

METODOLOGIA MULTICRITERIAL PARA AVALIAÇÃO DE TROCA DE LÂMPADAS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL

MULTICRITERIAL METHODOLOGY TO EVALUATE THE SHIFT OF PUBLIC LIGHTING LAMPS IN BRAZIL

ÁREA TEMÁTICA: GESTÃO DE OPERAÇÕES E LOGÍSTICA

Murilo Oliveira Leme, UTFPR, Brasil, muriloleme@utfpr.edu.br

Victor Ferraz de Lucia, UTFPR, Brasil, victorferraz101@gmail.com

Resumo

A iluminação pública é essencial para a sociedade moderna durante os horários em que não há iluminação natural, uma vez que ela proporciona aspectos fundamentais para o contexto urbano, como visibilidade, segurança e conforto. Contudo, no Brasil, este setor, em suma, não tem recebido a atenção devida. Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma metodologia multicriterial para avaliar a troca de lâmpadas na iluminação pública brasileira, objetivando uma escolha assertiva da fonte de luz e, que por consequência, acarreta em uma maior eficiência deste setor brasileiro. Para tal, o método proposto correlaciona diversos critérios através de duas metodologias multicriteriais ratificadas na literatura mundial: o AHP e o TOPSIS. A tomada de decisão é pautada em fatores quantitativos e qualitativos, sendo eles: Adequação ao ambiente, adequação técnica, comodidades e especificações técnicas. O decisor participa ativamente ao longo do processo de julgamentos, proporcionando assim, subjetividade nos resultados.

Palavras-chave: Iluminação Pública; Análise Multicriterial; Eficiência Energética

Abstract

Public lighting is essential for modern society during the night, as it provides fundamental aspects for the urban context, such as visibility, safety and comfort. However, in Brazil, this sector, in short, does not receive due attention. This paper presents the development of a multicriterial methodology to evaluate the replacement of lamps in Brazilian public lighting, aiming at an assertive choice of the light source and, consequently, leads to greater efficiency in this Brazilian sector. For such, the proposed method correlates several criteria through two multicriteria methodologies ratified in the world literature: AHP and TOPSIS. Decision making is based on quantitative and qualitative factors, namely: Adequacy to the environment, technical adequacy, amenities and technical specifications. The decision maker actively participates throughout the judgment process, thus providing subjectivity in the results. Finally, from acceptance tests with extreme cases, the coherence, cohesion and agreement of the developed method is confirmed.

Keywords: Street Lighting; . Multicriteria Analysis; Energy Efficiency

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica cresce de maneira exponencial ao longo dos últimos anos e, segundo a International Energy Agency (IEA), o consumo de energia tende a aumentar em 40% até o ano de 2040. Embora o consumo de energia ser um fator de medição para o crescimento econômico de um país já que é o reflexo da utilização de energia pelas empresas,

comércios e indivíduo (ANEEL, 2022), grande parte das fontes de energia são de recursos não renováveis (IEA, 2019), portanto, deve-se ter uma preocupação com a eficiência energética.

Com a crescente demanda da energia elétrica, necessita-se do aumento da oferta bem como diminuir o consumo já existente (IEA, 2019). Essa diminuição pode ser alcançada por diversas formas, como aumento da eficiência dos equipamentos, diminuição de reativos, entre outros.

Além de conter parte significativa da demanda de energia elétrica do país, a Iluminação Pública está atrelada à diferentes fatores de interesses dos gestores, já que uma iluminação pública de qualidade melhora a imagem da cidade e impacta diretamente no cotidiano da população (COPEL, 2012).

Dentre as partes fundamentais para a iluminação pública estão as lâmpadas e luminárias utilizadas, bem como os planos de manutenção (ABNT, 2018). Entretanto, mesmo que com todos esses fatores atrelados à ela, um quantia significativa das tecnologias instaladas são consideradas ultrapassadas (Schulz, 2016).

As modificações feitas na iluminação pública possuem, em suma, teor corretivo sem que haja um estudo de caso, criando diversas lacunas no setor. Entretanto essa realidade está mudando, uma vez que, gradativamente, alguns gestores públicos estão percebendo que uma iluminação urbana de qualidade é indispensável, assim como outros serviços básicos tal qual coleta de lixo e educação (Schulz, 2016).

Dentre as tecnologias empregadas na iluminação pública nacional, a lâmpada é um ponto crucial. A determinação de uma fonte de luz assertiva é fundamental para a eficiência no setor, uma vez que ela é o componente que transforma a energia elétrica em energia luminosa.

A escolha de uma lâmpada pode acarretar em adversidades para o decisor, já que existem muitos parâmetros para a serem considerados.

Tendo isso em vista, para haver uma rede de iluminação pública eficiente, é necessário que haja o controle de todo o processo. Para tal, é ideal que toda implementação, modificação ou correção no sistema seja estudada individualmente, para a escolha das lâmpadas não pode ser diferente.

