outras lâmpadas. Portanto, não há necessidade de avaliar mais de um cenário.

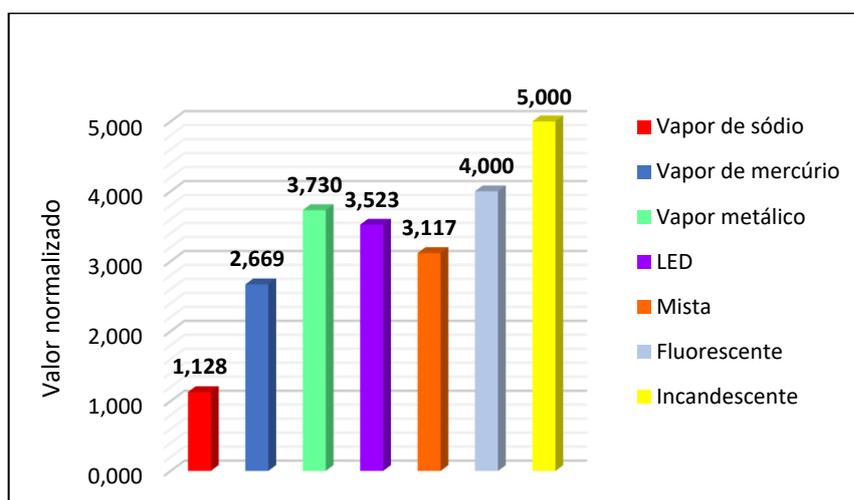
Tabela 22 - Valores do IRC normalizados

Tecnologia da lâmpada	Valor médio (%)	Valor normalizado
Vapor de Sódio	22,56	1,128
Vapor de Mercúrio	53,38	2,669
Vapor Metálico	74,61	3,730
LED	70,45	3,523
Mista	62,33	3,117
Fluorescente	80,00	4,000
Incandescente	100,00	5,000

Fonte: O próprio autor

O Gráfico 10 traz um comparativo entre os valores do IRC normalizados.

Gráfico 10 – IRC normalizado



Fonte: O próprio autor

O IRC das lâmpadas incandescentes é o maior entre as tecnologias já utilizadas no sistema de IP, e isso se deve ao seu princípio de funcionamento. Essa característica, contudo, não é suficiente para que essa tecnologia tenha seu uso incentivado. Sua baixa eficiência luminosa e seu curto tempo de vida eliminam qualquer possibilidade de classificar as lâmpadas incandescentes como sendo adequadas para a IP.

Em geral, o IRC das outras lâmpadas apresenta valores aceitáveis. A única exceção são as lâmpadas de vapor de sódio, cujo indicador é o pior entre todas as tecnologias. Apesar de não ser o principal critério para substituição de lâmpadas, a qualidade da iluminação não pode ser desprezada.

Um ponto que também deve ser destacado é que as lâmpadas de LED nem sequer estão entre as três melhores tecnologias. Isso indica que não existe uma tecnologia que seja

excelente em todos os critérios. Por conta disso, torna-se necessário priorizar alguns parâmetros em detrimento de outros.

4.2.4 Temperatura de Cor

A Tabela 23 traz um comparativo entre os valores da temperatura de cor dos diferentes tipos de tecnologias de lâmpadas. A normalização, mais uma vez, independe dos valores dos parâmetros das outras lâmpadas. Portanto, não há necessidade de avaliar mais de um cenário.

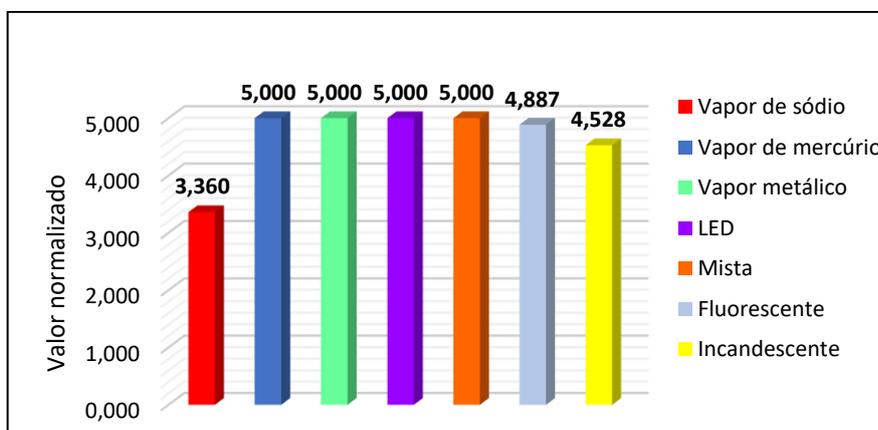
Tabela 23 - Valores da temperatura de cor normalizados

Tecnologia da lâmpada	Valor médio (K)	Valor normalizado
Vapor de Sódio	2016,28	3,360
Vapor de Mercúrio	4064,29	5,000
Vapor Metálico	4602,13	5,000
LED	4886,79	5,000
Mista	3573,33	5,000
Fluorescente	5112,60	4,887
Incandescente	2716,67	4,528

Fonte: O próprio autor

O Gráfico 11 traz um comparativo entre os valores de temperatura de cor normalizados.

