

Avaliação do potencial de eficiência energética na iluminação pública nos municípios paulistas

Carlos Echevarría
José Francisco Pessanha
Mariana Weiss
Michelle Hallack

Divisão de Energia

NOTAS
TÉCNICAS N°
IDB-TN-02727

Avaliação do potencial de eficiência energética na iluminação pública nos municípios paulistas

Carlos Echevarría
José Francisco Pessanha
Mariana Weiss
Michelle Hallack

Agosto de 2023

Catálogo na fonte fornecida pela
Biblioteca Felipe Herrera do
Banco Interamericano de Desenvolvimento

Avaliação do potencial de eficiência energética na iluminação pública nos municípios paulistas / Carlos Echevarría, José Francisco Pessanha, Mariana Weiss, Michelle Hallack.

p. cm. — (Nota técnica do BID ; 2727)

Inclui referências bibliográficas.

1. Electric power consumption-Brazil. 2. Energy consumption-Brazil. 3. Municipal lighting-Brazil. 4. Public administration-Brazil. I. Echevarría, Carlos. II. Pessanha, José. III. Weiss, Mariana. IV. Hallack, Michelle, 1983- V. Banco Interamericano de Desenvolvimento. Divisão de Energia. VIII. Série.

IDB-TN-2727

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2023 Banco Interamericano de Desenvolvimento. Esta obra está licenciada sob uma licença Creative Commons IGO 3.0 Atribuição-NãoComercial-SemDerivações (CC BY-NC-ND 3.0 IGO) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) e pode ser reproduzida com atribuição ao BID e para qualquer finalidade não comercial. Nenhum trabalho derivado é permitido.

Qualquer controvérsia relativa à utilização de obras do BID que não possa ser resolvida amigavelmente será submetida à arbitragem em conformidade com as regras da UNCITRAL. O uso do nome do BID para qualquer outra finalidade que não a atribuição, bem como a utilização do logotipo do BID serão objetos de um contrato por escrito de licença separado entre o BID e o usuário e não está autorizado como parte desta licença CC-IGO.

Note-se que o link fornecido acima inclui termos e condições adicionais da licença.

As opiniões expressas nesta publicação são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente a posição do Banco Interamericano de Desenvolvimento, de sua Diretoria Executiva, ou dos países que eles representam.



Agosto 2023

Avaliação do potencial de
eficiência energética
**NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
NOS MUNICÍPIOS PAULISTAS**

Carlos Echevarría, José Francisco Pessanha,
Mariana Weiss, Michelle Hallack



Agradecimentos

Os autores agradecem a revisão realizada por José Antonio Urteaga e o apoio dos analistas da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SIMA-SP).

Resumo

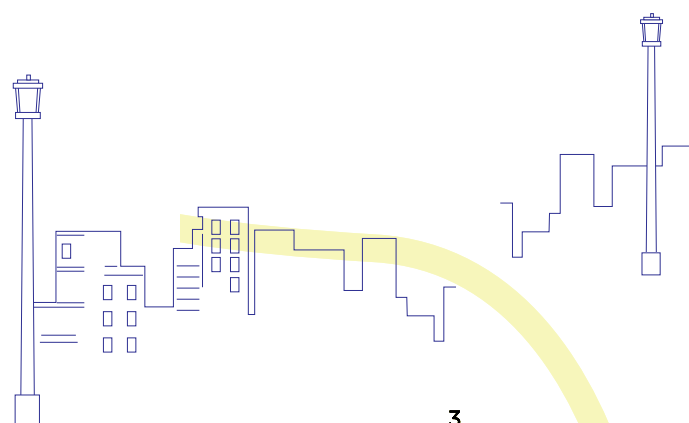
As lâmpadas LED (em inglês, light-emitting diodes) vem se consolidando no mercado principalmente após melhorias tecnológicas e significativa redução de seus custos. Entretanto, ainda há um potencial de eficiência energética a ser explorado pela introdução das lâmpadas LED, principalmente na iluminação pública. Diversos municípios ainda não modernizaram o seu parque de iluminação pública, seja por falta de informação ou por dificuldades de financiamento. Ciente dos benefícios da modernização da iluminação pública e das necessidades de financiamento dos municípios brasileiros, o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) tem desenvolvido projetos que visam viabilizar a modernização dos parques de iluminação pública dos municípios brasileiros. Entretanto, em função da falta de dados publicados e sistematizados sobre os parques de iluminação pública, não é trivial identificar os municípios com maior potencial de eficiência energética na iluminação pública e necessidade de financiamento para projetos de eficiência energética. Desta forma, este trabalho propõe uma metodologia para estimação do potencial de eficiência energética da iluminação pública com base em características socioeconômicas públicas dos municípios e para identificação dos municípios com maiores oportunidades para investimentos no setor. A metodologia foi aplicada ao estudo de caso dos municípios de São Paulo que apresentam uma base harmonizadas de dados históricos do consumo de energia elétrica dos municípios paulistas entre 2016 e 2020 (SIMA/SP, 2021). Em termos agregados a metodologia proposta estimou um potencial de redução do consumo na iluminação pública da ordem de 1249 GWh/ano no Estado de São Paulo, o que seria equivalente a uma economia anual de R\$ 348,68 milhões, sendo que a maior parte deste potencial se encontra nas cidades com população entre 50 mil e 500 mil habitantes. A exploração deste potencial implicaria na substituição de cerca de 2,9 milhões de lâmpadas convencionais por lâmpadas LED mais eficientes em todo o Estado de São Paulo.

Palavras chaves: Eficiência Energética, Iluminação Pública, Consumo de Eletricidade, Gestão Pública Municipal

Códigos JEL: Q40, Q48, H5, H54

Sumário

1. Introdução	7
2. Iluminação Pública no Brasil: Um Contexto de Oportunidades para a Tecnologia LED	11
3. Como estimar o Potencial de Eficiência Energética na Iluminação Pública com restrições de dados?	14
4. Uma Nova Proposta Metodológica para Estimar o Potencial de Eficiência Energética na Iluminação Pública	17
4.1. Avaliação do potencial de economia na Iluminação Pública por meio da análise de fronteira estocástica	17
4.1.1. Apresentação Didática da Metodologia aplicada ao estudo de caso	18
4.1.2. Modelo proposto para estimação do potencial de Eficiência Energética da Iluminação Pública	19
4.2. Classificação dos municípios e identificação dos maiores potenciais de economia na Iluminação Pública	21
5. Potenciais de eficiência energética da iluminação pública dos municípios paulistas	24
6. Classificação dos municípios paulistas com base em seus potenciais de eficiência energética da iluminação pública	31
7. Conclusões	39
Referências Bibliográficas	41



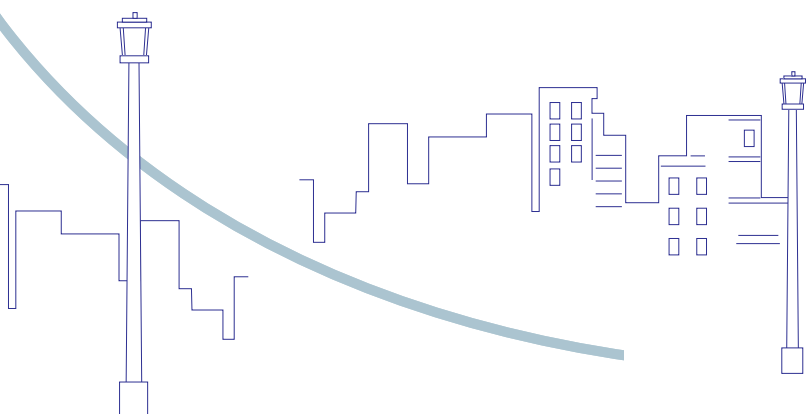
Apêndice A Fronteira Estocástica de Custo	46
Apêndice B Estimativa do número de lâmpadas convencionais e de lâmpadas LED no Estado de São Paulo	49
Apêndice C Intensidade energética na iluminação pública municipal	51
Apêndice D Estimativa alternativa do potencial de economia na iluminação pública no Estado de São Paulo	52
Apêndice E Análise de sensibilidade do potencial de economia de energia	53

Lista de Tabelas

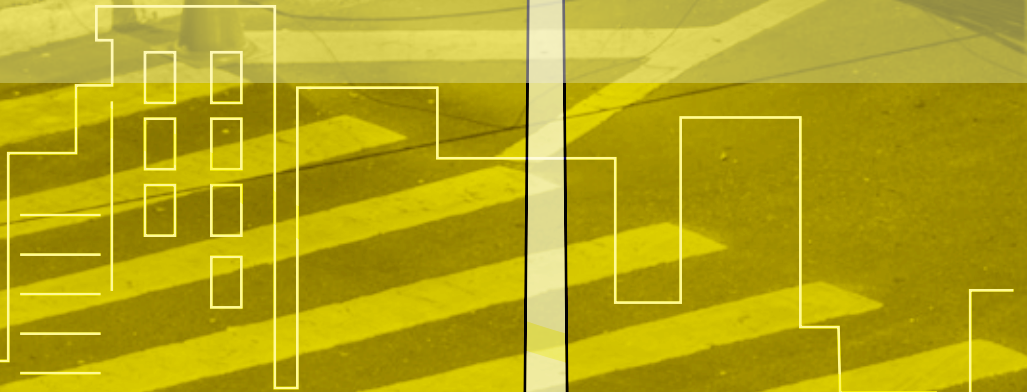
Tabela 1. Interpretação da Classificação em Quadrantes.	22
Tabela 2. Tarifas da iluminação pública (B4a) nos municípios paulistas	25
Tabela 3. Coeficientes de regressão e estatística gama dos modelos ajustados	25
Tabela 4. Top 10 no ranking de eficiência	27
Tabela 5. Bottom 10 no ranking de eficiência.	27
Tabela 6. Classificação dos municípios.	33
Tabela 7. Estatísticas consolidadas para os quadrantes.	34
Tabela 8. Estatísticas consolidadas para os municípios com até 20 mil habitantes.	35
Tabela 9. Estatísticas consolidadas para os municípios com 20 mil até 50 mil habitantes.	35
Tabela 10. Estatísticas consolidadas para os municípios com 50 mil até 500 mil habitantes.	36
Tabela 11. Estatísticas consolidadas para os municípios com mais de 500 mil habitantes.	37

Lista de Figuras

Figura 1. Exemplo Teórico de uma Fronteira de Eficiência.	18
Figura 2. Classificação de Municípios por Quadrantes para avaliação do potencial de eficiência energética na Iluminação Pública.	22
Figura 3. Evolução do consumo de energia elétrica na IP dos municípios paulistas	24
Figura 4. Boxplots dos índices anuais de eficiência da IP nos municípios paulistas.	26
Figure 5. Trajetória da eficiência nos municípios classificados no Top 10 em 2020.	28
Figure 6. Intensidade energética versus eficiência.	29
Figure 7. Mapa resultante da classificação dos municípios.	32



1



1

Introdução

Nos últimos anos, as lâmpadas LED (em inglês, light-emitting diodes) vem se consolidando no mercado após um esforço mundial para eliminação progressiva das lâmpadas incandescentes, halógenas e fluorescentes compactas desde o início dos anos 2000. Desde então, as lâmpadas LED vêm apresentando melhorias tecnológicas e uma significativa redução de seus custos, o que fez com que a participação de mercado das lâmpadas LED passasse de 5% em 2013 para mais da metade das vendas globais de iluminação em 2020 (IEA, 2022). Todavia, ainda é necessário um aumento contínuo na absorção de LED para alcançar um cenário de emissões zero, segundo IEA (2022).

Atualmente, as lâmpadas LED já ultrapassam as lâmpadas fluorescentes para fins comerciais e residenciais. Como prevê o Cenário de Zero Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa (IEA, 2021), a expectativa é que continuem a apresentar um mercado em ascensão e passem a ser majoritárias na composição de vendas de produtos de iluminação até 2025.

Entretanto, a penetração do LED permanece desigual em muitos mercados. A maioria das vendas de lâmpadas LED são destinadas a edifícios recém-construídos, porém já são vistos também avanços em relação à substituição de lâmpadas menos eficientes por lâmpadas LED (IEA, 2021). No caso da iluminação pública (IP), por exemplo, ainda há um grande potencial de eficiência energética a ser desenvolvido através da substituição por lâmpadas LED de lâmpadas de mercúrio e vapor de sódio de alta pressão (VSAP), aditivos metálicos e em alguns casos as lâmpadas incandescentes.

De acordo com Li & Makumbe et al. (2016), um sistema de iluminação pública de baixa qualidade pode representar até 65% dos gastos com consumo de eletricidade de uma cidade e até 5% do orçamento municipal em um ano. Desta forma, diversas cidades ao redor do mundo estão buscando investir em programas iluminação pública que implementam a tecnologia LED. Além de aumentar a eficiência energética da iluminação pública entre 40% e 70% (MEYER et al., 2017) e trazer economia para os cofres públicos, estes investimentos podem trazer externalidades positivas para o município.

As lâmpadas LED, devido à sua maior eficiência e vida útil, podem ajudar a reduzir os custos de operação e manutenção, bem como outras despesas operacionais dos municípios com o parque de iluminação pública¹. A redução destes custos pode ser ainda maior se a adoção da tecnologia LED vier acompanhada de projetos luminotécnicos ou por sistemas inteligentes de telegestão com sensores que permitam o monitoramento e controle da rede de iluminação pública (PARDO-BOSCH et al., 2022), como atenuadores de potência nas primeiras horas da manhã, quando há menor circulação de veículos e pedestres. Estas iniciativas se mostram como marcos importantes para a inserção dos municípios na rota das cidades inteligentes.

Li e Makumbe (2017) ressaltam ainda que a melhoria da iluminação pública com a introdução de lâmpadas LED pode trazer benefícios para a segurança da comunidade, podendo contribuir para a redução do índice de criminalidade e acidentes de trânsito, devido a sua maior utilização prover uma melhor visibilidade para as vias públicas devido a sua capacidade de gerar maior luminância com a mesma potência instalada de outras lâmpadas (POVEDA & ALARCON, 2018). Conseqüentemente, a introdução de lâmpadas LED pode colaborar positivamente também para o crescimento econômico e para o aumento da arrecadação fiscal municipal, uma vez que a sensação de maior segurança pública pode colaborar para o desenvolvimento de atividades econômicas e de entretenimento na cidade mesmo após o anoitecer.

Desta forma, a eficiência energética na iluminação pública se apresenta também como uma oportunidade significativa para as prefeituras, pois proporciona uma redução expressiva das despesas municipais com energia e, concomitantemente, aumenta a disponibilidade de recursos para o atendimento de outras demandas sociais e a realização de investimentos na sustentabilidade das cidades, uma das metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS 11 Cidades e Comunidades Sustentáveis) (ONU, 2018).

Ciente dos benefícios da modernização da iluminação pública e das necessidades de financiamento dos municípios brasileiros, o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) tem desenvolvido modelos de negócios para financiar parcerias público-privadas de infraestrutura (BID, 2021) e que podem ser acessados para viabilizar a substituição das lâmpadas convencionais que usam vapor de sódio ou de mercúrio por lâmpadas com tecnologia LED.

Alguns exemplos de projetos desenvolvidos pelo BID são a operação multisetorial para fomentar a melhoria e a eficiência da infraestrutura viária, de água, energia, iluminação pública e demais serviços públicos dos municípios de pequeno e médio porte com até 500 mil habitantes (BID, 2018) e, mais recentemente, o “Programa Desenvolve SP – Infraestrutura Sustentável” (BID, 2022), cujo propósito é oferecer financiamento de médio e longo prazo para apoiar o desenvolvimento de infraestrutura e investimentos sustentáveis por municípios e pequenas e médias empresas no Estado de São Paulo. O BID com esses projetos espera colaborar para a redução dos custos de energia para os municípios, gerando fluxos de caixa que poderão apoiar a expansão da rede de iluminação pública de forma sustentável e com maior eficiência energética.

Entretanto, em função da disponibilidade de dados e da diversidade das realidades locais dos municípios quanto ao grau de eficiência energética na iluminação pública, não é trivial identificar os municípios com maior potencial de eficiência energética na iluminação pública e com necessidade de financiamento para projetos de eficiência energética, principalmente diante da escassez de dados detalhados para os municípios.

1. De acordo com Poveda e Alarcón (2018), a vida útil de lâmpadas Vapor de Sódio de Alta Pressão (VSAP), tipo de lâmpada mais difundido na iluminação pública, chega em média a 15.000 horas, enquanto a vida útil das lâmpadas LED a até 50.000 horas. Logo, a substituição de lâmpadas VSAP por lâmpadas LED demandaria menos reposições do parque de iluminação pública, resultando em menores despesas com a compra de novas lâmpadas VSAP, mão de obra e equipamentos para sua substituição.

