

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VICTOR FERRAZ DE LUCIA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA MULTICRITÉRIO
PARA AVALIAR A TROCA DE LÂMPADAS DA ILUMINAÇÃO
PÚBLICA NO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2021**

VICTOR FERRAZ DE LUCIA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA
AVALIAR A TROCA DE LÂMPADAS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL**

**Development of a multicriteria methodology to evaluate the shift of public
lighting lamps in Brazil**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.
Orientador: Prof. Dr. Murilo Oliveira Leme

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VICTOR FERRAZ DE LUCIA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA
AVALIAR A TROCA DE LÂMPADAS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 18 de agosto de 2021.

Max Mauro Dias Santos
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cristhiane Gonçalves
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Murilo de Oliveira Leme
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2021

Dedico este trabalho a família e aos meus
amigos, peço que me perdoem.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas e a esta instituição às quais presta-se homenagem. Certamente esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas que elas estejam certas de que fazem parte dos nossos pensamentos e de nossa gratidão.

A minha família, pelo carinho, incentivo e total apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Murilo Oliveira Leme, que me mostrou os caminhos a serem seguidos e pela confiança depositada.

Aos professores e colegas do departamento, em especial ao meu caro amigo Eduardo P.C. Braga, que me ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Faça as coisas o mais simples que você
puder, porém não se restrinja às mais
simples (EINSTEIN, Albert)

RESUMO

LUCIA, Victor Ferraz de. **Desenvolvimento de uma metodologia multicritério para avaliar a troca de lâmpadas da iluminação pública no Brasil**. 2021. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

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 trabalho 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. Finalmente, a partir de testes de aceitação com casos extremos é confirmado a coerência, coesão e concordância do método desenvolvido.

Palavras-chave: Iluminação Pública. Lâmpadas. Análise Multicriterial. Eficiência. Metodologia Multicritério.

ABSTRACT

LUCIA, Victor Ferraz de. **Development of a multicriteria methodology to evaluate the shift of public lighting lamps in Brazil**. 2021. 67 p. Final Coursework (Bachelor's Degree in Electrical Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2021.

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. Lamps. Multicriteria Analysis. Efficiency. Multicriteria Methodology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Consumo de energia elétrica da IP em GWh	17
Figura 2 – Poste Unilateral	19
Figura 3 – Poste bilateral alternado	20
Figura 4 – Poste bilateral frente à frente	21
Figura 5 – Poste Canteiro Central $D < 3$ e $H > 1,6L$	21
Figura 6 – Poste Canteiro Central $D < 3$ e $H < 1,6L$	22
Figura 7 – Poste Canteiro Central $3 < D < 6$	22
Figura 8 – Poste canteiro central $D > 6$ e $H > 1,6L$	23
Figura 9 – Poste canteiro central $D > 6$ $H < 1,6L$	23
Figura 10 – Luminária inadequada para iluminação pública	24
Figura 11 – Exemplificação da eficiência luminosa através do conjunto optico	24
Figura 12 – Luminária integrada para iluminação pública	25
Figura 13 – Lâmpada incandescente	26
Figura 14 – Lâmpada a vapor de mercúrio em alta pressão	26
Figura 15 – Lâmpada a vapor de sódio em alta pressão	27
Figura 16 – Lâmpada Phillips de vapor metálico de quartzo	27
Figura 17 – Esquema Lâmpada Puma fluorescente de indução magnética	28
Figura 18 – Projetor Phillips LED Essential	28
Figura 19 – Correlação luminância com o tipo de visão humana	31
Figura 20 – Resposta visível em relação à temperatura de cor	34
Figura 21 – Variação crescente de temperatura de cor	34
Figura 22 – IRC e Temperatura de cor nas diversas tecnologias de lâmpadas	35
Figura 23 – Comparativo entre lâmpadas com diferentes IRC	35
Figura 24 – Pilares da Eficiência energética sustentável	36
Figura 25 – Índices randômicos propostos por Saaty (1987)	40
Figura 26 – Representação gráfica dos vetores de distância das soluções ideais	41
Figura 27 – Fluxograma geral	44
Figura 28 – Fatores para adequação ao ambiente	45
Figura 29 – Fatores para adequação técnica	46
Figura 30 – Fatores de comodidade	47
Figura 31 – Fatores de características técnicas	48
Figura 32 – Fluxograma da análise dos critérios	50
Figura 33 – Teste de aceitação: Matriz de julgamentos e autovalores para Adequação ao Ambiente	51
Figura 34 – Teste de aceitação: Matriz de julgamentos e autovalores para Adequação Técnica	52
Figura 35 – Teste de aceitação: Matriz de julgamentos e autovalores para Comodidades	52
Figura 36 – Teste de aceitação: Resultado AHP	52
Figura 37 – Teste de aceitação: Entrada de dados TOPSIS	52
Figura 38 – Teste de aceitação: Valores normalizados TOPSIS	53
Figura 39 – Teste de aceitação: Valores normalizados e ponderados TOPSIS	53
Figura 40 – Teste de aceitação: Soluções positivas e negativas TOPSIS	53
Figura 41 – Teste de aceitação: Distância de J+ e J- TOPSIS	53

Figura 42 – Teste de aceitação: Performance Final	54
Figura 43 – Teste de aceitação: Resultado AHP com alteração nas ponderações	54
Figura 44 – Teste de aceitação: Performance Final com alteração nas ponderações	54
Figura 45 – Matriz de julgamentos e autovalores para Adequação ao Ambiente .	58
Figura 46 – Matriz de julgamentos e autovalores para Adequação Técnica . . .	58
Figura 47 – Matriz de julgamentos e autovalores para Comodidade	59
Figura 48 – Vetor de decisão AHP	59
Figura 49 – Entrada de dados TOPSIS	59
Figura 50 – Valores Normalizados	59
Figura 51 – Valores normalizados e ponderados	60
Figura 52 – Soluções ideias positivas e negativas	60
Figura 53 – Distância das soluções ideais	60
Figura 54 – Performances de cada lâmpada	61
Figura 55 – Performances de cada lâmpada com relevâncias comutadas	61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
EAD	Ensino a Distância
FP	Fator de potência
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IP	Iluminação Pública
IRC	Índice de reprodução de cor
LED	Light-Emitting Diode
MMC	Metodologia Multicriterial
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
ReLuz	Programa Nacional de Iluminação Eficiente
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PROBLEMA	15
1.2	HIPÓTESE	15
1.3	JUSTIFICATIVA	15
1.4	OBJETIVOS	15
1.4.1	Objetivo Geral	15
1.4.2	Objetivos específicos	15
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL	17
2.1.1	Classificação das vias	18
2.1.1.1	Vias urbanas	18
2.1.1.2	Vias rurais	18
2.1.2	Postes	19
2.1.2.1	Posteação unilateral	19
2.1.2.2	Posteação bilateral alternada	20
2.1.2.3	Posteação bilateral frente a frente	21
2.1.2.4	Posteação no canteiro central	21
2.1.3	Luminárias	24
2.1.4	Lâmpadas	25
2.1.4.1	Lâmpadas incandescentes	25
2.1.4.2	Lâmpadas a vapor de mercúrio em alta pressão	25
2.1.4.3	Lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão	26
2.1.4.4	Lâmpada a multivapores metálicos	26
2.1.4.5	Lâmpada fluorescente de indução magnética	27
2.1.4.6	Lâmpadas LED's	28
2.1.5	Tipos de Comando	28
2.1.6	Referências normativas e legislativas	29
2.2	CONCEITOS E TERMOS FUNDAMENTAIS	30
2.2.1	Visão	30
2.2.2	Eficiência luminosa	31
2.2.3	Fator de potência	31
2.2.4	Intensidade Luminosa	32
2.2.5	Luminância	32
2.2.6	Iluminância	32
2.2.7	Vida Mediana	33
2.2.8	Índice de eficiência energética	33
2.2.9	Fator de uniformidade	33
2.2.10	Temperatura de cor	34
2.2.11	Índice de reprodução de cor (IRC)	34
2.3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SMART CITY	34
2.4	MÉTODOS DE ANÁLISE MULTICRITERIAL	37

2.4.1	AHP	39
2.4.2	TOPSIS	41
3	METODOLOGIA	43
3.1	DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA	43
3.1.1	Identificar o ponto em alteração	44
3.1.2	Seleção de modelos de lâmpadas a serem analisadas	44
3.1.3	Critérios de comparação	45
3.1.3.1	Adequação ao ambiente	45
3.1.3.2	Adequação técnica	46
3.1.3.3	Comodidades	47
3.1.3.4	Especificações técnicas	48
3.1.4	Ponderação dos Critérios	49
3.1.5	Aplicação dos métodos multicriteriais	49
3.1.6	Análise dos resultados	50
3.2	TESTE DE ACEITAÇÃO	51
3.2.1	Teste de aceitação em casos extremos	51
3.2.2	Exemplo de aplicação	54
3.2.3	Análise dos resultados	60
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que o crescimento populacional para os próximos 15 anos seja de mais de 1 bilhão, e que no ano de 2100 haverão aproximadamente 53% mais pessoas que no ano de 2015(ONU, 2015). Por consequência a demanda por energia será maior (IEA, 2019).

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, 2021), 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.

Desde o princípio, o homem busca por formas de suprimir a escuridão, seja por tochas, velas ou outras tecnologias. Os primeiros relatos da utilização de energia elétrica para a iluminação das ruas se deu no ano de 1417, quando na Inglaterra organizou-se a considerada primeira Iluminação Pública (IP) (EATON, 2021).

No Brasil, os primeiros indícios de iluminação pública datam o final do século XVIII, na ocasião, foram instaladas nos postes da cidade do Rio de Janeiro 100 luminárias à óleo. Porém foi apenas em 1887, na cidade de Porto Alegre, que a utilização de energia elétrica para a iluminação artificial do meio público foi instalado (RISITO, 2009).

Séculos se passaram e a demanda por energia elétrica do setor da iluminação pública apenas aumentou. No Brasil em 2016, o consumo do setor foi de aproximadamente 4,5% da demanda total de energia elétrica do país (SCHULZ, 2016). Além dessa grande demanda, os pontos de iluminação também se multiplicaram exponencialmente, segundo a ELETROBRAS, em 2008, haviam 15 milhões de pontos de iluminação pública no país.

Além de conter parte significativa da demanda de energia elétrica do país, a IP 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).

Segundo a constituição brasileira, compete aos municípios as prestação dos serviços de iluminação pública em sua plenitude porém, devido as dificuldades encontradas, muitos optam por terceirizar essa tarefa (COPEL, 2012).

Por conta disso, as modificações feitas na IP possuem, em suma, teor corretivo sem que haja um estudo de caso, criando diversas lacunas no setor (SCHULZ, 2016).

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).

Cada vez mais as municipalidades tem buscado por conhecimentos e utilização de novas tecnologias (COPEL, 2012). Contudo, muitos gestores se deparam com grandes dificuldades no decorrer das tomadas de decisão, principalmente em pautas de modernização.

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 (F.; G., 2013).

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 (F.; G., 2013).

Esse trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo sobre a iluminação pública brasileira, propondo uma metodologia multicriterial para analisar a troca de lâmpadas do contexto brasileiro. Desta forma, buscando uma iluminação pública mais eficiente.

É importante salientar que a metodologia proposta neste trabalho é puramente teórica, com testes de aceitação e exemplo de aplicação elencados pelo autor. Não há caso de aplicação real.

1.1 PROBLEMA

No contexto atual a iluminação pública brasileira os gestores defrontam-se com grandes dificuldades para a administração da troca de lâmpadas. Devido à isso, é comum que não seja feito nenhum estudo relacionado à troca das fontes de luz, acarretando em uma menor eficiência do setor.