As metodologias multicriteriais são ferramentas ideais para tomadas de decisão nestes moldes, visto que com sua aplicação é possível estruturar e resumir os diversos aspectos sobre o problema em questão. Além disso, com a aplicação de tais metodologias, a subjetividade do que é o melhor cenário possível é enaltecido, já que o decisor participa de todo o processo (Ayala e Frank, 2013).

Em grande parte dos municípios brasileiros, não há nenhum estudo sobre as trocas de lâmpadas da iluminação pública, mesmo que uma escolha de lâmpada adequada acarrete não só uma maior eficiência energética, mas também, segurança, redução de acidentes noturnos, conforto e qualidade de vida à toda população que utiliza deste serviço. Portanto, faz-se necessário uma análise criteriosa e adequada neste contexto.

Esse artigo apresenta um estudo sobre a iluminação pública brasileira, propondo uma metodologia multicriterial para análise da troca de lâmpadas do contexto brasileiro.

2. ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL

Em setembro de 2012, a ANEEL através do artigo 218 da resolução normativa nº414/2010 estipulou que os acervos da iluminação pública registrados pelas concessionárias devem ser transferidos ao poder público. Uma vez que no Brasil existem diferentes realidades de competência técnica e financeira, a gestão descentralizada da IP resulta em desigualdades na prestação deste serviço (COPEL, 2012).

2.1 Lâmpadas

As lâmpadas são as fontes luminosas do sistema de iluminação pública. Através de métodos distintos, as lâmpadas, convertem energia elétrica em energia luminosa.

Na iluminação pública são utilizadas 6 tecnologias distintas, sendo elas as lâmpadas incandescentes, lâmpadas a vapor de mercúrio em alta pressão, lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão, lâmpadas a multivapores metálicos, lâmpadas fluorescente de indução magnética e lâmpadas LED's (COPEL, 2012). Além de suas formas de transformar energia elétrica em luminosa serem distintas, todas as lâmpadas são classificadas por parâmetros conhecidos (EDP, 2016).

A visão humana pode ser subdividida em: Fotópica: ocorre durante condições normais de luz natural durante o dia ($> 3\text{cd/m}^2$). Visão humana colorida; Escotópica: ocorre durante condições de escuridão ($< 0,001\text{cd/m}^2$) e Mesópica: ocorre durante condições de baixa luminosidade mas não totalmente escuro (EDP, 2016),.

Para a iluminação pública, as luzes consideradas brancas possuem maior eficiência em relação as amareladas, já que a calibração dos equipamentos fotométricos são realizadas na visão fotópica e quando equalizados para a visão mesópica, em geral, as luzes mais amareladas tendem a perder sua eficiência luminosa (EDP, 2016).

São características importantes das lâmpadas que devem ser levadas em conta quanto a sua escolha:

- A Eficiência Luminosa, medida em lúmen por watt (lm/w), a eficiência luminosa relaciona o fluxo luminoso com a potência elétrica utilizada (COPEL, 2012);
- O Fator de Potência (FP) é definido pela razão entre a potência ativa e aparente de um circuito e quanto mais próximo de 1 o fator de potência for, mais eficiente é a lâmpada e mais próximo de zero, mais ineficiente (COPEL, 2012);
- A Intensidade Luminosa, medida em candelas (cd), é a quantidade de luz que uma fonte luminosa emite em uma certa direção (CEPA, 2021);
- A Luminância, medida em candelas por metro quadrado (cd/m^2), a brilhância (como também é conhecida) indica a razão da intensidade luminosa por determinada área de superfície (CEPA, 2021);
- A Iluminância, medida em lúmen por metro quadrado (lm/m^2) ou lux (lux), o iluminamento, como também é conhecido, possui papel fundamental na escolha de uma lâmpada, pois segundo a NBR 5101:2012, existem níveis mínimos de

iluminância dependendo do local onde a lâmpada está instalada. A partir do conceito de iluminância também surge o conceito de iluminância média, ou seja, valor médio de iluminamento em uma área delimitada. (ABNT, 2018);

- A Vida mediana, medida em horas (h), a vida mediana de uma lâmpada é o tempo após o qual metade das lâmpadas testadas pararam de funcionar (COPEL, 2012). É comum que o conceito de vida útil seja confundido com o de vida mediana. Vida útil é o tempo em horas (h) que a lâmpada demora para perder uma porcentagem de seu fluxo luminoso. Portanto, é evidente que a vida mediana sempre terá um valor absoluto maior que a vida útil (Vaiser, 2021);
- O Índice de Eficiência Energética (IEE), diretamente proporcional à eficiência energética da iluminação pública e pode ser calculado a partir do produto da iluminância média pela potência total instalada, dividida pela área atendida e é a unidade utilizada para mensurar a classificação energética do selo PROCEL das instalações da iluminação pública (EDP, 2016);
- O Fator de Uniformidade, que é a divisão da iluminância mínima (E_{min}) pela iluminância média (E_{med}) em uma determinada área delimitada (ENERGISA, 2019). Sua unidade é adimensional, com valor de zero à um. Assim como o fator de potência, é almejado um valor o mais próximo de 1 (COPEL, 2012).
- A Temperatura da Cor, medida em Kelvin, está relacionado às sensações que se proporciona no ambiente (Phillips, 2022). As temperaturas de cor variam na faixa de 2000K à 10000K (COPEL, 2012);
- O Índice de Reprodução de Cor, valor em porcentagem que define a proximidade das cores refletidas em relação às reais (COPEL, 2012). Uma lâmpada com IRC de 100% reproduzirá com máxima fidelidade as cores reais do objeto (EDP, 2016).