Desta forma, este trabalho visa propor a formulação de uma metodologia para estimação do potencial de eficiência energética da iluminação pública com base em características socioeconômicas dos municípios. Além disso, este estudo busca propor um método de classificação dos municípios com o objetivo de identificar aqueles que apresentam as melhores oportunidades para investimentos no setor. Neste contexto, acredita-se que a segmentação dos municípios, com base em um indicador do potencial de economia na iluminação pública, permite que sejam identificados os municípios mais atrativos para a oferta de modelos de negócios customizados às necessidades de modernização da iluminação pública municipal com a tecnologia LED e aderentes às condições econômicas dos municípios. Adicionalmente, a metodologia proposta foi aplicada ao estudo de caso dos municípios do Estado de São Paulo, utilizando dados do “Anuário de Energéticos por Municípios do Estado de São Paulo 2021 – ano base 2020”² (SIMA/SP, 2021). O artigo está organizado em 7 seções, sendo a primeira seção esta breve introdução. A seguir, na seção 2, apresenta-se uma pequena contextualização das oportunidades decorrentes da introdução da tecnologia LED na iluminação pública nas cidades brasileiras. A seguir, na seção 3, é apresentada uma breve revisão bibliográfica de trabalhos correlatos que visa estimar o potencial de eficiência energética da iluminação pública. Na seção 4, é proposta a metodologia para estimação do potencial de eficiência energética da iluminação pública e apresentado o estudo de caso para o estado de São Paulo. Os resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta aos municípios paulistas são apresentados nas seções 5 e 6. Por fim, as principais conclusões são apresentadas na seção 7.

2. Sendo a iluminação pública uma competência do poder municipal, há necessidade de dados desagregados por município. Contudo, a disponibilidade de estatísticas municipais é muito limitada, sobretudo no que tange ao consumo de energia elétrica. Em geral, as estatísticas disponíveis sobre o consumo de energia elétrica são apresentadas para o Brasil, Regiões e Unidades da Federação como no “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020” (EPE, 2021) ou para as distribuidoras de energia elétrica como no endereço eletrônico da Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica (ABRADEE, 2021). Uma exceção notável é o “Anuário de Energéticos por Municípios do Estado de São Paulo 2021 – ano base 2020” (SIMA/SP, 2021), no qual podem ser encontrados dados do consumo de energia elétrica nas diferentes classes de consumo para cada um dos 645 municípios do estado de São Paulo, entre elas o consumo na classe iluminação pública.

2



2

Iluminação Pública no Brasil: Um Contexto de Oportunidades para a Tecnologia LED

No Brasil, a iluminação pública é um serviço público sob responsabilidade do poder público municipal, conforme indicado no artigo 189 da Resolução Normativa ANEEL nº 1000 (ANEEL, 2021), e segundo Meyer et al. (2017), as despesas decorrentes da compra de energia elétrica para a iluminação pública comprometem entre 3% e 5% dos orçamentos dos municípios, valor superado apenas pelas despesas municipais com as folhas de pagamento de pessoal. Adicionalmente, a iluminação pública representa, em média, cerca de 30% ou 45% da energia consumida pelo setor público em um município (POVEDA e ALARCÓN, 2018), sendo que o restante do consumo é proveniente dos prédios públicos, e.g., creches, escolas, postos de saúde, hospitais e departamentos municipais de água e esgoto, devido à utilização de motobombas elétricas (PROCELINFO, 2021).

Em 2021, o consumo de energia elétrica da iluminação pública no Brasil alcançou o montante de 14.034 GWh, correspondendo a cerca de 3% do consumo total de energia elétrica do país (EPE, 2022). A energia destinada à iluminação pública no país é um serviço público que beneficia cerca de 94% da população brasileira (POVEDA e ALARCÓN, 2018). Segundo TEIXEIRA et al. (2016) e MEYER et al. (2017), o Brasil conta com mais de 18 milhões de pontos de luz. Porém, a iluminação pública no Brasil é feita ainda majoritariamente por lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão e, em menor número, por lâmpadas de vapor de mercúrio, enquanto as lâmpadas LED, as mais eficientes, ainda contam com uma reduzida participação (POVEDA e ALARCÓN, 2018).

Considerando que as lâmpadas LED podem economizar entre 40% e 70% da energia consumida pelas lâmpadas convencionais (MEYER et al, 2017), estatísticas fornecidas pelo Procel (2016) estimam em 30% a economia possivelmente alcançada por uma gestão eficiente da iluminação pública. Para dar uma ordem de grandeza da economia alcançada, Poveda e Alarcón (2018) relatam que, por exemplo, a cidade do Rio de Janeiro poderia economizar anualmente US\$ 75 milhões e deixaria de emitir 110.000 toneladas de CO₂ apenas pela substituição das lâmpadas da iluminação pública por lâmpadas LED.

Porém, muitos municípios brasileiros ainda encontram desafios para investir em luminárias LED. Além dos recursos municipais serem limitados diante da rigidez das despesas correntes e dos compromissos com a Lei de Responsabilidade Fiscal que impõe restrições de financiamento aos municípios, o investimento para substituir todas as luminárias convencionais por luminárias LED pode implicar em grande montante, dado que, apesar da redução de custos, as lâmpadas LED ainda podem ser até cinco vezes mais caras que as lâmpadas de vapor de sódio (POVEDA e ALARCÓN, 2018).

Vale destacar que os municípios brasileiros podem contar com recursos do Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes (Procel Reluz) para viabilizar o financiamento dos projetos de eficiência energética na iluminação pública. Por exemplo, a 3ª Chamada Pública Procel Reluz 01/2021, divulgada em 6 de dezembro de 2021, beneficiou 99 municípios, cujos projetos abrangem a substituição por lâmpadas LED em mais de 54 mil pontos de luz e que totalizam investimentos da ordem de R\$ 72 milhões, sendo que os recursos providos pelo Procel Reluz correspondem a quase 90% (R\$ 64,8 milhões) dos investimentos (PROCEL, 2021). Anteriormente, na 2ª Chamada Pública Procel Reluz 1/2019, encerrada em 4 de dezembro de 2019, 77 municípios receberam investimentos da ordem de R\$ 30 milhões para o emprego da tecnologia LED na iluminação pública (PROCEL, 2020). A primeira chamada pública foi realizada em 2017 e nas três chamadas já realizadas, o Procel Reluz forneceu mais de R\$ 112,5 milhões em 198 municípios de todas as regiões do país, inclusive cinco consórcios intermunicipais. Ademais, apenas nas duas primeiras chamadas 44 mil pontos de luz foram eficientizados com a tecnologia LED, gerando uma economia de 22,9 GWh/ano (Procel, 2022).

Além disso, alguns municípios têm buscado o estabelecimento de parcerias público-privadas (PPP) como alternativa de contratação para atender às necessidades de investimentos, modernização, operação e manutenção da iluminação pública (POVEDA e ALARCÓN, 2018). Conforme levantamento realizado pela Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Serviços de Iluminação Pública (ABCIP, 2021), as parcerias saltaram de 17 em 2019 para 51 no ano de 2020, enquanto o número de projetos saiu de 287 em 2019 para 422 em 2020, cobrindo 7,1 milhões de pontos de luz ou cerca de 1/3 do parque instalado e totalizando investimentos da ordem de R\$ 18 bilhões nos próximos 20 anos. Vale ainda destacar que as iniciativas dos municípios para aumentar a eficiência energética na iluminação pública já é perceptível nas estatísticas setoriais.

Os avanços dos Procel-Reluz e das PPP de iluminação pública podem explicar o fato de em 2021 o consumo da iluminação pública ter apresentado uma redução de 9,2% em relação ao ano de 2020 (EPE, 2022). Todavia, apesar do sucesso alcançado pelas PPP, Meyer et al (2017) observam que as PPP são uma boa opção para municípios grandes e médios com baixo risco de crédito, uma condição que não é satisfeita por muitos municípios brasileiros.

Por fim, outro desafio significativo para o avanço de iniciativas de eficiência energética decorre da falta de dados públicos sistematizados e atualizados sobre o parque de iluminação pública dos municípios brasileiros. O monitoramento dos números de pontos de luz, tipos de lâmpada e padrão de consumo dos parques de iluminação pública municipais apoiaria a tomada de decisão e provavelmente colaboraria para o impulso de investimentos para troca de lâmpadas menos eficientes por lâmpadas LED e consequente para o aumento da eficiência energética e a redução de custos para os municípios.

3



3

Como estimar o Potencial de Eficiência Energética na Iluminação Pública com restrições de dados?

Seguramente, o primeiro método que vem à mente para quantificar o potencial de economia de energia elétrica na iluminação pública envolveria contabilizar a soma das potências nominais de todas as lâmpadas do parque de iluminação pública de uma dada região de análise, no caso um município (POVEDA e ALARCÓN, 2018). Todavia, este método nem sempre se mostra viável, dado que raras são as cidades do Brasil com dados públicos disponíveis acerca do parque de iluminação pública.

Segundo Torrico (2018), tais informações estão disponíveis para os municípios brasileiros no Cadastro Nacional de Pontos de Iluminação Pública (ABRASI, 2022), porém não são atualizados desde o ano de 2008. Silva (2006) apresenta dados de potência e eficiência do parque de iluminação pública no Brasil em 2004. Um sinal da desatualização do Cadastro Nacional dos Pontos de Iluminação Pública é a ausência das lâmpadas LED nos dados disponibilizados pelo cadastro.

Como consequência, há uma certa escassez de estudos que estimem o potencial de eficiência energética da iluminação pública municipal e isso se deve principalmente à escassez de dados sistematizados e detalhados do parque de iluminação pública das cidades e seu respectivo consumo de energia. Ressalta-se que muitos trabalhos disponíveis analisam projetos específicos de iluminação pública em vias urbanas e logradouros.

Desta forma, esta seção será dedicada a análise de estudos correlatos que visaram quantificar o potencial de eficiência energética da iluminação pública municipal com base em métodos alternativos que se baseiem somente em dados públicos, principalmente socioeconômicos coletados em censos e pesquisas de amostragem domiciliar. A utilização de dados socioeconômicos para estimar o potencial de eficiência energética da iluminação pública se justifica pelo fato que o consumo de energia elétrica da iluminação pública se mostra bem correlacionado com o consumo de energia elétrica residencial e, portanto, pode ser explicado pelos mesmos determinantes (LEON et al, 2007, LEON et al., 2010).

Entre os trabalhos encontrados com foco em estimar o potencial de eficiência energética da iluminação pública por meio de variáveis socioeconômicas, destacam-se Poveda e Alarcón (2018), Meyer et al. (2017), e Lorenzo e Sánchez (2007).

Poveda & Alarcón (2018) compilaram dados do número de habitantes, custos da energia elétrica para a iluminação pública, consumos de eletricidade e despesas totais dos 5.570 municípios brasileiros. Os autores classificaram os municípios brasileiros em quatro grupos com base no número de habitantes: menos que 20.000 habitantes (3920 municípios), entre 20.000 e 50.000 habitantes (1043 municípios), entre 50.000 e 500.000 habitantes (563 municípios) e mais de 500.000 habitantes (44 municípios). Com base nesta desagregação, Poveda e Alarcón (2018) apresentam estimativas agregadas do número total de pontos de luz, gastos com iluminação pública, despesas com energia e despesas totais para cada um dos quatro grupos de municípios. Entre os principais resultados, os autores destacam que a iluminação pública corresponde à uma parcela entre 40,5% e 56,9% da energia total consumida pelo poder público municipal o que equivale a uma despesa que varia entre 0,6% e 0,9 % da despesa municipal. Os autores destacam que, em

termos per capita, o consumo de energia da iluminação pública é maior nos municípios menores (até 500 mil habitantes), indicando o elevado potencial de eficiência energética da adoção da tecnologia LED para estes municípios. Porém, um maior impacto nos gastos municipais não significa necessariamente um maior potencial de economia de energia. Ademais, os autores não apresentam uma estimativa do potencial de eficiência energética da iluminação pública em cada município.

Já, Meyer et al. (2017) classificaram os municípios brasileiros em 6 grupos (clusters) identificados em uma base de dados contendo os seguintes indicadores socioeconômicos municipais: PIB per capita, unidades consumidoras por extensão da rede de abastecimento de água, Índice Firjan de Gestão Financeira, razão entre débito e receita municipal, número de pontos de iluminação pública, proporção de ruas não atendidas e uma variável indicadora que assume valor unitário se mais de 20% das lâmpadas na Iluminação Pública são de vapor de mercúrio. Na sequência, os autores formularam oito modelos de negócios (1 - PPP municipal, 2 - consórcio municipal com PPP, 3 - fundo municipal, 4 - programas das distribuidoras, 5 - empresa de serviço de energia - ESCO³, 6 - compras centralizadas, 7 - autofinanciamento e 8 - transferência de luminárias) e identificaram os modelos mais adequados à cada um dos seis grupos de municípios. A partir dos resultados obtidos os autores estimaram que o total dos investimentos requeridos para substituição das lâmpadas convencionais por lâmpadas LED em todos os municípios brasileiros custaria R\$ 27,8 bilhões, ou cerca de R\$ 5 milhões por município.

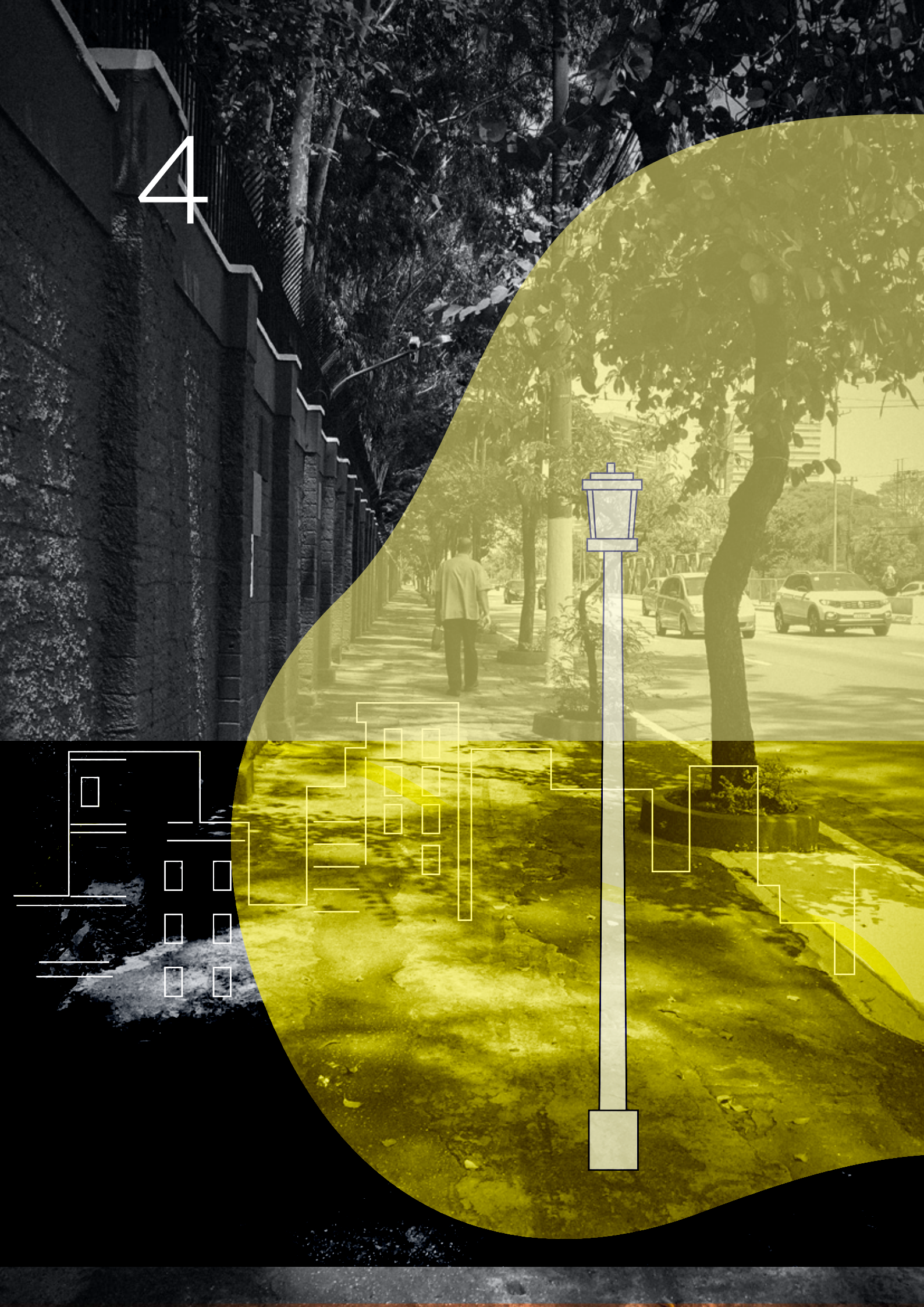
Meyer et al. (2017) sugerem que as PPPs seriam viáveis para os 464 municípios mais populosos (8%), dado que estes também são aqueles que apresentam os maiores números de pontos de luz e os maiores investimentos requeridos. Embora o montante de investimento requerido seja informado, Meyer et al. (2017) não informam uma estimativa do potencial de eficiência energética da iluminação pública em cada município. Além disso, é importante destacar que os dados utilizados neste estudo já se encontram desatualizados e que desde então foram realizados avanços significativos.