1.2 HIPÓTESE

Utilização de um modelo multicriterial para uma escolha de lâmpada assertiva, considerando diversos fatores que influenciam a tomada de decisão e são diretamente relacionadas às fontes de luz.

1.3 JUSTIFICATIVA

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.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Propor uma metodologia multicriterial em que o decisor escolha assertivamente qual lâmpada utilizar na iluminação pública brasileira.

1.4.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos:

- Aprofundar estudos sobre metodologia multicriterial;
- Aprofundar estudos sobre eficiência e políticas da iluminação pública;
- Desenvolver e testar uma metodologia para avaliar a troca de lâmpadas na iluminação pública.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho foi composto por pesquisas bibliográficas. A partir da coleta de informações através de artigos, livros, manuais entre outros, utilizando-se das ideias principais de cada autor em forma de citação é analisado o problema em questão em diversos aspectos concluindo-se com a realização do trabalho.

Primeiramente estudou-se a estrutura da iluminação pública no país, desde as normas que regem, até os *players* do mercado, instalações, competência no setor entre outros. Assim identificando a necessidade de uma escolha mais assertiva no âmbito das lâmpadas.

Em um segundo momento, aprofundou-se os conhecimentos sobre as diferentes técnicas de metodologias multicriteriais e suas respectivas formas de análises.

Posteriormente, correlacionou-se duas metodologias multicritérios à critérios também previamente definidos, gerando assim o método proposto.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em quatro capítulos.

O primeiro capítulo traz a introdução ao tema juntamente com o problema a ser tratado, a hipótese trabalhada, a justificativa, objetivos e procedimentos metodológicos.

O segundo capítulo explica como é o funcionamento da iluminação pública brasileira e seus conceitos fundamentais, bem como apresenta diferentes tipos de métodos multicriteriais, conceitos sobre eficiência energética e *smart city*.

O terceiro capítulo apresenta e discorre sobre a metodologia em questão, além de apresentar um exemplo de aplicação e testes de aceitação.

O quarto capítulo, por fim, proporciona a conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL

No Brasil, segundo o Capítulo IV, artigo 30, inciso V da Constituição de 1988, a organização e prestação de iluminação pública é de dever do poder público municipal e os requisitos do setor são estabelecidos pela NBR 5101:2018.

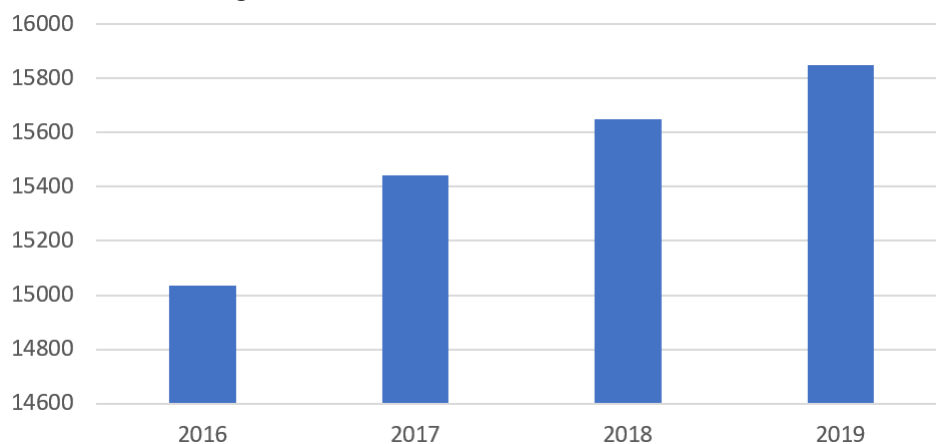
Em setembro de 2012, a ANEEL através do artigo 218 da resolução normativa nº414/2010 estipulou que os acervos da iluminação pública registrados pelas concessionárias devem ser transferidos ao poder público. Uma vez que no Brasil existem diferentes realidades de competência técnica e financeira, a gestão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

Por conta da falta de conhecimento e devido à complexidade de administrar o setor, é comum que os municípios terceirizem empresas para exercer esta função (COPEL, 2012).

Mesmo com as dificuldades envolvidas, existem diversos fatores de interesse das prefeituras em uma iluminação pública de qualidade, bem como os benefícios ao turismo, lazer noturno, comércio e segurança pública (COPEL, 2012).

Uma vez que o serviço de iluminação requer 4,5% da demanda total de energia do país (SCHULZ, 2016), é importante que esquema seja gerido de forma que atenda as necessidades da população, cumpra os requisitos estabelecidos e sejam eficientes do ponto de vista energético. A figura 1 apresenta o consumo de energia elétrica da iluminação pública em GWh por ano.

Figura 1 – Consumo de energia elétrica da IP em GWh



Fonte: Adaptado de EPE (2020)

Além da atual grande demanda de energia elétrica total, o padrão de consumo possui tendência de alta, ou seja, nos próximos anos este consumo de energia elétrica

da iluminação pública tende a aumentar.

Para um melhor entendimento da iluminação pública, é necessário ter domínio dos conceitos explanados a seguir.

2.1.1 Classificação das vias

As vias, bem como o nome diz, são os locais por onde há trânsito que serão atendidos pela iluminação pública (ABNT, 2018).

É importante classificá-las, uma vez que os critérios estabelecidos na norma regulamentadora são referenciados a elas.

São divididas, majoritariamente, em vias urbanas, apresentadas na seção 2.1.1.1, e rurais, apresentadas na seção 2.1.1.2.

2.1.1.1 Vias urbanas

São todos os locais destinados à circulação pública dentro de um ambiente urbano. São vias urbanas: ruas, avenidas, vielas, entre outros.

Segundo a NBR 5101:2012, as vias urbanas são subdivididas em:

- Via de trânsito rápido: Com velocidade máxima de 80 km/h, as vias de trânsito rápido são caracterizadas por um alto fluxo de veículos e baixo fluxo de pedestres.
- Via arterial: Com velocidade máxima de 60 km/h, as vias arteriais são caracterizadas pelo exclusivo trânsito motorizado, com interseções em nível e controlada por semáforos.
- Via coletora: Com velocidade máxima de 40 km/h e destinadas a veículos motorizados, as vias coletoras são caracterizadas por um volume de tráfego inferior e por mais acessos de tráfego que às vias arteriais. São destinadas a coletar e distribuir o fluxo de veículos.
- Via local: Com velocidade máxima de 30 km/h, as vias locais são destinadas ao acesso local.

2.1.1.2 Vias rurais

São os locais destinados a circulação pública conhecidas como estrada de rodagem (ABNT, 2018).

Segundo a NBR 5101:2012, as vias rurais são subdivididas em:

- Estradas: Com velocidade máxima de 60 km/h, as estradas são caracterizadas por não serem pavimentadas. Podem haver trechos desta via que estão localizadas em áreas urbanas.
- Rodovias: Com velocidades máximas de 110 km/h para automóveis, 90 km/h para ônibus e 80 km/h para os demais, as rodovias são caracterizadas por serem vias para tráfego motorizado, porém existem tráfego de pedestres. São pavimentadas.

2.1.2 Postes

São os suportes do conjunto luminária-lâmpada. Para o trabalho e questão será importante a disposição dos postes nas vias, uma vez que isso influenciará nos critérios iluminância e fator de uniformidade, apresentados em 2.2.

Existem 4 tipos de *layout* de disposições mais comuns (CEMIG, 2012), são eles:

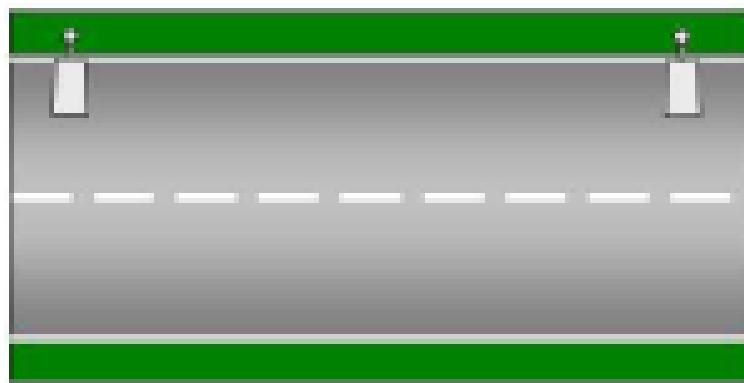
- Posteação unilateral;
- Posteação bilateral alternada;
- Posteação bilateral frente a frente;
- Posteação no canteiro central.

2.1.2.1 Posteação unilateral

Deve ser utilizada quando a altura do poste for maior ou igual à largura da via (CEMIG, 2012).

Geralmente é utilizado em vias locais e coletoras (COPEL, 2012).

Figura 2 – Poste Unilateral



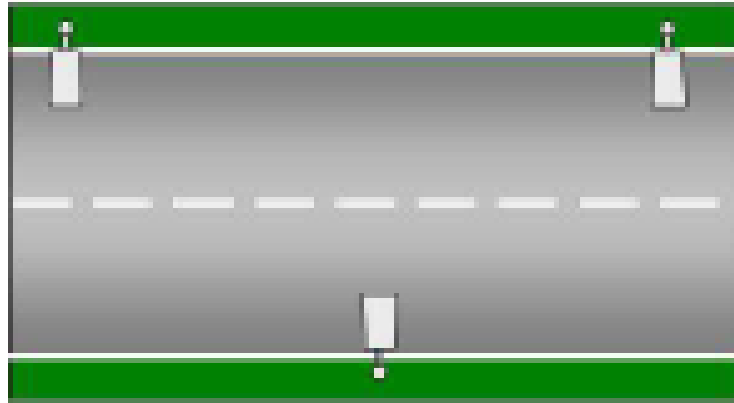
Fonte: CEMIG (2012)

2.1.2.2 Posteação bilateral alternada

Deve ser utilizada quando a altura do poste estiver entre 1 e 1,6 vezes a largura da via (CEMIG, 2012).

Geralmente é utilizado em vias de trânsito intenso (COPEL, 2012).

Figura 3 – Poste bilateral alternado



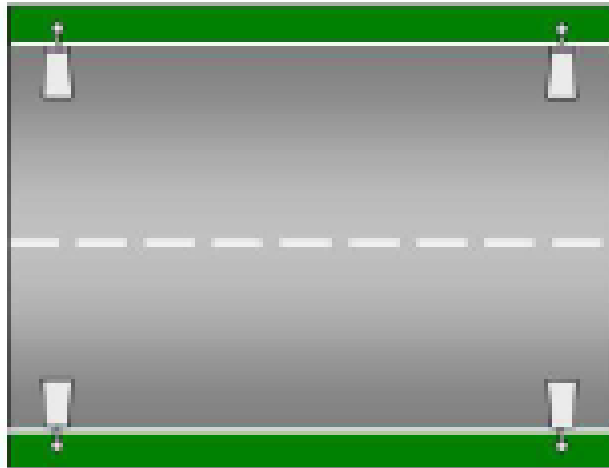
Fonte: CEMIG (2012)

2.1.2.3 Posteação bilateral frente a frente

Deve ser utilizada quando a altura do poste for menor que 1,6 vez a largura da via (CEMIG, 2012).

Geralmente é utilizado em vias de trânsito intenso (COPEL, 2012).

