

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DOUTORADO EM SISTEMAS DE GESTÃO SUSTENTÁVEIS

LUANA MERENCIANO DA SILVA

**ABORDAGEM HÍBRIDA PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS TÉCNICOS
E SUSTENTÁVEIS EM PROJETOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM
TECNOLOGIA LED**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutora em Sistemas de Gestão Sustentáveis. Área de Concentração: Sistemas de Gestão da Sustentabilidade. Linha de Pesquisa: Apoio à Decisão em Organizações Sustentáveis.

Orientador:

Prof. Dr. Gilson Brito Alves Lima - UFF

Coorientador:

Prof. Dr. Márcio Zamboti Fortes - UFF

Niterói, RJ

2024

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S586a Silva, Luana Merenciano da
Abordagem Híbrida para Avaliação de Parâmetros Técnicos
e Sustentáveis em Projetos de Iluminação Pública com
Tecnologia LED / Luana Merenciano da Silva. - 2024.
98 f.

Orientador: Gilson Brito Alves Lima.
Coorientador: Márcio Zamboti Fortes.
Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de
Engenharia, Niterói, 2024.

1. Políticas Públicas. 2. Iluminação Pública. 3.
Decisão Multicritério. 4. Sustentabilidade. 5. Produção
intelectual. I. Lima, Gilson Brito Alves, orientador. II.
Fortes, Márcio Zamboti, coorientador. III. Universidade
Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD - XXX

LUANA MERENCIANO DA SILVA

**ABORDAGEM HÍBRIDA PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS TÉCNICOS
E SUSTENTÁVEIS EM PROJETOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM
TECNOLOGIA LED**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutora em Sistemas de Gestão Sustentáveis. Área de Concentração: Sistemas de Gestão da Sustentabilidade. Linha de Pesquisa: Apoio à Decisão em Organizações Sustentáveis.

Aprovado em 26 de novembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Gilson Brito Alves Lima, D.Sc. - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Márcio Zamboti Fortes, D.Sc. - Coorientador
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Julio Cesar de Faria Alvim Wasserman, D.Sc.
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Bruno Henriques Dias, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Prof^a Cristina Gomes de Souza, D.Sc.
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET

Prof Teófilo Miguel de Souza, D.Sc.
Universidade Estadual Paulista - UNESP

Niterói, RJ

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me trouxe até aqui e me capacitou em cada passo desta jornada. Sua presença constante foi fundamental para que eu pudesse superar desafios e alcançar este momento tão especial.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família, que sempre esteve ao meu lado. Ao meu esposo, por seu amor e apoio constantes; à minha filha, por sua alegria e inspiração; e à minha mãe, ao meu irmão e ao meu padasto, que sempre me incentivaram a seguir em frente. A todos os meus familiares, agradeço de coração por cada palavra de encorajamento e por estarem presentes em momentos cruciais.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Gilson, e ao coorientador, Prof. Márcio, pela orientação valiosa, paciência e confiança depositada em meu trabalho. Suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento desta tese.

Um agradecimento especial às secretárias Liliam e Bianca, do Programa de Doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis, que sempre estiveram disponíveis para ajudar e esclarecer dúvidas, tornando o processo mais tranquilo.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro da bolsa de pesquisa de doutorado, concedida durante o período de desenvolvimento da tese.

Aos amigos e apoiadores do LabLux-UFF, minha eterna gratidão pela parceria e pelas trocas de conhecimento que enriqueceram minha trajetória.

Por fim, agradeço à Universidade Federal Fluminense por proporcionar um ambiente acadêmico estimulante e por me permitir crescer como pesquisadora e profissional.

A todos vocês, meu muito obrigado!

RESUMO

O avanço tecnológico e o crescimento populacional têm impulsionado a demanda por iluminação artificial, que corresponde a 20% da produção global de eletricidade. A iluminação pública, responsável por 3 a 4% do consumo elétrico nas cidades, desempenha um papel crucial na segurança pública, qualidade de vida e valorização urbana. Neste contexto, a gestão sustentável da iluminação pública é essencial para equilibrar aspectos econômicos, ambientais e sociais, reduzindo custos energéticos e melhorando a qualidade de vida com vias públicas mais seguras e bem iluminadas. Este estudo combina a técnica de tomada de decisão AHP (*Analytic Hierarchy Process*) com a modelagem por Redes Bayesianas, oferecendo uma solução híbrida para apoiar gestores públicos na seleção de projetos de iluminação pública com tecnologia LED. Além disso, a pesquisa foi embasada por uma revisão da literatura sobre práticas e desafios relacionados à gestão sustentável, permitindo uma compreensão mais ampla do contexto. A aplicação dessa metodologia oferece uma ferramenta eficaz para decisões mais informadas e sustentáveis, levando em conta critérios técnicos, econômicos e ambientais. Os resultados da modelagem indicam que o critério C1 - Redução do Consumo de Energia foi consistentemente priorizado em todos os grupos focais, destacando sua importância universal para a sustentabilidade. Em contraste, o critério C2 - Qualidade de Energia foi o menos priorizado, sugerindo uma percepção de menor relevância em comparação com outros critérios. O critério C3 - Design do Equipamento recebeu maior prioridade nos grupos focais do Fabricante e da Prefeitura, refletindo a ênfase em aspectos visuais e funcionais. Por fim, o critério C4 - Descarte apresentou variabilidade nas prioridades, com menor ênfase no Grupo Focal do LabLux e maior em outros grupos, indicando diferentes perspectivas sobre a importância do descarte. A proposta desenvolvida tem o potencial de contribuir significativamente para a tomada de decisões informadas e sustentáveis na gestão da iluminação pública, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade e eficiência energética.

PALAVRAS-CHAVE: Políticas Públicas, Iluminação Pública, Abordagem Híbrida, Decisão Multicritério, AHP, Rede Bayesiana, Sustentabilidade.

ABSTRACT

Technological advancements and population growth have driven the demand for artificial lighting, which accounts for 20% of global electricity production. Public lighting, responsible for 3-4% of urban electricity consumption, plays a critical role in public safety, quality of life, and urban value. Therefore, sustainable public lighting management is essential to balance economic, environmental, and social aspects, reducing energy costs and enhancing quality of life with safer, well-lit public spaces. This study combines the AHP (Analytic Hierarchy Process) decision-making technique with Bayesian Networks modeling, offering a hybrid solution to support public managers in selecting LED public lighting projects. Furthermore, the research is grounded in a literature review on practices and challenges related to sustainable management, providing a broader understanding of the context. The application of this methodology offers an effective tool for more informed and sustainable decisions, considering technical, economic, and environmental criteria. The modeling results indicate that Criterion C1 - Energy Consumption Reduction was consistently prioritized across all focus groups, underscoring its universal importance for sustainability. In contrast, Criterion C2 - Energy Quality was the least prioritized, suggesting a perceived lower relevance compared to other criteria. Criterion C3 - Equipment Design received higher priority in the Manufacturer and City Council focus groups, reflecting an emphasis on visual and functional aspects. Lastly, Criterion C4 - Disposal showed variability in priorities, with lower emphasis in the LabLux Focus Group and higher in others, indicating differing perspectives on the importance of disposal. The proposed approach holds significant potential to contribute to informed and sustainable decision-making in public lighting management, aligning with sustainability and energy efficiency goals.

KEYWORDS: Public Policy, Public Lighting, Hybrid Approach, Multicriteria Decision, AHP, Bayesian Network, Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação no consumo de energia por categoria em 2023	21
Figura 2 - Distribuição do consumo de energia em 2023.....	22
Figura 3 - Estrutura da tese.....	26
Figura 4 - Relações envolvidas na sustentabilidade da iluminação pública.....	35
Figura 5 - Fluxograma Geral do AHP	38
Figura 6 - Estrutura hierárquica do método AHP	39
Figura 7 - Identificação de similaridades	54
Figura 8 - Matriz de comparação.....	67
Figura 9 - Rede de decisão bayesiana.....	73
Figura 10 - Rede de decisão bayesiana referente ao resultado do LabLux	73
Figura 11 - Rede de decisão bayesiana referente ao resultado do Centro de Pesquisas. 74	
Figura 12 - Rede de decisão bayesiana referente ao resultado do Fabricante	75
Figura 13 - Rede de decisão bayesiana referente ao resultado da Prefeitura	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Eventos Significativos que Moldaram a Discussão sobre Sustentabilidade (1972-2024).....	31
Quadro 2 - Estruturação da base de busca no Acrônimo PICO.....	50
Quadro 3 - Construção da <i>string</i> de pesquisa.....	51
Quadro 4 - Etapas de Seleção e Resultados de Pesquisa (2021)	53
Quadro 5 - Etapas de Seleção e Resultados de Pesquisa (2024)	55
Quadro 6 - Objetivo, critérios e fatores definidos para o estudo	64
Quadro 7 - Quadro Resumo.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala Fundamental de Saaty	46
Tabela 2 - Índice de Consistência Aleatória	46
Tabela 3 - Pesos dos critérios com base no método AHP do grupo focal Lablux.....	70
Tabela 4 - Pesos dos critérios com base no método AHP do grupo focal Centro de Pesquisas.....	71
Tabela 5 - Pesos dos critérios com base no método AHP do grupo focal do Fabricante	71
Tabela 6 - Pesos dos critérios com base no método AHP do grupo focal da Prefeitura	72