Para a padronização, assegurar a qualidade e segurança do sistema de iluminação, faz-se necessário a regulamentação através de normas e legislações. Tais documentos são estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

2.2 Eficiência Energética e *Smart City*

Em 2000, tratando-se da área de Iluminação Pública, foi concebido pela ELETROBRÁS e visando o desenvolvimento do setor, o Programa Nacional de Iluminação Eficiente (ReLuz) foi criado (PROCEL, 2000).

O ReLuz tem por objetivo investir no setor de Iluminação Pública do país, desta forma, assim, incitando mais aportes na modernização das lâmpadas do sistema público de iluminação artificial. Para tal, são estabelecidos vínculos com os poderes públicos municipais (ELETROBRAS, 2020). Entretanto, não é possível que haja sustentabilidade sem que sejam revistos os conceitos de gestão e planejamento dos espaços urbanos (Campos, 2016).

Uma cidade inteligente se forma quando investimentos em capital humano e social aliado à infraestruturas de comunicação tradicionais e modernas alimentam um crescimento

econômico sustentável e qualidade de vida, com uma gestão sábia dos recursos naturais por meio de uma governança participativa (Caragliu; Delbo e Nijkamp, 2011).

3. MÉTODOS DE ANÁLISE MULTICRITERIAL

A todos os instantes durante nossa existência, somos confrontados com situações em que é necessário uma tomada de decisão. Segundo Saaty (2008), tudo o que nós fazemos, seja conscientemente ou inconscientemente, é resultado de uma tomada de decisão. As informações conhecidas ajudam e moldam nossos julgamentos porém nem todas informações são úteis ou até mesmo benéficas para compor o veredito.

Geralmente, uma tomada de decisão possui mais de um objetivo a ser satisfeito, e muitas das vezes esses diferentes objetivos geram contraposições defendidas por diferentes grupos de interesse ou partes interessadas (Berias; Maltese e Mariotti, 2012).

3.1 AHP

O método Analytic Hierarchy Process (AHP) visa ponderar critérios de alternativas de forma par a par, assim mitigando as complexidades do problema imposto. o método abrange 5 etapas, sendo elas a estruturação, o julgamentos, a priorização, o cálculo das consistências e o cálculo das performances gerais (Saaty, 1987).

O julgamento das alternativas e a estruturação do método decisor deve ser feito conforme reflete as respostas de duas perguntas: qual dos dois elementos é mais importante com respeito a um critério de nível superior, e com que intensidade, usando a escala de 1-9 apresentado na Tabela 1 (Saaty, 1987).

Intensidade de Importância	Definição	Motivo
1	Mesma Importância	Ambas contribuem igualmente ao objetivo
3	Importância pequena	A alternativa é levemente favorecida em relação a outra
5	Importância Essencial	A alternativa é fortemente favorecida em relação a outra
7	Importância grande	A alternativa é fortemente favorecida em relação a outra e sua dominância é vista na prática
9	Importância muito grande	A alternativa é o melhor possível em relação à outra
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando há necessidade de compromisso entre duas opções
Recíprocos	Reciprocidade	Uma designação razoável
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz.

Tabela 1 – Razões de comparação AHP

A matriz de julgamento deve ser composta com as importâncias dadas às alternativas. Todos os valores da diagonal principal devem ser 1 e as comparações inversas dever ser o valor recíproco (Saaty, 1987).

É necessário testar se o julgamento feito foi correto. Para isso utiliza-se dois indicadores, índice de consistência (IC) e razão de consistência(RC). Para o cálculo do índice de consistência, é necessário seguir os seguintes passos:

- Calcular os autovalores das linhas da matriz de julgamentos;
- Normalizar os autovalores encontrados; e
- Calcular o autovalor máximo a partir da multiplicação da matriz do autovetor normalizado com a matriz soma das colunas da matriz de julgamentos.

3.2 TOPSIS

O método de análise multicritério utilizado é o Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), visa ponderar diversos critérios e denominar a melhor alternativa para o problema. Para cada critério analisado pelo método em questão, haverá a melhor e a pior resolução dentre as alternativas em questionamento. Estes serão, respectivamente, a solução ideal positiva e negativa.

O método multicritério TOPSIS requer apenas um número mínimo de entradas do usuário e suas saídas são facilmente compreendidas. Os únicos parâmetros subjetivos são os pesos associados aos critérios. A ideia principal do TOPSIS é que a melhor solução é aquela que possui a menor distância até a solução ideal e a maior distância da solução ideal, conforme figura 1, para dois critérios e alternativas A e B (Yshizaka e Nemery, 2013).