Figura 4 – Poste bilateral frente à frente

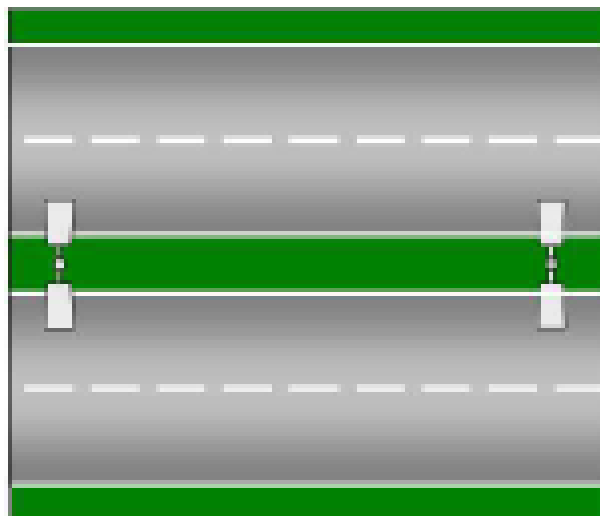


Fonte: CEMIG (2012)

2.1.2.4 Posteação no canteiro central

Quando a largura do canteiro central (D) for menor que 3 metros e a altura do poste (H) maior que 1,6 vezes a largura da via (L) (CEMIG, 2012), deve-se utilizar o *layout* apresentado em 5.

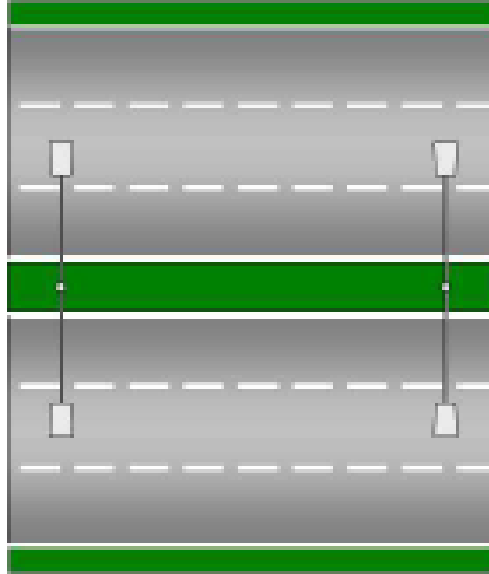
Figura 5 – Poste Canteiro Central $D < 3$ e $H > 1,6L$



Fonte: CEMIG (2012)

Quando a largura do canteiro central (D) for menor que 3 metros e a altura do poste (H) menor que 1,6 vezes a largura da via (L) (CEMIG, 2012), deve-se utilizar o *layout* apresentado em 6.

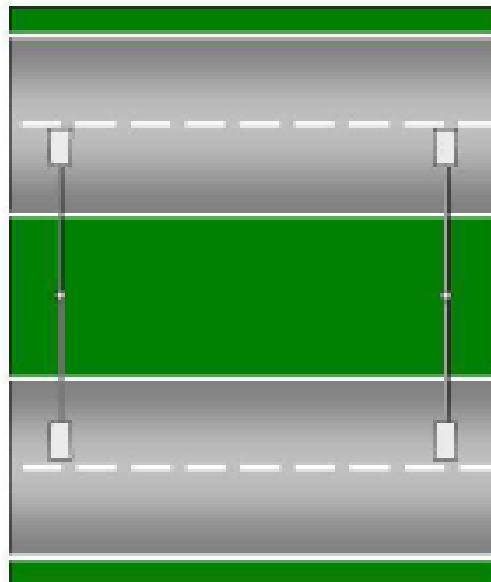
Figura 6 – Poste Canteiro Central $D < 3$ e $H < 1,6L$



Fonte: CEMIG (2012)

Quando a largura do canteiro central (D) estiver entre 3 e 6 metros (CEMIG, 2012), deve-se utilizar o *layout* apresentado em 7.

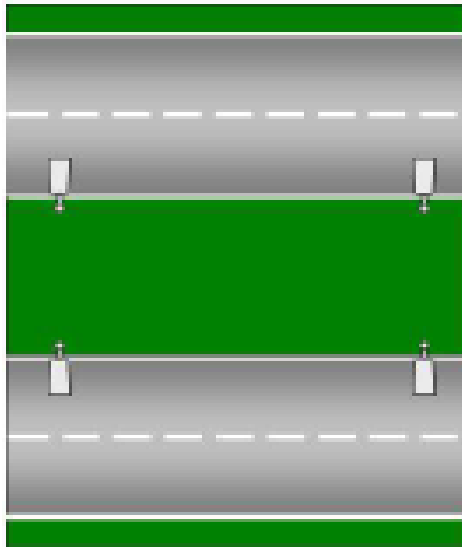
Figura 7 – Poste Canteiro Central $3 < D < 6$



Fonte: CEMIG (2012)

Quando a largura do canteiro central (D) for maior que 6 metros e a altura do poste (H) maior que 1,6 vezes a largura da rua (L) (CEMIG, 2012), deve-se utilizar o *layout* apresentado em 8.

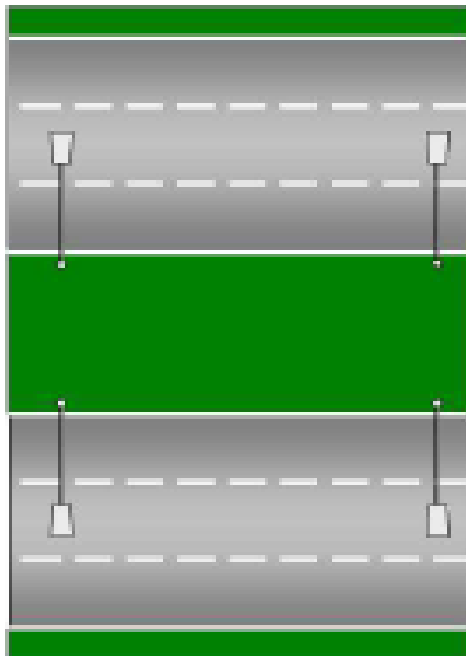
Figura 8 – Poste canteiro central $D > 6$ e $H > 1,6L$



Fonte: CEMIG (2012)

Quando a largura do canteiro central (D) for maior que 6 metros e a altura do poste (H) menor que 1,6 vezes a largura da rua (L) (CEMIG, 2012), deve-se utilizar o *layout* apresentado em 9.

Figura 9 – Poste canteiro central $D > 6$ $H < 1,6L$



Fonte: CEMIG (2012)

2.1.3 Luminárias

A princípio, as luminárias eram vistas como uma conexão entre a lâmpada e a rede elétrica. As luminárias antigas não são adequadas ao uso proposto, uma vez que o fluxo luminoso não é bem direcionado e há exposição da lâmpada à diversos fatores que podem influenciar seu funcionamento, como o clima e vandalismo (COPEL, 2012). A figura 10 apresenta uma luminária inadequada.

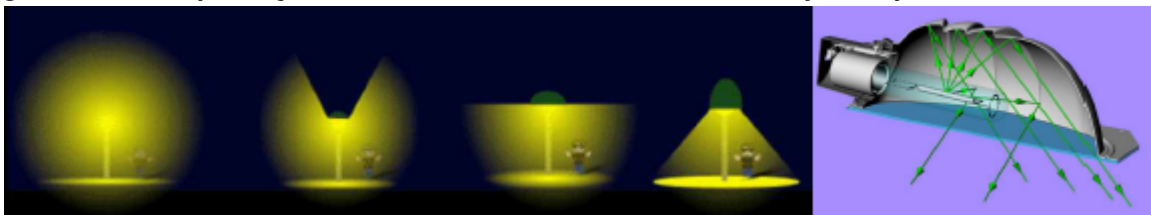
Figura 10 – Luminária inadequada para iluminação pública



Fonte: Copel (2012)

Com a evolução das luminárias, foram desenvolvidas luminárias com tecnologias ópticas que visam concentrar o fluxo luminoso as áreas de interesse, acarretando, assim, em um aumento de eficiência luminosa da lâmpada, como apresentado na figura 11.

Figura 11 – Exemplificação da eficiência luminosa através do conjunto óptico



Fonte: Copel (2012)

Aliado à isso, adicionou-se proteções frontais, usualmente fabricadas de vidro, para que a fonte luminosa seja distanciada das intempéries.

Além de uma maior eficiência luminosa e proteção, atualmente, as luminárias integradas, como a apresentada na figura 12, provém suporte para a instalação dos reatores e relés fotoelétricos, desta forma atenuando a poluição visual causada por esses equipamentos.

Figura 12 – Luminária integrada para iluminação pública



Fonte: Copel (2012)

2.1.4 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)

2.1.4.1 Lâmpadas incandescentes

As Lâmpadas incandescente, como a apresentada na figura 13, emitem luz a através do aquecimento, devido à passagem de corrente elétrica, de um filamento, geralmente composto por tungstênio (PHILLIPS, 2011).

São pouco utilizadas devido à sua baixa eficiência luminosa e baixa vida mediana (COPEL, 2012).

2.1.4.2 Lâmpadas a vapor de mercúrio em alta pressão

As Lâmpadas a vapor de mercúrio em alta pressão, como apresentada na figura 14, através da passagem de corrente elétrica, estimulam o gás que emite luz (PHILLIPS, 2011).

Essas que são mais eficientes e possuem média vida mediana em relação às

Figura 13 – Lâmpada incandescente



Fonte: Copel (2012)

apresentadas em 2.1.4.1. (COPEL, 2012).

Geralmente, devem ser utilizadas apenas em manutenções (CEMIG, 2012).

Figura 14 – Lâmpada a vapor de mercúrio em alta pressão



Fonte: Copel (2012)

2.1.4.3 Lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão

As Lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão, como a apresentada na figura 15, possuem os mesmos fundamentos operacionais que as lâmpadas a vapor de mercúrio em alta pressão. As de sódio possuem um menor pico de tensão em sua partida devido às características do elemento químico utilizado (EDP, 2016).

São utilizadas em larga escala e possuem alta eficiência luminosa porém baixo IRC. (COPEL, 2012).

2.1.4.4 Lâmpada a multivapores metálicos

As lâmpadas a multivapores metálicos, como a apresentada na figura 16, são, elementarmente, iguais às lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão. Graças à adi-

Figura 15 – Lâmpada a vapor de sódio em alta pressão



Fonte: Copel (2012)

ção de de iodetos metálicos, as lâmpadas multivapores possuem uma maior eficiência luminosa e IRC (PHILLIPS, 2011).

Devido à sua alta reprodução de cor, esta fonte luminosa é altamente empregada para a decoração de locais (COPEL, 2012).

Figura 16 – Lâmpada Phillips de vapor metálico de quartzo



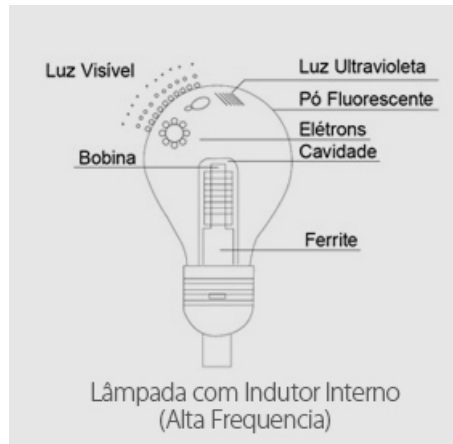
Fonte: Phillips (2020a)

2.1.4.5 Lâmpada fluorescente de indução magnética

As lâmpadas fluorescentes de indução magnética, como a apresentada na figura 17, possuem o funcionamento a partir da aplicação de um campo elétrico oscilante sobre o mercúrio e os gases nobres (COPEL, 2012).

Mesmo que ainda não existam lâmpadas desta tecnologia com altas potências, devido à sua vida útil prolongada, pode ser utilizada em lugares de difícil acesso (COPEL, 2012).

Figura 17 – Esquema Lâmpada Puma fluorescente de indução magnética



Fonte: Puma (2020)

2.1.4.6 Lâmpadas LED's

As Lâmpadas Light-Emitting Diode (LED), como a apresentada na figura 18, emitem luz a partir da passagem de corrente elétrica por um componente eletrônico semicondutor (EDP, 2016).

Devido à sua alta vida mediana, eficiência energética, temperatura de cor ajustável, elevado IRC e ser livre de metais pesados, essa tecnologia é a mais promissora (COPEL, 2012).