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ALAN	<i>Artificial Light at Night</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AIoT	<i>Artificial Intelligence of Things</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
COSIP	Contribuição para o Custeio da Iluminação Pública
CO2	Dióxido de carbono
DAG	<i>Directed Acyclic Graph</i>
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Expressing Reality</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESG	<i>Environmental, Social, and Governance</i>
HID	<i>High Intensity Discharge</i>
IA	Inteligência Artificial
IC	Índice de consistência
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IP	Iluminação Pública
ICA	Índice de Consistência Aleatória
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
Lablux-UFF	Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense
LED	<i>Light Emitting Diode</i>

MCDA	Método de apoio multicritério à decisão
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PPP	Parceria Público-Privada
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i>
RB	Rede Bayesiana
RC	Razão de consistência
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TPC	Tabela de probabilidade condicional
VOSviewer	<i>Visualizing Scientific Landscapes</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	Contextualização do Tema.....	14
1.2.	Situação Problema	18
1.3.	Objetivo Geral.....	23
1.4.	Objetivos Específicos	23
1.5.	Questão da Pesquisa.....	24
1.6.	Aderência a Interdisciplinaridade	24
1.7.	Contribuição e Originalidade	25
1.8.	Estrutura da Tese	26
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1	Desenvolvimento Sustentável.....	28
2.2	Gestão Sustentável em Projetos de Iluminação Pública	33
3.	APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO	36
3.1.	Análise Hierárquica de Processo (AHP).....	37
3.2.	A Modelagem por Redes Bayesianas	40
4.	METODOLOGIA DE PESQUISA	43
4.1.	Classificação da Pesquisa	43
4.2.	Instrumentos de Coleta de Dados	44
4.3.	Análise e Tratamento de Dados	48
4.4.	Revisão Sistemática da Literatura.....	50
4.4.1.	Definição da Questão de Pesquisa.....	50
4.4.2.	Estratégia de Busca e Seleção	51
4.4.3.	Levantamento Inicial (2021)	52
4.4.4.	Atualização da Revisão (2024).....	52
4.4.5.	Análise dos Resultados da Revisão da Literatura.....	52
4.4.6.	Correlações Teóricas entre Sustentabilidade e Iluminação Pública	57

4.4.7. Levantamento de Aplicações Sustentáveis no Âmbito da IP em Escala Internacional	58
5. APLICAÇÕES DAS FERRAMENTAS DE MULTICRITÉRIO PARA ANÁLISE E APOIO À TOMADA DE DECISÃO.....	62
5.1. Etapa 1 - Definição do objetivo, dos critérios e fatores	63
5.2. Etapa 2 - Definição do grupo focal	64
5.3. Etapa 3: Desenvolvimento da modelagem.....	66
5.3.1. Fase 1 - Método AHP	66
5.3.2. Fase 2 - Redes Bayesianas.....	68
6. ANÁLISE E SÍNTESE DOS RESULTADOS	70
6.1. Análise dos Resultados da Aplicação das Ferramentas Multicritério.....	70
6.2. Síntese dos Resultados.....	79
6.2.1. Síntese dos Resultados da Revisão Sistemática da Literatura.....	79
6.2.2. Síntese dos Resultados da Aplicação das Ferramentas Multicritério	80
6.2.3. Integração e Análise dos Resultados	80
7. CONCLUSÕES.....	82
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A - Questionário aplicado a pesquisa.....	91
ANEXO 1.....	92
PRODUÇÕES TÉCNICAS E TECNOLÓGICAS.....	92
ANEXO I-a.....	93
ANEXO I-b.....	94
ANEXO II-a	95
ANEXO II-b.....	96
ANEXO III.....	97
ANEXO VI	98

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do Tema

A iluminação pública (IP) tem aspectos relevantes, na vida social dos cidadãos e, é serviço primordial do poder público nas cidades Spahiu; Dharmo e Zavalani (2018), seu impacto nas contas públicas também é notável, o parque de iluminação pública no Brasil conta com mais de 18 milhões de pontos de luz, correspondendo a cerca de 4,3% do consumo total de energia elétrica do país e comprometendo entre 3% e 5% do orçamento dos municípios, isso evidencia e justifica os diversos esforços para modernização e aumento da sustentabilidade em IP (MEYER et al., 2017).

Buscando promover um consumo mais eficiente de energia elétrica, são observadas iniciativas significativas por parte do poder público. Estas iniciativas são evidentes, especialmente em estados que desenvolvem projetos de eficiência energética em prédios públicos e em municípios que investem na modernização dos parques de IP. Nesse contexto, a modernização é acompanhada pela melhoria dos indicadores de qualidade da iluminação pública, através da substituição de lâmpadas de descarga (como lâmpadas mista, vapor de sódio, vapor de mercúrio e multivapor metálico) por luminárias que utilizam uma tecnologia mais moderna, representada pelas lâmpadas de LED (*Light Emitting Diode* ou Diodo Emissor de Luz, em português) (DELÉO E OLIVEIRA; AVINO, 2022).

Diante da crescente preocupação da sociedade com as questões ambientais e o desenvolvimento sustentável, torna-se fundamental aprimorar a eficiência energética na IP. A IP desempenha um papel crucial na segurança e qualidade de vida nos centros urbanos, atuando como um instrumento de cidadania. Ela contribui para a segurança dos cidadãos, a prevenção da criminalidade, o embelezamento das áreas urbanas, a valorização de monumentos artísticos, edifícios e paisagens, além de orientar percursos e permitir um melhor aproveitamento das áreas de lazer. A melhoria dos sistemas de IP nas cidades não apenas fortalece a imagem urbana, favorecendo atividades de turismo, comércio e lazer noturno, mas também estimula a cultura do uso eficiente e racional da energia elétrica, promovendo, assim, o desenvolvimento social e econômico da população. Além disso, a IP desempenha um papel vital na segurança do tráfego,

especialmente em um contexto de crescimento do número de veículos automotores, onde a gestão do tráfego se torna essencial para reduzir congestionamentos e acidentes.

A necessidade de uma abordagem sustentável para a iluminação pública se torna cada vez mais evidente, especialmente quando se considera a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada em 2015 pelos 193 Estados Membros da ONU. Este plano de ação global visa promover o bem-estar das pessoas e do planeta, através de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas associadas. Em particular, o ODS 11, que foca em Cidades e Comunidades Sustentáveis, enfatiza a importância de ampliar a urbanização sustentável e fortalecer a capacidade de planejamento e gestão de assentamentos humanos de maneira inclusiva e sustentável até 2030 (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2015).

A percepção da relevância da IP no contexto das cidades sustentáveis também pode ser notada a partir dos esforços globais em se estabelecer padrões e indicadores nesta área, como vem sendo buscado pela ISO (*International Standard Organization*), que, a partir de uma interpretação do ODS, propõe sua ISO 37122 no Brasil, sendo traduzida pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) como ABNT NBR ISO 37122:2020 (ABNT/CEE-268 CIDADES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2020). Esta norma estipula diretrizes para a implementação de um sistema de gestão que promova o desenvolvimento sustentável em comunidades, adotando uma abordagem integral e garantindo a conformidade com as políticas vigentes de desenvolvimento sustentável.

Vale ressaltar que, desde 2015, os municípios brasileiros assumiram a responsabilidade pela gestão dos ativos de iluminação pública e pela prestação desse serviço à população. A administração pode ser realizada de três formas: diretamente com equipes próprias, por meio da contratação de serviços regida pela Lei 8.666/1993 (SENADO FEDERAL, 2021), ou por delegação integral à iniciativa privada através de parcerias público-privadas (PPP).

Em relação ao papel de regulação nesse setor, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) intervém apenas na relação entre concessionárias de energia e os municípios, abrangendo contratos de fornecimento, medição de consumo e tarifas. No entanto, cabe aos municípios definir como o serviço de iluminação pública será prestado,

Para apoiar os municípios na definição de parâmetros de qualidade e tecnologia na iluminação pública, a Norma Técnica NBR 5101:2024 da ABNT estabelece requisitos para a iluminação viária (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024). A elaboração dessa norma foi coordenada pelo Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-003) e a Comissão de Estudo de Aplicações Luminotécnicas e Medições Fotométricas (CE-003:034.004). O processo de revisão incluiu três fases de Consulta Nacional: a primeira, de 27/05/2021 a 28/06/2021; a segunda, de 19/07/2022 a 17/08/2022; e a terceira, de 20/04/2023 a 22/05/2023. Esta quarta edição da NBR 5101, publicada em 25/03/2024, substitui a versão anterior, a NBR 5101:2018 + Emenda 1:2018, que passou por revisão técnica completa (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024).