Gráfico 11 – Temperatura de Cor normalizada



Fonte: O próprio autor

Como a maior parte das lâmpadas está dentro da faixa de valores delimitada entre 3000 e 5000 K, apenas as lâmpadas de vapor de sódio, as incandescentes e as fluorescentes não atingiram o valor máximo do indicador. As duas primeiras apresentaram temperatura de cor mais quente, abaixo dos 3000 K. Já as fluorescentes, mais frias, apresentaram temperatura de cor média acima de 5000 K.

É importante reiterar que a temperatura de cor não interfere na eficiência da lâmpada e, diferentemente do IRC, também não tem relação direta com a qualidade da luz. Portanto, não é um indicador que deve ser priorizado. Apesar disso, ele não pode ser totalmente desprezado uma vez que há uma recomendação de que as lâmpadas utilizadas em sistemas de IP apresentem a temperatura de cor dentro de uma faixa delimitada.

4.2.5 *Manutenção do fluxo luminoso*

A Tabela 24 traz um comparativo entre os valores da manutenção do fluxo luminoso (fluxo residual) dos diferentes tipos de lâmpadas. Os valores absolutos foram obtidos a partir de revisão bibliográfica.

Tabela 24 - Valores da manutenção do fluxo luminoso normalizados

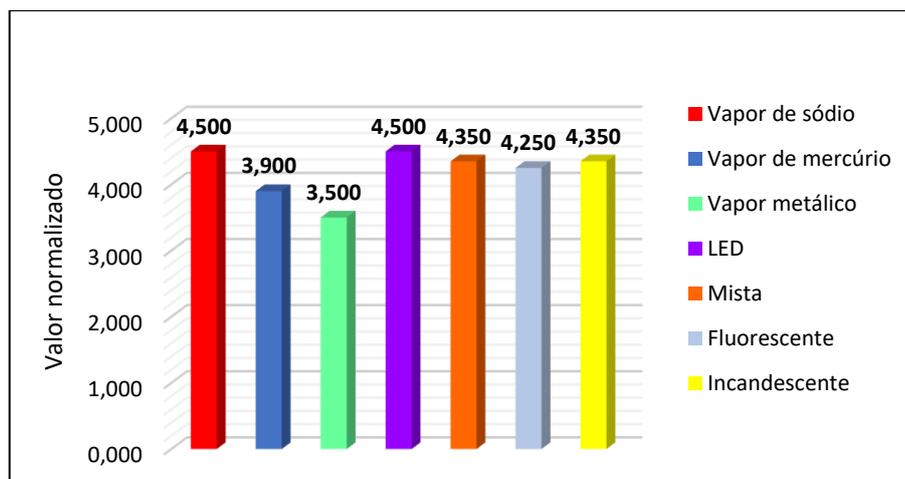
Tecnologia da lâmpada	Valor absoluto (%)²	Valor normalizado
Vapor de Sódio	90	4,500
Vapor de Mercúrio	78	3,900
Vapor Metálico	70	3,500
LED	90	4,500
Mista	87	4,350
Fluorescente	85	4,250
Incandescente	87	4,350

Fonte: O próprio autor

O Gráfico 12 traz um comparativo entre os valores da manutenção do fluxo luminoso normalizados.

² Valores obtidos a partir de Lindinho (2015)

Gráfico 12 – Manutenção do fluxo luminoso normalizado



Fonte: O próprio autor

As lâmpadas de LED e as de vapor de sódio foram as que apresentaram os melhores resultados. Isso significa que, ao se aproximar de seu tempo de vida mediana, essas lâmpadas ainda emitem cerca de 90 % do seu fluxo inicial.

As lâmpadas de vapor de mercúrio e as de vapor metálico apresentaram um desempenho um pouco inferior em relação às demais. Contudo, pode-se observar que os valores são bem semelhantes entre si.

4.2.6 Perda nos reatores

A Tabela 25 traz um comparativo entre os valores das perdas nos reatores dos diferentes tipos de lâmpadas. Os valores absolutos foram obtidos a partir de revisão bibliográfica.

Tabela 25 – Valores das perdas nos reatores normalizados

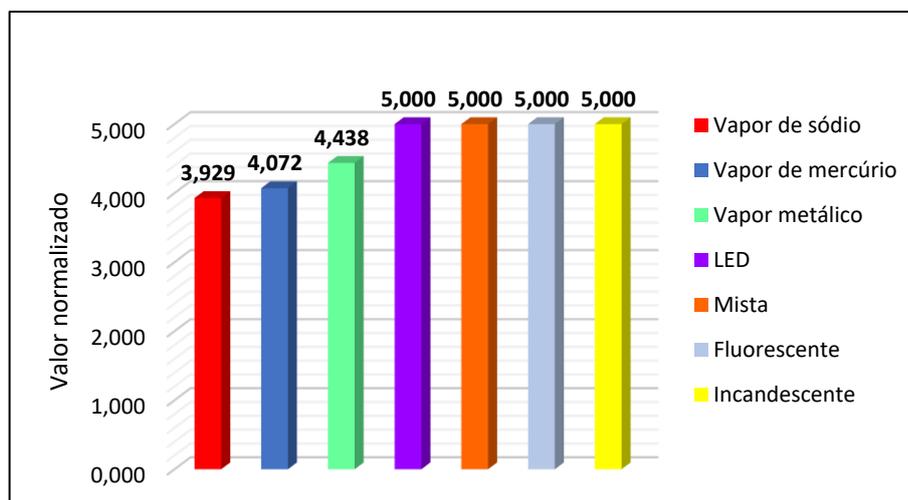
Tecnologia da lâmpada	Valor absoluto (%) ³	Valor normalizado
Vapor de Sódio	21	3,929
Vapor de Mercúrio	19	4,072
Vapor Metálico	11	4,438
LED	0	5,000
Mista	0	5,000
Fluorescente	0	5,000
Incandescente	0	5,000

Fonte: O próprio autor

³ Valores obtidos a partir de Silva (2006)

O Gráfico 13 traz um comparativo entre os valores das perdas nos reatores normalizados.