Figura 18 – Projetor Phillips LED Essencial



Fonte: Phillips (2020b)

2.1.5 Tipos de Comando

Os comandos de liga e desliga (*ON/OFF*) da iluminação pública nacional podem ser individualizados ou em grupos (BHIP, 2020).

Para comandos individualizados, é utilizado um relé fotoelétrico acoplado diretamente na luminária em questão. Com construção baseada em eletrônica, este relé - através de sensores fotovoltaicos- detecta a falta de iluminação natural e comanda o ligamento da lâmpada. Em casos de falha, a lâmpada ficara apagada (ENERGISA, 2019).

Para comandos em grupo, é possível utilizar dois métodos: Chave magnética e quadro de comando (BHIP, 2020).

2.1.6 Referências normativas e legislativas

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).

A iluminação pública brasileira é referenciada através das normas apresentadas a seguir:

- NBR 5101:2018 - Iluminação Pública - Procedimento
- NBR 5410:2004 - Instalações elétricas de baixa tensão
- NBR 5123:2016 - Relé fotocontrolador intercambiável e tomada para iluminação — Especificação e ensaios
- NBR 5125:1996 - Reator para lâmpada a vapor de mercúrio a alta pressão
- NBR 13593 - Reator e ignitor para lâmpada a vapor de sódio a alta pressão — Especificação e ensaios
- NBR 14305:2015 - Reator e ignitor para lâmpada a vapor metálico (halogenetos) - Requisitos e ensaios
- NBR 15129:2012 - Luminárias para iluminação pública — Requisitos particulares
- NBR IEC 60598-1:2010 - Luminárias Parte 1: Requisitos gerais e ensaios
- NBR IEC 60662:1997 - Lâmpadas a vapor de sódio a alta pressão
- NBR IEC 61167:1997 - Lâmpadas a vapor metálico (halogenetos)
- NBR 16205-1:2013 - Lâmpadas LED sem dispositivo de controle incorporado de base única. Parte 1: Requisitos de segurança
- NBR 16205-2:2013 - Lâmpadas LED sem dispositivo de controle incorporado de base única. Parte 2: Requisitos de desempenho

- NBR 15688:2012 - Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus
- NBR IEC 60529:2017 - Graus de proteção providos por invólucros (Códigos IP)

Da mesma forma, a iluminação pública do país é legislada pelas seguintes resoluções:

- Resolução Normativa ANEEL N° 414 de 09/09/2010
- Resolução Normativa ANEEL N° 888 de 30/06/2019
- Resolução Homologatória N° 2590/2019
- Nota Técnica N° 024/2020
- Despacho N° 368 de 11/02/2020
- Norma Regulatória NR 10

2.2 CONCEITOS E TERMOS FUNDAMENTAIS

Conforme dito anteriormente, todas as lâmpadas são classificadas quanto às suas tecnologia porém todas são também diferenciadas por seus parâmetros intrínsecos, esses que são classificados nesta seção do trabalho.

Os termos e conceitos luminotécnicos estão relacionados tanto às características elétricas, luminosas e construtivas da fonte de luz.

Para um completo entendimento das lâmpadas é necessário o conhecimento dos termos apresentados a seguir.

2.2.1 Visão

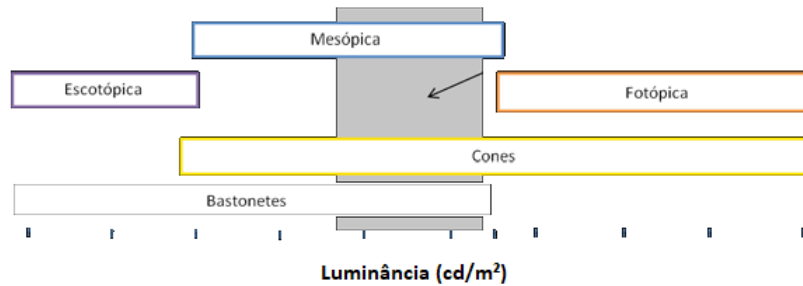
Para entendermos por completo a influência das lâmpadas, é importante a compreensão dos três tipos de visão humana. Segundo EDP (2016), a visão humana pode ser subdividida em:

- **Fotópica:** São ativados os cones. Ocorre durante condições normais de luz natural durante o dia ($> 3\text{cd/m}^2$). Visão humana colorida;
- **Escotópica:** São ativos os bastonetes. Ocorre durante condições de escuridão ($< 0,001\text{ cd/m}^2$)
- **Mesópica:** São ativos os bastonetes e cones. Ocorre durante condições de baixa luminosidade mas não totalmente escuro.

A figura 19 apresenta um comparativo visual no qual correlaciona os tipos de visão com a luminância. Na imagem, a luminância, da esquerda para direita, é crescente.

Também na figura 19, a área retangular demarcada na cor cinza escuro é justamente a faixa de operação da iluminação pública (EDP, 2016).

Figura 19 – Correlação luminância com o tipo de visão humana



Fonte: Adaptação EDP (2016)

Portanto conclui-se que a condição mesópica é a condição existente na visão humana quando exposto à iluminação pública.

2.2.2 Eficiência luminosa

Medida em lúmen por watt (lm/w), a eficiência luminosa relaciona o fluxo luminoso com a potência elétrica utilizada conforme apresentado na equação 1 (COPEL, 2012).

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (1)$$

Em suma, 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).

2.2.3 Fator de potência

O Fator de potência (FP) é definido pela razão entre a potência ativa e aparente de um circuito.

Quanto mais próximo de 1 o fator de potência for, mais eficiente é a lâmpada e mais próximo de zero, mais ineficiente.

Na maioria dos casos, podemos considerar a o sistema elétrico como senóides puras, então o fator de potência pode ser calculado a partir da equação 2 (COPEL, 2012).

$$FP = \cos\phi \quad (2)$$

Onde:

ϕ é o ângulo entre a potência ativa e a potência aparente do circuito em questão.

Entretanto para os casos em que não há senóides puras, deve-se levar em consideração a distorção harmônica da tensão e corrente. Desta forma, pode-se calcular o fator de potencia a partir da equação 3: (FUENTES; GONZÁLEZ, 2016).

$$FP = \frac{\cos\phi}{\sqrt{1 + THDi^2}} \quad (3)$$

Sendo THDi obtido através da equação 4 (FUENTES; GONZÁLEZ, 2016).

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum I_j^2}}{I_1} \quad (4)$$

Onde:

I_j é o valor eficaz da componente harmônica da corrente absorvida pela carga;
 I_1 é a componente fundamental da corrente.

2.2.4 Intensidade Luminosa

Medida em candelas (cd), a intensidade luminosa é simplesmente a quantidade de luz que uma fonte luminosa emite em uma certa direção (CEPA, 2021a).

2.2.5 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, 2021b).

2.2.6 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.

Copel (2012) afirma que a iluminância é a densidade do fluxo luminoso recebido por uma superfície.

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)

2.2.7 Vida Mediana

Medida em horas (h), a vida mediana de uma lâmpada é o tempo após o qual metade das lampadas 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).

2.2.8 Índice de eficiência energética

O índice de eficiência energética (IEE) é diretamente proporcional à eficiência energética da iluminação pública. Pode ser calculada a partir da equação 5 (EDP, 2016).

$$IEE = \frac{S * E}{P} \quad (5)$$

Onde:

S é a área total em m²;

E é a iluminância média;

P é a potência total instalada.

O valor de IEE é a unidade utilizada para mensurar a classificação energética do selo procel das instalações da iluminação pública (EDP, 2016).

2.2.9 Fator de uniformidade

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 equação 6 apresenta o cálculo do fator de uniformidade (U) (EDP, 2016)

$$U = \frac{E_{min}}{E_{med}} \quad (6)$$

2.2.10 Temperatura de cor

Medida em Kelvin, a temperatura de cor está relacionado às sensações que se proporciona no ambiente. (PHILLIPS, 2011).

As temperaturas de cor variam na faixa de 2000K à 10000K. (COPEL, 2012)

A figura 20 apresenta a resposta visível em relação à variação da temperatura de cor.

Figura 20 – Resposta visível em relação à temperatura de cor



Fonte: EDP (2016)

A figura 21 apresenta a variação crescente de temperatura cor em um local iluminado a partir da iluminação pública.

Figura 21 – Variação crescente de temperatura de cor



Fonte: Copel (2012)

2.2.11 Índice de reprodução de cor (IRC)

O Índice de reprodução de cor (IRC) é o 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).

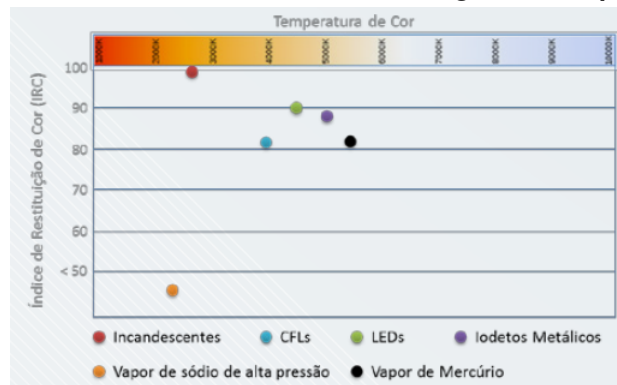
A figura 22 apresenta índices típicos de IRC e temperatura de cor para as diversas tecnologias de iluminação.

A figura 23 apresenta um demonstrativo entre duas fontes luminosas com diferentes índices de reprodução de cor.

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SMART CITY

A energia elétrica é um dos principais pilares da sociedade moderna, pois além de nos proporcionar conforto, as grandes atividades giram entorno dela, como

Figura 22 – IRC e Temperatura de cor nas diversas tecnologias de lâmpadas



Fonte: EDP (2016)

Figura 23 – Comparativo entre lâmpadas com diferentes IRC



Fonte: Copel (2012)

produção industrial, transporte, iluminação artificial, tratamento de água e esgoto, entre outros. (GALLOTTI, 2021)

Nos dias de hoje, o conceito de que os recursos de nosso planeta são infinitos não são mais aceitos. Portanto faz-se necessário a utilização mais eficiente dos recursos aqui disponíveis e, devido à isso, foi criado o conceito de eficiência energética sustentável, cujas bases são sustentabilidade, eficiência energética e políticas energéticas, conforme apresenta a figura 24 (AUTOMOTIVA, 2017).

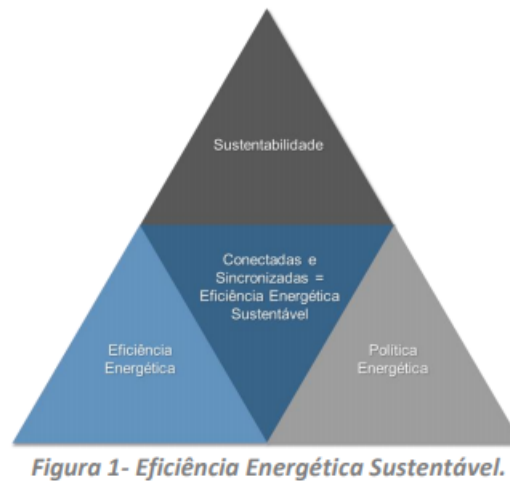
Portanto, para alcançar a sustentabilidade no setor de energia, é necessário criar políticas energéticas para estimular a busca pela eficiência energética.

Segundo a EPE (2021): "Eficiência significa fazer mais (ou, pelo menos, a mesma coisa) com menos, mantendo o conforto e a qualidade. Quando se discute energia, eficiência energética significa gerar a mesma quantidade de energia com menos recursos naturais ou obter o mesmo serviço ("realizar trabalho") com menos energia."