A NBR 5101:2024, publicada após sete anos de revisão pela ABNT, estabelece novos procedimentos para projetos de iluminação viária no Brasil, alinhando-se à norma europeia EN13201. A atualização introduz três classes viárias (M, C e P), com classificação mais detalhada para diferentes tipos de vias. A norma também aprimora as malhas de projeto e medição, adicionando uma malha de iluminância vertical em faixas de pedestres, e impõe limites para a temperatura de cor da luz (máximo de 3000K para pedestres e valores menores para vias específicas), visando reduzir a poluição luminosa e a emissão de luz azul prejudicial ao meio ambiente e ao ciclo circadiano. Além disso, traz novos indicadores de eficiência energética (Dp e De) e o sistema BUG para classificação fotométrica, oferecendo diretrizes mais completas e adaptadas à realidade brasileira (JUNQUEIRA; IWASHITA, 2024).

Os municípios brasileiros podem utilizar a Contribuição para o Custeio da Iluminação Pública (CIP ou COSIP) como uma fonte específica de financiamento para os serviços de iluminação pública, conforme estabelecido pelo art. 149-A da Constituição Federal, introduzido pela Emenda Constitucional n. 39 de 2002. Aproximadamente 70% dos municípios já instituíram essa contribuição. A Constituição permite que a COSIP seja cobrada diretamente nas contas de energia elétrica emitidas pelas distribuidoras, o que resulta em alta eficiência na arrecadação, facilitando a formalização de contratos de longo prazo com a iniciativa privada para a prestação desses serviços (BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL).

Inicialmente, muitos municípios optaram pela terceirização das atividades de operação e manutenção da iluminação pública para empresas privadas, por meio de licitações tradicionais regidas pela Lei n. 8.666/1993 (SENADO FEDERAL, 2021). Esses contratos anuais eram renováveis por até cinco anos. Contudo, com a entrada em vigor da nova Lei de Licitações e Contratos Administrativos (Lei n. 14.133/2021) (BRASIL, 2021) em 2021, que substituiu gradualmente a Lei n. 8.666/1993, surgiu um período de transição de dois anos para que os órgãos públicos pudessem optar entre utilizar as novas regras ou seguir com as antigas até a completa transição (BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL).

Além da terceirização, em menor escala, alguns municípios optam por realizar a gestão da iluminação pública diretamente por meio de equipes próprias dos departamentos municipais, autarquias ou empresas públicas (BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL).

Ainda assim, observa-se uma ausência de critérios padronizados para orientar os gestores municipais na escolha das tecnologias empregadas na iluminação pública, especialmente quanto aos equipamentos utilizados. Para que a seleção de fornecedores e tecnologias seja mais eficiente, recomenda-se que se considerem critérios essenciais, como os tecnológicos (eficiência luminosa e energética dos equipamentos); financeiros (análise custo-benefício ao longo da vida útil dos dispositivos); ambientais (impacto ambiental da fabricação ao descarte, incluindo custos de reciclagem); e sociais (adequação do projeto às necessidades específicas, como a diferenciação entre iluminação de parques e de vias públicas). A adoção desses critérios favorece escolhas mais sustentáveis e alinhadas às demandas urbanas.

Diante desse cenário, destaca-se a necessidade de uma pesquisa voltada para a implementação desses aspectos, por meio de ferramentas multicritério, como o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e as Redes Bayesianas. Essas ferramentas permitem qualificar e quantificar as alternativas de projetos, oferecendo suporte aos gestores na tomada de decisão. Além disso, fornecem subsídios valiosos para a formulação de políticas públicas focadas na gestão sustentável da iluminação pública.

1.2. Situação Problema

É indiscutível a preocupação com as novas soluções tecnológicas para aplicações em IP, pois além de viabilizar uma iluminação de qualidade, estas devem ser eficientes na conversão de energia elétrica em luz, e ter uma vida útil longa, e assim reduzir gastos com a manutenção deste sistema (ARAÚJO et al., 2019). Tradicionalmente a IP utiliza lâmpadas de descarga em alta pressão, sendo vapor de sódio e a vapor de mercúrio as mais usadas nos municípios, cerca de 94,7% dos pontos de iluminação existentes no Brasil possuem estas tecnologias instaladas e em efetiva operação (NOGUEIRA et al., 2014).

O parque luminotécnico brasileiro é majoritariamente composto por luminárias com tecnologias baseadas em vapores metálicos, como mercúrio e sódio, que são de baixa eficiência energética, têm vida útil limitada (cerca de seis anos ou até 25.000h) e requerem manutenção frequente. Além disso, essas tecnologias contêm materiais tóxicos, impactando o meio ambiente durante o descarte (BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL).

Atualmente, há uma transição para a tecnologia LED, que oferece maior eficiência energética, reduzindo o consumo em mais de 50%, vida útil superior a 50.000h, e menor impacto ambiental, por não emitir radiação UV e substâncias tóxicas em sua composição, como o mercúrio (BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL).

Vale ressaltar que as lâmpadas que contêm mercúrio, após o uso, são classificadas como resíduos perigosos (Classe 1) pela ABNT NBR N° 10.004/04 (ABNT/CEE-246 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LOGÍSTICA REVERSA, 2004). Diante disto, merecem cuidados especiais quanto aos procedimentos de manuseio (retirada/coleta), acondicionamento, transporte, armazenagem e destinação final, em função das suas características peculiares e dos riscos que apresentam. A contaminação pelo mercúrio pode causar sérios danos à saúde humana e ao meio ambiente, tanto pela exposição direta quanto pela sua ingestão ou inalação. O elemento mercúrio vaporiza à temperatura ambiente e mais rapidamente quando aquecido e o vapor, caso inalado, causa intoxicação (SILVA, 2006). Imaginando-se os centros urbanos cada vez mais populosos a eliminação deste risco faz parte da proteção ao residente destas áreas.

Apesar do uso massivo das lâmpadas de descarga em alta pressão em vias públicas, o uso da tecnologia LED (*Light Emitting Diode*) tem crescido em todo o mundo.

Pode-se citar como exemplo os projetos de iluminação inteligente já implementados nos EUA, França e no Brasil (ARAÚJO et al., 2019). Pode-se dizer que a inserção da tecnologia LED no parque de IP brasileiro, além de melhorar a qualidade da iluminação, também contribui com ações de eficiência energética. Nesse sentido, diversas ações estão sendo implementadas no país, reduzindo os custos de energia com a IP dentro dos municípios. Além disso, a tecnologia LED possui maior vida útil quando comparada com as outras tecnologias, promovendo assim uma redução de custos de manutenção e gestão da IP (ARAÚJO et al., 2019).

Globalmente, a ONU ressalta que a adoção generalizada de lâmpadas de baixo consumo poderia gerar uma economia anual de 120 bilhões de dólares. Em resposta a desafios como esse, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável foi estabelecida em 2015, congregando líderes mundiais em torno de um conjunto de metas universais que visam transformar a sociedade nos próximos 15 anos (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2015). Esta agenda integra as dimensões econômica, social e ambiental de maneira equilibrada, buscando um desenvolvimento verdadeiramente sustentável. Composta por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, a Agenda 2030 orienta ações em áreas essenciais para a humanidade e o planeta. Dentre os objetivos, destaca-se a necessidade de, até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos, promover práticas empresariais sustentáveis e incentivar compras públicas que favoreçam a sustentabilidade. Essas metas refletem a motivação central deste estudo (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2015).

A Eletrobrás, por meio do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) Reluz, tem promovido iniciativas para o desenvolvimento de sistemas eficientes de iluminação pública (IP). Uma das iniciativas recentes do Procel Reluz, em consonância com o 4º Plano de Aplicação de Recursos do Procel, destinou cerca de R\$ 55,6 milhões para a modernização da iluminação pública, com foco na substituição de luminárias convencionais por luminárias de LED. Esse investimento, direcionado ao período de 2022-2023, faz parte dos esforços contínuos do programa, que desde o ano 2000 já possibilitou a substituição de mais de 2,8 milhões de pontos de iluminação em aproximadamente 1.500 municípios. Além de promover a redução no consumo de energia, o programa também visa valorizar os espaços públicos, ampliando a segurança e incentivando o uso de áreas beneficiadas pela nova iluminação (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022).