Outro exemplo de abordagem para calcular o potencial de eficiência energética na iluminação pública pode ser encontrado em Lorenzo e Sánchez (2007). Os autores usaram um modelo de Análise Envoltória de Dados (Data Envelopment Analysis - DEA) na avaliação da eficiência dos serviços de iluminação pública de 24 municípios espanhóis.

A abordagem DEA quantifica a eficiência com que organizações ou processos transformam recursos (inputs) em produtos (outputs), trata-se de uma abordagem não paramétrica baseada em programação linear para identificar uma fronteira de eficiência, i.e., um benchmark contra o qual podem ser comparadas os desempenhos das organizações. No caso da iluminação pública, Lorenzo e Sánchez (2007) identificaram quatro variáveis inputs (número de empregados, número de lâmpadas, energia consumida e custos totais) e três variáveis outputs (área iluminada, total de horas de funcionamento das lâmpadas e o inverso da duração do tempo de reparo das lâmpadas danificadas). Adicionalmente, os autores consideraram as seguintes variáveis ambientais: área do município, densidade populacional, total anual de horas de luz solar e total de ocorrências de vandalismo contra a rede de iluminação pública. Os autores usaram um modelo DEA orientado ao insumo com o objetivo de apontar as possíveis economias resultantes da redução do consumo na Iluminação Pública.

Há ainda outras metodologias que também se mostram adequadas para a estimação de potencial de eficiência energética, apesar de não serem encontrados estudos aplicados à iluminação pública. Um exemplo, citado inclusive por Lorenzo e Sánchez (2007), é a metodologia de análise de fronteira estocástica que é capaz de estimar o potencial de eficiência com base na criação de uma espécie de fronteira de eficiência nos dados disponíveis para os parâmetros identificados como relevantes (MENDONÇA et al., 2021).

4



4

Uma Nova Proposta Metodológica para Estimar o Potencial de Eficiência Energética na Iluminação Pública

Neste trabalho, busca-se desenvolver uma metodologia capaz de estimar o potencial de economia decorrente da modernização dos parques de iluminação pública dos municípios brasileiros. Diante da limitação ou da ausência de dados atualizados dos parques de iluminação pública nos municípios, uma boa estratégia consiste em avaliar o potencial de economia por meio de análise de fronteira estocástica, como proposto por Lorenzo e Sánchez (2007). O modelo proposto foi estruturado com o objetivo de utilizar como determinantes apenas dados socioeconômicos publicamente disponíveis para todos os municípios brasileiros.

A metodologia proposta foi aplicada ao estudo de caso dos municípios do Estado de São Paulo que apresenta uma base histórica sistematizada com informações do consumo de energia elétrica da iluminação pública para todos os municípios do estado (SIMA/SP, 2021). Ao todo, foram analisados 645 municípios do Estado de São Paulo para os anos de 2016 a 2020.

Após a avaliação do potencial de economia em cada município do estudo de caso, deve-se classificar os municípios e identificar os mais propensos a participarem de programas de financiamento da modernização da iluminação pública.

Assim propõe-se uma metodologia com duas etapas. Inicialmente, estima-se o potencial de economia na iluminação pública de cada município por meio de um modelo de fronteira estocástica e, na sequência, faz-se a classificação dos municípios. As duas etapas são descritas a seguir.

4.1 Avaliação do potencial de economia na Iluminação Pública por meio da análise de fronteira estocástica

A análise de fronteira estocástica é uma abordagem econométrica comumente utilizada por agências reguladoras na realização de análises de benchmarking (COELLI et al., 2003). Dado que o objetivo é ajustar uma fronteira de eficiência que indique o menor consumo na iluminação pública em função das características de um município, propõe-se uma fronteira estocástica de custo, conforme sugerido por Lorenzo e Sánchez (2007).

Entre os exemplos de aplicação da análise de fronteira estocástica de custos destacam-se a estimação dos níveis eficientes dos custos operacionais das concessionárias de distribuição (MENDONÇA et al., 2021), a definição das perdas não técnicas regulatórias (LEITE et al., 2020) e a definição de metas para os indicadores de continuidade (MENDONÇA et al., 2022).

Esta metodologia se mostra interessante para avaliar potenciais de economia na iluminação pública dos municípios tomando em conta diversos fatores de caracterização socioeconômica e geográfica, como os propostos por Meyer et al. (2017). Além disso, a análise de fronteira estocástica (Stochastic Frontier Analysis - SFA) expurga efeitos de fatores não gerenciáveis do cálculo dos

índices de eficiência (KUMBHAKAR & LOVELL, 2000). Portanto, a abordagem SFA pode fornecer uma melhor estimativa do potencial de economia na iluminação pública, que outras metodologias como a análise envoltória de dados (DEA). Na metodologia DEA, por exemplo, qualquer desvio em relação à fronteira é contabilizado como sendo ineficiência, incluindo, indevidamente, até mesmo os efeitos de fatores não gerenciáveis pela gestão da iluminação pública, por exemplo, falhas intempestivas de fotossensores, vandalismo a duração total da luz solar ao longo do ano (LORENZO e SÁNCHEZ, 2007).

Uma vez justificada a adoção da análise de fronteira estocástica, a primeira subseção é dedicada a explicar de uma forma simplificada e didática como interpretar os resultados trazidos por esta metodologia de análise e a segunda subseção é dedicada a apresentar o modelo proposto para a estimativa do potencial de eficiência energética da iluminação pública dos municípios brasileiros, com base dados públicos.

4.1.1. Apresentação Didática da Metodologia aplicada ao estudo de caso

O objetivo dessa subseção é explicar o funcionamento da análise de fronteira estocástica para a estimação do potencial de eficiência energética na iluminação pública.

A Figura 1 traz uma fronteira fictícia de eficiência energética para um conjunto de n municípios para os quais foram disponibilizadas estatísticas do número de habitantes e do consumo de energia elétrica na iluminação pública. A escolha desses parâmetros se justifica pelo fato de que o número de habitantes é uma das variáveis explicativas do consumo de energia elétrica do setor residencial, que apresenta uma elevada correlação com o número de pontos de luz e com o consumo na iluminação pública (LEON et al, 2007, LEON et al., 2010). Conforme ilustrado na Figura 1, dispendo-se as observações municipais nas duas variáveis supracitadas em um diagrama de dispersão pode-se estimar uma fronteira de eficiência, através de uma função que fornece o menor consumo de energia elétrica necessário para atender uma rede de iluminação pública de determinado tamanho, representado neste caso pela população do município.

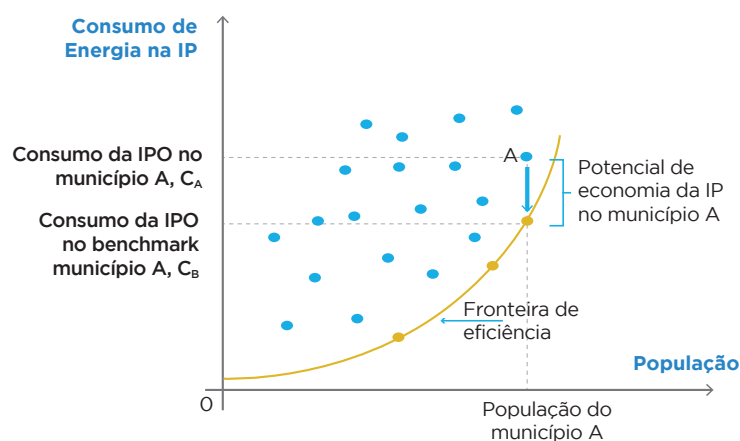


Figura 1. Exemplo Teórico de uma Fronteira de Eficiência.

Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 1, o exemplo de fronteira de eficiência indica o menor consumo de energia elétrica na classe Iluminação Pública que pode ser alcançado para um dado tamanho da população municipal. Adicionalmente, cada ponto representa um município e qualquer ponto localizado na fronteira representa um município com parque de iluminação eficiente, enquanto os pontos acima da fron-

teira representam municípios com parques ineficientes, i.e., municípios com consumo de eletricidade para Iluminação Pública acima do mínimo necessário definido pela fronteira de eficiência. Por exemplo, o município A tem um parque ineficiente, pois pode atender a mesma população com um consumo de eletricidade da Iluminação pública igual a C_B , que é significativamente menor que o consumo de eletricidade atual da iluminação pública (C_A).

Um caso concreto que ilustraria bem este exemplo é o caso da cidade do Rio de Janeiro, cuja iluminação pública supera em 60% o consumo da iluminação pública na cidade de Nova York, mesmo com 2 milhões de habitantes a menos que a cidade norte-americana (POVEDA e ALARCÓN, 2018). Contudo, a densidade demográfica em Nova York é quase o dobro da densidade demográfica da cidade do Rio de Janeiro, o que explica a economia de escala na iluminação pública em Nova York e aponta para a necessidade de incluir outras variáveis explicativas no modelo de fronteira, por exemplo, a área do município. A menor densidade demográfica da cidade do Rio de Janeiro deve-se também à sua maior área⁴ o que implica em um maior número de avenidas, ruas e logradouros que requerem mais pontos de luz.

Na análise de fronteira estocástica, o potencial de economia ou eficiência energética na Iluminação Pública de um município é dado pela distância entre o respectivo ponto no diagrama de dispersão e a fronteira de eficiência, conforme indicado na Figura 1. Matematicamente, no caso do município A o potencial de economia em megawatts hora (MWh) corresponde a diferença $C_A - C_B$. Já o índice de eficiência de um município é adimensional e corresponde ao quociente do nível de consumo mínimo (estimado pela fronteira de eficiência) e o consumo atual. No caso do município A o respectivo índice de eficiência corresponde à razão $\theta = C_B / C_A$. Assim, o potencial de economia do município A indicado na Figura 1 pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\left(1 - \frac{C_B}{C_A}\right) \times 100\% \quad (1)$$

Assim, para um município com 80% de eficiência o respectivo potencial de economia é de 20%, i.e., o consumo atual de energia elétrica na IP deve ser reduzido em 20% para que o município alcance a fronteira de eficiência. Conforme indicado na equação (1), o potencial de economia na iluminação pública é maior nos municípios menos eficientes.

4.1.2 Modelo proposto para estimação do potencial de Eficiência Energética da Iluminação Pública

O objetivo dessa subseção é apresentar o modelo proposto de análise de fronteira estocástica para a estimação do potencial de eficiência energética na iluminação pública.

Dado um conjunto com observações de n municípios, a estimação do potencial de economia na iluminação pública é realizada por meio do modelo de fronteira estocástica de custo especificado a seguir, cuja escolha das variáveis explicativas baseou-se nos trabalhos de Lorenzo e Sánchez (2007) e Meyer et. al. (2017). Este estudo utilizou o pacote `sfaR` (DAKPO et al, 2022) para o ambiente R (R Core Team, 2021).

$$\log(IP_i) = \beta_0 + \beta_1 \log(POP_i) + \beta_2 \log(AREA_i) + \beta_3 \log(IDHM_i) + v_i + u_i \quad \forall i=1,n \quad (2)$$

4. A cidade do Rio de Janeiro tem uma área de 1.200 km², enquanto a cidade de Nova York tem uma área de 783,8 km².

em que:

- IP_i é o consumo anual de energia elétrica da iluminação pública no município i .
- POP_i é a população do município i , uma proxy do número de pontos de luz.
- $AREA_i$ é a área do município i , uma proxy da extensão da rede de iluminação pública.
- $IDHMi$ é o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal 2010 do município i , uma medida do grau de desenvolvimento socioeconômico no município.
- v_i é uma componente do erro aleatório, $v_i \sim N(0, \sigma_v^2) \forall i = 1, n$ que captura o efeito de fatores não gerenciáveis sobre o consumo de energia elétrica na IP do município i .
- u_i é uma componente do erro aleatório associada com a ineficiência, tem distribuição half-normal ($u_i \sim N^+(0, \sigma_u^2) \forall i = 1, n$) e captura a ineficiência na iluminação pública do município i , i.e., a distância do município i até a fronteira de eficiência, mas livre do efeito do ruído aleatório v_i .

Ainda na equação (2), o intercepto β_0 e as elasticidades β_1 , β_2 e β_3 são parâmetros a serem estimados, juntamente com as variâncias σ_v^2 e σ_u^2 das componentes aleatórias. Adicionalmente a estatística $\gamma = \sigma^2 / (\sigma^2 + \sigma^2) \in [0,1]$ permite avaliar qual das duas componentes do erro é predominante (COELLI et al., 2005). Se $\gamma=0$ a ineficiência não existe e os desvios em relação à fronteira são aleatórios. Por outro lado, quando $\gamma=1$, a ineficiência está presente e os desvios em relação à fronteira são devidos exclusivamente à ineficiência. Para avaliar se a ineficiência está presente emprega-se o teste da razão de verossimilhança para testar a hipótese $H_0 \gamma=0$ contra a hipótese $H_1 \gamma \neq 0$. Mais detalhes sobre o modelo de fronteira estocástica de custo podem ser encontrados no Apêndice A deste trabalho.

Admitindo que as componentes aleatórias u e v sejam independentes, a estimação do modelo econométrico em (2) é realizada pelo método da máxima verossimilhança e o índice de eficiência para um município i é dado pela Equação 3.

$$\theta_i = e^{-\hat{u}_i} \quad (3)$$

em que \hat{u}_i é a estimativa associada à componente de ineficiência extraída dos resíduos do modelo econométrico descrito na Equação 2.

Em termos absolutos (MWh), o potencial de economia na iluminação pública para o município i é dado pela Equação 4.

$$potencial_MWh_i = (1 - \theta_i) \times IP_i \quad (4)$$

em que θ_i é a eficiência energética e IP_i é o total de energia elétrica consumida pela iluminação pública no município i .

O potencial de economia na iluminação pública, expresso em Reais (R\$), corresponde ao produto do potencial de economia (*em MWh*) pela tarifa da iluminação pública paga pelo município i (Equação 5).

$$potencial_R\$_i = (1 - \theta_i) \times IP_i \times Tarifa_i \quad (5)$$

A seguir, admitindo que a iluminação pública funcione 12 horas por dia (OLIVEIRA e VARELLA, 2019), em todos os dias do ano, e que as perdas nos reatores das lâmpadas convencionais sejam da ordem de 10% da potência nominal da lâmpada (CASTRO e LUCIANO, 2012), a Equação 6 fornece uma estimativa do número total de lâmpadas convencionais a serem substituídas por lâmpadas LED, para que seja alcançado o potencial de economia de energia na iluminação pública do conjunto dos n municípios analisados.

$$\text{Número de lâmpadas} = \frac{1000000 \times \sum_{i=1}^n (1 - \theta_i) \times IP_i}{365 \text{ dias} \times 12 \text{ horas} \times (1,1 \times P_C - P_L)} \quad (6)$$

em que θ_i é a eficiência energética; IP_i é o total de energia elétrica consumida pela iluminação pública no município i ; P_C e P_L denotam, respectivamente, a potência média de uma lâmpada convencional e a potência média de uma lâmpada LED respectivamente, cujas magnitudes são determinadas no Apêndice B. Adicionalmente, conforme indicado pelo fator 1,1 na equação (6), considerou-se que as perdas nos reatores para as lâmpadas convencionais sejam da ordem de 10% das potências nominais das lâmpadas.

4.2 Classificação dos municípios e identificação dos maiores potenciais de economia na Iluminação Pública

Uma vez estimado o potencial de eficiência dos municípios, é possível então agrupar os municípios de forma a identificar os grupos de municípios com maior potencial ainda não explorado, de modo a auxiliar no processo de tomada de decisão de investimentos.

Poveda e Alarcon (2018) classificaram os municípios com base no número de habitantes, enquanto Meyer et al. (2017) classificaram os municípios com base em um conjunto selecionado de indicadores socioeconômicos. Neste presente estudo, os municípios são classificados com base nos resultados oriundos de modelos de fronteira estocástica estimados para os anos de 2017 e 2020.

O modelo análise de fronteira estocástica proposto na Equação 2 inclui a área do município, uma variável invariante no tempo, portanto, não se trata de um modelo para dados em painel. Assim, para avaliar a evolução dos índices de eficiência no período entre os anos T_0 e T_1 , o modelo de análise de fronteira estocástica deve ser ajustado separadamente aos dados dos dois anos supracitados, a fim de obter os respectivos índices de eficiência $\theta_{0,i}$ e $\theta_{1,i}$ de cada município $\forall i=1, n$.

A partir dos índices de eficiência ($\theta_{0,i}$ e $\theta_{1,i}$), a Equação 7 apresenta o cálculo da taxa de variação anual da eficiência no período entre T_0 e T_1 ($\Delta\theta$).

$$\Delta\theta_i = 100\% \times (\theta_{1,i} - \theta_{0,i}) / (T_1 - T_0) \quad (7)$$

Na sequência, para a classificação dos municípios propõe-se o mapa ilustrado na Figura 2, no qual o eixo horizontal ordena os municípios na ordem crescente dos respectivos potenciais de economia, enquanto o eixo vertical ordena os municípios na ordem crescente dos respectivos ganhos de eficiência no período analisado, uma medida do ritmo de evolução da eficiência energética na rede de Iluminação Pública ao longo do período analisado. Ademais, o centro do mapa corresponde ao ponto com abscissa na média dos potenciais de economia dos n municípios analisados e com ordenada igual a zero, i.e., variação nula da eficiência entre T_0 e T_1 . Assim, os municípios (pontos) são posicionados no mapa apresentado na Figura 2 com base nos respectivos potenciais de economia e nas respectivas variações da eficiência no período analisado.