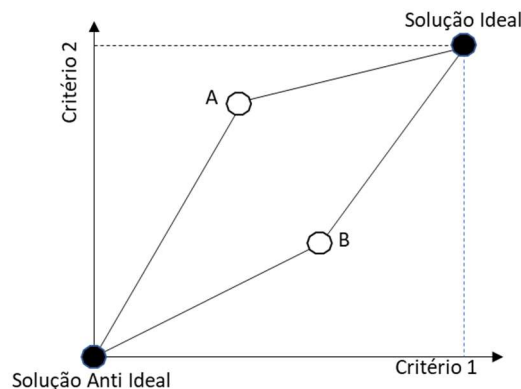


Figura 1 – Legenda da figura

O TOPSIS é baseado em cinco etapas de procedimentos matemáticos. O primeiro passo é reunir os desempenhos das alternativas nos diferentes critérios. Esses desempenhos precisam ser normalizados na segunda etapa.

Nas etapas seguintes, os escores normalizados são então ponderados e as distâncias a um ponto ideal e anti-ideal são calculadas. Por fim, na quinta e última etapa, a proximidade é dada pela proporção dessas distâncias (Yshizaka e Nemery, 2013).

O fluxograma abaixo apresenta detalhadamente essas 5 etapas e os procedimentos matemáticos realizados em cada uma delas (Behzadian, Otaghsara e Yazdani, 2013).

- Passo 1: Construção da matriz de decisão padrão seguindo a equação (1):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum x^2_{ij}}} \text{ for } i = 1, \dots, m; \dots j = 1, \dots, n \quad (1)$$

Onde x_{ij} e r_{ij} são respectivamente as matrizes de decisão original e normalizada.

- Passo 2: Construção dos pesos normalizados na matriz de decisão, seguindo a equação (2):

$$v_{ij} = w_{ij} * r_{ij} \quad (2)$$

Onde w_j é o peso do critério j

- Passo 3: Determinar soluções ideais e anti-ideais. seguintes equações (3), (4), (5) e (6).

$$A^* = \{v_i^*, \dots, v_n^*\} \quad \text{Solução positiva ótima} \quad (3)$$

$$\text{Onde } v_i^* = \max v_{ij} \quad \text{se } j \in J \quad ; \quad v_i^* = \min v_{ij} \quad \text{se } j \in J' \quad (4)$$

$$A' = \{v_i', \dots, v_n^*\} \quad \text{Solução anti-ideal} \quad (5)$$

$$\text{Onde } v_i' = \min v_{ij} \quad \text{se } j \in J \quad ; \quad v_i^* = \max v_{ij} \quad \text{se } j \in J' \quad (6)$$

- Passo 4: Determine a distância de cada alternativa da solução ideal e anti-ideal, seguindo as equações (7) e (8). A distância da solução ideal é dada por:

$$S_i^* = \left[\sum (v_i^* - v_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ para } i = 1, \dots, m \quad (7)$$

Da mesma forma para a matriz anti-ideal:

$$S_i' = \left[\sum (v_j' - v_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ para } i = 1, \dots, m \quad (8)$$

- Passo 5: Cálculo da proximidade relativa da solução ideal C_i^* , seguindo a equação (9).

$$C_i^* = \frac{S_i}{(S_i^* + S_i')} \text{ onde } 0 < C_i^* < 1 \quad (9)$$

A alternativa mais próxima de 1 é selecionada.

Existe uma ampla gama de aplicações do mundo real para o método TOPSIS em diferentes campos, incluindo: Gestão da Cadeia de Suprimentos e Logística, Sistemas de Design, Engenharia e Manufatura, Gestão de Negócios e Marketing, Saúde, Segurança e Meio Ambiente, Gestão de Recursos Humanos, Gestão de Energia, Engenharia Química, Gestão de Recursos Hídricos entre outros. O uso de métodos multicritérios na área de gestão da cadeia de suprimentos e logística TOPSIS é o mais utilizado, enquanto na gestão de negócios e

marketing é o terceiro mais utilizado em trabalhos acadêmicos (Behzadian, Otaghsara e Yazdani, 2013).

4. DESENVOLVIMENTO

A metodologia proposta tem por objetivo analisar e ponderar a troca de lâmpadas, seja de forma corretiva ou por melhoria, na iluminação pública brasileira. Atrelando todos os fatores as quais a iluminação artificial interfere e, assim, alcançando a eficiência no setor.

Para tal, a metodologia correlaciona dois métodos multicriteriais consolidados na literatura, o TOPSIS e o AHP e, para realizar as análises, utiliza-se de uma gama de critérios que serão apresentados.

Estes critérios são associados tanto à especificações técnicas das lâmpadas, quanto à comodidades relacionadas à troca, adequação ao ambiente e adequações técnicas.

Como em qualquer Metodologia Multicriterial (MMC), o resultado é relativo, já que o decisor é quem julga as importâncias através das definições de relevâncias dos critérios e a análise deles. É comum que para uma mesma análise feita por decisores diferentes, os resultados sejam divergentes.