Além das iniciativas como o Procel Reluz, outra abordagem estratégica que vem

ganhando força no Brasil para a gestão de iluminação pública é a Parceria Público-Privada (PPP). Esse modelo de contrato de longo prazo integra a modernização, expansão, operação e manutenção dos sistemas de iluminação, muitas vezes viabilizados através de financiamento privado. As PPPs, especialmente no contexto da iluminação pública, têm sido formalizadas como concessões administrativas, conforme previsto na Lei Federal 10.079/2004 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2004). Nesse arranjo, o parceiro privado assume a responsabilidade por atualizar e gerir a infraestrutura de iluminação do município, com o compromisso de alcançar metas específicas de desempenho e eficiência energética, em troca de uma remuneração periódica paga pelo poder público. Esse pagamento é condicionado ao cumprimento dos critérios de qualidade e eficiência acordados, assegurando que os benefícios gerados, como a redução no consumo de energia, sejam revertidos para a sociedade ao longo do tempo.

No Brasil, Parcerias Público-Privadas (PPP) têm sido implementadas em diversos municípios com o objetivo de modernizar a infraestrutura de iluminação pública e reduzir os custos operacionais por meio de tecnologias mais eficientes, como as luminárias de LED. Tais iniciativas permitem que as prefeituras obtenham suporte técnico e financeiro para a modernização dos sistemas de iluminação urbana, promovendo uma gestão mais sustentável e eficiente.

Um exemplo emblemático é o projeto de Belo Horizonte (MG), que estabeleceu uma PPP em 2017, com a meta de substituir mais de 182 mil pontos de luz por luminárias LED e de assegurar a operação e manutenção do sistema por um período de 20 anos. Esse contrato, avaliado em aproximadamente R\$ 1,4 bilhão, destaca-se pela ampla modernização e eficiência energética do parque luminotécnico da cidade, oferecendo uma solução integrada que inclui desde a atualização tecnológica até o monitoramento contínuo da iluminação pública. Esse modelo de gestão exemplifica uma abordagem estratégica para superar desafios comuns à iluminação urbana, proporcionando benefícios em termos de economia de energia e qualidade do serviço, além de servir de referência para outras cidades que buscam soluções sustentáveis e de longo prazo na gestão de seus sistemas de iluminação (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - MG, 2018).

Recentemente, São Luís (MA) passou por uma significativa modernização em seu sistema de iluminação pública, tornando-se um exemplo de como a tecnologia LED pode transformar a gestão urbana. Por meio do projeto de Parceria Público-Privada (PPP), a capital maranhense substituiu suas luminárias convencionais por aproximadamente 80 mil luminárias de LED, com o objetivo de aumentar a eficiência energética e reduzir

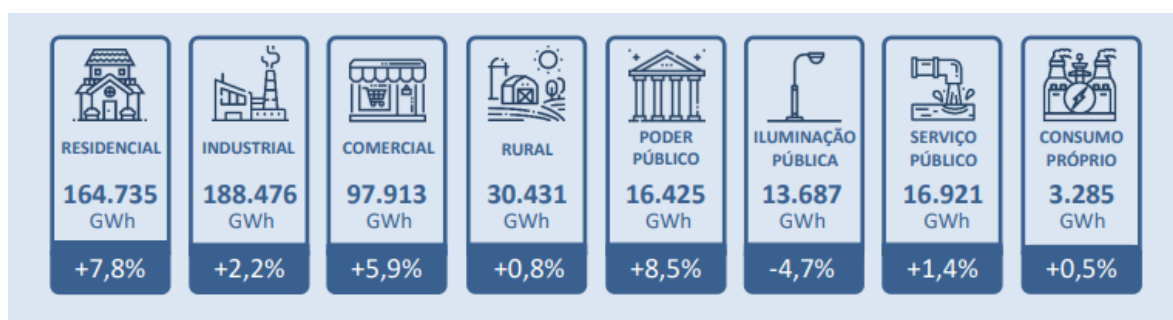
custos operacionais a longo prazo. Além dos benefícios em economia de energia, a modernização trouxe melhorias na segurança pública e valorização dos espaços urbanos, uma vez que a nova iluminação proporciona uma visibilidade mais clara e homogênea nas vias públicas, contribuindo para a qualidade de vida da população local (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2024).

Esses exemplos de modernização em Belo Horizonte e São Luís refletem um esforço nacional para otimizar o consumo de energia em iluminação pública.

De acordo com o Anuário da Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2024), o consumo de energia por classe apresentou, em 2023, um aumento em sete das oito categorias analisadas, sendo a única exceção a classe de Iluminação Pública. Esse resultado pode refletir o impacto positivo dos esforços de modernização da iluminação pública, com a implementação de luminárias de LED, que consomem menos energia e, assim, contribuem para a diminuição da demanda nesse segmento. Projetos como os apoiados pelo Procel Reluz reforçam essa tendência, cumprindo o objetivo de otimizar o consumo energético em áreas urbanas.

Contudo, a elevação do consumo nas demais classes reflete mudanças nas dinâmicas energéticas, e as variações registradas destacam a necessidade de políticas de eficiência energética que atendam aos setores de maior demanda. Em particular, a classe de Iluminação Pública apresentou uma queda de -4,7% no consumo, sugerindo um efeito positivo das estratégias de eficiência adotadas. A Figura 1 ilustra a variação de consumo por categoria em 2023, enfatizando a queda observada em Iluminação Pública em contraste com o crescimento em outras classes.

Figura 1 - Variação no consumo de energia por categoria em 2023



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2024).

Além disso, a distribuição do consumo de energia em 2023, conforme apresentada na Figura 2, fornece uma visão abrangente sobre os setores que mais demandaram

energia, identificando áreas prioritárias para ações de sustentabilidade. Esse panorama reforça a importância de investimentos contínuos em tecnologias eficientes, como as luminárias de LED, principalmente para serviços essenciais como a iluminação pública, que exerce um papel significativo na demanda energética geral. A Figura 2 ilustra a distribuição do consumo de energia em 2023, evidenciando as variações de distribuição do consumo em cada segmento.

Figura 2 - Distribuição do consumo de energia em 2023



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2024).

Diante desse contexto, a presente pesquisa adota uma abordagem interdisciplinar e multicritérios de suporte à decisão para a gestão sustentável da iluminação pública, combinando o Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) com a modelagem por Redes Bayesianas. Essa metodologia original busca orientar os gestores públicos na seleção de projetos de modernização que utilizem tecnologia LED, considerando múltiplos critérios de sustentabilidade. A integração entre a análise hierárquica e a modelagem probabilística permite uma avaliação criteriosa e abrangente dos fatores críticos, facilitando a escolha de soluções que conciliem eficiência, eficácia e impacto ambiental reduzido. Dessa forma, a pesquisa oferece um suporte técnico robusto para a tomada de decisões sustentáveis e para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à modernização eficiente da iluminação pública.

1.3. Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é desenvolver uma proposta metodológica interdisciplinar, combinando a técnica de tomada de decisão AHP com a modelagem por Redes Bayesianas, para criar uma solução híbrida que auxilie gestores públicos na seleção de projetos sustentáveis de iluminação pública, utilizando tecnologia LED, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais.

1.4. Objetivos Específicos

Neste contexto, são delineados alguns objetivos específicos, apresentados a seguir:

1. Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre gestão sustentável da iluminação pública e métodos multicritérios, identificando lacunas e oportunidades para a aplicação de AHP e Redes Bayesianas.
2. Desenvolver um questionário e conduzir grupos focais com especialistas e stakeholders para identificar e hierarquizar os critérios relevantes na seleção de projetos de iluminação pública com tecnologia LED.
3. Aplicar a técnica de tomada de decisão AHP para priorizar os critérios identificados, determinando a importância relativa de cada um na seleção de projetos de iluminação pública.
4. Implementar a modelagem por Redes Bayesianas utilizando o *software HUGIN* para integrar os resultados do AHP e analisar as inter-relações entre os critérios, simulando diferentes cenários de decisão.
5. Validar a proposta metodológica híbrida através de estudos de caso ou simulações, avaliando a eficácia da combinação de AHP e Redes Bayesianas na tomada de decisões para projetos de iluminação pública.
6. Elaborar recomendações para gestores públicos sobre a aplicação da metodologia desenvolvida, destacando as melhores práticas para a seleção de projetos de iluminação pública sustentável.

1.5. Questão da Pesquisa

Diante da situação problema e considerando o objetivo geral e os objetivos específicos previamente descritos, a questão de pesquisa principal formulada foi:

"Segundo a literatura, quais são os fatores críticos de sucesso que levam alguns municípios a implantarem a gestão sustentável na iluminação pública?"

Essa questão busca explorar as condições e práticas que distinguem os municípios bem-sucedidos na implementação da gestão sustentável da iluminação pública. Embora a literatura aborde diversas estratégias e desafios para a adoção de práticas sustentáveis, ainda há uma lacuna significativa no entendimento dos fatores específicos que contribuem para o sucesso dessas iniciativas em contextos municipais. A investigação desses fatores críticos visa identificar as melhores práticas e fornecer subsídios para a formulação de políticas públicas que incentivem a adoção de soluções eficazes e sustentáveis em outros municípios.