Com o intuito fomentar as práticas que gerem eficiência no setor de eletricidade nacional, em 30 de dezembro de 1985, pela Portaria Interministerial nº 1.877, foi instituído o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). (MME, 2021)

Segundo MME (2021), o PROCEL reúne uma vasta área de atuação, entre

Figura 24 – Pilares da Eficiência energética sustentável



Fonte: Automotiva (2017)

elas estão os equipamentos, edificações, iluminação pública, poder público, indústria, comércio e conhecimento.

Desde a sua criação até o ano de 2020, o Programa foi responsável pela economia de aproximadamente 195 bilhões de kWh. (ELETROBRAS, 2020)

Em 2000, tratando-se da área de IP, 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 IP do país, desta forma, assim, incitando mais aportes na modernização das lâmpadas do sistema publico de iluminação artificial. Para tal, são estabelecidos vínculos com os poderes públicos municipais.(ELETROBRAS, 2020)

Além das aplicações financeiras, o ReLuz também instrui os órgãos competentes a como manejar da melhor forma a IP. No ano de 2020, estreou-se o curso "Projeto de Sistema de Iluminação Pública", este, que em forma de Ensino a Distância (EAD), visa capacitar os profissionais que atuam na área de iluminação pública no país quanto a desenvolver e executar projetos eficientes no setor. (ELETROBRAS, 2020)

Campos (2016) enfatiza o fato de que não é possível que haja sustentabilidade sem que sejam revistos os conceitos de gestão e planejamento dos espaços urbanos. Perante o exposto, o conceito de *Smart City* é enfatizado.

Para (CARAGLIU; DELBO; NIJKAMP, 2011): "Uma cidade inteligente se forma quando investimentos em capital humano e social aliado à infraestruturas de comunicação tradicionais e modernas (Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC)) alimentam um crescimento econômico sustentável e qualidade de vida, com uma gestão sábia dos recursos naturais por meio de uma governança participativa."

Desta forma, a partir das cidades inteligentes será possível unir a eficiência energética, sustentabilidade, entre outros (CAMPOS, 2016). A SECTI (2017) afirma que existem 10 dimensões nas quais as *smart cities* se baseiam, sendo elas: governança, administração pública, planejamento urbano, tecnologia, o meio-ambiente, conexões internacionais, coesão social, capital humano e a economia.

Ao compreender essas 10 dimensões, encontra-se um dos pilares para alcançar a eficiência energética numa *Smart City*, conhecido por *Smart Street*, uma vez que o sistema de iluminação artificial eficaz reduz drasticamente o consumo de energia elétrica cidadão (GLAGLIARD et al., 2020).

De forma genérica, uma *Smart Street* é composta por equipamentos inteligentes que gerem relatórios de dados e se comuniquem entre eles, com o intuito de um melhor aproveitamento do ambiente urbano (GLAGLIARD et al., 2020).

As lâmpadas, por sua vez, desempenham um papel crucial para o funcionamento correto das *Smart Street*, uma vez que são elas o alicerce de toda a rede de iluminação pública.

2.4 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; MARIOTTI, 2012).

A complexidade de uma tomada de decisão é diretamente proporcional ao número de variáveis ligadas à ela (NAYAK; D'SOUZA, 2019). Sabendo disso e devido à necessidade de uma maior assertividade nas tomadas de decisão, foram desenvolvidas técnicas para auxiliar essas tarefas.

O início da utilização dos métodos multicriteriais ocorreu no ano de 1896 pelo trabalho de Pareto. Trabalho no qual determinou o conceito de eficiência entre duas possíveis decisões (ZUFFO et al., 2002).

Porém foi durante segunda guerra mundial, devido à grande utilização dessas ferramentas para a tomada de decisão militar, que a pesquisa deste contexto foi avançada (ZUFFO et al., 2002). Gerando assim, por consequência de todos os estudos na área, a atual existência de inúmeros métodos multicriteriais fixados.

Atualmente, as metodologias multicriteriais são empregadas na mais diversas áreas. Por exemplo, Momeni, Fathi e Zarchi (2011) utilizaram-se do FUZZY TOPSIS para avaliar estratégias de manutenção, enquanto Gomes e Costa (2015) utilizam três métodos multicritérios para avaliar tecnologias de pagamento eletrônico.

Os métodos multicritérios consistem em diversas técnicas que auxiliam o decisor a aplicar o julgamento mais preciso ao longo de um problema complexo com base em seus parâmetros e resultados esperados (SANSEVERINO et al., 2016).

Existe, na literatura, uma ampla gama de métodos multicriteriais, como, *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Analytic Network Process* (ANP), *ELimination Et Choix Traduisant la REalité* (ELECTRE), *Preference Ranking Organization METHods for Enrichement Evaluation* (PROMETHEE), *Tecniq ue for Order Preference by Similarità to Ideal Solution* (TOPSIS), *Compromise Ranking Method* (VIKOR) e *EVALuation of MI-Xed criteria* (EVAMIX) (NESTICÒ; SOMMA, 2019).

Ainda que todas as teorias tenham diferenças elementares, para Triantaphyllou (2000, citado por Mulliner, Malys e Maliene (2016)), existem três etapas que todas metodologias multicriteriais seguem. Sendo elas:

- Determinação dos critérios e alternativas relevantes;
- De forma numérica, ponderar a relevância de cada critério;
- Processar os dados numéricos visando determinar o ranking entre as alternativas.

Já os critérios, por sua vez, podem ser subdivididos em quantitativos e qualitativos (MULLINER; MALYS; MALIENE, 2016).

Os quantitativos são aqueles que podem ser descritos por números. Já os qualitativos são aqueles que podem ser descritos através de suas características, por sua classificação (TRACTION, 2021). Em razão desta diferença inerente dos critérios, existem métodos mais apropriados para a análise de cada um dos subgrupos.

Como já dito previamente, cada técnica de análise multicriterial possui suas peculiaridades, o que acarreta em maior harmonização com determinados critérios.

O AHP possui maior efetividade em critérios qualitativos, com critérios e sub-critérios, uma vez que seu método de comparação par-a-par auxilia o decisor na escolha da melhor solução. Diferentemente, o ELECTRE, utiliza-se de uma matriz numérica para fazer sua análise (NESTICÒ; SOMMA, 2019).

Já o VIKOR, utiliza-se de meios matemáticos para classificar qual a solução ideal e a partir desta criar um *ranking* entre as alternativas. O TOPSIS, por sua vez, utiliza-se da solução ideal positiva e negativa para gerar a classificação (NESTICÒ; SOMMA, 2019).

2.4.1 AHP

O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) criado por Saaty (1987), visa ponderar critérios de alternativas de forma par a par, assim mitigando as complexidades do problema imposto. (SAATY, 1987).

Segundo Saaty (1987), o método AHP abrange 5 etapas, sendo elas a estruturação, o julgamentos, a priorização, o cálculo das consistências e o cálculo das performances gerais.

Conforme já citado, os julgamentos são analisados par a par e, portanto, para um julgamento coerente, é necessário compreender o método criado por Saaty.

O julgamento das alternativas e a estruturação do método decisor deve ser feito conforme apresentado na tabela 1 .

Tabela 1 – Razões de Comparação AHP

Intensidade de Importância	Definição	Motivo
1	Mesma Importância	Ambas contribuem igualmente ao objetivo
3	Importância pequena	A alternativa é levemente favorecida em relação à outra
5	Importância Essencial	A alternativa é fortemente favorecida em relação à outra
7	Importância grande	A alternativa é fortemente favorecida em relação à outra e a 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	Recíprocidade	A intensidade de x em relação à y é recíproca à y em relação à x
Racionais	Médias provindas das escalas	

Fonte: Adaptação de Saaty (1987)

Portanto, os julgamentos devem ser feitos a partir dos dois seguintes pilares: Qual das duas alternativas é mais essencial analisando o critério em questão e com que intensidade, considerado a tabela 1. (SAATY, 1987)

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 devem ser o valor recíproco. (SAATY, 1987)

Como exemplificação, a tabela 2 exemplifica o preenchimento de uma matriz de julgamento para o critério foco, com as alternativas local, ambiente, reputação e acadêmico.

É necessário testar se o julgamento feito foi correto. Para isso utiliza-se dois indicadores, índice de consistência (IC) e razão de consistência(RC).

Tabela 2 – Exemplo de matriz de julgamento

FOCO	LOCAL	AMBIENTE	REPUTAÇÃO	ACADÊMICO
Local	1	1/7	1/5	1/5
Ambiente	7	1	2	3
Reputação	5	1/2	1	1
Acadêmico	5	1/3	1	1

Fonte: Adaptação de Saaty (1987)

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;
- Calcular o autovalor máximo a partir da multiplicação da matriz do autovetor normalizado com a matriz soma das colunas da matriz de julgamentos.

A partir do autovalor máximo, calcula-se o índice de consistência, conforme a equação 7.

$$IC = \frac{AV_{max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

E razão de consistência, conforme a equação 8.

$$RC = \frac{IC}{IndiceRandomico} \quad (8)$$

Saaty (1987) sugere os seguintes índices randômicos para matrizes de ordem 1 à 10, conforme a figura 25.

Figura 25 – Índices randômicos propostos por Saaty (1987)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random consistency index (R.I.)	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Fonte: Saaty (1987)

Segundo Saaty (1987), o julgamento estará correto caso IC seja um valor abaixo de 0,10 e RC menor que 10%.

A performance das alternativas em cada critério ou específicas são dadas a partir do autovalor normalizado.

Para a performance geral, deve-se ponderar as performances específicas e somá-las.

Para o trabalho em questão, as ponderações das performances específicas devem ser atribuídas pelo decisor.

2.4.2 TOPSIS

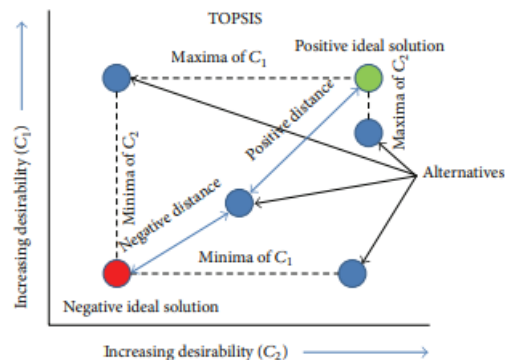
O método de análise multicriterial utilizado é o *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), criado por Hwang e Yoon, o método visa ponderar diversos critérios e denominar a melhor alternativa para o problema.

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.

A melhor alternativa é a que mais se aproxima da solução ideal positiva e a que mais se distancia da solução ideal negativa (TZENG, 2011), conforme apresentado na figura 26.

Essas distâncias podem ser consideradas vetores em espaços multidimensionais. Portanto para o cálculo da distância, é possível, apenas, considerar a distância entre dois pontos em um espaço (CHAUHAN; VAISH, 2014).

Figura 26 – Representação gráfica dos vetores de distância das soluções ideais



Fonte: Chauhan e Vaish (2014)

Segundo Leme e Trojan (2019), para aplicar a metodologia, deve-se seguir os seguintes passos:

- Definir os elementos de sua matriz de priorização;
- Normalizar todos os elementos da matriz, a partir da Equação 9

$$X_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum X_{ij}^2}} \quad (9)$$

- Ponderar os pesos - que foram optados previamente- de cada critério, como mostra a Equação 10

$$V_{ij} = X_{ij} * PESO \quad (10)$$

- Encontrar a solução ideal positiva(J) e a solução ideal negativa(J') para cada um dos critérios.

Para aqueles critérios que não são desejados, o menor valor será a solução ideal positiva e o maior valor será a solução ideal negativa.

Para aqueles critérios que são desejados, o maior valor será a solução ideal positiva e o menor a solução ideal negativa.