Gráfico 13 – Perda nos reatores normalizada



Fonte: O próprio autor

As perdas nos reatores são uma característica exclusiva das lâmpadas que necessitam desse equipamento auxiliar para operar.

Entre as lâmpadas de descarga de alta pressão, as de vapor metálico foram as que apresentaram um reator mais eficiente, garantindo que a maior parte da potência absorvida seja transformada em energia luminosa. Já as lâmpadas de vapor de sódio foram as que apresentaram o pior desempenho. A eficiência luminosa dessas lâmpadas diminui quando considerado que a potência consumida não equivale somente à potência da lâmpada, mas também às perdas nos equipamentos auxiliares.

Esse parâmetro tem uma grande relevância para a eficiência energética, uma vez que um de seus princípios é a redução das perdas. Novamente, as lâmpadas de LED mostram ser uma boa alternativa já que não necessitam desse tipo de equipamento para funcionar.

4.2.7 Taxa de Distorção Harmônica

A Tabela 26 traz um comparativo entre os valores da THD dos diferentes tipos de lâmpadas. Os valores absolutos foram obtidos a partir de revisão bibliográfica.

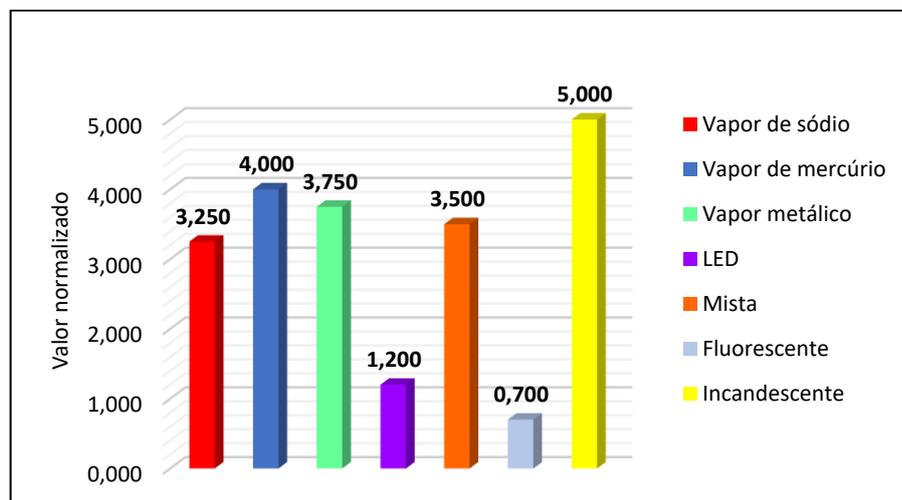
Tabela 26 – Valores de THD normalizados

Tecnologia da lâmpada	Valor absoluto (%)⁴	Valor normalizado
Vapor de Sódio	35	3,250
Vapor de Mercúrio	20	4,000
Vapor Metálico	25	3,750
LED	76	1,200
Mista	30	3,500
Fluorescente	86	0,700
Incandescente	0	5,000

Fonte: O próprio autor

O Gráfico 14 traz um comparativo entre os valores da THD normalizados.

Gráfico 14 – THD normalizada



Fonte: O próprio autor

Esse é um dos poucos aspectos em que as lâmpadas de LED apresentaram um dos piores indicadores. Isso se deve principalmente por seu funcionamento estar associado à eletrônica. Isso significa que o uso de lâmpadas de LED, apesar de proporcionar uma maior eficiência, aumenta a quantidade de harmônicos na rede, afetando a qualidade da energia.

Como a distorção harmônica está relacionada à não linearidade das cargas, isso também afeta as lâmpadas de descarga independentemente do tipo de reator, uma vez que o processo de formação do arco elétrico envolve a atuação de cargas não lineares. Mas como pode ser percebido, o impacto causado pelas lâmpadas de descarga de alta pressão é cerca de um terço daquele causado pelas lâmpadas de LED.

⁴ Valores obtidos a partir de Pires (2006), Cattaneo (2007) e Carvalho (2015)

Entre as lâmpadas de descarga de alta pressão, a de vapor de sódio foi a que apresentou o pior desempenho apesar de não haver uma grande diferença entre os valores.

4.3 Indicador geral de desempenho das lâmpadas

A Tabela 27 mostra o resultado geral do desempenho de cada uma das lâmpadas com base nos pesos dados a cada um dos parâmetros. São apresentados dois cenários, um deles inclui e o outro exclui as lâmpadas de LED.