Além disso, foi realizada uma análise com base em redes bayesianas com os grupos focais, onde as probabilidades dos fatores foram definidas por meio da seguinte pergunta adicional:

"De acordo com sua experiência em projetos de iluminação pública, qual a probabilidade de os seguintes fatores serem priorizados nestes projetos?"

Essa segunda pergunta permitiu a integração das percepções práticas dos especialistas com os critérios identificados na pesquisa, fornecendo uma base sólida para a modelagem probabilística e a priorização dos fatores críticos na gestão sustentável da iluminação pública.

1.6. Aderência a Interdisciplinaridade

A presente pesquisa demonstra aderência ao aspecto da Interdisciplinaridade proposta pelo Programa de Doutorado em Sistemas de Gestão Sustentáveis, por meio da proposta de abordagem da identificação, levantamento e da aplicação de práticas sustentáveis na gestão pública, especificamente na iluminação pública com tecnologia LED. Alinhada com os objetivos do programa, a pesquisa contribui para o desenvolvimento de soluções inovadoras que equilibram os aspectos econômicos,

ambientais e sociais, promovendo a sustentabilidade como um fator central na tomada de decisões.

Nesse aspecto, o estudo propõe uma metodologia interdisciplinar que integra técnicas de tomada de decisão, como o AHP e as Redes Bayesianas, visando desenvolver ferramentas que apoiem gestores públicos na seleção de projetos de iluminação pública sustentáveis, contribuindo para a pesquisa aplicada e a promoção de soluções eficientes no contexto da gestão pública. Essa abordagem não apenas reforça os princípios de sustentabilidade, mas também está em consonância com o compromisso do programa de formar profissionais capazes de implementar e gerenciar sistemas sustentáveis em diferentes contextos.

Além disso, a pesquisa responde à demanda crescente por soluções que contribuam para o desenvolvimento urbano sustentável, um dos focos centrais do programa, e oferece um exemplo prático de como a gestão sustentável pode ser aplicada em políticas públicas, promovendo benefícios tangíveis para a sociedade.

1.7. Contribuição e Originalidade

A presente pesquisa se estrutura numa abordagem original que consiste em uma proposta de solução metodológica híbrida, que combina os métodos multicritérios AHP e Redes Bayesianas, com o objetivo de apoiar gestores públicos na tomada de decisões sobre projetos de iluminação pública sustentável com tecnologia LED.

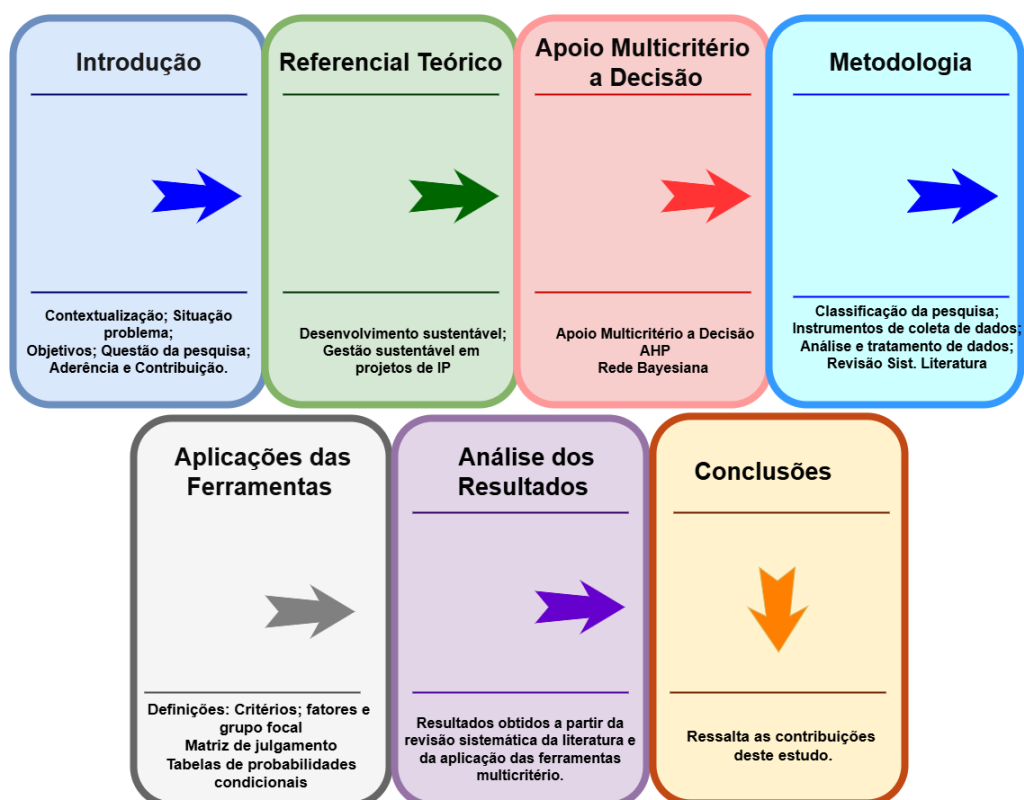
A principal contribuição prática deste estudo está no desenvolvimento de uma ferramenta que permite aos gestores tomarem decisões mais informadas e equilibradas, considerando de forma integrada os critérios técnicos, econômicos e ambientais, com a sustentabilidade como foco central.

Além disso, a pesquisa oferece uma análise detalhada das vantagens e desvantagens associadas aos impactos técnicos, econômicos, sociais e ambientais dos projetos de iluminação pública, proporcionando um suporte metodológico essencial para os municípios. Essa contribuição é especialmente relevante no contexto atual, em que a demanda por soluções eficientes e sustentáveis cresce continuamente, mas frequentemente carece de métodos robustos para fundamentar a tomada de decisão.

1.8. Estrutura da Tese

A estrutura desta tese foi planejada para abordar os objetivos de forma sequencial e organizada, facilitando o entendimento das diferentes etapas de pesquisa e análise. O trabalho está dividido em capítulos que progridem desde a introdução até a conclusão. A Figura 3 apresenta a sequência e inter-relação dos capítulos e seções que compõem a tese, permitindo uma visualização clara da estrutura adotada e dos caminhos metodológicos seguidos.

Figura 3 - Estrutura da tese



Fonte: Elaborado pela autora.

A introdução estabelece o contexto do tema, define a situação-problema e detalha os objetivos gerais e específicos, a questão de pesquisa, a aderência ao PPSIG e a contribuição da pesquisa.

O referencial teórico aborda o desenvolvimento sustentável e a gestão sustentável em projetos de iluminação pública. Em seguida, é apresentada a base conceitual dos métodos multicritério, com ênfase na Análise Hierárquica de Processo (AHP) e na modelagem por Redes Bayesianas, fundamentais para a análise.

A metodologia de pesquisa descreve a classificação, os instrumentos de coleta de dados, a análise e tratamento dos dados, bem como uma revisão sistemática da literatura com suas atualizações e análise dos resultados.

Em sequência, são exploradas as aplicações das ferramentas multicritério na análise e apoio à tomada de decisão, seguidas pela análise e síntese dos resultados obtidos. As conclusões sintetizam as principais descobertas e contribuições da pesquisa, enquanto a seção de apresentações e publicações resume as contribuições acadêmicas e profissionais do estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda o desenvolvimento sustentável e sua aplicação em projetos de iluminação pública. Inicialmente, serão discutidos os conceitos fundamentais de desenvolvimento sustentável, com ênfase em seu papel nas políticas públicas e na gestão urbana. Em seguida, será explorada sua relevância para projetos de iluminação pública, destacando a importância de tecnologias eficientes, como o uso de LEDs, na promoção de economias de energia e redução de impactos ambientais. Essa revisão visa fornecer uma base teórica sólida para as discussões e análises realizadas ao longo da pesquisa.

2.1 Desenvolvimento Sustentável

Nas últimas décadas, o termo desenvolvimento sustentável tem ganhado crescente relevância no cenário global. As autoridades mundiais vêm debatendo alternativas para reduzir o consumismo, otimizar o uso dos recursos naturais e minimizar os impactos ambientais, com o objetivo de promover uma melhor qualidade de vida. Essas discussões buscam soluções que equilibrem o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental, alinhando-se à urgência de enfrentar os desafios globais contemporâneos.