Para a aplicação da metodologia, é sugerido que se identifique qual ponto de iluminação será o objeto de alteração, que se selecione alguns elegíveis modelos de lâmpadas, pondere os critérios com a utilização das MMC e analise os resultados.

A figura 2 apresenta o fluxograma geral da metodologia elaborada por este trabalho.

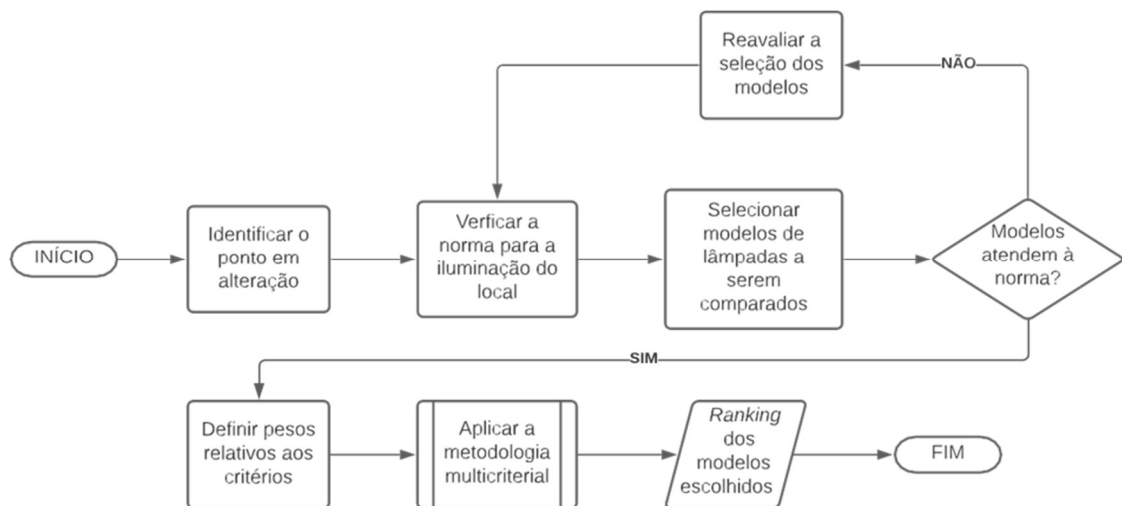


Figura 2 – Fluxograma da metodologia

4.1 Identificação do ponto de substituição

As trocas de lâmpadas na iluminação pública podem ser corretivas ou com propósitos específicos.

As trocas de caráter corretiva são aquelas em que há a necessidade da alteração pois a lâmpada já não desempenha sua função de forma satisfatória, podendo acarretar na melhora ou não da eficiência no ponto de iluminação. Já as alterações com outras especificidades, tem como objetivo a melhoria do sistema.

A partir disso, é possível categorizar o local em que o ponto de iluminação está presente. Este dado possui suma importância para que seja possível adequar a escolha da nova fonte de luz à legislação regulamentadora.

4.2 Seleção dos modelos de lâmpadas a ser analisadas

Uma vez identificado o motivo pela troca e o ponto de iluminação a ser substituído, é possível selecionar modelos de lâmpadas que serão analisados na metodologia.

As lâmpadas escolhidas podem ser das mais diversas tecnologias, fabricantes ou modelos. A única obrigação é que esta deve atender aos requisitos mínimos de iluminância média e fator de uniformidade estabelecidos pela NBR5101:2018.

Entretanto estes dois aspectos devem ser levados em consideração ao escolher o modelo da lâmpada, uma vez que a troca delas também influenciam nesses fatores. Portanto, devem ser desqualificadas aquelas lâmpadas que quando instaladas não atenderiam os requisitos exigidos por norma.

Os critérios são subdivididos em quatro grupos, sendo eles: Especificações técnicas, Comodidades, Adequação ao ambiente e Adequação técnica.

Os fatores que correlacionam a eficiência da iluminação pública com as lâmpadas são inúmeras. São apresentados os aspectos julgados importantes, definidos após a revisão bibliográfica sobre o tema.

Os critérios aqui impostos são sugestões dadas ao decisor. É de sua competência decidir sua relevância.

4.3 Adequação ao ambiente

Este critério está relacionado à quais sensações é pretendido que a iluminação gere nos indivíduos. Existem diversos fatores que mudam os sentimentos das pessoas no local. A figura 3 apresenta os fatores em que o decisor deve basear sua tomada de decisão.

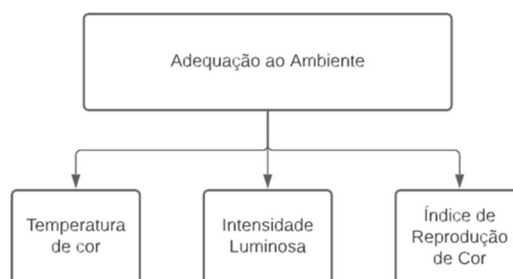


Figura 3 – Critério de adequação ao ambiente

A utilização de luzes com tons mais amarelados geram sentimento de conforto, relaxamento e maior segurança. Portanto esses tipos de lâmpadas são indicadas, por exemplo, para utilizações em praças, pontos gastronômicos, entre outros. A utilização de luzes com tons mais brancas geram maior atividade humana, ou seja incita a atenção, perspicácia (COPEL, 2012).