- Encontrar a distância dos elementos da matriz normalizada em relação à solução ideal positiva e negativa. Para tal, utiliza-se as Equações 11 e 12:

$$S_i = \sqrt{\sum (V_{ij} - J_i)^2} \quad (11)$$

$$S'_i = \sqrt{\sum (V_{ij} - J'_i)^2} \quad (12)$$

- Calcular a performance de cada alternativa a partir da equação 13:

$$P_i = \frac{S'_i}{S_i + S'_i} \quad (13)$$

- A melhor alternativa é a que tiver maior performance (P).

3 METODOLOGIA

3.1 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

Como apresentado anteriormente, o planejamento urbano e a utilização de novas tecnologias desempenham um papel valioso não só para atingir graus de *smart city*, mas também a busca pela eficiência no contexto urbano em geral.

No setor de iluminação pública, a palavra eficiência é comumente relacionada ao consumo de energia elétrica. Entretanto os administradores não devem considerar apenas este aspecto, uma vez que a IP impacta diretamente na vida da população, seja no conforto, segurança ou em outros diversos fatores (COPEL, 2012).

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 mundial, o TOPSIS e o AHP e, para realizar as análises, utiliza-se de uma gama de critérios que serão apresentados no decorrer deste capítulo.

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

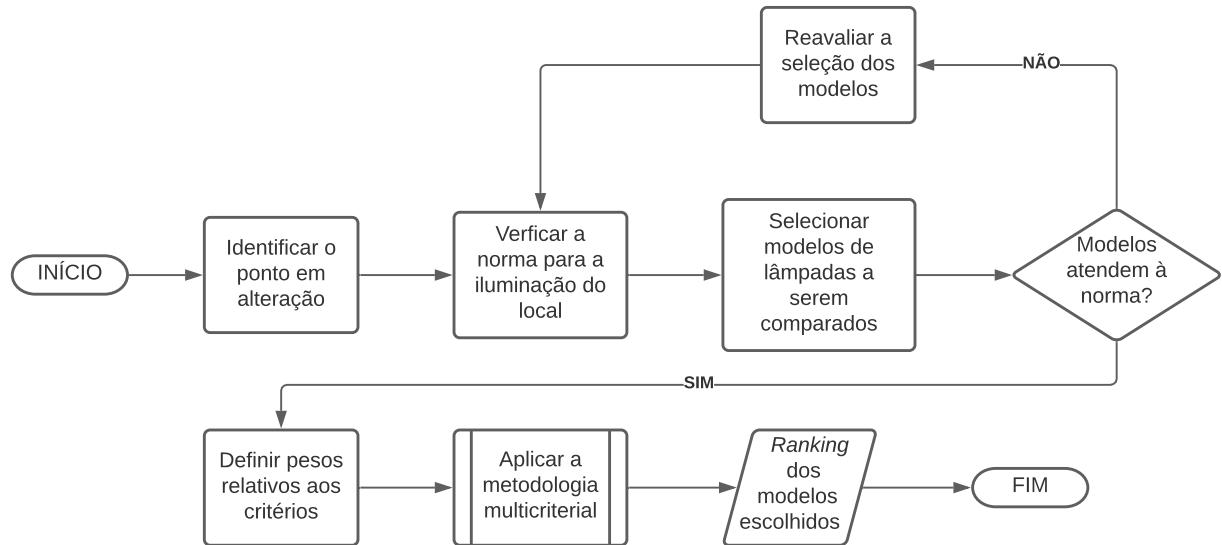
Como em qualquer Metodologia Multicriterial (MMC), o resultado é relativo, já que o decisor é quem julga as importâncias através das definições de relevâncias dos critérios e a análise deles. É comum que para uma mesma análise feita por decisores diferentes, os resultados sejam divergentes.

A utilização de metodologias multicriteriais são imprescindíveis uma vez que existe diferentes realidades de conhecimento técnico e competência financeiras no contexto brasileiro.

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 27 apresenta o fluxograma geral da metodologia elaborada por este trabalho.

Figura 27 – Fluxograma geral



Fonte: Autoria própria

3.1.1 Identificar o ponto em alteração

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 desta etapa, 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, uma vez que as normas definem parâmetros correlacionados ao local onde a lâmpada está instalada (ABNT, 2018).

3.1.2 Seleção de modelos de lâmpadas a serem 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.

É sabido que a iluminância média e o fator de uniformidade estão relacionadas

não só com a lâmpada, mas também com o tipo de luminária, distância entre postes, arborização do local, entre outros (COPEL, 2012).

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.

3.1.3 Critérios de comparação

Nesta subseção serão apresentados os critérios que farão parte da análise proposta. Os critérios são subdivididos em quatro grupos, sendo eles: Especificações técnicas, Comodidades, Adequação ao ambiente e Adequação técnica.

Todos os critérios são baseados em subcritérios (ou fatores) que também serão explicados no decorrer deste capítulo.

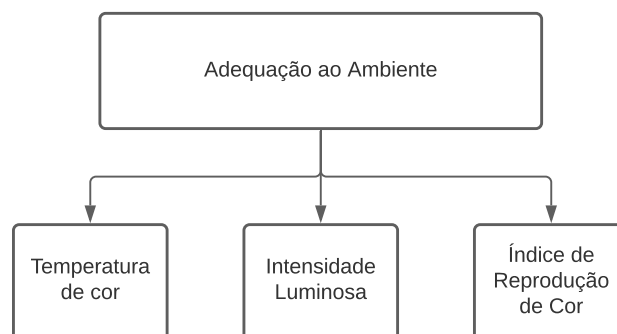
Os fatores que correlacionam a eficiência da iluminação pública com as lâmpadas são inúmeras. Portanto, nesta seção, são apresentados os aspectos julgados importantes, definidos após a revisão bibliográfica sobre o tema.

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

3.1.3.1 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 28 apresenta os fatores em que o decisor deve basear sua tomada de decisão.

Figura 28 – Fatores para adequação ao ambiente



Fonte: Autoria própria

A utilização de luzes com tons mais amarelados geram sentimento de conforto, relaxamento e maior segurança (COPEL, 2012). Portanto esses tipos de lâm-

padas 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). Portanto esses tipos de lâmpadas são indicadas, por exemplo, para utilização em vias de tráfego intenso de veículos.

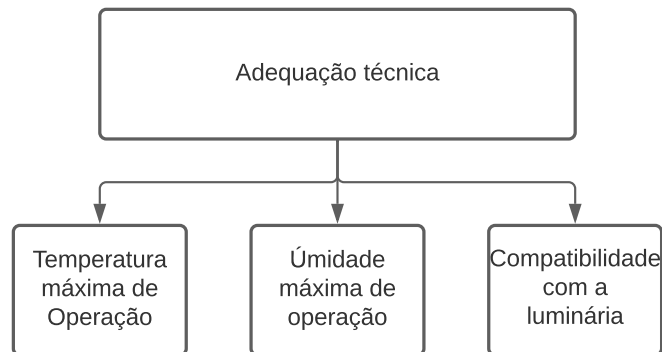
A intensidade luminosa é diretamente proporcional à sensações de maior atividade humana, porém, segundo a NBR ISO 8995-1:2013, é necessário se atentar ao fato de que luminância em excesso gera ofuscamento da visão.

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.

3.1.3.2 Adequação técnica

Este critério está relacionado à compatibilidade da lâmpada com o local de trabalho à ela proposto. A figura 29 apresenta os fatores em que o decisor deve basear sua tomada de decisão.

Figura 29 – Fatores para adequação técnica



Fonte: Autoria própria

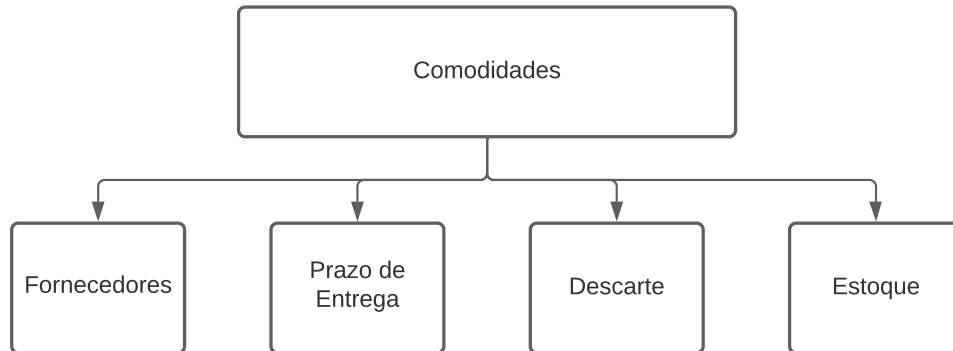
Em geral, as temperaturas máximas de operação e umidade máxima de operação são parecidas para lâmpadas de mesma tecnologia, porém quando se tratando de tecnologias diferentes existe uma mudança significativa neste parâmetro. (PHILIPS, 2011)

Conforme apresentado anteriormente, existem alguns tipos de luminárias homologadas na IP. 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.

3.1.3.3 Comodidades

Este critério está relacionado às facilidades que o deparará durante o processo de troca de lâmpada. A figura 30 apresenta os fatores em que o decisor deve basear sua tomada de decisão.

Figura 30 – Fatores de comodidade



Fonte: Autoria própria

Segundo a lei número 8.666, artigo 6, inciso III, toda aquisição remunerada de bens deve ser feita a partir de licitações.

As licitações possuem três etapas burocráticas (SILVA; ROCHA, 2006), tendo isso em vista, se houver a possibilidade de diminuir a complexidade dessa etapa, deve ser adotado.

Sabendo disso, 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.

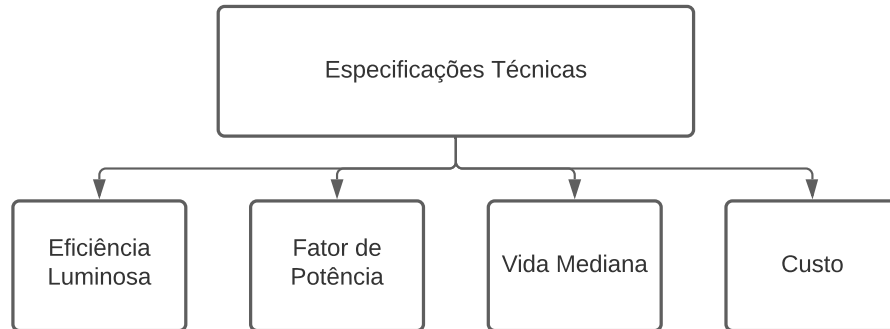
Além disso, se atender às exigências, pode-se optar por possíveis produtos em estoque. É importante lembrar que nem sempre utilizar as lâmpadas em estoque é a melhor opção, uma vez que no caso em que essas se esgotem e haver a necessidade de trocas corretivas, o tempo de reparo será aumentado.

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

3.1.3.4 Especificações técnicas

Este critério está relacionado às características técnicas das fontes de luz. A figura 31 apresenta os fatores em que o decisor deve basear sua tomada de decisão.

Figura 31 – Fatores de características técnicas



Fonte: Autoria própria

Todos os projetos de engenharia possuem três pilares, o custo, o escopo e o prazo. A determinação correta do custo é de suma importância uma vez que quando gerenciado de forma incorreta, pode comprometer o sucesso do projeto. (FONTANELE; CORREIA, 2014)

Na iluminação pública há o mesmo panorama, além de uma iluminação adequada e eficiente, deseja-se o melhor custo associado.

A vida mediana de uma lâmpada é um ponto crucial, uma vez que o impacto financeiro é diretamente correlacionado ao tempo de funcionamento do equipamento. Também há o apelo ecológico relacionado com a produção de lixo e utilização de recursos.

Além dos pontos apresentados acima, a vida mediana de uma lâmpada possui grande relevância, principalmente quando o ponto de iluminação é de difícil acesso, uma vez que com uma longevidade maior da fonte luz é requisitado uma menor utilização de recursos de mão de obra com reparos ou trocas.