Os municípios classificados nos quadrantes 1 e 4 possuem os maiores potenciais de economia resultantes do aumento da eficiência na iluminação pública e são os que mais necessitam de financiamento para apoiar projetos de eficiência energética como a substituição de lâmpadas convencionais por lâmpadas LED. A diferença entre os dois quadrantes é que no quadrante 1 os potenciais de economia já estão sendo explorados e criando oportunidades para os municípios, enquanto no quadrante 4 os potenciais ainda permanecem inexplorados.

Conforme ilustrado na Figura 2, os municípios podem ser classificados nos quatro quadrantes do mapa, cujos significados são descritos na Tabela 1 a seguir. Nas próximas duas seções são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta para o estudo de caso dos municípios do estado de São Paulo.

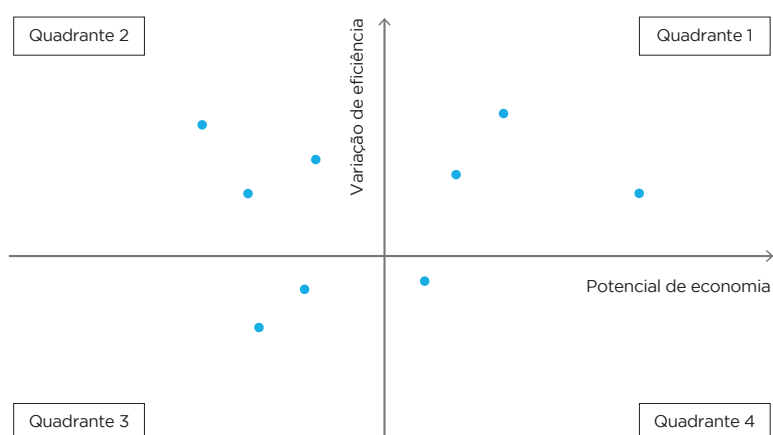


Figura 2. Classificação de Municípios por Quadrantes para avaliação do potencial de eficiência energética na Iluminação Pública.

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 1. Interpretação da Classificação em Quadrantes para avaliação do potencial de eficiência energética na Iluminação Pública.

QUADRANTE	DESCRIÇÃO
1. OPORTUNIDADES	<p>Quadrante de municípios com potenciais que já estão sendo explorados (<i>potencial > potencial médio e $\Delta\theta > 0$</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ municípios com elevado potencial de economia na Iluminação Pública, pois tem níveis de eficiência ainda reduzidos, mas crescentes. ■ abrange os municípios que estão conseguindo modernizar lentamente o parque de Iluminação Pública.
2. EFICIENTES	<p>Quadrante de municípios eficientes (<i>potencial \leq potencial médio e $\Delta\theta > 0$</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ municípios com reduzido potencial de economia na Iluminação Pública, pois tem níveis de eficiência elevados e crescentes. ■ abrange os municípios que conseguiram modernizar o parque de Iluminação Pública ou que seguem modernizando em ritmo acelerado.
3. AMEAÇAS	<p>Quadrante de municípios com eficiência ameaçada (<i>potencial \leq potencial médio e $\Delta\theta \leq 0$</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ municípios com reduzido potencial de economia na Iluminação Pública, pois tem níveis de eficiência elevados, mas decrescentes no período 2017-2020. ■ abrange municípios com elevada eficiência na Iluminação Pública, mas que podem estar enfrentando alguma dificuldade para manter o ritmo de modernização da Iluminação Pública.
4. POTENCIAIS	<p>Quadrante de municípios com potenciais ainda a serem explorados (<i>potencial > potencial médio e $\Delta\theta \leq 0$</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ municípios com grande potencial de economia na Iluminação Pública, pois tem níveis de eficiência reduzidos e decrescentes. ■ abrange municípios com dificuldades para modernizar o parque de iluminação pública e encontram-se atrasados em relação aos demais.

Fonte: Elaboração Própria.

5



5

Potenciais de eficiência energética da iluminação pública dos municípios paulistas

Nesta seção apresentam-se os principais resultados obtidos pela metodologia proposta para a estimação do potencial de eficiência energética na iluminação pública dos municípios paulistas e na identificação dos municípios paulistas com as maiores oportunidades de investimentos no setor.

Conforme ilustrado na Figura 3, a trajetória do total de energia elétrica consumida pela iluminação pública nos 645 municípios paulistas apresentou uma inflexão no ano de 2017 e desde então tem seguido uma tendência decrescente que pode ser atribuída à difusão das lâmpadas LED.

Naturalmente, cada município segue um ritmo diferente no que tange a modernização da iluminação pública. Por exemplo, Jambeiro foi o primeiro município paulista com 100% de lâmpadas LED, um resultado alcançado no ano de 2018. Já o município de São Paulo, responsável por uma vasta rede de IP, tem investido nas lâmpadas LED desde 2015 e está avançando para ter 100% de sua iluminação pública com esta tecnologia. Porém, muitos municípios ainda estão longe da difusão em massa das lâmpadas LED e possuem um elevado potencial de economia na iluminação pública ainda pouco explorado.

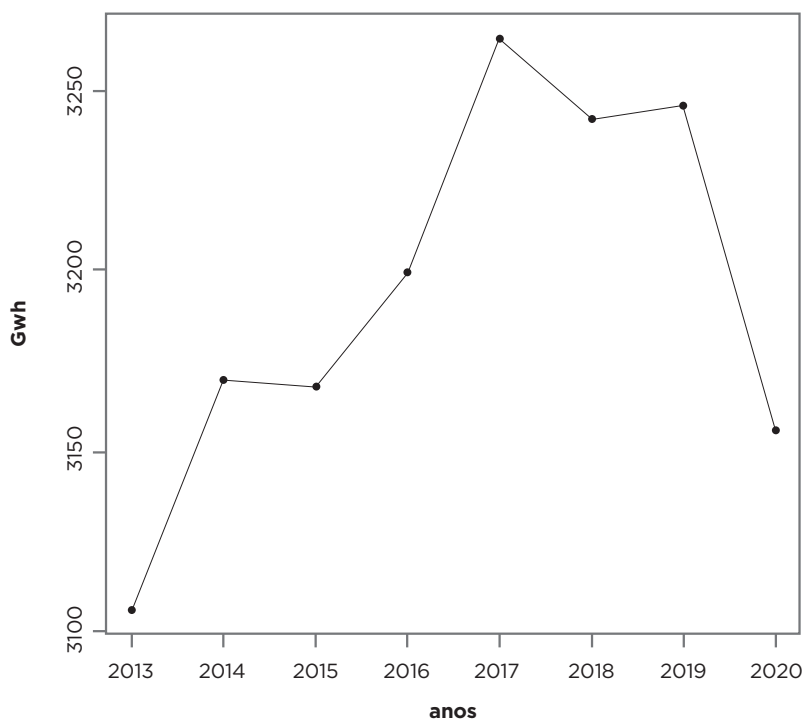


Figura 3.
Evolução do consumo de energia elétrica na iluminação pública dos municípios paulistas
Fonte: Elaboração Própria.

No período de 2017 até 2020 o consumo de eletricidade na iluminação pública passou de cerca de 3265 GWh para aproximadamente 3156 GWh, uma redução de 3,7%. Assumindo as tarifas de energia elétrica para a iluminação pública (B4a) apresentadas na Tabela 2 para todo o período, a despesa total dos municípios paulistas com IP saiu de R\$ 912 milhões em 2017 para R\$ 882 milhões em 2020.

Tabela 2.
Tarifas de energia elétrica aplicadas à iluminação pública (B4a) por concessionárias de distribuição de energia elétrica no estado de São Paulo.

EMPRESA	TE ⁵ R\$/KWH	TUSD ⁶ R\$/KWH	TARIFA = TE + TUSD R\$/KWH
CPFL Santa Cruz	0,13646	0,17428	0,31074
CPFL Paulista	0,15249	0,11405	0,26654
CPFL Leste Paulista	0,11034	0,14605	0,25639
CPFL Sul Paulista	0,10888	0,15855	0,26743
CPFL Mococa	0,10832	0,15300	0,26132
CPFL Piratininga	0,13967	0,12993	0,26960
Elektro	0,13558	0,15695	0,29253
ENEL	0,14073	0,14284	0,28357
Energia Sul Sudeste	0,15749	0,15736	0,31485
EDP	0,17313	0,17662	0,34975
Caiuá	0,13350	0,10666	0,24016

Fonte: Elaboração própria com base em ANEEL (2022) e ARSESP (2022).

No modelo de análise de fronteira estocástica especificado na equação (2) as variáveis explicativas “AREA” e “IDHM” não variam ao longo do tempo e, por esta razão, preferiu-se não considerar uma estrutura de dados em painel. Assim, o modelo SFA foi ajustado separadamente para cada ano do período 2017-2020 e as respectivas estimativas para os coeficientes de regressão são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes de regressão e estatística gama dos modelos ajustados.

ANO	INTERCEPTO	LOG(POP)	LOG(AREA)	LOG(IDHM)	GAMA (γ)
	β_0	β_1	β_2	β_3	
2017	7,22 (0,16)	0,82 (0,01)	0,10 (0,01)	5,96 (0,30)	0,79 (0,05)
2018	7,32 (0,17)	0,82 (0,01)	0,10 (0,01)	6,11 (0,31)	0,76 (0,06)
2019	7,29 (0,17)	0,81 (0,01)	0,11 (0,01)	5,91 (0,33)	0,66 (0,08)
2020	7,29 (0,18)	0,81 (0,01)	0,12 (0,02)	5,89 (0,35)	0,55 (0,10)

Nota: Erro padrão entre parênteses.

Fonte: Elaboração própria.

5. Tarifa de Energia

6. Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição

Para todos os anos avaliados os coeficientes estimados na Tabela 3 são significativamente diferentes de zero, inclusive a estatística gama (γ), logo a ineficiência está presente, justificando o emprego de modelos SFA.

Os boxplots na Figura 4 fornecem uma visão das distribuições dos índices de eficiência dos 645 municípios paulistas em cada ano do período analisado. As medianas dos boxplots (linhas em preto no interior das caixas) apontam para um aumento da eficiência na IP a partir de 2017, um ano importante para a iluminação pública no Estado de São Paulo, pois marca o fim de uma tendência de crescimento do consumo, conforme indicado na Figura 3. Concomitantemente, observa-se uma redução na dispersão das eficiências com a convergência das eficiências em direção à níveis mais elevados. A redução da dispersão dos índices de eficiência está alinhada com a redução da estatística γ na Tabela 3 e com as iniciativas de modernização dos parques de iluminação pública em alguns municípios.

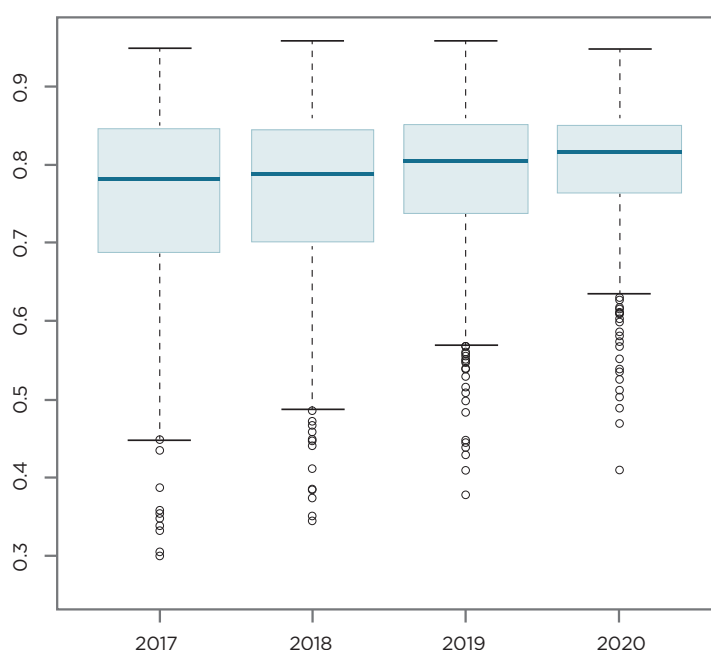


Figura 4.

Boxplots dos índices anuais de eficiência da Iluminação Pública nos municípios paulistas.

Fonte: Elaboração Própria.

Note que a cada ano o limite inferior e o primeiro quartil do boxplot têm aumentado, portanto, pode-se inferir que os municípios paulistas estão buscando modernizar suas redes de iluminação pública com lâmpadas LED. Adicionalmente, Vale destacar que em 2020 o menor índice de eficiência é da ordem de 41% em Ilha Comprida, portanto, um potencial de economia de 60% e que pode ser alcançado pela substituição das lâmpadas convencionais por lâmpadas LED. Ainda na Figura 4, os pontos destacados na parte inferior dos boxplots (outliers) correspondem aos municípios com reduzidos índices de eficiência e que estão com dificuldades de acompanhar o ritmo de modernização da iluminação pública.

A seguir nas Tabelas 4 e 5 apresentam-se os 10 municípios mais eficientes (top 10) e os 10 municípios menos eficientes (bottom 10) para cada ano do período avaliado.

Tabela 4. Top 10 no ranking de eficiência

POSIÇÃO	ANO			
	2017	2018	2019	2020
1	Jambeiro	Jambeiro	Jambeiro	Jambeiro
2	Santa Rita do Passa Quatro	Eldorado	Mauá	Arapeí
3	Estrela do Norte	Mirante do Paranapanema	Eldorado	Mauá
4	Mirante do Paranapanema	Barra do Chapéu	São Lourenço da Serra	Monteiro Lobato
5	Carapicuíba	Carapicuíba	Iporanga	Santa Branca
6	Eldorado	Iporanga	Carapicuíba	Eldorado
7	Sud Menmucci	Mauá	Oriente	São Lourenço da Serra
8	Pontal	Pontal	Pontal	Iporanga
9	Oriente	Pirapozinho	Murutinga do Sul	São José dos Campos
10	Ibiúna	Murutinga do Sul	Ibiúna	Oriente

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 5. Bottom 10 no ranking de eficiência.

POSIÇÃO	ANO			
	2017	2018	2019	2020
636	Borebi	Borebi	Salto Grande	Praia Grande
637	Paulicéia	Praia Grande	Buri	Taquarituba
638	Buri	Buri	Taquarituba	Bertioga
639	Uru	Bertioga	Uru	Uru
640	Bertioga	Uru	Arandu	Arandu
641	Rifaina	Peruibe	Rifaina	Rifaina
642	Peruibe	Rifaina	Peruibe	Peruibe
643	Arandu	Arandu	Bertioga	Vera Cruz
644	Ilha Comprida	Guararema	Guararema	Guararema
645	Guararema	Ilha Comprida	Ilha Comprida	Ilha Comprida

Fonte: Elaboração Própria.

No conjunto Top 10 destaca-se a presença de Jambeiro sempre na primeira posição, trata-se do primeiro município paulista com 100% da iluminação pública com lâmpadas LED. Quanto aos demais municípios do Top 10 observa-se uma grande mobilidade com vários municípios alternando de posição, um fato que pode ser explicado pela existência de projetos de modernização com lâmpadas LED ainda em andamento nos municípios paulistas. Conforme ilustrado na Figura 5, os municípios pertencentes ao top 10 em 2020 têm perseverado em manter níveis elevados de eficiência na iluminação pública, um indicativo de que estes municípios têm investido na modernização de seus sistemas de IP.

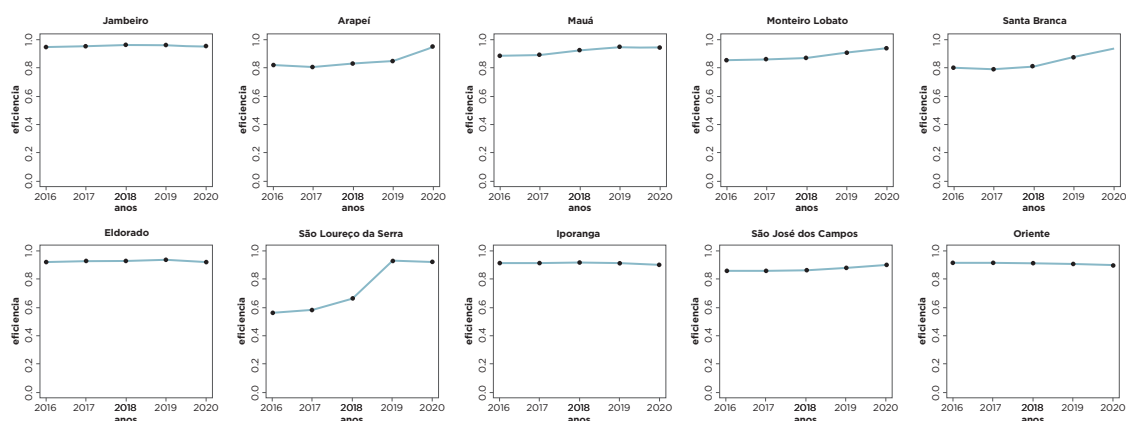


Figure 5. Trajetória da eficiência nos municípios classificados no Top 10 em 2020.