O IRC está correlacionado à aptidão da lâmpada em reproduzir corretamente as cores dos objetos por ela iluminado (EDP, 2016). Portanto o decisor deve se atentar a qual nível de reprodução de cor é desejável para o ambiente em questão.

4.4 Adequação técnica

Este critério está relacionado à compatibilidade da lâmpada com o local de trabalho à ela proposto. A figura 4 apresenta os fatores em que o decisor deve basear sua tomada de decisão.

Em geral, as temperaturas máximas de operação e umidade máxima de operação são parecidas para lâmpadas de mesma tecnologia, porém quando se tratando de tecnologias diferentes existe uma mudança significativa neste parâmetro (Phillips, 2022).



Figura 4 – Critério de adequação técnica

Em geral, as temperaturas máximas de operação e umidade máxima de operação são parecidas para lâmpadas de mesma tecnologia, porém quando se tratando de tecnologias diferentes existe uma mudança significativa neste parâmetro (Phillips, 2022).

Conforme apresentado anteriormente, existem alguns tipos de luminárias homologadas na Iluminação Pública. Portanto, é importante que o decisor leve em consideração se a lâmpada é compatível com a luminária ou não. Na análise deste critério, também deve ser considerado a tensão de alimentação presente no ponto.

4.5 Comodidades

Este critério está relacionado às facilidades que o deparará durante o processo de troca de lâmpada. A figura 5 apresenta os fatores em que o decisor deve basear sua tomada de decisão.

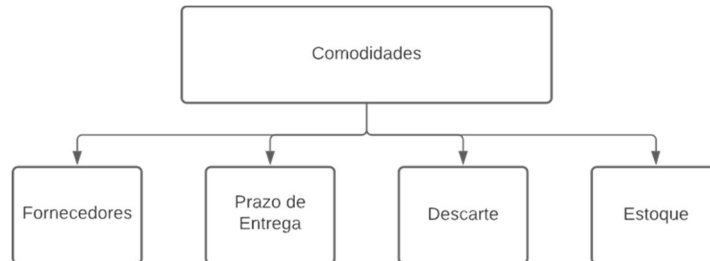


Figura 5 – Critério de comodidades

É de grande ajuda para o tomador de decisão a compra de uma lâmpada com o menor número de entraves, principalmente quando há uma troca de lâmpada de teor corretivo.

O prazo de entrega e números de fornecedores estão diretamente ligados à essa facilidade, uma vez que um menor prazo de entrega significa em agilidade no processo e um maior números de fornecedores numa maior quantidade de opções de compra.

Além disso, se atender às exigências, pode-se optar por possíveis produtos em estoque. É importante lembrar que nem sempre utilizar as lâmpadas em estoque é a melhor opção, uma vez que no caso em que essas se esgotem e haver a necessidade de trocas corretivas, o tempo de reparo será aumentado.

Como a sustentabilidade é um dos pilares da eficiência na Iluminação Pública neste trabalho, é preferível que o administrador opte por lâmpadas cujo descarte seja facilitado, lâmpadas que tenham apelo ecológico maior.

4.6 Especificações técnicas

Este critério está relacionado às características técnicas das fontes de luz. A figura 6 apresenta os fatores em que o decisor deve basear sua tomada de decisão.

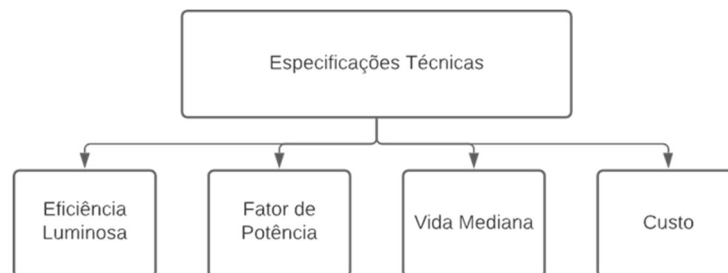


Figura 6 – Critério de especificações técnicas

É utilizado o valor de vida mediana e não vida útil, uma vez que as depreciações do fluxo luminoso em relação ao tempo de vida entre as diversas tecnologias de lâmpadas não são proporcionais.

A eficiência luminosa, por sua vez, assim como seu nome indica, está relacionada com a eficiência energética da fonte de luz, ou seja, esta característica está correlacionada com a diminuição de consumo de energia elétrica e, por consequência, diminuição do custo de manutenção mensal da rede de iluminação pública.

Já o fator de potência está correlacionado à qualidade do consumo de energia que a fonte de luz possui. Quando com fatores de potência muito baixos as consequências são diversas e entre elas estão o aumento da corrente pelo neutro, distorção harmônica da tensão, aumento das perdas, diminuição da qualidade de energia, entre outros (COPEL, 2012). Portanto é preferível lâmpadas com FP mais próximos a 1.