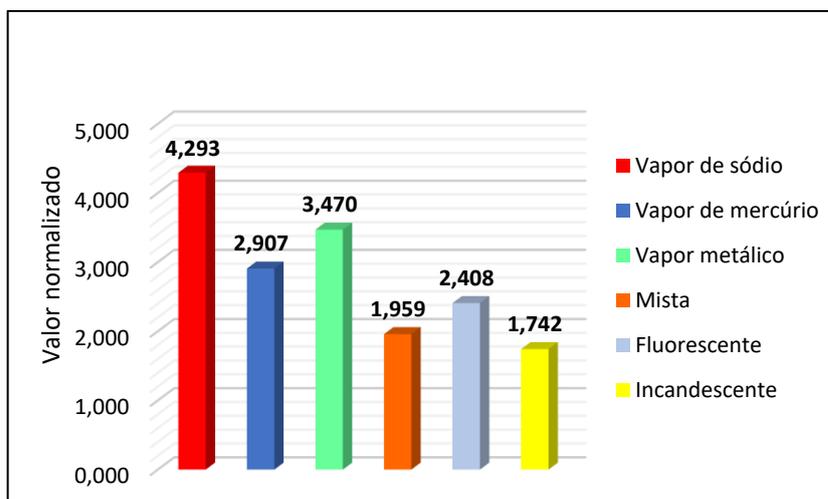
Tabela 27 – Indicador geral de desempenho das lâmpadas

Tecnologia da lâmpada	Indicador Geral (excluindo LED)	Indicador Geral (incluindo LED)
Vapor de Sódio	4,2932	3,3959
Vapor de Mercúrio	2,9070	2,4125
Vapor Metálico	3,4696	2,9679
LED		4,4573
Mista	1,9587	1,7173
Fluorescente	2,4078	2,1088
Incandescente	1,7420	1,6880

Fonte: O próprio autor

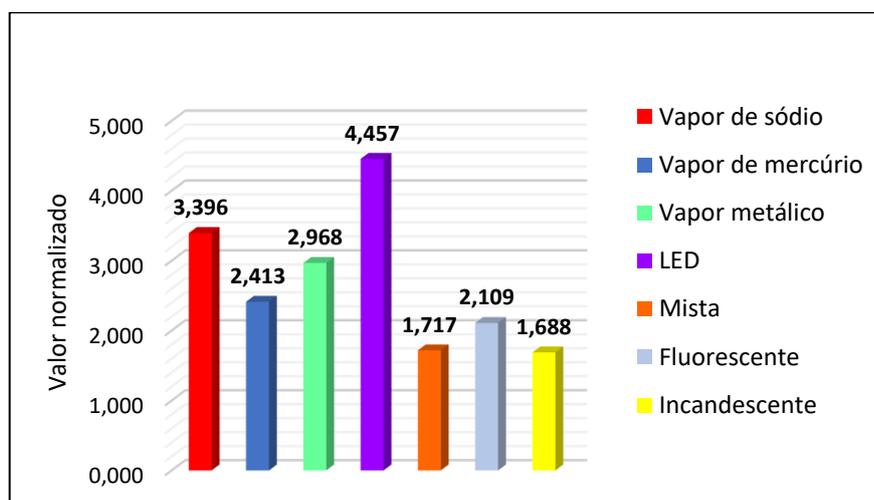
Os Gráficos 15 e 16 trazem, respectivamente, o indicador geral de desempenho das lâmpadas com a exclusão e com a inclusão das lâmpadas de LED.

Gráfico 15 - Indicador geral excluindo lâmpadas de LED



Fonte: O próprio autor

Gráfico 16 - Indicador geral incluindo lâmpadas de LED



Fonte: O próprio autor

Analisando inicialmente apenas o cenário em que as lâmpadas de LED são excluídas, percebe-se que as lâmpadas de vapor de sódio realmente são as mais eficientes. O que significa que os esforços para a substituição de lâmpadas de vapor de mercúrio por lâmpadas de vapor de sódio foram bem direcionados.

Diante de um cenário onde não existem lâmpadas de LED, as lâmpadas de vapor de sódio representam o que há de melhor em termos de desempenho, apesar de, em geral, não ter índices satisfatórios quando se trata de qualidade da energia. Isso evidencia que, em certos casos, é necessário priorizar uma característica em detrimento de outra.

Entre as lâmpadas de descarga de alta pressão, as de vapor de mercúrio foram as que apresentaram o pior resultado, mas ainda assim têm resultados mais positivos do que as lâmpadas fluorescentes, as mistas e as incandescentes.

Analisando um contexto que representa melhor o cenário atual, isto é, que inclui as lâmpadas de LED, é possível perceber que, mais uma vez, os esforços para a substituição dos pontos de iluminação existentes por luminárias de LED são bem direcionados, já que elas apresentaram o melhor indicador de desempenho.

As lâmpadas incandescentes e as mistas, que têm seu princípio de funcionamento totalmente ou parcialmente baseados no fenômeno da incandescência foram as que apresentaram os piores indicadores gerais. Apesar de as lâmpadas mistas, em teoria, unirem características positivas tanto das lâmpadas de descarga como das lâmpadas incandescentes, elas também possuem características negativas de ambas as tecnologias. Elas não apresentam

eficiência luminosa tão boa quanto às lâmpadas de descarga e nem bons resultados para o IRC e a THD como as lâmpadas incandescentes. Isso faz com que seu indicador geral de desempenho se aproxime do indicador das incandescentes, uma tecnologia mais simples. Adotando esse indicador como critério, a substituição de lâmpadas incandescentes por mistas não é viável tecnicamente.

As lâmpadas fluorescentes, que são do tipo de descarga de baixa pressão, apresentaram o 3º pior desempenho, situando-se entre aquelas baseadas na incandescência e as de descarga de alta pressão.