Fonte: Elaboração Própria.

De forma distinta, no conjunto Bottom 10 (Tabela 5) observa-se uma menor mobilidade no ranking dos municípios, um indicativo de que a modernização da iluminação pública nesses municípios segue em ritmo lento.

A aplicação da Equação 4 aos índices de eficiência estimados pelo modelo de fronteira estocástica para o ano de 2020 resultou em um potencial de economia de 633 GWh, i.e., 20% do consumo da IP no Estado de São Paulo no ano de 2020. Contudo, este potencial está muito abaixo das expectativas de uma economia entre 40% e 70% apontadas por Meyer et al (2017). Por esta razão, para fins de definição do potencial de economia, preferiu-se adotar o limite inferior dos intervalos de confiança para os índices de eficiência de todos os municípios, com exceção de Jambeiro, o primeiro município paulista a alcançar uma rede de IP integralmente com LED, e a cidade de São Paulo, onde 88,5% dos pontos de luz são lâmpadas LED. Para Jambeiro, inicialmente a eficiência foi estimada em 0,9495, mas adotou-se o limite superior do intervalo de confiança (0,9986). Por sua vez, para a capital foi considerada a estimativa pontual de 0,8717 fornecida pelo modelo, um número próximo da participação de 88,5% de lâmpadas LED no parque de iluminação pública da capital paulista. Este procedimento visa capturar o movimento da fronteira de eficiência decorrente da recente difusão da tecnologia LED na iluminação pública para a maioria dos municípios. Assim, o potencial de economia na IP é da ordem de 1249,08 GWh, i.e., 39,57% do consumo atual na iluminação pública dos municípios paulistas.

Conforme ilustrado na Figura 6, os índices de eficiência usados na definição do potencial de economia guardam uma relação inversa (correlação de -0,61) com o indicador de intensidade energética na iluminação pública municipal definido no Apêndice C. Logo, os municípios com maior intensidade energética apresentam os menores índices de eficiência na iluminação pública e, portanto, possuem os maiores potenciais de economia, um indicativo da boa qualidade dos índices de eficiência obtidos pelo modelo de análise de fronteira estocástica.

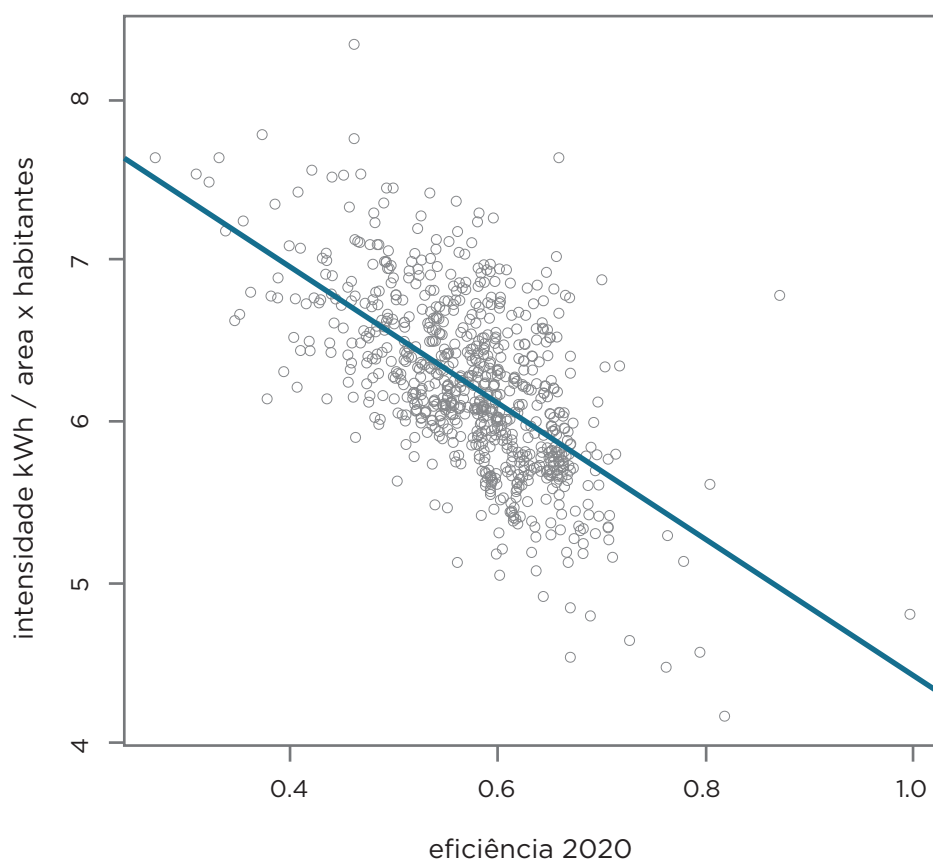


Figure 6. Intensidade energética versus eficiência.

Fonte: Elaboração Própria.

Os potenciais de economia na iluminação pública são calculados a partir dos índices de eficiência resultantes do modelo de análise de fronteira estocástica, conforme a Equação 4. Por exemplo, no ano de 2020 o consumo da iluminação pública na cidade de São Paulo alcançou cerca de 456 GWh e o respectivo índice de eficiência estimado pelo modelo de análise de fronteira estocástica é 87,17%, logo o potencial de economia é cerca de 12,83% ou $0,1283 \times 456 = 58,57$ GWh ou R\$ 16,6 milhões, admitindo uma tarifa de 0,28357 R\$/kWh. Assim, tomando por base os índices de eficiência dos municípios, referentes ao ano de 2020, o potencial de economia estimado para todo o Estado de São Paulo é da ordem de 1249,08 GWh, uma economia de 39,57% em relação ao consumo do ano de 2020 ou R\$ 349 milhões por ano com base nas tarifas de energia elétrica para a iluminação pública B4a na Tabela 2.

Admitindo que cada ponto de luz tenha uma lâmpada, demonstra-se no Apêndice B como obter estimativas dos totais de pontos de luz no Estado de São Paulo. As estimativas obtidas apontam para um total de 3.571.189 lâmpadas no conjunto de parques de iluminação pública de todos os municípios paulistas, sendo 2.683.119 (75%) lâmpadas convencionais e 888.070 (25%) lâmpadas LED. Ademais estima-se que a potência média das lâmpadas convencionais a serem substituídas seja da ordem de 207,45 W.

No Apêndice D tem-se uma avaliação alternativa do potencial de economia na iluminação pública para todo o Estado de São Paulo. Segundo a metodologia alternativa apresentada, o potencial de economia para São Paulo seria da ordem de 1592 GWh mediante a substituição de 2.683.119 lâmpadas convencionais por lâmpadas LED. Apesar das diferenças, as duas estimativas são da mesma ordem de grandeza, o que valida a metodologia proposta. Ademais no Apêndice E apresenta-se uma análise de sensibilidade do potencial de economia de energia segundo diferentes premissas para as potências médias das lâmpadas LED e convencionais e difusão das lâmpadas LED. A média de todas as possibilidades elencadas resulta um potencial de economia da ordem de 1366 GWh.

6



6

Classificação dos municípios paulistas com base em seus potenciais de eficiência energética da iluminação pública

Nesta seção, apresentam-se os principais resultados obtidos pela metodologia proposta de classificação dos municípios paulistas quanto ao seu potencial de eficiência energética na iluminação pública com o objetivo de identificar aqueles municípios paulistas com as maiores oportunidades de investimentos no setor.

De posse dos índices de eficiência dos 645 municípios do Estado de São Paulo para os anos de 2016 e 2020 foi possível fazer o mapa ilustrado na Figura 7, no qual cada círculo representa um município e tem diâmetro proporcional ao respectivo número de habitantes. Naturalmente, o município de São Paulo tem o maior círculo, cujo centro localiza-se no segundo quadrante, pois São Paulo tem um potencial de economia de 12,83% e uma variação ligeiramente positiva da eficiência entre 2016 (0,86) e 2020 (0,8717).

Note que o potencial médio dos 645 municípios é da ordem de 39,58% e que os maiores potenciais aparecem no lado direito, por exemplo, Ilha Comprida (73%) e Guararema (69,24%). Já no lado esquerdo estão os municípios com os maiores índices de eficiência ou menores potenciais de economia, como o município de Jambuí, cujo potencial de economia estimado é de apenas 0,14%, pois foi o primeiro município paulista que substituiu todas as lâmpadas convencionais por lâmpadas LED.

Na sequência, os 645 municípios foram classificados nos quatro quadrantes do mapa na Figura 7 e em cada quadrante os municípios foram classificados em quatro estratos, os mesmos considerados por Poveda e Alarcón (2018) e definidos em função do número de habitantes⁷. Para cada quadrante e faixa de número de habitantes foram calculados os potenciais de economia em termos relativos e em termos absolutos (em GWh/ano e em R\$ milhões por ano), conforme indicado na Tabela 6.

A Tabela 6 revela que o conjunto de 317 municípios classificados no quadrante 1 teve o maior consumo na iluminação pública no ano de 2020 (1570 GWh) e apresenta os maiores potenciais de economia em termos relativos (48%) e absolutos, uma economia de 754 GWh/ano ou R\$ 209,4 milhões por ano, sendo que a maior parte deste potencial (497 GWh/ano) está concentrada nos municípios com população entre 50 mil e 500 mil habitantes.

Os 103 municípios no quadrante 4 também apresentam um elevado potencial em termos relativos (44,6%), porém um menor potencial em termos energéticos (202,4 GWh/ano) e econômicos (R\$ 57,3 milhões por ano). O potencial total dos quadrantes 1 e 4 é da ordem de 956,1 GWh/ano ou R\$ 266,7 milhões por ano. A exploração deste potencial demandará a substituição de pouco mais de 2 milhões de lâmpadas convencionais por lâmpadas LED.

7. Até 20 mil habitantes, de 20 mil até 50 mil habitantes, de 50 mil até 500 mil habitantes e acima de 500 mil habitantes

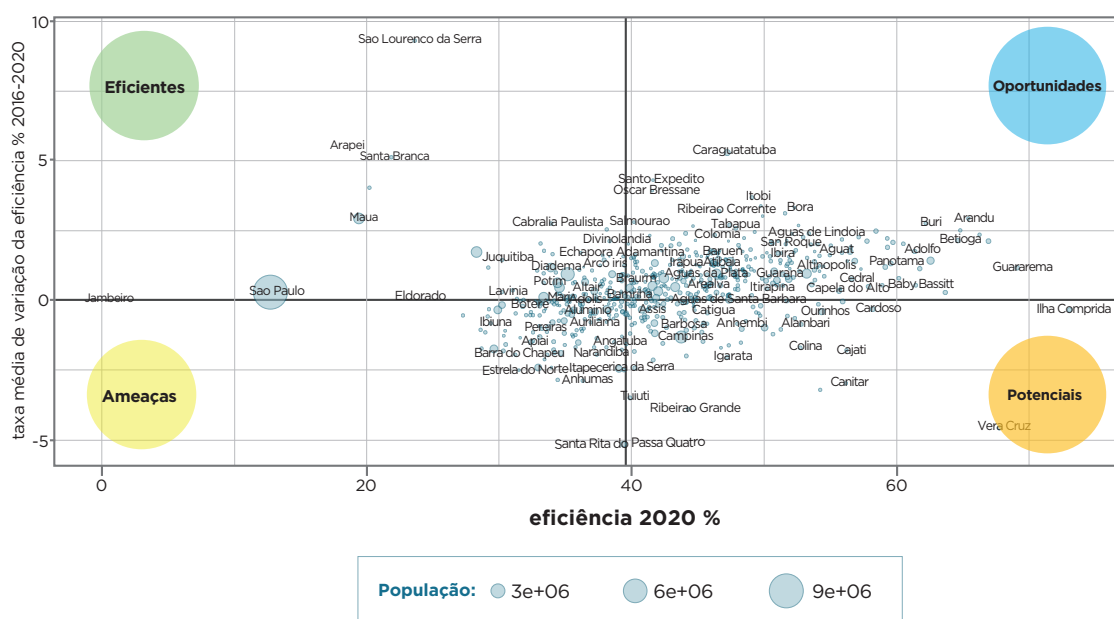


Figure 7. Mapa resultante da classificação dos municípios.

Fonte: Elaboração Própria.

Admitindo um cenário conservador, considera-se que o tempo de vida útil de uma luminária LED é de 50.000 horas (SALES, 2012) ou, aproximadamente 12 anos (OLIVEIRA e VARELLA, 2019) caso as lâmpadas permaneçam ligadas 12 horas por dia. Assim, a exploração do potencial total dos 420 municípios nos quadrantes 1 e 4 resultaria em uma economia da ordem de 11,47 TWh ao longo dos 12 anos. Se o potencial de todos os 645 municípios for explorado a economia de energia ao longo dos 12 anos é estimada em 14,99 TWh.

Ademais, vale ressaltar que os 225 municípios paulistas classificados nos quadrantes 2 e 3 correspondem aos municípios com os parques de iluminação pública mais eficientes, alguns com expressiva participação de lâmpadas LED como os municípios de Jambéiro e São Paulo.

Tabela 6. Classificação dos municípios.

QUADRANTE	Distribuição dos municípios por número de habitantes		Consumo IP 2020 (GWh)	Potencial relativo (%)	Potencial economia anual (GWh/ano)	Potencial economia anual (R\$ milhões)
1 oportunidades	>500.000 hab.	2	117,86	45,28	53,37	14,29
	50.000 - 500.000	70	1034,70	48,05	497,13	137,62
	20.000 - 50.000	69	248,18	48,28	119,82	33,66
	< 20.000 hab.	176	169,25	49,27	83,40	23,80
	Consolidado	317	1569,99	48,00	753,72	209,37
2 eficientes	>500.000 hab.	6	647,89	18,87	122,31	34,30
	50.000 - 500.000	11	120,65	35,80	43,18	11,80
	20.000 - 50.000	13	28,83	37,19	10,72	3,07
	< 20.000 hab.	59	32,35	35,61	11,52	3,26
	Consolidado	89	829,72	22,62	187,73	52,43
3 ameaças	>500.000 hab.	0				
	50.000 - 500.000	24	201,23	34,48	69,38	19,34
	20.000 - 50.000	19	45,86	35,86	16,44	4,61
	< 20.000 hab.	93	55,27	35,15	19,42	5,60
	Consolidado	136	302,36	34,81	105,25	29,25
4 potenciais	>500.000 hab.	1	96,07	43,76	42,04	11,21
	50.000 - 500.000	22	240,09	43,82	105,22	30,33
	20.000 - 50.000	20	61,33	44,17	27,09	7,72
	< 20.000 hab.	60	56,30	49,77	28,02	8,07
	Consolidado	103	453,79	44,60	202,37	57,33
Estado de São Paulo	>500.000 hab.	9	861,83	25,26	217,73	59,80
	50.000 - 500.000	127	1596,67	44,78	714,91	199,10
	20.000 - 50.000	121	384,20	45,31	174,08	49,05
	< 20.000 hab.	388	313,17	45,46	142,36	40,73
	Consolidado	645	3155,87	39,58	1249,08	348,68

Fonte: Elaboração Própria.

A seguir, na Tabela 7 apresentam-se algumas estatísticas consolidadas para cada quadrante. Os 317 municípios classificados no quadrante 1 respondem por quase 50% do consumo da classe iluminação pública, cerca de 40 % do consumo municipal e 40% do consumo de energia elétrica total no Estado de São Paulo. Além de conter o maior número de municípios e o maior potencial de economia, o quadrante 1 tem a menor tarifa média, abrange 48% da área do estado, 34% da população paulista, 47% dos pontos de luz e demandará 60% das lâmpadas LED para substituir as lâmpadas convencionais.

Tabela 7. Estatísticas consolidadas para os quadrantes.

VARIÁVEIS	QUADRANTES				TOTAL
	1 Oportunidades	2 Eficiente	3 Ameaças	4 Potenciais	
Número de municípios	317	89	136	103	645
Consumo na IP (GWh)	1.569,99	829,72	302,36	453,79	3155,87
Potencial de eficiência na IP (GWh)	753,72	187,73	105,25	202,37	1249,08
Pontos de luz	1.669.177	1.113.322	320.797	467.892	3.571.189
Lâmpadas substituídas	1.619.043	403.286	226.081	434.709	2.683.119
Consumo municipal (GWh)	4.403	3.870	1.487	1.358	11.118
Consumo total (GWh)	50.310	44.457	16.135	14.307	125.209
Tarifa média (R\$/MWh)	277,55	280,76	280,73	283,06	279,49
População total (milhões)	15,1	19,1	5,4	5,0	44,6
Taxa urbanização (%)	96	99	93	95	97
Densidade (habitantes/km2)	128	545	102	119	180
Área (km2)	118.395	35.105	52.788	41.931	248.219

Fonte: Elaboração Própria.