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, distor-

ção 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.

3.1.4 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 à 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.

3.1.5 Aplicação dos métodos multicriteriais

Conforme apresentado, faz-se necessário a aplicação de dois métodos multicriteriais (AHP e TOPSIS) para a análise completa devido às peculiaridades inatas dos critérios levantados.

A escolha das MMC deu-se por conta de elas 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.

Bem como mostrado em 2.4.1, o *Output* 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.

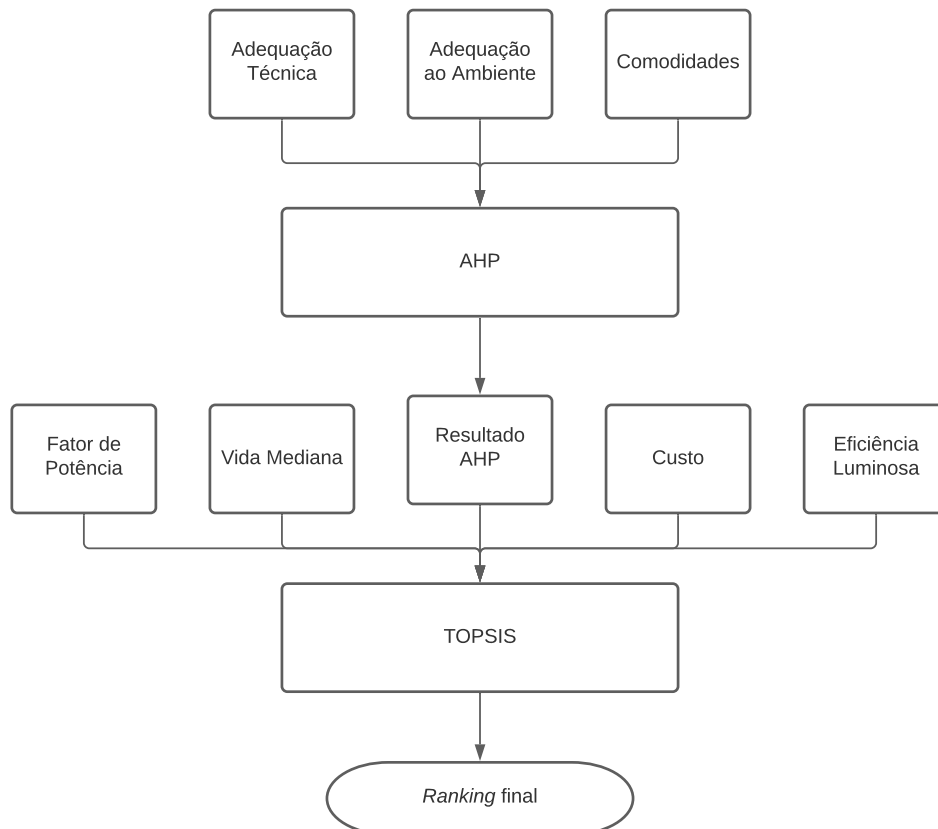
O AHP ficará encarregado por ponderar a adequação ao ambiente, adequação técnica e comodidades.

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 32 apresenta um fluxograma explicativo dos *Input's* e *Output's* da metodologia proposta.

Figura 32 – Fluxograma da análise dos critérios



Fonte: Autoria própria

A execução das ponderações feitas pelo AHP e TOPSIS devem seguir o roteiro apresentado em 2.4.1 e 2.4.2, respectivamente.

3.1.6 Análise dos resultados

A análise dos resultados é o passo final do método proposto. Assim que os dados cedidos ao TOPSIS forem trabalhados, este fornecerá uma tabela com a performance de cada um dos modelos de lâmpadas avaliados, conforme apresentado em 2.4.2. 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.

3.2 TESTE DE ACEITAÇÃO

Neste capítulo será apresentado uma aplicação prática do método desenvolvido neste trabalho, bem como a análise dos resultados e testes de aceitação a partir de casos extremos.

3.2.1 Teste de aceitação em casos extremos

O teste de aceitação aqui exposto se resume em aplicar a metodologia proposta utilizando-se de modelos de lâmpadas idealizados em casos extremos, ou seja, haverão 4 lâmpadas, sendo uma delas muito superior às outras e uma muito inferior.

Primeiramente, os dados serão tratados com determinados pesos também estabelecidos pelo autor e, após, efetuar a troca dos pesos. O resultado esperado é uma grande disparidade para ambos os casos extremos e uma paridade nas duas remanescentes.

As lâmpadas escolhidas serão chamada de W,X,Y,Z. Sendo que W é o caso extremo positivo e Z o caso extremo negativo.

As figuras 33 34 e 35 apresentam as matriz de julgamentos para os critério: Adequação ao Ambiente, Adequação técnica e Comodidade, respectivamente.

Figura 33 – Teste de aceitação: Matriz de julgamentos e autovalores para Adequação ao Ambiente

Comparativo Adequação ao Ambiente					Adequação ao Ambiente		
Critérios	W	X	Y	Z	Alternativas	A.V.	A.V.N
W	1	5	5	9	W	3 7/8	65%
X	1/5	1	1	3	X	7/8	15%
Y	1/5	1	1	3	Y	7/8	15%
Z	1/9	1/3	1/3	1	Z	1/3	6%

Fonte: Autoria própria

Figura 34 – Teste de aceitação: Matriz de julgamentos e autovalores para Adequação Técnica

Comparativo Adequação Técnica					Adequação Técnica		
Critérios	W	X	Y	Z	Alternativas	A.V.	A.V.N
W	1	5	5	9	W	3 7/8	65%
X	1/5	1	1	3	X	7/8	15%
Y	1/5	1	1	3	Y	7/8	15%
Z	1/9	1/3	1/3	1	Z	1/3	6%

Fonte: Autoria própria

Figura 35 – Teste de aceitação: Matriz de julgamentos e autovalores para Comodidades

Comparativo Comodidade					Comodidade		
Critérios	W	X	Y	Z	Alternativas	A.V.	A.V.N
W	1	5	5	9	W	3 7/8	65%
X	1/5	1	1	3	X	7/8	15%
Y	1/5	1	1	3	Y	7/8	15%
Z	1/9	1/3	1/3	1	Z	1/3	6%

Fonte: Autoria própria

Portanto a figura 36 apresenta o resultado da aplicação do AHP.

Figura 36 – Teste de aceitação: Resultado AHP

	Adequação ao Ambiente	Adequação Técnica	Comodidade	Vetor de Decisão
Pesos	0,5	0,3	0,2	1
W	65%	65%	65%	64,91%
X	15%	15%	15%	14,75%
Y	15%	15%	15%	14,75%
Z	6%	6%	6%	5,59%

Fonte: Autoria própria

A figura 37 apresenta os dados para julgamento no TOPSIS

Figura 37 – Teste de aceitação: Entrada de dados TOPSIS

ENTRADA DE DADOS						
	FATOR DE POTÊNCIA	VIDA MEDIANA	AHP	CUSTO	EFICIÊNCIA LUMINOSA	
PESOS	0,05	0,22	0,1	0,37	0,26	
W	1	1000000	64,91%	R\$ 1,00	250	
X	0,92	15000	14,75%	R\$ 50,00	37	
Y	0,92	20000	14,75%	R\$ 65,00	34	
Z	0,2	1000	5,59%	R\$ 600,00	1	

Fonte: Autoria própria

A figura 38 apresenta os valores normalizados.

Figura 38 – Teste de aceitação: Valores normalizados TOPSIS

VALORES NORMALIZADOS					
	FATOR DE POTÊNCIA	VIDA MEDIANA	AHP	CUSTO	EFICIÊNCIA LUMINOSA
PESOS	0,05	0,22	0,1	0,37	0,26
W	0,329	0,965	0,649	0,001	0,776
X	0,303	0,014	0,148	0,070	0,115
Y	0,303	0,019	0,148	0,091	0,106
Z	0,066	0,001	0,056	0,838	0,003

Fonte: Autoria própria

A figura 39 apresenta os valores normalizados e ponderados.

Figura 39 – Teste de aceitação: Valores normalizados e ponderados TOPSIS

VALORES NORMALIZADOS E PONDERADOS					
	FATOR DE POTÊNCIA	VIDA MEDIANA	AHP	CUSTO	EFICIÊNCIA LUMINOSA
PESOS	0,05	0,22	0,1	0,37	0,26
W	0,016	0,212	0,065	0,001	0,202
X	0,015	0,003	0,015	0,026	0,030
Y	0,015	0,004	0,015	0,034	0,027
Z	0,003	0,000	0,006	0,310	0,001

Fonte: Autoria própria

A figura 40 apresenta as soluções ideias positivas e negativas.

Figura 40 – Teste de aceitação: Soluções positivas e negativas TOPSIS

SOLUÇÕES IDEIAS POSITIVA E NEGATIVA					
	FATOR DE POTÊNCIA	VIDA MEDIANA	AHP	CUSTO	EFICIÊNCIA LUMINOSA
J+	0,016	0,212	0,065	0,001	0,202
J-	0,003	0,000	0,006	0,310	0,001

Fonte: Autoria própria

A figura 41 apresenta a distância de cada lâmpada às soluções ideias.

Figura 41 – Teste de aceitação: Distância de J+ e J- TOPSIS

DISTÂNCIA DA SOLUÇÃO IDEAL POSITIVA E NEGATIVA		
-	S+	S-
W	0,000	0,430
X	0,277	0,286
Y	0,278	0,278
Z	0,430	0,000

Fonte: Autoria própria

A figura 42 apresenta as performances de cada lâmpada.

É possível observar que na figura 40, conforme esperado, todos os valores das soluções ideias positivas são provenientes da lâmpada W e das soluções ideias negativas, da lâmpada Z.

Também, como esperado, a lâmpada W possui performance de 100% e a Z, 0%. As lâmpadas X e Y obtiveram valores intermediários.

Figura 42 – Teste de aceitação: Performance Final

CÁLCULO DAS PERFORMANCES	
P	
W	100,00%
X	50,85%
Y	50,01%
Z	0,00%

Fonte: Autoria própria

Como o próximo passo para o teste de aceitação do método, há a troca das relevâncias dos critérios. A figura 43 apresenta o *Output* do AHP e a figura 44 as performances geral das lâmpadas.

Figura 43 – Teste de aceitação: Resultado AHP com alteração nas ponderações

	Adequação ao Ambiente	Adequação Técnica	Comodidade	Vetor de Decisão
Pesos	0,1	0,66	0,24	1
W	65%	65%	65%	64,91%
X	15%	15%	15%	14,75%
Y	15%	15%	15%	14,75%
Z	6%	6%	6%	5,59%

Fonte: Autoria própria

Figura 44 – Teste de aceitação: Performance Final com alteração nas ponderações

CÁLCULO DAS PERFORMANCES	
P	
W	100,00%
X	54,29%
Y	53,53%
Z	0,00%

Fonte: Autoria própria

Da mesma forma, a lâmpada W possui performance de 100% e a Z, 0%. As lâmpadas X e Y obtiveram valores intermediários.

Assim, pode-se concluir que a metodologia proposta possui coerência e coesão dos resultados apresentados.

3.2.2 Exemplo de aplicação

Para exemplificar a utilização da metodologia criada, nesta seção será realizada um estudo de caso. Para tal, foi utilizado a ferramenta *Microsoft Excel* para análise e tratamento dos dados.

Uma cidade do interior do estado de São Paulo, de aproximadamente 15 mil habitantes, identificou a pretensão de troca das lâmpadas de uma via de trânsito rápido com posteação bilateral frente à frente e um total de 78 pontos de luz.

O intuito inicial da substituição deu-se devido à problemas recorrentes de queima das lâmpadas pois essas já estavam perto do final de suas vidas úteis.