Em seguida, em ordem crescente, têm-se as lâmpadas de vapor de mercúrio, de vapor metálico e de vapor de sódio como sendo as que apresentaram os melhores indicadores. O que essas lâmpadas têm em comum é seu princípio de funcionamento. Apesar de diferentes entre si, todas apresentam limitações que, mesmo com o avanço das tecnologias, não podem ser eliminadas, como as perdas nos reatores. Comparando-as entre si, a substituição das lâmpadas de vapor de mercúrio é sempre indicada. Apesar de possuir vida mediana superior à das lâmpadas de vapor metálico, suas demais características reduzem seu desempenho.

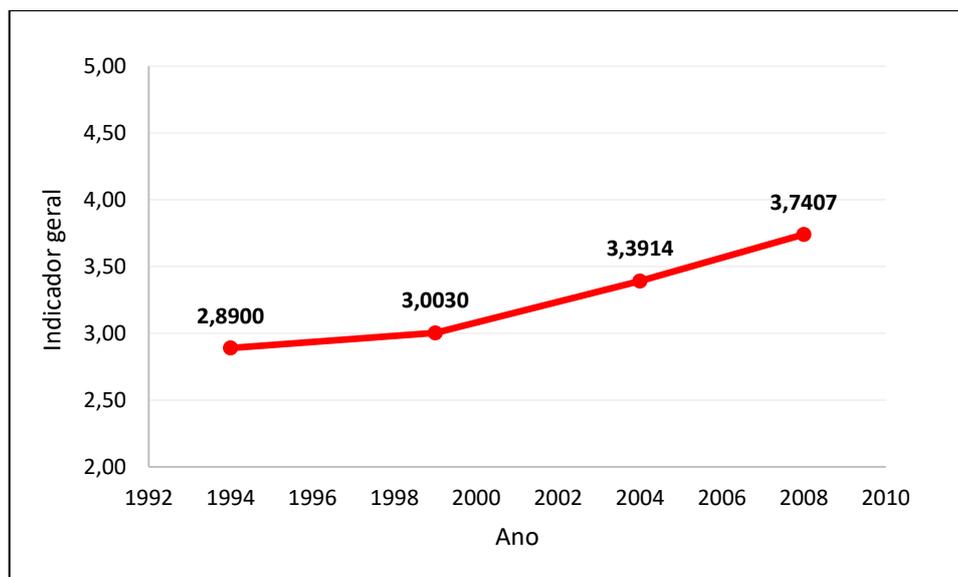
Já as lâmpadas de LED, que obtiveram os melhores resultados, têm um princípio de funcionamento que aumenta seu tempo de vida em relação às demais, garante bons níveis de eficiência, dispensa a necessidade de reator, mas afeta a qualidade da energia devido a presença de harmônicos, que não podem ser eliminados já que são inerentes ao circuito eletrônico que compõe as lâmpadas. Essa é uma das características que limitam o desempenho das luminárias de LED.

Com isso, conclui-se que o princípio de funcionamento é determinante para a classificação das lâmpadas, visto que o desempenho de lâmpadas de LED foi superior ao de todas as lâmpadas de descarga que, por sua vez, tiveram desempenho superior ao daquelas que possuem filamento de lâmpada incandescente.

4.4 Indicador geral de eficiência do sistema de IP brasileiro

O Gráfico 17 mostra a evolução do indicador geral de eficiência do sistema de IP brasileiro registrado entre os anos de 1994 e 2008.

Gráfico 17- Evolução histórica do indicador geral de eficiência



Fonte: O próprio autor

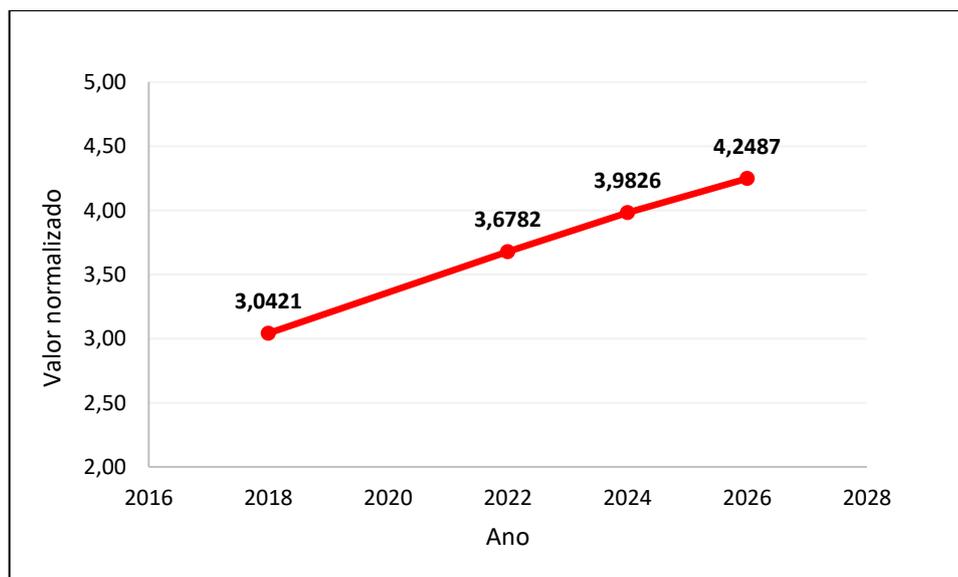
A partir do Gráfico 17, percebe-se que o Brasil começou a experimentar uma melhoria mais significativa no sistema de IP a partir de 1999. Entre os anos de 1994 e 1999, o país teve um aumento médio do indicador de 0,0226 por ano. Já de 1999 a 2008, o aumento médio anual foi de 0,08197.