Quanto ao quadrante 4, também formado por municípios com elevado potencial de economia, os 103 municípios respondem por 14% do consumo na iluminação pública e cerca de 11% do consumo municipal e do consumo total no Estado de São Paulo. Os municípios classificados no quadrante 4 têm a maior tarifa média e abrangem 17% da área do estado, 11% da população paulista, 13% dos pontos de luz e demandarão 13% das lâmpadas LED para substituir as lâmpadas convencionais. Assim, os investimentos para aumentar a eficiência na iluminação pública dos municípios classificados nos quadrantes 1 e 4 resultarão na modernização de 60% dos pontos de luz, beneficiando 45% da população paulista.

O quadrante 2 com apenas 89 municípios e menor área total, concentra a maior população do estado e, portanto, possui a maior densidade demográfica. A explicação deve-se a presença da cidade de São Paulo entre os municípios classificados no quadrante 2, conforme ilustrado na Figura 7. Já o quadrante 3 possui o menor consumo na iluminação pública, apesar de abranger uma população total ligeiramente superior ao contingente populacional no quadrante 4. Tal resultado ilustra o menor potencial de economia dos municípios classificados no quadrante 3 e 2, ambos menores que a média para estado estimado em 40%.

Na sequência, nas Tabelas 8 até 11 apresenta-se a desagregação das estatísticas por faixa de número de habitantes em cada quadrante. Vale ressaltar que no quadrante 3 não há município com mais de 500 mil habitantes, então na Tabela 11 as estatísticas do quadrante 2 foram calculadas separadamente para São Paulo e os demais municípios no quadrante.

Os municípios com menos 20 mil habitantes, apesar de numerosos, representam apenas cerca de 10% do consumo de energia na iluminação pública, conforme indicado na Tabela 1. As estatísticas da Tabela 8 revelam que o conjunto destes municípios ocupa quase a metade da área do Estado São Paulo, porém concentra apenas 3 milhões de habitantes. Estes municípios apresentam as menores densidades demográficas e taxas de urbanização entre os municípios paulistas. Ademais, as estimativas apresentadas na Tabela 8 indicam que as lâmpadas convencionais representam 91% do parque de iluminação pública do conjunto destes municípios e para alcançar o potencial de economia de 142 GWh será necessário substituir cerca de 306 mil lâmpadas convencionais por lâmpadas LED, sendo que os municípios classificados nos quadrantes 1 e 4 respondem por 78% das substituições.

Tabela 8. Estatísticas consolidadas para os municípios com até 20 mil habitantes.

VARIÁVEIS	QUADRANTES				TOTAL
	1 Oportunidades	2 Eficiente	3 Ameaças	4 Potenciais	
Número de municípios	176	59	93	60	388
Consumo na IP (GWh)	169	32	55	56	313
Potencial de eficiência na IP (GWh)	83,40	11,52	19,43	28,02	142,36
Pontos de luz	180.063	39.674	56.778	56.996	333.511
Lâmpadas substituídas	179.145	24.745	41.731	60.188	305.810
Consumo municipal (GWh)	379	94	154	129	757
Consumo total (GWh)	3.652	858	4.878	1.152	10.540
Tarifa média (R\$/MWh)	285,42	283,10	288,37	287,96	286,16
População total (milhões)	1,4	0,4	0,8	0,5	3,0
Taxa urbanização (%)	87	81	78	82	83
Densidade (habitantes/km2)	27	24	23	30	28
Área (km2)	51.544	18.262	32.774	16.361	118.941

Fonte: Elaboração Própria.

Conforme indicado na Tabela 9, o conjunto dos municípios com população de 20 mil até 50 mil habitantes apresentam taxa de urbanização superior a 90%. O potencial de economia para este conjunto de municípios é estimado em cerca de 174 GWh e será alcançado mediante a substituição de 374 mil lâmpadas, sendo que os municípios nos quadrantes 1 e 4 respondem por cerca de 84% das substituições.

Tabela 9. Estatísticas consolidadas para os municípios com 20 mil até 50 mil habitantes.

VARIÁVEIS	QUADRANTES				TOTAL
	1 Oportunidades	2 Eficiente	3 Ameaças	4 Potenciais	
Número de municípios	69	13	19	20	121
Consumo na IP (GWh)	248	29	46	61	384
Potencial de eficiência na IP (GWh)	119,82	10,72	16,44	27,09	174,08
Pontos de luz	260.514	31.805	47.134	66.632	406.085
Lâmpadas substituídas	257.378	23.032	35.323	58.195	373.930
Consumo municipal (GWh)	599	94	139	159	991
Consumo total (GWh)	6.550	700	1.667	2.184	11.101
Tarifa média (R\$/MWh)	281,49	285,98	280,00	285,17	282,24
População total (milhões)	2,2	0,4	0,6	0,7	3,9
Taxa urbanização (%)	92	90	91	91	92
Densidade (habitantes/km2)	60	42	53	71	48
Área (km2)	35.693	8.968	12.023	9.961	66.645

Fonte: Elaboração Própria.

Conforme indicado na Tabela 10, no conjunto dos municípios com população entre 50 mil e 500 mil habitantes residem cerca de 19,1 milhões de pessoas, 42% da população do Estado de São Paulo. Ademais, os resultados apresentados na Tabela 1 mostram que os municípios com população entre 50 mil e 500 mil habitantes concentram o maior potencial de economia, cerca de 715 GWh, um montante superior à soma dos potenciais dos demais estratos populacionais. Para alcançar este potencial será necessária a substituição de pouco mais de 1,5 milhão de lâmpadas convencionais por lâmpadas LED, conforme indicado na Tabela 10, o que representa 57% das substituições es-

timadas para todos os quadrantes. Os municípios nos quadrantes 1 e 4 respondem por 84% das trocas de lâmpadas nos municípios com 50 mil até 500 mil habitantes.

Ainda na Tabela 10, vale destacar que os quadrantes 1 e 4 abrangem 67% da população e 78% da área dos municípios com 50 mil até 500 mil habitantes, resultando nas menores densidades demográficas para este grupo de municípios.

Tabela 10. Estatísticas consolidadas para os municípios com 50 mil até 500 mil habitantes.

VARIÁVEIS	QUADRANTES				TOTAL
	1 Oportunidades	2 Eficiente	3 Ameaças	4 Potenciais	
Número de municípios	70	11	24	22	127
Consumo na IP (GWh)	1.035	121	201	240	1.597
Potencial de eficiência na IP (GWh)	497,13	43,19	69,38	105,22	714,91
Pontos de luz	1.098.401	152.166	216.885	247.013	1.714.465
Lâmpadas substituídas	1.067.874	92.772	149.027	226.014	1.535.687
Consumo municipal (GWh)	3.010	334	1.194	767	5.305
Consumo total (GWh)	36.275	6.625	9.589	7.960	60.450
Tarifa média (R\$/MWh)	276,42	273,58	278,80	287,99	278,24
População total (milhões)	10,3	2,2	4,0	2,6	19,1
Taxa urbanização (%)	97	98	96	96	97
Densidade (habitantes/km ²)	342	518	499	176	334
Área (km ²)	30.057	4.286	7.991	14.815	57.148

Fonte: Elaboração Própria.

Na Tabela 11, o município de São Paulo destaca-se pelo elevado consumo na iluminação pública e número de pontos de luz, respectivamente 14% e 18% do estado. O município de São Paulo já conta com 88,5% do parque de IP formado por lâmpadas LED e segundo as estimativas apresentadas na Tabela 11 ainda restam cerca de 125 mil lâmpadas convencionais que devem ser trocadas. Os demais municípios do quadrante 2 são Guarulhos, Osasco, Santo André, São Bernardo do Campo, São José dos Campos.

Os municípios de Ribeirão Preto e Sorocaba pertencem ao quadrante 1 e o município de Campinas pertence ao quadrante 4. Ainda na Tabela 11 observa-se que o conjunto de municípios nos quadrantes 1 e 4 concentram 2,5 milhões de habitantes e possuem a menor densidade demográfica no estrato de municípios com mais de 500 mil habitantes. Ademais as tarifas médias nos quadrantes 1 e 4 são menores. O potencial de economia estimado para estes três municípios é da ordem de 95 GWh e deverá ser alcançado por meio da substituição de 205 mil lâmpadas convencionais.

Tabela 11. Estatísticas consolidadas para os municípios com mais de 500 mil habitantes.

VARIÁVEIS	QUADRANTES				TOTAL
	1 Oportunidades	2 Eficiente	3 Ameaças	4 Potenciais	
Número de municípios	2	5	1	1	9
Consumo na IP (GWh)	118	191	456	96	862
Potencial de eficiência na IP (GWh)	53,37	63,74	58,57	42,04	217,73
Pontos de luz	130.199	250.659	639.019	97.252	1.117.128
Lâmpadas substituídas	114.645	136.924	125.812	90.311	467.693
Consumo municipal (GWh)	415	656	2.692	302	4065
Consumo total (GWh)	3.833	10.547	25.727	3.010	43.117
Tarifa média (R\$/MWh)	267,86	277,40	283,57	266,54	278,15
População total (milhões)	1,3	4,2	11,9	1,2	18,6
Taxa urbanização (%)	99	99	99	99	99
Densidade (habitantes/km2)	1.219	2.054	7.803	1.479	3.397
Área (km2)	1.101	2.068	1.521	795	5.485

Fonte: Elaboração Própria.

7



7

Conclusões

Marcadas por sua capacidade prestar o serviço de iluminação com um consumo de energia elétrica significativamente menor, as lâmpadas LED (em inglês, light-emitting diodes) vem se consolidando no mercado principalmente após melhorias tecnológicas e significativa redução de seus custos (IEA, 2022). Entretanto, ainda há um potencial de eficiência energética a ser explorados pela introdução das lâmpadas LED, principalmente na iluminação pública.

De acordo com Li & Makumbe et al. (2016), a substituição de lâmpadas de baixa eficiência por lâmpadas LED no parque de iluminação pública pode trazer inúmeros benefícios, desde a economia significativa nos gastos municipais relativos ao consumo de energia elétrica para a iluminação pública, ao aumento da sensação de segurança para a população e ao aquecimento da economia do município. Todavia, seja por falta de informação ou por dificuldades de financiamento, diversos municípios ainda não modernizaram o seu parque de iluminação pública com a introdução da tecnologia LED.

Ciente dos benefícios da modernização da iluminação pública e das necessidades de financiamento dos municípios brasileiros, o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) tem desenvolvido modelos de negócios para financiar parcerias público-privadas de infraestrutura que possam ajudar a viabilizar a substituição das lâmpadas convencionais por lâmpadas com tecnologia LED nos parques de iluminação pública dos municípios brasileiros. Um dos projetos desenvolvidos pelo BID tem sido o “Programa Desenvolve SP – Infraestrutura Sustentável” (BID, 2022), cujo propósito é oferecer financiamento de médio e longo prazo para apoiar o desenvolvimento de infraestrutura e investimentos sustentáveis por municípios e pequenas e médias empresas no Estado de São Paulo.

Entretanto, em função da falta de dados publicados e sistematizados sobre os parques de iluminação pública, não é trivial identificar os municípios com maior potencial de eficiência energética na iluminação pública e com maior necessidade de financiamento para projetos de eficiência energética.

Desta forma, este trabalho visa propor a formulação de uma metodologia para estimação do potencial de eficiência energética da iluminação pública com base em características socioeconômicas dos municípios coletadas principalmente em censos e pesquisas por amostragem domiciliar. Além disso, este estudo busca propor um método de classificação dos municípios com o objetivo de identificar aqueles que apresentam as melhores oportunidades para investimentos no setor. Neste contexto, acredita-se que a segmentação dos municípios, com base em um indicador do potencial de economia na iluminação pública, permite que sejam identificados os municípios mais atrativos para a oferta de modelos de negócios customizados às necessidades de modernização da iluminação pública municipal com a tecnologia LED e aderentes às condições econômicas dos municípios. Adicionalmente, a metodologia proposta foi aplicada ao estudo de caso dos municípios do Estado de São Paulo, utilizando dados do “Anuário de Energéticos por Municípios do Estado de São Paulo 2021 – ano base 2020” (SIMA/SP, 2021).

O presente texto apresentou uma metodologia para avaliação do potencial de economia na iluminação pública dos municípios. Diante da limitação de dados acerca da composição dos parques de iluminação pública instalados nos municípios, o potencial de economia é estimado a partir de índices de eficiência obtidos por um modelo de fronteira estocástica de custo. A fronteira de eficiência fornece um benchmark ou referência que permite quantificar o nível eficiente do consumo de energia elétrica na iluminação pública de cada município avaliado.

Para ilustrar a aplicação da metodologia proposta foram considerados os dados do consumo de energia elétrica na iluminação pública dos 645 municípios paulistas. A escolha dos municípios paulistas deve-se à disponibilidade de dados desagregados por municípios.

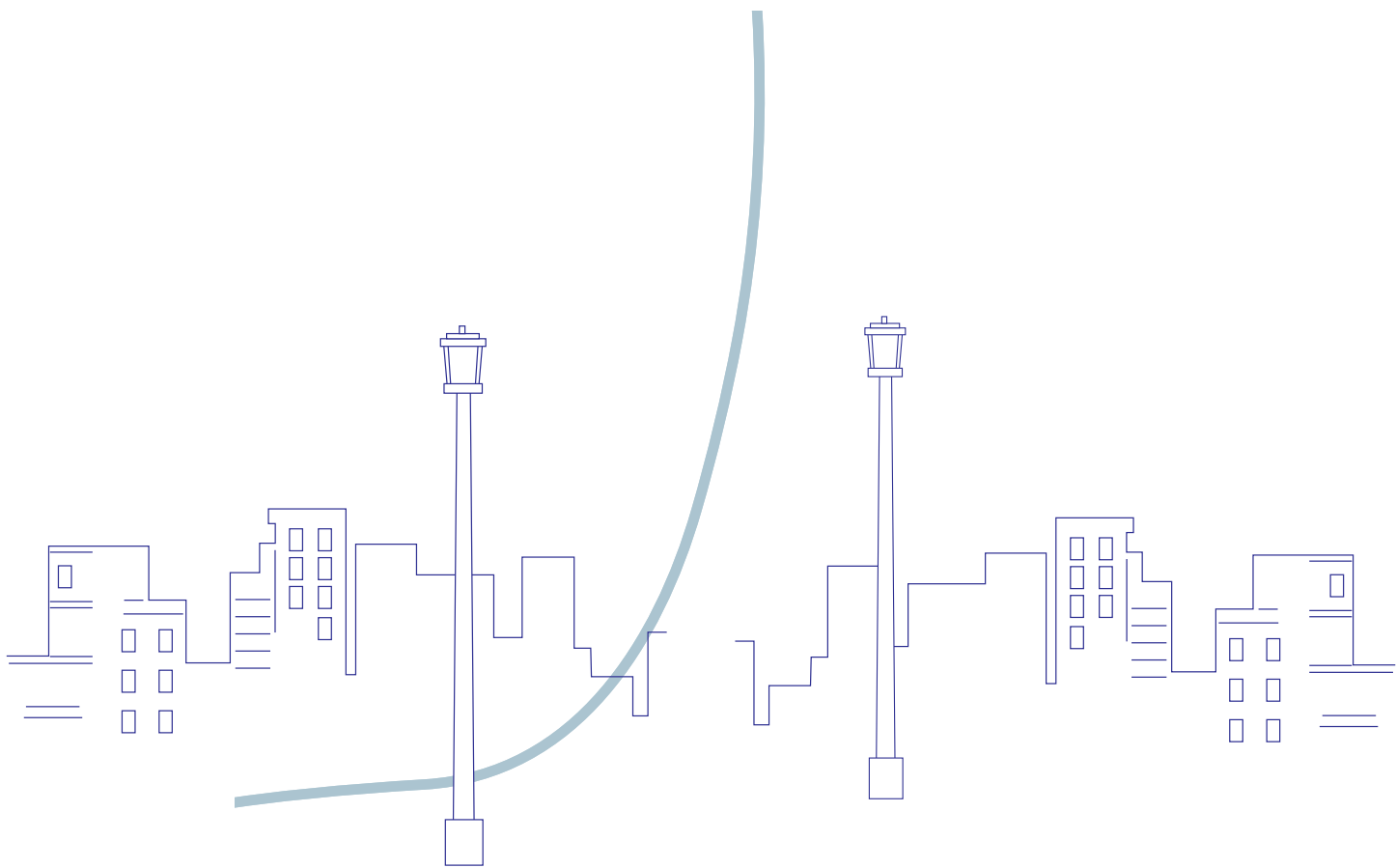
A partir dos índices de eficiência obtidos pelo modelo de fronteira estocástica foi possível estimar o potencial de economia resultante da modernização dos parques de iluminação pública por meio da substituição de lâmpadas convencionais por lâmpadas LED. Os resultados apresentados para os municípios paulistas mostraram que o nível de eficiência guarda uma relação inversa com a intensidade energética na iluminação pública. Portanto, municípios com maior intensidade energética na iluminação pública possuem parques de iluminação pública ineficientes e que precisam ser modernizados com a introdução de lâmpadas LED.