4.7 Ponderação dos critérios

A definição das relevâncias, ou pesos, é parte fundamental dentro da metodologia proposta uma vez que a partir deles que o decisor poderá direcionar suas preferências de escolha.

Por ser intrínseco dos métodos multicritérios utilizados (TOPSIS e AHP), o único requisito para as relevâncias é que a soma dos pesos de cada critério analisado pela mesma metodologia deve ser igual a 1.

Visando nortear a avaliação, o tomador de decisão deve atribuir relevâncias maiores para os critérios que julgar mais importantes e menor relevância aos critérios menos importantes. Caso o usuário considerar algum fator irrelevante, basta que sua ponderação ao critério seja zero, logo este não fará parte de sua análise.

Por exemplo, quando uma relevância for definida como 0.4, entende-se que este critério é detentor de 40% de influência sobre a decisão em questão.

4.8 Aplicação dos métodos multicriteriais

Faz-se necessário a aplicação de dois métodos multicriteriais (AHP e TOPSIS) para a análise completa devido às peculiaridades natas dos critérios levantados.

A escolha destes métodos deu-se por conta de suprirem as necessidades de análise dos critérios e serem de fácil entendimento, podendo realizar todo o tratamento de dados através da ferramenta Microsoft Excel, por exemplo. Assim, cria-se uma facilidade para os decisores aderirem ao método criado.

A estrutura proposta referencia o resultado estabelecido pelo AHP como uma entrada em forma de critério no TOPSIS. Este cascadeamento é confeccionado devido a maior aptidão do primeiro à critérios qualitativos e, do segundo, à critério quantitativos.

A saída que o método AHP oferece para cada uma das alternativas um é autovalor normalizado, ou seja, um dado quantitativo, fazendo assim uma ótima circunstância para o TOPSIS analisá-los.

O AHP fica encarregado por ponderar a adequação ao ambiente, adequação técnica e comodidades.

O TOPSIS, por sua vez, ficará encarregado por ponderar o resultado do AHP, bem como as especificações técnicas porém, diferentemente do método anterior, essa metodologia analisará este parâmetro através de seus subcritérios.

A figura 7 apresenta um fluxograma explicativo das “entradas” e “saídas” da metodologia proposta.

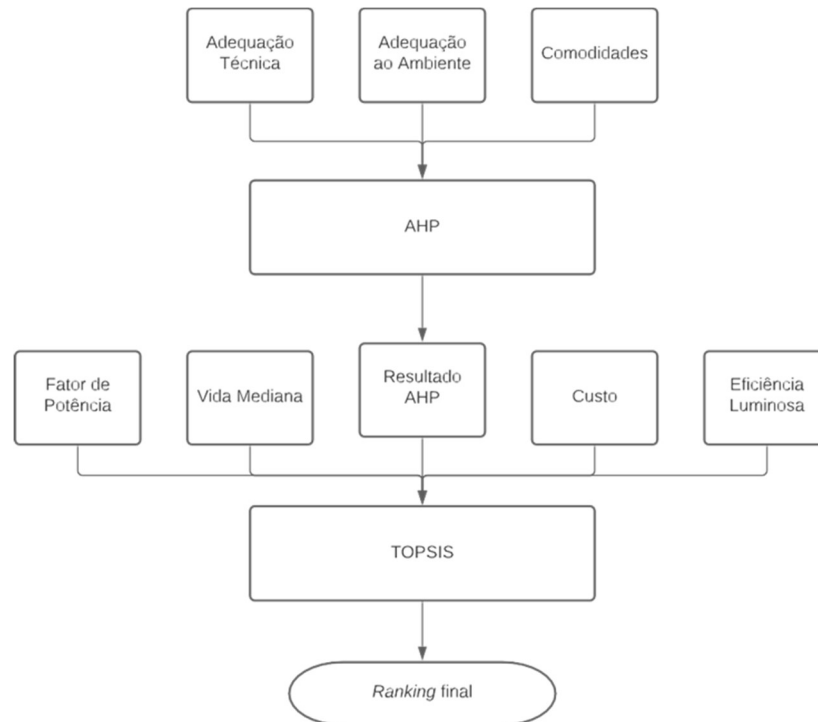


Figura 7 – Fluxograma da metodologia proposta

A execução das ponderações feitas pelo AHP e TOPSIS devem seguir o roteiro apresentado no artigo, padrão dos métodos propostos.

4.9 Análise dos resultados

Assim que os dados cedidos ao TOPSIS são trabalhados, este fornecerá uma tabela com a performance de cada um dos modelos de lâmpadas avaliados. Esta tabela é justamente o Ranking dos modelos escolhidos.

Neste resultado final apresenta uma performance relativa a cada fonte de luz. Esta performance é dada por um número real de 1 a 0, sendo 1 o melhor desempenho e 0 o pior.

Este resultado pode ser compreendido como o quanto cada um dos modelos atende à necessidade imposta. Por exemplo, para um exemplar com performance de 0,82, pode-se entender que este modelo atende com 82% de eficiência as primordialidades.