Esse crescimento evidencia a importância do incentivo à substituição de lâmpadas de vapor de mercúrio por lâmpadas de vapor de sódio proposta pelos programas de eficiência energética existentes no Brasil. Sabendo que até em 2008 as lâmpadas de vapor de sódio apresentavam o melhor indicador geral, de 4,2932, e considerando que o ritmo de crescimento do indicador geral de eficiência do sistema de IP se mantivesse constante, demoraria cerca de 7 anos para que o Brasil atingisse o nível máximo de eficiência diante das tecnologias existentes, isto é, até 2015 quase 100 % das lâmpadas do país seriam de vapor de sódio.

Essa previsão, contudo, não se concretizou, uma vez que em 2018 apenas 70 % das lâmpadas eram de vapor de sódio, o que significa que o ritmo de crescimento das substituições diminuiu.

Além disso, com os avanços das tecnologias, principalmente com o surgimento das luminárias de LED, o cenário se modificou. O Gráfico 18 mostra o cenário atual da eficiência do sistema de IP brasileiro e as projeções futuras considerando que atualmente as lâmpadas de LED representam o que há de melhor em termos de eficiência.

Gráfico 18 - Projeção de crescimento do indicador geral de eficiência



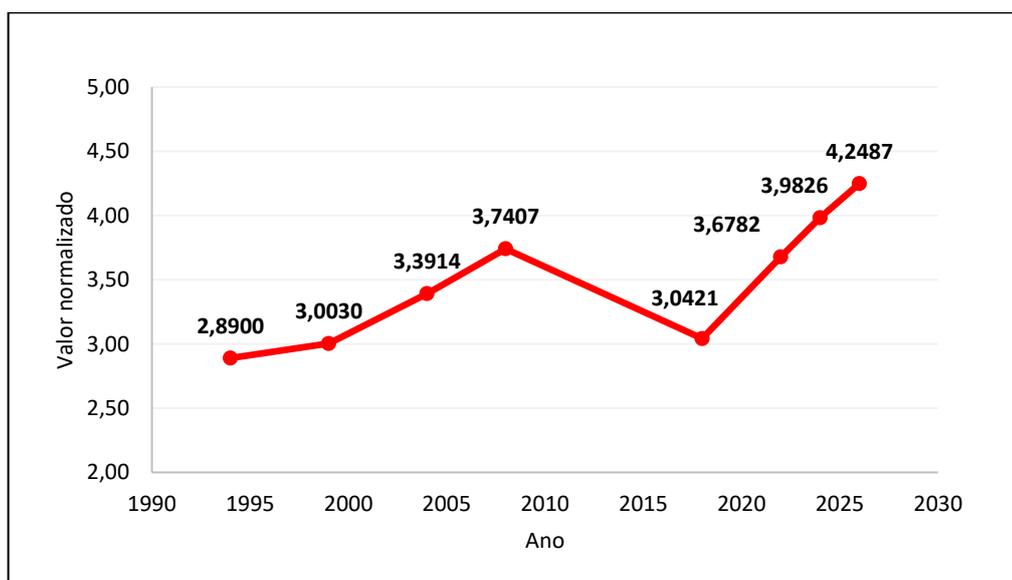
Fonte: O próprio autor

O primeiro ponto que deve ser observado é que o indicador geral de eficiência do sistema de IP em 2018 é inferior àquele registrado em 2008 mesmo com o aumento das lâmpadas de vapor de sódio, o que ocorre devido à inclusão das lâmpadas de LED no sistema. Com a projeção do Gráfico 18, até 2028 quase todas as lâmpadas do sistema de IP brasileiro seriam de LED e, com isso, o país atingiria o valor máximo do indicador de eficiência diante das tecnologias existentes.

Contudo, é provável que até 2028 outras tecnologias que estão surgindo já estejam sendo aplicadas comercialmente, o que mais uma vez modificará o indicador e possibilitará outras projeções.

O Gráfico 19 traz um panorama geral do indicador de eficiência do sistema de IP brasileiro com base nos cinco últimos levantamentos realizados pelo PROCEL e nas projeções de crescimento.

Gráfico 19 - Panorama geral do Indicador de eficiência do sistema de IP do Brasil



Fonte: O próprio autor

A partir do Gráfico 19, é possível perceber a queda do indicador geral de eficiência do sistema de IP brasileiro, ocasionada pelo início da aplicação das lâmpadas de LED em escala comercial, fazendo com que as lâmpadas de vapor de sódio, predominantes no sistema, deixassem de ser a tecnologia com melhor desempenho.

Considerando um cenário em que o sistema de IP só pode ser considerado eficiente caso o valor do indicador geral seja superior à 3,5, pode-se afirmar que apenas em 2008 o Brasil atingiu essa meta. No contexto atual, seria necessário que cerca de 47 % das lâmpadas de vapor de sódio de todo o país fossem substituídas por luminárias de LED para que essa meta fosse atingida novamente.

A estimativa de que até 2028 quase todas as lâmpadas do sistema de IP sejam de LED depende também de um maior volume de investimentos, já que foram necessários 23 anos para que as lâmpadas de vapor de sódio passassem de 7 % para 70 % do total de lâmpadas presentes na IP brasileira. As lâmpadas de LED atualmente representam pouco mais de 3 % do total de pontos de IP do país.

5 CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como intuito promover um estudo sobre a eficiência do sistema de IP brasileiro a partir das tecnologias utilizadas, classificando cada tipo de lâmpada usada no sistema e fornecendo um panorama geral sobre a situação da IP no Brasil.