Em termos agregados a metodologia proposta estimou um potencial de redução do consumo na iluminação pública da ordem de 1249 GWh/ano no Estado de São Paulo, o que seria equivalente a uma economia anual de R\$ 348,68 milhões, sendo que a maior parte deste potencial se encontra nas cidades com população entre 50 mil e 500 mil habitantes. A exploração deste potencial implicaria na substituição de cerca de 2,9 milhões de lâmpadas convencionais por lâmpadas LED mais eficientes em todo o Estado de São Paulo.

Por meio de pesquisas na internet foi possível identificar que alguns municípios paulistas já iniciaram a substituição das lâmpadas convencionais por lâmpadas LED, por exemplo, Jambuí já tem lâmpadas LED em toda a iluminação pública desde 2018 e a cidade de São Paulo já usa lâmpadas LED desde 2015, mas outros municípios intensificaram a substituição de lâmpadas em 2021 e 2022. Portanto, cada município está seguindo seu próprio ritmo durante a transição para as lâmpadas LED. Por esta razão, preferiu-se fazer uma taxonomia dos municípios paulistas classificando-os em um sistema com duas dimensões (potencial de economia e velocidade da transição para as lâmpadas LED) e que juntas formam um mapa com 4 quadrantes, a partir do qual foram identificados 420 municípios paulistas que precisam de algum apoio para que possam financiar a modernização de seus parques de iluminação pública com lâmpadas LED. O potencial de economia deste conjunto de municípios é da ordem de 956,1 GWh/ano ou R\$ 266,7 milhões por ano.

As quantidades e participações das lâmpadas convencionais e LED em cada município constituem uma informação de difícil acesso. Contudo, a partir de algumas premissas sobre como seria a composição dos parques de iluminação pública para todo o Estado de São Paulo, obteve-se uma estimativa alternativa do potencial de economia de energia de 1592 GWh, um valor da mesma ordem de grandeza da economia de 1249 GWh estimado pela metodologia proposta. Tal fato aponta para a validade das estimativas apresentadas pela metodologia proposta.

Dado que as quantidades e proporções de lâmpadas convencionais e LED não são conhecidas em cada município, os potenciais de economia de energia (GWh) estimados para alguns municípios podem estar subestimados. Apesar desta possibilidade, os resultados apresentados para os municípios paulistas são promissores, sobretudo na identificação dos municípios mais propensos a receberem algum tipo de apoio no financiamento para a modernização da iluminação pública.



Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. (2022a) Resolução Normativa nº 1000/2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. (2022b) Calendário e Resultado dos Processos Tarifários de Distribuição. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/resultado-dos-processos-tarifarios-de-distribuicao> Acesso em: 2 mar. 2022.

AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO - AEEESP. (2022) Concessionárias de energia elétrica. Disponível em: <http://www.arsesp.sp.gov.br/SitePages/energia-eletrica/concessionarias-energia-eletrica.aspx> Acesso em: 2 mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA - ABRADDEE. (2022) Disponível em: <https://www.abradee.org.br/wp-content/uploads/2018/09/DADOS-DE-MERCADO-DAS-EMPRESAS-DISTRIBUIDORA-S-ASSOCIADAS-A-ABRADEE-2020-v27-05-2021.zip>. Acesso em: 2 mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS CONCESSIONÁRIAS PRIVADAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA - ABCIP. Panorama da participação privada na iluminação pública, 2021. Disponível em <https://www.associacaoabcip.com.br/post/no-ar-a-segunda-edicao-do-panorama-setorial-da-iluminacao-publica-privada-idealizada-pela-abcip>. Acesso em 18 jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE SERVIÇOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA - ABRASI, Dados do Setor - Cadastro Nacional de Pontos de Iluminação Pública. Disponível em: <http://www.abrasi.org.br/iluminacao-urbana/2/dados-do-setor>. Acesso em: 2 mar. 2022.

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO - BID, BID e Banco do Brasil vão investir em infraestrutura municipal, Comunicados de Imprensa, Dez, 2018. Disponível em: <https://www.iadb.org/pt/noticias/brasil-promovera-parcerias-publico-privadas-de-infraestrutura-com-apoio-do-bid>. Acessado em: 7 jul. 2022.

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO - BID, Brasil promoverá parcerias público-privadas de infraestrutura com apoio do BID, Comunicados de Imprensa, Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.iadb.org/pt/noticias/brasil-promovera-parcerias-publico-privadas-de-infraestrutura-com-apoio-do-bid>. Acessado em: 7 jul. 2022.

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO - BID, Programa Desenvolve SP p Infraestrutura Sustentável (BR-L1582): Perfil de Proyecto, Fev, 2022. Disponível em: <https://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=EZSHARE-1222066660-3>. Acessado em: 7 jul. 2022.

CASTRO, F.N.; LUCIANO, B.A. Eficiência energética em sistemas de iluminação pública. Capítulo X, O Setor Elétrico, 2012. Disponível em: https://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/2012/11/Ed81_fasc_iluminacao_cap10.pdf. Acesso em: 4 jul. 2022.

CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - PROCELINFO, Eficiência energética: o desafio dos novos prefeitos. 5 dez. 2016. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7B8D1AC2E8-F790-4B7E-8DDD-CAF4CDD2BC34%7D¶ms=itemID=%7BBF0A4E12-6527-48DA-8321-2F24AA15DB1F%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>. Acessado em: 2 mar. 2022.

CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - PROCELINFO, Eficiência energética: uma aliada da gestão pública. 21 jan. 2021. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7B8D1AC2E8%2DF790%2D4B7E%2D8DDD%2DCAF4CDD2BC34%7D¶ms=itemID=%7B66C48460%2DA1F0%2D4774%2DA331%2DC6F289B-CED1D%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB%2D05D4%2D4644%2DA8F2%2DFAD4803C8898%7D>. Acessado em: 2 mar. 2022.

COELLI, T.; ESTACHE, A.; PERELMAN, S.; TRUJILLO, L. A primer on efficiency measurement for utilities and transport regulators. Washington: World Bank Institute, 2003.

COELLI, T.J.; RAO, D.S.P., O'DONNELL, C.J., BATTESE, G.E. A Introduction to Efficiency and Productivity Analysis. 2ª edição. Springer, 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf. Acesso em: 2 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 ano base 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%C3%A1rio%20Estat%3ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2022.

FERNANDES, A.L.; RASOTO, V.I. Estudo sobre viabilidade econômica e impactos urbanos no uso de lâmpadas LED (diodo emissor de luz) na iluminação pública da cidade de Curitiba, Rev. FAE, v. 20, n. 2, p. 21-34, Curitiba, 2017.

GCCE Grupo Coordenador de Conservação de Energia Elétrica, Prestação de Contas 2º Plano Anual de Aplicação de Recursos do Procel (PAR/2018-2019), 2020. https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cgee/arquivos/documentos/par_2018___relatorio_consolidado_v7.pdf

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021.

JONDROW, J.; LOVELL, C.A.K.; MATEROV, L.S.; SCHMIDT, P. On the estimation of technical inefficiency in the stochastic frontier production function model, Journal of Econometrics, v. 19, pp. 233-238, 1982.

KUMBHAKAR, S.C.; LOVELL, C.A.K. Stochastic frontier analysis. Cambridge, 2000.

LEITE, D.; PESSANHA, J.; SIMÕES, P.; CALILI, R.; SOUZA, R. A Stochastic Frontier Model for Definition of Non-Technical Loss Targets. Energies 2020, 13, 3227. <https://doi.org/10.3390/en13123227>. LEON, N. ; PESSANHA, J. F. M. ; SOBRINHO, J.R. . Projeção de demanda de energia elétrica da Eletrobrás Distribuição Alagoas. 2010.

LEON, N. ; PESSANHA, J. F. M. ; BOSINGNOLI, D. O. . Previsão de mercado futuro de energia elétrica: classes residencial, comercial, rural, iluminação pública, poder público e serviço público & consumo próprio. 2007.

LI, J.; MAKUMBE, P. LED street lighting: Unburdening our cities, August, 2017. <https://blogs.worldbank.org/energy/led-street-lighting-unburdening-our-cities>

LORENZO, J.M.P.; SÁNCHEZ, I.M.G. Efficiency evaluation in municipal services: na application to the street lighting sevice in Spain, J.Prod.Anal, 27, p. 149-162, 2007.

MAKUMBE, P.; WEYL, D.K.; EIL, A.; LI, J. Proven Delivery Models for LED Public Lighting: Synthesis of Six Case Studies, The World Bank, May, 2016. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/25336/109532-ESM-P152422-PUBLIC-ABSTRACT-SENT-FINALESMAAProvenDeliveryModelsLEDPublicLightingKSopt.pdf?sequence=1&%3Bamp%3BisAllowed=y>

MENDONÇA, M.J.C.; PEREIRA, A.O.; MEDRANO, L.A.; PESSANHA, J.F.M. Analysis of electric distribution utilities efficiency levels by stochastic frontier in Brazilian power sector. Socio-Economic Planning Sciences 2021, 76, 100973.

MENDONÇA, M.J.C.; PEREIRA, A.O.; PESSANHA, J.F.M.; MEDRANO, L.A.; BELLIDO, M.M.H. Avaliando a qualidade dos serviços de distribuição de energia elétrica no Brasil, Texto para Discussão, TD 2776, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Junho, 2022.

MEYER, M.; MAURER, L.; FREIRE, J.; GOUVELLO, C. Lighting Brazilian Cities: business models for energy efficiency public street lighting. Washington: World Bank Group, April, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e diretrizes básicas. 2011. Disponível em: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00052.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2022.

OLIVEIRA, B.G.; LIBONI, L.B. Proposta de indicador de eficiência da gestão pública municipal em promover desenvolvimento local. Interações, Campo Grande, v. 20, n. 3, p. 815-830, jul./set. 2019, Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/7RpDq3gz7QxV5bz4gW78Nrr/?format=pdf&lang=pt>, Acesso em: 2 mar. 2022.

OLIVEIRA, S.A.M.G.S.; GUERRA, F.K.O.M.V. Eficiência energética em iluminação pública na UFERSA, Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, v. 1, n. 1, p. 223-234, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 6 – 7 – 11 – 12 – 15, Documentos Técnicos, Brasília, julho, 2018. Disponível em: <https://unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-04/documentos20temc3a1ticos20-20ods20620ods20720ods201120ods201220e20ods2015-1.pdf>, Acesso em: 2 mar. 2022.

PARDO-BOSCH, F.; BLANCO, A.; SESÉ, E.; EZCURRA, F.; PUJADAS, P. Sustainable strategy for the implementation of energy efficient smart public lighting in urban areas: case study in San Sebastian, Sustainable Cities and Society, 76,2022.

PEDERNEIRAS, Secretaria Municipal de Desenvolvimento, Urbano, Infraestrutura, Obras e Trânsito. Memorial de Cálculo de Eficiência da Iluminação Pública, Pátio de Iluminação Pública de Pederneiras – SP, Janeiro, 2020.

POVEDA, M.; ALARCÓN, A. Análisis del potencial de eficiencia energética en iluminación pública: el caso de municipios pequeños y medianos de Brasil, Nota Técnica nº IDB-TN-1574, Banco Interamericano de Desarrollo, Novembro, 2018.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - PROCEL. Eletrobras divulga resultado final da 3 Chamada Pública Procel Reluz. 2022. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66B-B65%7D&Team=¶ms=itemID=%7B32489A3E-96AA-4313-9F4D-B8B32CA49FF6%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - PROCEL. Resultados Procel 2022 ano base 2021. 2022. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B05C5B41D-92F5-4646-BOE3-81B0E3D8642A%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E-3F-A182-629352E9EB18%7D>

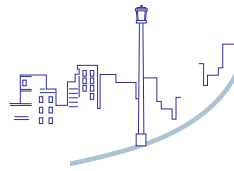
SALES, R. Luminárias a LED na iluminação pública: características técnicas e viabilidade econômica. Capítulo V, O Setor Elétrico, 2012. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2012/06/Ed76_fasc_iluminacao_cap5.pdf, Acesso em: 4 jul. 2022.

SIMA/SP, SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. Anuário de Energéticos por Municípios do Estado de São Paulo 2021 - ano base 2020, São Paulo, 2021, Disponível em: https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/anuario_energetico_municipio.pdf, Acesso em: 2 mar. 2022.

SILVA, L.L.F. Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais, Dissertação de Mestrado, Programa de Planejamento Energético, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006.

TEIXEIRA, I.; RIVERA, R.; REIFF, L.O. Iluminação LED: sai Edison, entram Haitz e Moore - benefícios e oportunidades para o país, Tecnologias da Informação e Comunicação, BNDES setorial 43, p. 363-412, Março, 2016.

TORRICO, L.A.P. A importância da responsabilidade compartilhada no descarte e acondicionamento dos resíduos sólidos da iluminação pública no município de Salvador, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Ambiental, Universidade Católica de Salvador, 2018.



Apêndice A

Fronteira Estocástica de Custo

Em termos gerais, uma fronteira de custo indica o mínimo custo necessário para produzir uma determinada quantidade de produto, dados o nível de produção, os preços dos insumos e a tecnologia existente. Assim, os produtores ineficientes estão localizados acima da fronteira, enquanto os produtores eficientes estão na fronteira.

A fronteira de custo funciona como uma referência (benchmark) contra o qual podem ser comparados os desempenhos de diferentes produtores ou DMU's (Decision Making Units) que atuam em um mesmo segmento da indústria. Uma simples comparação com a função fronteira permite discriminar os produtores entre eficientes e ineficientes.

Os desvios em relação à função "fronteira" refletem falhas na otimização do processo de produção. Isto sugere que o grau de eficiência relativa de um produtor pode ser avaliado por meio da sua distância em relação à fronteira de eficiência (KUMBHAKAR & LOVELL, 2000). Esta métrica é um número no intervalo $[0,1]$ e a DMU é considerado eficiente se a métrica assume um valor unitário, caso contrário ele é considerado ineficiente. Por exemplo, para uma DMU que produz uma quantidade y de produto, a partir de uma quantidade x de insumos com preços unitários w , a eficiência θ corresponde a razão entre o mínimo custo potencial definido pela fronteira de eficiência $c(y,w)$ e o custo de produção verificado $E = wx \geq c(y,w)$, ou seja:

$$\theta = c(y,w)/E \quad (A1)$$

Arranjando os termos da equação (A1) tem-se que $E = c(y,w) \theta^{-1}$. Na sequência, obtém-se a seguinte equação por meio de uma transformação logarítmica:

$$\ln E = \ln c(y,w) - \ln \theta \quad (A2)$$

Admitindo que a função de produção seja linear nos logaritmos das variáveis (por exemplo, uma especificação Cobb-Douglas) e fazendo $\varepsilon = -\ln \theta$, um termo aleatório, tem-se a seguinte equação de regressão linear para cada DMU i em um conjunto com n DMUs:

$$\ln E_i = \beta_0 + \beta_1 \ln y_i + \beta_2 \ln w_i + \varepsilon_i \quad (A3)$$

Na equação (A3) o termo aleatório ε_i expressa o desvio entre o custo verificado ($\ln E_i$) e o custo mínimo definido pela fronteira de eficiência ($\beta_0 + \beta_1 \ln y_i + \beta_2 \ln w_i$). Vale ressaltar que de forma distinta do modelo de regressão linear convencional o termo aleatório em (A3) tem média não nula ($E(\varepsilon_i) < 0$) e não é normalmente distribuído.

Nos modelos de fronteira determinística qualquer desvio em relação à fronteira atribui-se à ineficiência. Tais modelos ignoram o fato de que os custos podem ser afetados por choques aleatórios não gerenciáveis pelas DMUs. Um avanço neste sentido são os modelos de fronteira estocástica, cuja principal virtude reside no reconhecimento de que os desvios em relação à fronteira podem ter origem na ineficiência de produtores e podem ser causados por choques aleatórios não gerenciáveis. Para acomodar as duas fontes de desvios em relação à fronteira, tais modelos decompõem o termo aleatório em duas componentes ($\varepsilon_i = v_i + u_i$), conforme indicado na equação (A4):

$$\ln E_i = \beta_0 + \beta_1 \ln y_i + \beta_2 \ln w_i + v_i + u_i \quad (A4)$$

Na equação (A4) v_i é uma componente aleatória normalmente distribuída com média zero e que captura choques aleatórios não gerenciáveis pela i -ésima DMU, enquanto u_i é uma componente aleatória não negativa e que reflete o grau de ineficiência da DMU i . A soma das componentes aleatórias define o erro composto $\varepsilon_i = v_i + u_i$, positivamente assimétrico.