Portanto, para a análise de dados final é recomendado que se ordene de forma decrescente as lâmpadas a partir de suas performance, ou seja, a lâmpada que ocupar o primeiro lugar desta lista é a melhor opção global de acordo com o julgamento realizado.

Para validação da metodologia foi realizado o teste de aceitação que se resume em aplicar a metodologia proposta utilizando-se de modelos de lâmpadas idealizados em casos extremos, no caso, com 4 lâmpadas, sendo uma delas muito superior às outras e uma muito inferior.

Primeiramente, os dados foram tratados com determinados pesos também estabelecidos pelo autor e, após, efetuar a troca dos pesos. O resultado foi uma grande disparidade para ambos os casos extremos e uma paridade nas duas remanescentes, de modo a validar a metodologia.

CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi desenvolver uma metodologia multicriterial para avaliar a troca de lâmpadas na iluminação pública brasileira. Para tal, correlacionou-se diversos critérios que influenciam na eficiência da iluminação artificial do contexto urbano.

Uma cidade que goza de uma iluminação pública de qualidade melhora seu ambiente urbano em geral, atraindo turistas, gerando segurança e conforto para as pessoas e para o trânsito, aumentando a eficiência energética, reduzindo custo com manutenções do sistema.

Aplicando a metodologia proposta é possível escolher a melhor lâmpada para ser utilizada para cada localização, pontuando os aspectos positivos e negativos de cada tecnologia. Os pesos empregados à cada critério e as comparações par a par realizados pelo decisor leva em consideração todas as variáveis que a iluminação deve abordar.

A subjetividade que as metodologias multicriteriais carregam consigo são fundamentais para a escolha mais assertiva da troca de lâmpadas na iluminação pública brasileira, uma vez que existem realidades completamente distintas ao redor do território nacional.

Com a aplicação da metodologia proposta, espera-se que os gestores do setor de Iluminação Pública sejam capazes de realizar um estudo de caso para cada situação de troca de lâmpadas de maneira mais técnica. Assim, será possível aumentar a eficiência da iluminação pública no local.

Aliado à isso, aplicando os julgamentos recomendados, também será possível avaliar todos as particularidades e pontos de interesse da iluminação pública, trazendo assim retornos certos, rápidos e visíveis, seja na segurança, bem-estar ou em qualquer dos inúmeros aspectos que a iluminação está atrelada.

Embora a metodologia proposta esteja focada na iluminação pública, é encorajado para que em trabalhos futuros, através de alterações pontuais nas normas aplicadas e critérios de avaliação, abranjer outras modalidades de iluminação, como industrial e residencial

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Energia no Brasil e no mundo. 2021. http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf (30 de Junho de 2022).
- Ayala N. F., G., Frank A. G. (2013) Métodos de análise multicriterial: uma revisão das forças e fraquezas. XIII SEPROSUL – Semana de la Ingeniería de Producción Sudamericana. Gramado. Brasil.
- Berias, P.; Maltese, I.; Mariotti, I. Multicriteria versus cost benefit analysis: a comparative perspective in the assessment of sustainable mobility. *European Transport Research Review*, v. 4, 09 2012.
- Behzadian M., Otaghsara S.K., Yazdani M. Ignatius J. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39: 3051–3069 (2012).

- Campos, R. (2016) O discurso internacional das cidades inteligentes: a estratégia smart city Berlin. 7º Congresso Luso Brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável.
- Caragliu, A.; Delbo, C.; Nijkamp, P. Aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento de recursos hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, p. 65–82, 2011.
- COPEL, Distribuição. Manual de iluminação pública. 2012. [https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual_iluminacao_publica/\\$FILE/manual%20iluminacao%20publica.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/manual_iluminacao_publica/$FILE/manual%20iluminacao%20publica.pdf) (10 de Junho de 2022).
- CEPA, USP IF. Intensidade luminosa. 2021. <http://cepa.if.usp.br/energia/energia2000/turmaA/grupo6/lidia.htm> (18 de Junho de 2022).
- ENERGISA. Iluminação pública. 2019. <https://www.energisa.com.br> (10 de Maio de 2022)
- EDP. Manual de iluminação pública. <http://www.edp.com.br/ilumicao-publica> (20 de Abril de 2022)
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Eficiência energética. 2021. <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica> (17 de julho de 2021).
- IEA, International Energy Agency. Electricity Generation By Fuel. 2019. <https://www.iea.org> (15 de Junho de 2022).
- Ishizaka A., Nemery P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*. 1 ed.. United Kingdom: Wiley.
- PHILLIPS. Lighting Hardware. <https://www.lighting.philips.com/main/prof> (15 de maio de 2022).
- Saaty, R.W. (1987) The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, v. 9, n. 3, p. 161 – 176.
- Schulz, W. Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar. 2016. <https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/iluminacao-publica.pdf> (20 de Maio de 2022).
- PROCEL. Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes. <http://www.procelinfo.com.br> (05 de maio de 2022).
- VAISER, Simone. Vida mediana ou vida útil? O Setor Elétrico, O Setor Elétrico, 2021. <https://osetoreletrico.com.br/vida-mediana-ou-vida-util> (12 de Maio de 2022).