A partir da pesquisa, foram percebidas algumas necessidades prioritárias, bem como as principais perspectivas de modernização. Para que o Brasil atinja um nível satisfatório de eficiência do sistema de IP nos próximos anos, é necessário que quase metade dos pontos de iluminação do país sejam constituídos por lâmpadas de LED, o que exige um grande aumento das oportunidades de investimentos, já que, mantendo o ritmo experimentado quando as lâmpadas de vapor de mercúrio passaram a ser substituídas por lâmpadas de vapor de sódio, demoraria mais de uma década para que as lâmpadas de LED se tornassem maioria no sistema. É válido ressaltar que esse período é suficiente para que novas tecnologias mais eficientes sejam inseridas no mercado, diminuindo ainda mais o indicador geral de eficiência do sistema. A inserção de novas tecnologias não deve ser vista como algo negativo, mas é necessário estar preparado para absorver essa mudança.

O trabalho também possibilitou a criação de um indicador geral de desempenho das lâmpadas baseado em parâmetros de desempenho independentes entre si. Com isso, foi possível definir quais substituições de lâmpadas foram vantajosas. Com o indicador geral foi possível concluir que a substituição de lâmpadas de vapor de mercúrio por lâmpadas de vapor de sódio foi um esforço muito bem direcionado, que o fato de as lâmpadas de vapor metálico não terem se tornado predominantes no sistema após o declínio das lâmpadas de vapor de mercúrio foi vantajoso e que a eficiência de cada tecnologia está limitada pelo seu princípio de funcionamento.

A partir dos resultados da evolução do indicador ao longo dos anos, conclui-se que, mesmo lentamente, o sistema de IP brasileiro realmente está se modernizando e que há uma evolução que se inicia a partir do aperfeiçoamento de parâmetros básicos das lâmpadas já existentes e continua a partir do desenvolvimento de novas tecnologias. Nesse sentido, a evolução do indicador e, conseqüentemente, do sistema de IP, é cíclica, já que sempre haverá uma nova tecnologia com melhores parâmetros de desempenho que demorará um tempo até ser disseminada. A eficiência do sistema estará vinculada, portanto, à rapidez com que essa tecnologia será absorvida.

Em relação às contribuições, apesar do indicador geral de eficiência ter sido criado com base em dados a nível nacional, os mesmos resultados obtidos podem ser reproduzidos a

nível mundial, permitindo realizar comparações com outros países e a nível municipal, facilitando a tomada de decisão acerca da modernização do sistema e estimulando que o município alcance níveis satisfatórios de eficiência em IP.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos trabalhos pode-se buscar aprimorar o indicador geral de desempenho das lâmpadas, investigando de maneira mais aprofundada como os diferentes parâmetros relacionam-se entre si, para garantir que cada peso adotado represente precisamente a relevância de cada parâmetro para o desempenho geral das lâmpadas no cenário da IP.

Além disso, é importante entender a influência de aspectos econômicos sobre o indicador geral de desempenho das lâmpadas. Ademais, a eficiência do sistema de IP deve ser abordada sobre outros aspectos como a gestão e a regulação, que também são fatores chave para haver qualquer tipo de melhoria na IP brasileira.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5101. Iluminação Pública: Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ANEEL. **Programa de Eficiência Energética**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica>>. Acesso em 01 de jun. de 2021.

ARAUJO, J.; SILVA, L.; FORTES, M. **Avaliação da atualização tecnológica da Iluminação Pública no Brasil**. *IEEE Latin America Transactions*, n° 4, 2020. Disponível em: <<https://latamt.ieeeer9.org/index.php/transactions/article/download/165/484/50593#:~:text=Para%20realizar%20a%20proje%C3%A7%C3%A3o%20do,pontos%20de%20IP%20atualmente%20existentes>>. Acesso em: 11 de jun. de 2021.

ARCHIEXPO. **Poste de Iluminação Pública**. Disponível em: <https://www.archiexpo.com/pt/prod/performance-in-lighting/product-53226-1838063.html>. Acesso em: 24 de ago. 2021.

BARBOSA, Robson. **A gestão e o uso eficiente da energia elétrica nos sistemas de iluminação pública**. 2000. 182 f. Dissertação (Pós-graduação em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Escola Politécnica, Faculdade de Economia e Administração e Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-03042012-090809/publico/RobsonBarbosa.PDF>>. Acesso em: 07 de jun. de 2021.

CARVALHO, F.G. **Caracterização do conteúdo Harmônico em Ambientes Residenciais: Estudo de Caso**. 2015, 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/7556/2/arquivototal.pdf>>. Acesso em: 27 de jul. de 2021.

CASTRO, F.N.; LUCIANO; A.L. **Eficiência energética em sistemas de iluminação pública**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, n° 4, 2012, Goiânia. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/anais/SBSE2012/PDFS/ARTIGOS/96747.PDF>>. Acesso em 07 de jun. de 2021.

CATTANEO, M.M.; RICHARD, S.P; CHINAZZO, T. **Análise dos harmônicos em lâmpadas de LED disponíveis no Brasil**. 2017. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: >http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10072/1/CT_COELE_2017_1_06.pdf>. Acesso em: 13 de mai. de 2021.

EDP Distribuição. **Manual de Iluminação Pública**: Revisão. São Paulo, 2016.

ELÉTRICO, O Setor. **Iluminação Pública e temperatura de cor Ideal**. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/iluminacao-publica-e-temperatura-de-cor-ideal/>>. Acesso em: 31 de jul. de 2021.