O conceito de desenvolvimento sustentável foi formalmente definido no Relatório Brundtland de 1987, também conhecido como *Nosso Futuro Comum*, elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. O relatório apresenta o desenvolvimento sustentável como aquele que *"responde às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades"* (EUROPEAN UNION, 2023). Dessa forma, o conceito busca conciliar o crescimento econômico com a inclusão social e a gestão ambiental, fornecendo uma base para a formulação de políticas públicas em diversas regiões, como a União Europeia (UE). O desenvolvimento sustentável está formalmente incluído como um dos objetivos de longo prazo da UE, conforme disposto no artigo 3º do Tratado da União Europeia (EUROPEAN UNION, 2023).

O Relatório Brundtland, também destacou os riscos do uso descontrolado dos recursos naturais, sem considerar a capacidade dos ecossistemas de suportar esse consumo excessivo. Em resposta a esse cenário, o relatório sugeriu que os países em desenvolvimento deveriam buscar um modelo de crescimento econômico mais

sustentável, equilibrando a expansão com a preservação dos recursos naturais. Essa recomendação foi um marco importante nas discussões sobre a sustentabilidade global, apontando para a necessidade urgente de se adotar práticas que respeitem os limites ecológicos do planeta (FERREIRA PIMENTA; NARDELLI, 2016).

As três dimensões fundamentais para o desenvolvimento sustentável identificadas no Relatório Brundtland - social, ambiental e econômica – servem como pilares centrais da Agenda 2030 da ONU, lançada décadas depois. A Agenda, com seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promove uma abordagem integrada que conecta essas três dimensões, reforçando a ideia de que o desenvolvimento sustentável só será possível através de ações conjuntas de governos, sociedade civil, setor privado e indivíduos. Portanto, os objetivos e metas da Agenda 2030 visam garantir que as necessidades do presente sejam atendidas sem comprometer a capacidade das gerações futuras de prosperar (ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS ADMINISTRATIVAS E MARKETING - ECAM).

Os ODS, estabelecidos pela Organização das Nações Unidas em 2015, constituem uma agenda global para promover um futuro mais justo e sustentável. Ao todo, são 17 objetivos que abordam diversas questões sociais, econômicas e ambientais, visando erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir a prosperidade para todos. Dentre esses objetivos, o ODS 11 - que se refere a "Cidades e Comunidades Sustentáveis" - é particularmente relevante para esta pesquisa. Esse objetivo enfatiza a necessidade de tornar as cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, incluindo a promoção de sistemas de transporte sustentáveis e a garantia de acesso a serviços básicos, como iluminação pública eficiente, crucial para a segurança e a qualidade de vida nas áreas urbanas. Assim sendo, o ODS 11 serve como uma diretriz fundamental para o desenvolvimento de práticas de gestão sustentável na iluminação pública (ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS ADMINISTRATIVAS E MARKETING - ECAM).

Com relação aos desafios globais que afetam a sustentabilidade estão interconectados e incluem questões sociais, ambientais e econômicas. A mudança climática, provocada pela emissão de gases de efeito estufa, resulta em eventos climáticos extremos e ameaça a segurança alimentar e a subsistência de milhões (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2021). Além disso, a desigualdade social e econômica

agrava esses impactos, especialmente para as populações vulneráveis, limitando o acesso a recursos essenciais e dificultando a adaptação às novas condições climáticas (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME - UNDP, 2019). Outro ponto relevante é que a desigualdade de gênero representa um obstáculo, pois mulheres em países em desenvolvimento enfrentam desastres ambientais com menos suporte (UN WOMEN).

A degradação ambiental, com a perda de biodiversidade e a poluição, compromete a resiliência dos ecossistemas e afeta a saúde humana (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP). Ao mesmo tempo, a governança global enfrenta dificuldades em coordenar respostas eficazes a crises simultâneas, e a rápida evolução de tecnologias sem regulação adequada aumenta os riscos de exploração insustentável dos recursos naturais (UNITED NATIONS). Portanto, esses desafios exigem ações integradas e colaborativas para promover um desenvolvimento sustentável acessível a todos.

Nesse contexto, abordagens inovadoras, como a Economia Circular, emergem como soluções viáveis para enfrentar esses desafios. A Economia Circular propõe um sistema no qual os produtos são projetados para ter uma vida útil prolongada, e os resíduos gerados são reintegrados ao ciclo produtivo como novos insumos, minimizando o impacto ambiental e gerando novas oportunidades de negócios (TIOSSI; SIMON, 2021).

O conceito de ESG (*Environmental, Social, and Governance*) também tem se destacado como uma abordagem para decisões de investimento sustentável. As práticas empresariais estão sendo moldadas com base em questões ambientais, sociais e de governança, promovendo práticas mais responsáveis e justas, que contribuem para um futuro mais equitativo e sustentável (IRIGARAY; STOCKER, 2022).

Com a realização da Cúpula do Futuro em 2024, as nações se reuniram para discutir soluções para os desafios globais, reafirmando o compromisso com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O evento teve como foco o fortalecimento da governança global, com ênfase na necessidade de promover uma maior colaboração entre os países do Sul Global, especialmente no que diz respeito ao Conselho de Segurança da ONU. Além disso, temas como a aceleração dos ODS e a utilização de tecnologias para promover a inclusão digital e reduzir as lacunas globais foram abordados, com o objetivo de garantir um desenvolvimento mais justo e sustentável para todos. O evento também destacou a importância de criar uma arquitetura financeira internacional mais justa e

incluir os jovens nas decisões globais, reforçando a necessidade de ações integradas para enfrentar os desafios persistentes (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2024).

O Quadro 1 resume eventos significativos que moldaram a discussão sobre sustentabilidade desde 1972, oferecendo uma visão clara da evolução do pensamento e das políticas em relação ao desenvolvimento sustentável. Esses eventos refletem as principais etapas na trajetória global, evidenciando marcos históricos, como a Conferência de Estocolmo, o Relatório Brundtland, as várias Cúpulas Rio+ e a formulação da Agenda 2030, até eventos mais recentes, como o Acordo de Paris e a Cúpula do Futuro de 2024.

Quadro 1 - Eventos Significativos que Moldaram a Discussão sobre Sustentabilidade (1972-2024)

Ano	Evento	Descrição	Impacto na Sustentabilidade
1972	Conferência de Estocolmo, na Suécia.	Primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano.	Reconheceu a necessidade de proteção ambiental no desenvolvimento e criou o PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente).
1982	Lançamento do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA)	Criação formal do PNUMA, órgão responsável por coordenar ações ambientais dentro do sistema ONU.	Promoveu a cooperação ambiental global e incentivou a adoção de práticas sustentáveis.
1987	Relatório Brundtland	Relatório "Nosso Futuro Comum", da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento.	Definiu o conceito de desenvolvimento sustentável, enfatizando a integração entre economia, sociedade e ambiente.
1992	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e o Desenvolvimento - (Rio-92)	Acordo que resultou na Agenda 21 e nas Convenções sobre Mudança Climática e Diversidade Biológica.	Estabeleceu bases para a ação ambiental integrada, consolidando o princípio das responsabilidades comuns, mas diferenciadas.
1997	Conferência Rio+5	Revisão dos avanços e desafios da implementação da Agenda 21, cinco anos após a Rio-92.	Destacou a necessidade de maior envolvimento dos governos e da sociedade na

			execução das políticas ambientais.
2000	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM)	Estabelecimento de metas globais para erradicar a pobreza extrema e promover o desenvolvimento sustentável.	Criou um framework para medir progresso e incentivar políticas públicas em todo o mundo.
2002	Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável - Rio+10	Reunião em Joanesburgo para avaliar os resultados desde a Rio-92 e propor novos compromissos para o século XXI.	Enfatizou a integração das dimensões social, econômica e ambiental.
2007	Conferência Rio+15	Evento focado em examinar o progresso e as falhas na implementação dos objetivos acordados nas reuniões anteriores.	Evidenciou a necessidade de ações mais concretas e efetivas para combater a degradação ambiental.
2012	Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20)	Revisão dos progressos e compromissos desde a Rio-92, resultando no documento "O Futuro que Queremos".	Lançou as bases para a formulação dos ODS e para uma nova visão de economia verde.
2015	Agenda 2030 e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	Substituição dos ODM por 17 ODS, com metas mais amplas e focadas na integração das três dimensões da sustentabilidade.	Estruturou uma agenda global de desenvolvimento para promover um futuro inclusivo e sustentável até 2030.
2015	Acordo de Paris	Acordo global firmado na COP21 para limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais.	Consolidou o compromisso global com a redução de emissões de carbono e adaptação climática.
2019	Conferência do Clima (COP25)	Realizada em Madri, com foco em finalizar o livro de regras do Acordo de Paris e discutir a implementação.	Reforçou a necessidade de acelerar a ambição climática e o financiamento para adaptação.
2021	Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP26)	Reunião em Glasgow para avaliar os compromissos climáticos e definir novos planos de ação até 2030.	Estabeleceu o "Pacto Climático de Glasgow", reafirmando metas de redução de emissões e financiamento climático.