As fontes de luz presentes do local eram do tipo vapor de sódio de 70W. Como o local é uma via de trânsito rápido, espera-se com a substituição uma melhor eficiência energética por um menor custo relativo atrelado à troca.

A partir dessas informações, foram pré-selecionadas 4 modelos de lâmpadas que atendem à todos os requisitos normativos:

Lâmpada A:

- Tecnologia: Incandescente
- Temperatura de Cor = 2700K
- Intensidade Luminosa = 500 lux
- Índice de reprodução de cor = 100%
- Temperatura Máxima de Operação = 55°C
- Umidade Máxima de Operação = 100%
- Compatibilidade com luminária = Compatível
- Fornecedores = Fácil
- Prazo de Entrega = 2 dias úteis
- Descarte = Fácil
- Quantidade em estoque = 0
- Eficiência Luminosa = 14 lm/W
- Fator de Potência = 1
- Vida Médiana = 1.000h
- Custo por unidade = R\$78,00

Lâmpada B:

- Tecnologia: Vapor de Mercúrio
- Temperatura de Cor = 4300K
- Intensidade Luminosa = 780 lux
- Índice de reprodução de cor = 55%
- Temperatura Máxima de Operação = 60°C

- Umidade Máxima de Operação = Proteção IP67
- Compatibilidade com luminária = Compatível
- Fornecedores = Fácil
- Prazo de Entrega = 1 dias úteis
- Descarte = Difícil
- Quantidade em estoque = 0
- Eficiência Luminosa = 46 lm/W
- Fator de Potência = 0,92
- Vida Mediana = 16.000h
- Custo por unidade = R\$45,00

Lâmpada C:

- Tecnologia: LED
- Temperatura de Cor = 6500K
- Intensidade Luminosa = 1680 lux
- Índice de reprodução de cor = 90%
- Temperatura Máxima de Operação = 50°C
- Umidade Máxima de Operação = Proteção IP68
- Compatibilidade com luminária = Incompatível
- Fornecedores = Fácil
- Prazo de Entrega = 6 dias úteis
- Descarte = Difícil
- Quantidade em estoque = 0
- Eficiência Luminosa = 120 lm/W
- Fator de Potência = >0,92
- Vida Mediana = 100.000h
- Custo por unidade = R\$320,00

Lâmpada D:

- Tecnologia: Fluorescente
- Temperatura de Cor = 4000K
- Intensidade Luminosa = 700 lux
- Índice de reprodução de cor = 60%
- Temperatura Máxima de Operação = 65°C
- Umidade Máxima de Operação = Proteção IP68
- Compatibilidade com luminária = Fácil adequação
- Fornecedores = Fácil
- Prazo de Entrega = 4 dias úteis
- Descarte = Difícil
- Quantidade em estoque = 0
- Eficiência Luminosa = 76 lm/W
- Fator de Potência = >0,7
- Vida Mediana = 10.000h
- Custo por unidade = R\$60,00

Os pesos para análise do AHP foram atribuídos da seguinte maneira:

Adequação ao ambiente: Peso atribuído = 0,5. Como o local de instalação é uma via onde há alto fluxo de automóveis trafegando, o decisor julga importante que a lâmpada escolhida proporcione estímulo aos motorista sem que haja ofuscamento de sua visão.

Adequação técnica: Peso atribuído = 0,3. Como já existem os pontos de iluminação, o decisor julga relevante a compatibilidade técnica.

Comodidade: Peso atribuído = 0,2. Como a substituição não possui caráter corretivo, o decisor não julga importante prazo de entrega, fornecedores e estoque. Entretanto, visando a sustentabilidade, o administrador atribuí uma relevância substancial ao critério.

Os pesos para análise do TOPSIS foram atribuídos da seguinte maneira:

Fator de potência: Peso atribuído = 0,05. O decisor não julga a distorção harmônica da rede como importante.

Vida Média: Peso Atribuído = 0,22. O decisor julga importante a longevidade da lâmpada, visto que isso uma maior vida útil da fonte de luz atrela um menor preço relativo no domínio do tempo.

AHP: Peso atribuído = 0,10. O decisor julga que os critérios analisados pelo AHP possuem menor importância em relação aos critérios confrontantes.

Custo: Peso atribuído = 0,37. O decisor julga o custo como o critério mais importante dentro de sua análise, uma vez que este fator impacta diretamente nas despesas geradas para a implementação do projeto.

Eficiência luminosa: Peso atribuído = 0,26. O decisor julga bem relevante o gasto mensal que essas fontes de luz acarretaram no passar do tempo.

Partindo para a aplicação da metodologia, primeiramente deve-se construir a matriz de julgamentos para a comparação par a par do método AHP e, logo após, deve-se calcular os autovalores e autovalores normalizados de cada critério.

A figura 45 apresenta a matriz de julgamentos e seus respectivos valores de autovalores para o critério Adequação ao Ambiente.

Figura 45 – Matriz de julgamentos e autovalores para Adequação ao Ambiente

Comparativo Adequação ao Ambiente					Adequação ao Ambiente		
Critérios	A	B	C	D	Alternativas	A.V.	A.V.N
A	1	1/5	1/7	1/3	A	1/3	5%
B	5	1	1/5	2	B	1 1/5	20%
C	7	5	1	5	C	3 2/3	62%
D	3	1/2	1/5	1	D	3/4	13%

Fonte: A autoria própria

A figura 46 apresenta a matriz de julgamentos e seus respectivos valores de autovalores para o critério Adequação Técnica.

Figura 46 – Matriz de julgamentos e autovalores para Adequação Técnica

Comparativo Adequação Técnica					Adequação Técnica		
Critérios	A	B	C	D	Alternativas	A.V.	A.V.N
A	1	1	7	3	A	2 1/7	40%
B	1	1	7	3	B	2 1/7	40%
C	1/7	1/7	1	1/5	C	1/4	5%
D	1/3	1/3	5	1	D	6/7	16%

Fonte: A autoria própria

A figura 47 apresenta a matriz de julgamentos e seus respectivos valores de autovalores para o critério Conforto.

Portanto, para ponderar as performances gerais de cada lâmpada, é necessário fazer uma soma de cada autovalor normalizado ponderado. A figura 48 apresenta o *Output* da aplicação do AHP.

Figura 47 – Matriz de julgamentos e autovalores para Comodidade

Comparativo Comodidade					Comodidade		
Critérios	A	B	C	D	Alternativas	A.V.	A.V.N
A	1	3	3	3	A	2 2/7	50%
B	1/3	1	1	1	B	3/4	17%
C	1/3	1	1	1	C	3/4	17%
D	1/3	1	1	1	D	3/4	17%

Fonte: Autoria própria

Figura 48 – Vetor de decisão AHP

	Adequação ao Ambiente	Adequação Técnica	Comodidade	Vetor de Decisão
Pesos	0,5	0,3	0,2	1
A	5%	40%	50%	24,56%
B	20%	40%	17%	25,35%
C	62%	5%	17%	35,67%
D	13%	16%	17%	14,43%

Fonte: Autoria própria

Uma vez aplicado todas as técnicas provenientes do AHP, deve-se dar início ao TOPSIS

A figura 49 apresenta os dados coletados impressos em uma tabela que será utilizada para a aplicação do método TOPSIS.

Figura 49 – Entrada de dados TOPSIS

ENTRADA DE DADOS						
	FATOR DE POTÊNCIA	VIDA MEDIANA	AHP	CUSTO	EFICIÊNCIA LUMINOSA	
PESOS	0,05	0,22	0,1	0,37	0,26	
A	1	1000	24,56%	R\$ 78,00	14	
B	0,92	16000	25,35%	R\$ 45,00	46	
C	0,92	100000	35,67%	R\$ 320,00	120	
D	0,7	10000	14,43%	R\$ 60,00	76	

Fonte: Autoria própria

Uma vez disponíveis os dados necessários, inicia-se a aplicação dos métodos matemáticos provenientes da metodologia. Iniciando-se pela normalização dos fatores.

A figura 50 apresenta os dados normalizados.

Figura 50 – Valores Normalizados

VALORES NORMALIZADOS						
	FATOR DE POTÊNCIA	VIDA MEDIANA	AHP	CUSTO	EFICIÊNCIA LUMINOSA	
PESOS	0,05	0,22	0,1	0,37	0,26	
A	0,282	0,008	0,246	0,155	0,055	
B	0,260	0,126	0,253	0,089	0,180	
C	0,260	0,787	0,357	0,636	0,469	
D	0,198	0,079	0,144	0,119	0,297	

Fonte: Autoria própria

O próximo passo é ponderar esses valores, conforme apresentado na figura 51.

Figura 51 – Valores normalizados e ponderados

VALORES NORMALIZADOS E PONDERADOS					
	FATOR DE POTÊNCIA	VIDA MEDIANA	AHP	CUSTO	EFICIÊNCIA LUMINOSA
PESOS	0,05	0,22	0,1	0,37	0,26
A	0,014	0,002	0,025	0,057	0,014
B	0,013	0,028	0,025	0,033	0,047
C	0,013	0,173	0,036	0,235	0,122
D	0,010	0,017	0,014	0,044	0,077

Fonte: Autoria própria

Para as soluções ideias positivas, adota-se para os critérios FP, vida mediana, AHP e eficiência luminosa, o valor máximo e para o critério custo, o mínimo. De maneira oposta, encontra-se as soluções ideias negativas.

A figura 52 apresenta tais soluções.

Figura 52 – Soluções ideias positivas e negativas

SOLUÇÕES IDEIAS POSITIVA E NEGATIVA					
	FATOR DE POTÊNCIA	VIDA MEDIANA	AHP	CUSTO	EFICIÊNCIA LUMINOSA
J+	0,014	0,173	0,036	0,033	0,122
J-	0,010	0,002	0,014	0,235	0,014

Fonte: Autoria própria

O cálculo da distância entre a lâmpada e as soluções ideias são apresentados na figura 53.

Figura 53 – Distância das soluções ideias

DISTÂNCIA DA SOLUÇÃO IDEAL POSITIVA E NEGATIVA		
-	S+	S-
A	0,204	0,178
B	0,164	0,207
C	0,202	0,204
D	0,164	0,202

Fonte: Autoria própria

E, por fim, após o cálculo das performances gerais de cada lâmpada, têm-se o resultado final da aplicação da metodologia, assim como apresentado na figura 54.

A partir da análise da figura 54, concluí-se que a melhor fonte de luz para a ocasião é a lâmpada B pois este obteve a maior performance (P).

3.2.3 Análise dos resultados

Os testes de aceitação em metodologias multicriteriais é amplamente utilizados para validação, uma vez que com a aplicação de casos extremos e a análise dos resultado é possível homologar a coesão, coerência e concordância.

Figura 54 – Performances de cada lâmpada

CÁLCULO DAS PERFORMANCES	
P	
A	46,62%
B	55,76%
C	50,16%
D	55,19%

Fonte: Autoria própria

Em 3.2.1, foi comprovado que a metodologia desenvolvida no trabalho proporciona resultados fieis à realidade.

Em 3.2.2, é levantado um caso para análise, e por ele é possível compreender plenamente o funcionamento do método.

Caso no exemplo apresentado em 3.2.2, o decisor optar por comutar as relevâncias dos critério Custo e Vida Mediana, obteria o resultado apresentado na figura 55.

Figura 55 – Performances de cada lâmpada com relevâncias comutadas

CÁLCULO DAS PERFORMANCES	
P	
A	25,65%
B	34,09%
C	71,95%
D	33,19%

Fonte: Autoria própria

Desta forma fica claro como o decisor tem grande influência sobre o resultado, já que apenas comutando a relevância entre dois critérios o resultado obtido é totalmente diferente. No caso, a melhor fonte de luz seria a lâmpada C.

A influência do decisor não se limita apenas à ponderação, mas também às comparações par a par realizadas no AHP.