ELETROBRAS. **Propostas de Novas Ações no Setor Público**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/iX%20-%20Eletrobras%20-%20PDef%20-%20Produto%2004_vfinal%20-%20gravado%20e%20impresso.pdf>. Acesso em: 10 de jun. de 2021.

EMPALUX. **Catálogo de Produtos**. Disponível em: <<https://empalux.com.br/categoria-produto/iluminacao-publica/>>. Acesso em: 31 de jul. de 2021.

EPE. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-ene1995rgetica-e-eletrica>>. Acesso em: 15 de mai. de 2021.

FORTLIGHT. **Catálogo de Produtos**. Disponível em: <<http://www.fortlight.com.br/categoria/iluminacao-led/publica/>>. Acesso em: 31 de jul. 2021.

GLIGHT. **Catálogo de Produtos**. Disponível em: <<https://www.glight.com.br/>>. Acesso em: 31 de jul. 2021.

LAMAS, N.C; THIAGO, E.V.S. **Patrimônio, cultura e iluminação: uma reflexão sobre o uso da luz no patrimônio cultural**. Revista Tecnologia e Sociedade. Curitiba, n. 20, p. 164-175, jul./dez. 2014.

LINDINHO, M.F.A. **Sistemas de Iluminação Pública inteligentes e de alta eficiência**. 2015. 156 f. Tese (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica-Energia e Automação Industrial) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Viseu, Viseu. Disponível em: <https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/2822/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o_Sistema%20iluminacao%20inteligente_Micael%20Lindinho.pdf>. Acesso em: 13 de mai. de 2021.

LUIZ, C.C. **Estudo de eficiência energética em luminárias destinadas à iluminação pública na cidade de Jaguaruna-SC**. 2016. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville. Disponível em: <<https://sistemabu.udesc.br/pergamumweb/vinculos/00002a/00002a9b.pdf>>. Acesso em: 11 de mai. de 2021.

LUMANTI. **Catálogo de Produtos**. Disponível em: <<http://lumanti.com.br/blog/linha/lampadas/>>. Acesso em: 31 de jul. de 2021.

LUMANTI. **O que é eficiência luminosa**. Disponível em: <<http://lumanti.com.br/blog/2019/03/29/o-que-e-eficiencia-luminosa/>>. Acesso em 22 de ago. de 2021.

LUMICENTER. **Catálogo de Produtos**. Disponível em: <<https://www.lumicenteriluminacao.com.br/>> Acesso em: 31 de jul. 2021.

PAREDES, L.M. **Iluminação Pública no Contexto das Cidades Inteligentes: Matriz Multicritério para Aplicação do LED e da IoT no Brasil**. 2019. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de

Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em:

<<http://www.repositorio.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli2654.pdf>>. Acesso em: 15 de mai. de 2021.

OUROLUX. **Catálogo de Produtos**. Disponível em: <<https://ourolux.com.br/home>>. Acesso em: 31 de jul. de 2021.

PHILIPS. **Catálogo de Produtos**. Disponível em:

<<https://www.lighting.philips.com.br/prof>>. Acesso em: 31 de jul. de 2021.

PIRES, I.A. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. 2006. 157 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/252M.PDF>>. Acesso em: 27 de jul. de 2021.

Prefeitura de Corumbá. **Projeto prevê troca de 9 mil lâmpadas incandescentes por LED na iluminação pública**. Disponível em: <https://www.corumba.ms.gov.br/2017/10/projeto-preve-troca-de-9-mil-lampadas-incandescentes-por-led-na-iluminacao-publica/>. Acesso em: 24 de ago. de 2021.

RBA Iluminação. **Catálogo de Produtos**. Disponível em:

<https://www.rbailuminacao.com.br/produtos/>. Acesso em: 24 de ago. de 2021.

REEEME. **Catálogo de Produtos**. Disponível em: <<http://www.reeme.com.br/tabela-de-lampadas/#1447760247285-4a2208ca-dee5>>. Acesso em: 31 de jul. de 2021.

ROSITO, L.N. **Desenvolvimento da Iluminação Pública no Brasil**. O Setor Elétrico, p. 18-24, março de 2009. Disponível em: <https://www.fne.org.br/upload/documentos/projetos/iluminacao-publica/desenvolvimento_i_p_no_brasil_-_luciano_haas_rosito.pdf>. Acesso em: 05 de jun. de 2021.

SANTOS, C.R.A. **Iluminação Pública e Sustentabilidade Energética**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61677/1/000148456.pdf>>. Acesso em: 11 de mai. de 2021.

SILVA, L.L.F. **Iluminação pública no Brasil: aspectos energéticos e institucionais**. 2006. 161 f. Dissertação (Pós-graduação de engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://antigo.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/llfroes.pdf>>. Acesso em: 10 de jun. de 2021.

SOBRAL, F. **Administração, teoria e prática no contexto brasileiro**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

VLP, Comercial. **Catálogo de Produtos**. Disponível em:

<<https://www.vlpcomercial.com.br/iluminacao.html>>. Acesso em: 31 de jul. de 2021.

WORLD BANK GROUP. *Lighting Brazilian Cities: Business Models For Energy Efficient Public Street Lighting*. Washington, 2017. Disponível em:
<<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29537/ESM-P150942-PUBLICLightingBrazilianCitiesReportENGLISHFINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
Acesso em: 10 de jun. de 2021.