2022	Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP27)	Realizada em Sharm el-Sheikh, Egito, com foco em "Implementação", tratando de adaptação, perdas e danos climáticos.	Criou um novo fundo de perdas e danos para apoiar países vulneráveis.
2024	Cúpula do Futuro	Reunião global para discutir ações e compromissos para um futuro sustentável, abordando desafios emergentes.	Destaca-se como um marco de reflexão e realinhamento dos compromissos globais com a sustentabilidade.

Fonte: Adaptado de Serrão; Almeida e Carestiato (2020), com atualizações sobre as Conferências realizadas entre 2021 e 2024.

2.2 Gestão Sustentável em Projetos de Iluminação Pública

A gestão sustentável da iluminação pública é essencial para garantir que os municípios ofereçam serviços eficientes e econômicos, minimizando impactos ambientais e promovendo a segurança e inclusão social. A administração da iluminação pública nos municípios pode ser realizada de três formas principais: (1) diretamente, com equipes próprias; (2) através da contratação de serviços para operação e manutenção, conforme regulado pela Lei 8.666/1993, atualizada pelo SENADO FEDERAL (2021); ou (3) por meio de delegação total, que envolve tanto investimentos quanto a prestação do serviço, à iniciativa privada através de parcerias público-privadas (PPP)(BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL).

Dado o contexto de preocupações como segurança pública, impactos ambientais e altos custos de energia elétrica, os municípios buscam alternativas para enfrentar esses desafios. Para um planejamento eficaz de um sistema de iluminação pública, é fundamental considerar fatores como sustentabilidade, economia, manutenção, segurança, durabilidade e controle de qualidade (KAYASIMA, 2024). A possibilidade de prolongar a vida útil das luminárias e aprimorar a gestão dos recursos municipais são aspectos que contribuem para a sustentabilidade e eficácia do sistema implantado (KAYASIMA, 2024). Investir em soluções sustentáveis para a iluminação pública é, portanto, essencial para o desenvolvimento de cidades mais inteligentes, resilientes e ambientalmente responsáveis.

A regulação da iluminação pública pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) se limita à relação entre as concessionárias de energia elétrica e os municípios,

abrangendo contratos de fornecimento, medição do consumo, tarifas e seus reajustes, bem como, o uso da tarifa especial de iluminação pública (B4a). No entanto, a responsabilidade de definir como o serviço de iluminação pública será prestado, incluindo parâmetros de qualidade e tecnologia utilizada, é de competência municipal. Não existem diretrizes obrigatórias a nível estadual ou federal para a operação desse serviço (BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL).

Recentemente, o serviço público de iluminação tem passado por transformações significativas nas esferas institucional, regulatória e tecnológica. A adoção de tecnologias como luminárias LED está revolucionando o setor, oferecendo economias substanciais de energia, reduzindo impactos ambientais e diminuindo custos de manutenção, beneficiando diretamente os contribuintes. Além dessas vantagens, a qualidade do serviço é crucial para a segurança comunitária, especialmente para grupos vulneráveis como mulheres, e para a implementação de elementos de cidades inteligentes. Projetos de iluminação pública não apenas aprimoram a iluminação urbana, mas também valorizam o espaço público, promovem o uso eficiente da energia e contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa e da poluição luminosa (ACOSTA, 2022).

No contexto atual, a consciência ambiental torna o impacto da iluminação pública um ponto crítico para práticas sustentáveis. A transição para lâmpadas LED reduz significativamente o consumo de energia, diminuindo a pegada de carbono e alinhando-se com metas de combate às mudanças climáticas. Além de sua eficiência energética, as lâmpadas LED têm uma vida útil muito mais longa do que as tecnologias tradicionais (IP MINAS, 2024). Essa durabilidade resulta em menos substituições, reduzindo a quantidade de resíduos gerados e minimizando o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida das lâmpadas. Portanto, a utilização de LEDs oferece uma solução sustentável e econômica a longo prazo para os sistemas de iluminação pública (IP MINAS, 2024).

A sustentabilidade na iluminação pública abrange três dimensões: ambiental, econômica e social. Ambientalmente, refere-se à redução do consumo de energia, diminuindo a utilização de recursos naturais e a emissão de CO₂. Economicamente, é alcançada pela diminuição dos gastos com energia e pelo planejamento eficiente, que possibilita investimentos que melhoram o sistema e beneficiam as cidades como um todo. Socialmente, é garantida pela eficácia na prestação dos serviços e pela oferta de um serviço de qualidade acessível a toda a população (SALVIA, 2016). Em resumo, a

sustentabilidade na iluminação pública é um componente essencial para a gestão sustentável das cidades. A Figura 4 demonstra como a eficiência é um elemento fundamental em cidades sustentáveis e inteligentes, com um foco específico na iluminação pública.

Figura 4 - Relações envolvidas na sustentabilidade da iluminação pública



Fonte: Salvia (2016)

A iluminação pública eficiente, aliada à adoção de tecnologias inteligentes, desempenha um papel crucial na construção de cidades sustentáveis. A integração de soluções como a eficiência energética no sistema de iluminação contribui para a redução do consumo de energia e das emissões de carbono, além de melhorar a qualidade de vida urbana. Essas ações estão diretamente ligadas ao conceito de cidades inteligentes, que buscam otimizar recursos e promover a sustentabilidade através de inovações tecnológicas. Dessa forma, a relação entre iluminação pública, eficiência energética e o desenvolvimento de cidades sustentáveis forma um ciclo positivo que impulsiona a transformação urbana alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 11, que visa cidades mais resilientes e sustentáveis.

3. APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO

O Apoio Multicritério à Decisão (MCDA, na sigla em inglês para *Multi-Criteria Decision Analysis*) é uma abordagem que visa auxiliar a tomada de decisão em cenários complexos, onde múltiplos critérios, frequentemente conflitantes, precisam ser considerados simultaneamente. A principal vantagem dos métodos MCDA é sua capacidade de integrar e avaliar tanto critérios quantitativos quanto qualitativos, proporcionando uma estrutura robusta para decisões em ambientes incertos ou com diversos interesses em jogo (BELTON; STEWART, 2002).

Dentro do MCDA, diversos métodos são utilizados para abordar diferentes aspectos da tomada de decisão. Entre os mais proeminentes estão o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), o TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), o PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) e o ELECTRE (*Elimination and Choice Expressing Reality*). Cada um desses métodos possui características distintas que os tornam apropriados para diferentes contextos de decisão.

O AHP, desenvolvido por Saaty (1980), é notável por sua capacidade de hierarquizar critérios e alternativas ou fatores com base na percepção subjetiva dos tomadores de decisão. Essa abordagem permite estruturar decisões complexas em uma hierarquia clara de critérios e subcritérios, facilitando a priorização das alternativas ou fatores. As Redes Bayesianas, por outro lado, são particularmente eficazes na modelagem de incertezas e na análise de relações probabilísticas entre variáveis. Elas proporcionam uma visão dinâmica e flexível sobre as dependências e probabilidades associadas às alternativas (PEARL, 1988a).

O TOPSIS, proposto por Yoon (1981), classifica alternativas com base em sua proximidade em relação a uma solução ideal. Esse método avalia a distância das alternativas ao melhor e ao pior cenário possível, ajudando a identificar a alternativa mais próxima do ideal. O PROMETHEE é valorizado pela sua simplicidade e eficácia em comparar alternativas com base em preferências ordenadas, enquanto o ELECTRE é utilizado para eliminar opções que não atendem a critérios mínimos, sendo mais adequado para cenários com restrições rigorosas (ROY, 1991).

Além desses métodos, a aplicação de MCDA requer uma análise meticulosa das variáveis envolvidas, bem como uma definição clara das prioridades e objetivos do

projeto. A escolha dos métodos e critérios é crucial para garantir que os resultados da análise multicritério sejam consistentes e representem fielmente as necessidades e metas do projeto. Os métodos multicritério têm aplicação em diversas áreas, como energia, gestão pública e infraestrutura urbana, onde decisões complexas envolvem a consideração de critérios ambientais, econômicos e sociais, entre outros.

Para os objetivos desta pesquisa, foram escolhidos dois métodos complementares: a Análise Hierárquica de Processos (AHP) e as Redes Bayesianas. O AHP foi selecionado devido à sua robustez na estruturação de decisões complexas e na ponderação de múltiplos critérios, essencial para a análise detalhada das alternativas ou fatores em consideração. Já as Redes Bayesianas foram escolhidas para incorporar e gerenciar incertezas, oferecendo uma abordagem probabilística para avaliar as interdependências entre os critérios e as alternativas ou fatores. A combinação desses métodos proporcionará uma base sólida e abrangente para a análise das alternativas ou fatores e a tomada de decisões mais consistentes e fundamentadas.