A fronteira estocástica tem duas partes: uma parte determinística, comum a todos as DMUs ($\beta_0 + \beta_1 Lny_i + \beta_2 Lnwi$), e uma parte específica de cada produtor, definida por θ_i e que captura efeitos de choques aleatórios em cada DMU. Já a medida de eficiência da i -ésima DMU é dada pela equação A5.

$$\theta_i = \exp(-u_i) \quad (A5)$$

A equação (A4) é estimada por máxima verossimilhança e dado que as variáveis aleatórias u e v são não observáveis, há a necessidade de assumir as seguintes premissas acerca das distribuições de probabilidades destas variáveis, para que seja possível utilizar o método de máxima verossimilhança na estimação dos parâmetros do modelo e a estimação da eficiência:

H1. $v_i \sim i.i.d N(0, \sigma_v^2)$

H2. $u_i \sim i.i.d N^+(0, \sigma_u^2)$ (Half-Normal)

H3. u_i e v_i são independentes entre si

H4. u_i e v_i são não correlacionadas com as variáveis explicativas do modelo

Assim, a função densidade do erro composto é dada por:

$$f(\varepsilon) = \int_0^\infty f(u, \varepsilon) du = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left[1 - \Phi\left(\frac{-\varepsilon\lambda}{\sigma}\right) \right] \cdot e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} = \frac{2}{\sigma} \varphi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) \Phi\left(\frac{\varepsilon\lambda}{\sigma}\right) \quad (A6)$$

em que $\lambda = \sigma_u / \sigma_v$, $\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$ e φ e Φ são respectivamente a densidade e a distribuição acumulada de uma $N(0,1)$.

O logaritmo da função de verossimilhança dado uma amostra com n DMUs é escrito como:

$$\ln L = \text{constante} - l \ln \sigma - \sum_i \ln \Phi\left(\frac{\varepsilon_i \lambda}{\sigma}\right) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_i \varepsilon_i^2 \quad (A7)$$

As estimativas de máxima verossimilhança correspondem aos valores de σ_u , σ_v e β que maximizam a equação (A7). Estas estimativas são assintoticamente consistentes (KHUMBAKAR & LOVELL, 2000).

Vale ressaltar que o logaritmo da verossimilhança foi parametrizado em termos de $\sigma^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2$ e $\lambda = \sigma_u / \sigma_v$. Tal parametrização permite uma melhor interpretação do modelo, por exemplo, a estatística $\gamma = \sigma_u^2 / (\sigma_u^2 + \sigma_v^2) = \lambda^2 / (1 + \lambda^2) \in [0,1]$ e permite avaliar qual das duas componentes do erro composto é predominante. Quando $\gamma = 0$ a ineficiência é inexistente, pois σ_v^2 representa a maior parte do erro. Desta forma, os desvios entre a fronteira e as DMUs são representados, em sua maior parte, por ruídos aleatórios. Contrariamente, quando $\gamma = 1$, o erro é dominado por σ_u^2 , logo, os desvios em relação à fronteira demonstram ineficiência. Assim, por meio do teste de razão de máxima verossimilhança pode-se testar a hipótese $H_0: \gamma = 0$ contra a hipótese alternativa $H_1: \gamma \neq 0$ para avaliar se a ineficiência está presente no conjunto de dados analisados. Como γ pode cair nos limites do intervalo $[0,1]$, a distribuição da estatística teste pode ser aproximada por uma χ^2 .

Conforme indicado na equação (A5), para estimar a eficiência de cada DMU é preciso ter uma estimativa de u_i , a componente do erro que captura o efeito da ineficiência. Esta estimativa pode ser obtida a partir dos resíduos ε_i pois $\varepsilon_i = v_i + u_i$. Como u_i e v_i são independentes entre si, a distribuição conjunta dessas variáveis é o produto das respectivas densidades marginais:

$$f(u, v) = \frac{2}{2\pi\sigma_u\sigma_v} e^{-\left(\frac{u^2}{2\sigma_u^2} + \frac{v^2}{2\sigma_v^2}\right)} \quad (A8)$$

Dado que $\varepsilon_i = v_i + u_i$, obtém-se a distribuição conjunta de u_i e ε_i :

$$f(u, \varepsilon) = \frac{2}{2\pi\sigma_u\sigma_\varepsilon} e^{\left(\frac{u^2}{2\sigma_u^2} - \frac{(\varepsilon-u)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right)} \quad (\text{A9})$$

Para obter a distribuição marginal de ε_i , basta integrar a função de densidade conjunta (A8) em função de u :

$$f(\varepsilon) = \int_0^\infty f(u, \varepsilon) du = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left[1 - \Phi\left(-\frac{\varepsilon\lambda}{\sigma}\right)\right] e^{\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} = \frac{2}{\sigma} \phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) \Phi\left(\frac{\varepsilon\lambda}{\sigma^2}\right) \quad (\text{A10})$$

em que ϕ e Φ são a densidade acumulada e a distribuição acumulada de uma normal padrão respectivamente.

Por meio da densidade conjunta em (A9) e a densidade de ε_i em (A10) consegue-se definir a densidade de probabilidade condicional de u_i dado ε_i :

$$f(u|\varepsilon) = \frac{f(u, \varepsilon)}{f(\varepsilon)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_*} e^{\left[\frac{(\mu - \mu_*)^2}{2\sigma_*^2}\right]} \Rightarrow u_i|\varepsilon_i \sim N^+(\mu_*, \sigma_*^2) \quad (\text{A11})$$

em que $\mu_* = \frac{\varepsilon\sigma_u^2}{\sigma^2}$ e $\sigma_*^2 = \frac{\sigma_u^2\sigma_\varepsilon^2}{\sigma^2}$

Uma estimativa pontual para u_i pode ser a média ou a moda da distribuição condicionada em (A11). Em qualquer um dos casos, a estimativa \hat{u}_i define a estimativa da eficiência $\theta_i^* = \exp(-\hat{u}_i)$. Por exemplo, Jondrow et al. (1982) sugerem usar o valor esperado da densidade condicional em (11) como estimativa pontual de u_i :

$$\hat{u}_i = E(u_i|\varepsilon_i) = \mu_{*i} + \sigma_* \left[\frac{\varphi(-\mu_{*i}/\sigma_*)}{1 - \Phi(-\mu_{*i}/\sigma_*)} \right] = \sigma_* \left[\frac{\varphi(\varepsilon_i\lambda/\sigma)}{1 - \Phi(\varepsilon_i\lambda/\sigma)} + \frac{\varepsilon_i\lambda}{\sigma} \right] \quad (\text{A12})$$

Já a medida de eficiência proposta por Battese e Coelli (COELLI et al., 2005) é dada por:

$$\theta_i = E(e^{-u_i}|\varepsilon_i) = \frac{1 - \Phi\left(\frac{\sigma_* - \mu_{*i}}{\sigma_*}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{\mu_{*i}}{\sigma_*}\right)} e^{-\mu_{*i} + \frac{1}{2}\sigma_*^2} \quad (\text{A13})$$

Os resultados apresentados baseiam-se na premissa de que a componente aleatória u_i tenha distribuição Half-Normal, mas outras premissas para a densidade de probabilidade de u_i podem ser admitidas, por exemplo, a densidade normal truncada.



Apêndice B

Estimativa do número de lâmpadas convencionais e de lâmpadas LED no Estado de São Paulo

Inicialmente assume-se que há dois tipos de lâmpadas: LED e convencional, sendo que entre as convencionais a mais comum é a de vapor de sódio, logo:

$$\text{Participação}_{LED} + \text{Participação}_{convencional} = 1 \quad (B1)$$

As participações das lâmpadas LED e convencional para o Estado de São Paulo não são conhecidas, mas podem ser estimadas mediante algumas premissas. Estima-se que em todo o Estado de São Paulo existam 3.571.189 pontos de luz, enquanto na capital há cerca de 639.019 pontos de luz. Ademais, 88,5% do parque de iluminação pública da cidade de São Paulo já é formado por lâmpadas LED. Nos municípios do interior a situação não é conhecida, com exceção de Jambeiro que tem LED em toda rede de iluminação pública. Considerando uma premissa conservadora admite-se que no interior as lâmpadas LED correspondam a 11% do total de lâmpadas, conforme indicado pelo caso do município de Pederneiras (PEDERNEIRAS, 2019). Assim, estima-se que no Estado de São Paulo cerca de $\frac{1}{4}$ das lâmpadas sejam LED e $\frac{3}{4}$ sejam de lâmpadas convencionais. Tais estimativas para as participações supracitadas foram obtidas a partir das seguintes equações:

$$\text{Participação}_{LED} = \frac{0,11 \times (3.571.189 - 639.019) + 0,885 \times 639.019}{3.571.189} = 0,2487 \quad (B2)$$

$$\text{Participação}_{convencional} = 1 - 0,2487 = 0,7513 \quad (B3)$$

Embora na equação (B2) não tenha sido incluído o total de lâmpadas LED em Jambeiro, este número é relativamente pequeno e não altera de forma significativa as parcelas encontradas.

Portanto estima-se que o conjunto dos parques de iluminação pública de todos os municípios paulistas tenha 888.070 lâmpadas LED e 2.683.119 lâmpadas convencionais.

A partir destes resultados pode-se avançar para estimar a potência média de cada tipo de lâmpada. O consumo total da iluminação pública no Estado de São Paulo em 2020 foi 3.155.870.922 kWh. Assim, admitindo que cada ponto de luz tenha uma lâmpada, a potência média das lâmpadas no Estado de São Paulo (\bar{P}) é estimada em:

$$\bar{P} = \frac{\text{consumo IP (Watts)}}{365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} \times \text{Número de lâmpadas}} = 201,7587 \text{ W} \quad (B4)$$

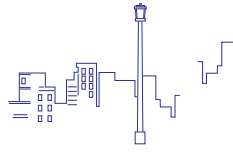
Seja P_c a potência média das lâmpadas convencionais e P_L a potência média das lâmpadas LED. Adicionalmente, considere que as perdas nos reatores para as lâmpadas convencionais sejam da ordem de 10% das potências nominais das lâmpadas. Então, \bar{P} é dada pela média ponderada das potências médias dos dois tipos de lâmpadas, conforme a seguir:

$$0,2487 P_L + 1,1 \times 0,7513 P_c = 201,7587 \quad (B5)$$

A modernização dos parques de iluminação pública demandará a substituição de todas as lâmpadas convencionais por lâmpadas LED, cujo resultado será uma economia de 1.249.079.825 kWh. Assim, pode-se obter a seguinte equação contendo as potências das lâmpadas P_c e P_L :

$$1,1 P_c - P_L = 1.249.079.825 \times 1000 / (365 \times 12 \times 2.683.119) = 106,286 \text{ W} \quad (B6)$$

As equações (B5) e (B6) formam um sistema, cuja solução determina as potências médias das lâmpadas convencionais e LED, respectivamente, $P_c = 207,45 \text{ W}$ e $P_L = 121,906 \text{ W}$.

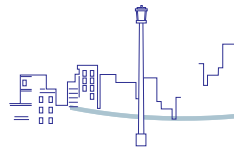


Apêndice C

Intensidade energética na iluminação pública municipal

Neste trabalho a intensidade energética na iluminação pública para um município i é definida pela média geométrica entre a intensidade per capita, $\log(\text{consumo da IP/habitante})$, e a intensidade por área, $\log(\text{consumo da IP/área})$, conforme indicado na equação (C1) a seguir:

$$\textit{intensidade energética}_i = \sqrt{\log\left(\frac{IP_i(kWh)}{Populaçã_o_i}\right) \times \log\left(\frac{IP_i(kWh)}{Área_i}\right)} \quad (C1)$$



Apêndice D

Estimativa alternativa do potencial de economia na iluminação pública no Estado de São Paulo

O consumo total da iluminação pública no Estado de São Paulo em 2020 foi 3.155.870.922 kWh. Assim, admitindo que cada ponto de luz tenha uma lâmpada, a potência média das lâmpadas no Estado de São Paulo é estimada em:

$$\bar{P} = \frac{\text{consumo IP (Watts)}}{365 \text{ dias} \times 12 \text{ horas} \times \text{Número de lâmpadas}} = 201,7587 \text{ W} \quad (D1)$$

Seja P_c a potência média das lâmpadas convencionais e considere que a potência média das lâmpadas LED seja de 100 W. Adicionalmente, considere que as perdas nos reatores para as lâmpadas convencionais sejam da ordem de 10% das potências nominais das lâmpadas. Então, \bar{P} é dada pela média ponderada das potências médias dos dois tipos de lâmpadas, conforme a seguir:

$$0,2487 \times 100 + 1,1 \times 0,7513 P_c = 201,7587 \quad (D2)$$

A solução da equação (D2) fornece uma estimativa de 214,0395 W para a potência média das lâmpadas convencionais. Assim, o potencial de economia de energia resultante da troca das 2.683.119 lâmpadas convencionais é estimado em 1591,74 GWh, conforme indicado abaixo:

$$365 \times 12 \times 2.683.119 \times (1,1 \times 214,0395 - 100) \times 10^{-9} = 1591,74 \text{ GWh} \quad (D3)$$



Apêndice E

Análise de sensibilidade do potencial de economia de energia

Estima-se que no Estado de São Paulo existam 3.571.189 pontos de luz, assim, o potencial de economia de energia (GWh) resultante da substituição das lâmpadas convencionais por lâmpadas LED é avaliado por meio da seguinte equação:

$$\text{Potencial de economia (GWh)} = 365 \times 12 \times 3.571.189 \times (1 - \%LED) \times (1,1 \times P_c - P_l) \times 10^{-9} \quad (E1)$$

em que %LED denota a participação das lâmpadas LED no parque instalado de iluminação pública em todo o Estado de São Paulo, PL é a potência média (W) das lâmpadas LED e PC a potência média (W) das lâmpadas convencionais.

As potências nominais das lâmpadas usadas na iluminação pública abrangem uma ampla gama de valores. Por exemplo, as lâmpadas LED apresentam potências nominais de 28 W, 61 W, 92 W, 106 W, 114 W, 115 W e 123 W. Já as lâmpadas convencionais podem ter potências nominais iguais a 70 W, 100 W, 150 W, 250 W e 400 W. Admitindo apenas um tipo de lâmpada LED e um tipo de lâmpada convencional, as respectivas potências nominais são as potências médias P_L e P_C na equação (E1).

Assim, conforme indicado na Tabela E1, o potencial de economia de energia pode ser avaliado para diferentes combinações de potências nominais das lâmpadas e distintos níveis de participação das lâmpadas LED (%LED). Naturalmente foram avaliadas apenas as combinações nas quais as lâmpadas convencionais são substituídas por lâmpadas LED de menor potência nominal, i.e., $P_L \leq P_C$. Ademais a potência média das lâmpadas do parque de iluminação pública de São Paulo é estimada em 201 W, portanto, as combinações indicadas em amarelo na Tabela E1 e os respectivos potenciais não são plausíveis. A estimativa do potencial de economia de energia calculada no Apêndice D corresponde a célula em cinza localizada próxima ao centro da Tabela E1. A média de todas as possibilidades na Tabela E1 resulta em um potencial de economia da ordem de 1.366 GWh.

Tabela E1. Análise de sensibilidade do potencial de economia de energia em função das potências médias das lâmpadas e participação das lâmpadas LED

POTÊNCIAS VSAP W	POTÊNCIAS LED W	PARTICIPAÇÃO DAS LÂMPADAS LED										
		0%	5%	10%	20%	25%	50%	75%	80%	90%	95%	100%
70	28	766	728	690	613	576	383	192	153	77	38	-
70	61	250	238	225	200	188	125	63	50	25	13	-
100	28	1.283	1.218	1.154	1.026	964	641	321	257	128	64	-
100	61	766	728	690	613	576	383	192	153	77	38	-
100	92	282	267	253	225	212	141	70	56	28	14	-
150	28	2.143	2.036	1.929	1.714	1.610	1.071	536	429	214	107	-
150	61	1.627	1.545	1.464	1.301	1.223	813	407	325	163	81	-
150	92	1.142	1.085	1.028	913	858	571	285	228	114	57	-
150	106	923	877	831	738	694	461	231	185	92	46	-
150	115	782	743	704	626	588	391	196	156	78	39	-
150	123	657	624	591	526	494	328	164	131	66	33	-
214,0395	100	2.119	2.013	1.907	1.695	1.592	1.059	530	424	212	106	-
250	28	3.864	3.670	3.477	3.091	2.903	1.932	966	773	386	193	-
250	61	3.347	3.180	3.013	2.678	2.516	1.674	837	669	335	167	-
250	92	2.862	2.719	2.576	2.290	2.151	1.431	716	572	286	143	-
250	106	2.643	2.511	2.379	2.115	1.987	1.322	661	529	264	132	-
250	114	2.518	2.392	2.266	2.015	1.893	1.259	630	504	252	126	-
250	115	2.503	2.378	2.252	2.002	1.881	1.251	626	501	250	125	-
250	123	2.378	2.259	2.140	1.902	1.787	1.189	594	476	238	119	-
400	28	6.444	6.122	5.800	5.156	4.843	3.222	1.611	1.289	644	322	-
400	61	5.928	5.632	5.335	4.743	4.455	2.964	1.482	1.186	593	296	-
400	92	5.443	5.171	4.899	4.355	4.091	2.722	1.361	1.089	544	272	-
400	106	5.224	4.963	4.702	4.179	3.926	2.612	1.306	1.045	522	261	-
400	114	5.099	4.844	4.589	4.079	3.832	2.550	1.275	1.020	510	255	-
400	115	5.084	4.829	4.575	4.067	3.820	2.542	1.271	1.017	508	254	-
400	123	4.958	4.711	4.463	3.967	3.726	2.479	1.240	992	496	248	-

Fuente: Elaboração Própria.