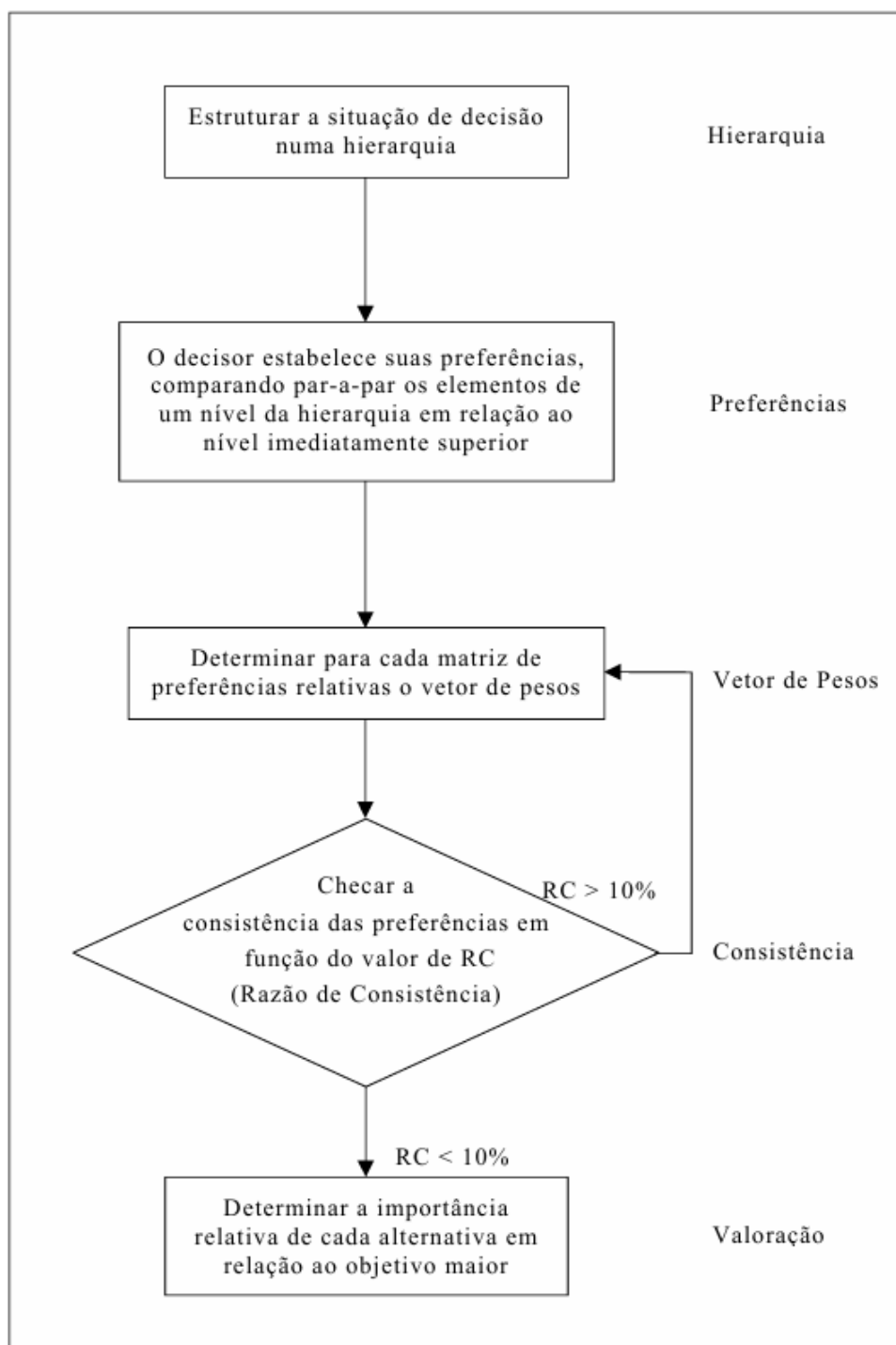
Dado que o AHP e as Redes Bayesianas são os métodos escolhidos para a análise multicritério nesta pesquisa, nos próximos tópicos, serão detalhadas as características e as aplicações de cada um desses métodos, iniciando com a Análise Hierárquica de Processos (AHP).

3.1. Análise Hierárquica de Processo (AHP)

O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), proposto por Tomas L. Saaty no início da década de 1970, é amplamente utilizado para apoiar a tomada de decisão em problemas com múltiplos critérios, principalmente por à sua simplicidade de aplicação (SALVIA et al., 2019). Esse método organiza o problema em níveis hierárquicos, que incluem o objetivo, os critérios e os fatores, facilitando a compreensão por parte dos tomadores de decisão (MARINS; SOUZA; BARROS, 2009).

O AHP possibilita a construção de uma estrutura hierárquica, que abrange a ordenação de julgamentos, critérios e subcritérios, proporcionando uma visão clara e objetiva das preferências dos tomadores de decisão. A Figura 5 resume os principais passos dessa metodologia no processo decisório (NOGUEIRA, 2002).

Figura 5 - Fluxograma Geral do AHP



Fonte: Nogueira (2002)

Tradicionalmente, a hierarquia no AHP é linear, ou seja, organizada de forma simples, onde um nível de elementos está diretamente ligado ao nível superior. Contudo, também é possível trabalhar com hierarquias não lineares, que podem apresentar arranjos

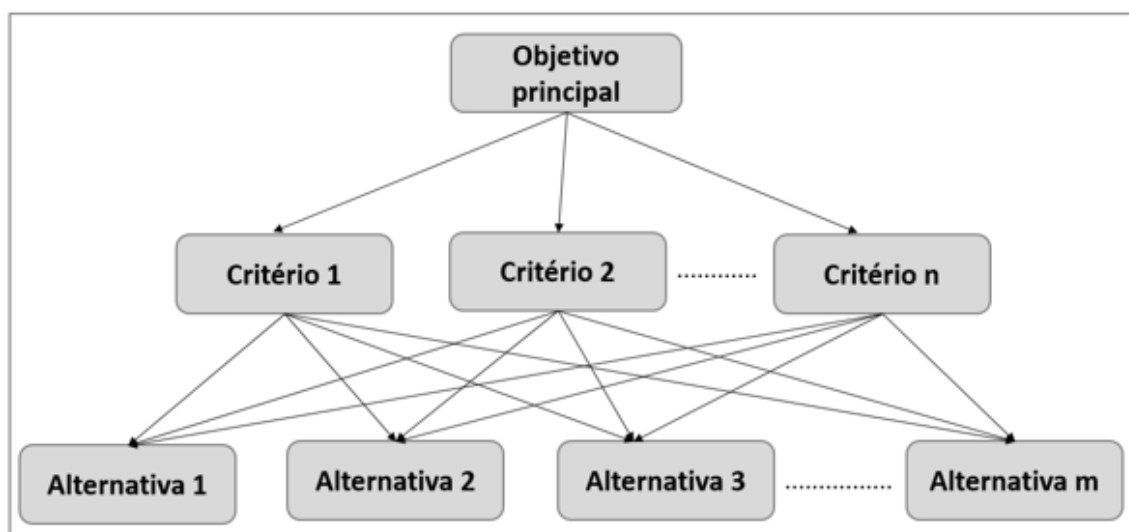
circulares, nos quais um nível inferior pode influenciar um nível superior, mantendo ainda uma relação de dominância.

Uma hierarquia simples no AHP pode ser decomposta em três níveis principais:

- Objetivo geral;
- Critérios;
- Alternativas ou Fatores.

A Figura 6 ilustra a estrutura do objetivo, critérios e alternativas proposta pelo método AHP.

Figura 6 - Estrutura hierárquica do método AHP



Fonte: Adaptado de Marins, Souza e Barros (2009).

A quantificação dos julgamentos paritários no AHP utiliza a Escala Fundamental de Saaty, uma escala de nove níveis que pode ser aplicada tanto de forma numérica quanto qualitativa. Especialistas realizam comparações par a par entre os critérios com base nessa escala. Após os julgamentos, o AHP calcula a consistência das avaliações para garantir a coerência. Quando a Razão de Consistência (RC) é igual ou inferior a 10%, os julgamentos são considerados consistentes (SAATY, 1990).

Etapas do Método AHP, conforme Saaty (2008) e Solangi; Longsheng e Shah (2021):

- Definição do problema e do objetivo.
- Estruturação da hierarquia do problema em níveis (objetivo, critérios e alternativas ou fatores). Para fins de padronização, o termo “fatores” será utilizado para se referir às alternativas ao longo deste trabalho.
- Comparações par a par entre os critérios, utilizando a Escala Fundamental de Saaty.
- Construção da matriz de comparação.
- Cálculo dos pesos por normalização e vetor de prioridade.
- Verificação da consistência por meio do Índice de Consistência (IC) e do Índice de Consistência Aleatória (ICA).

No método AHP, após a definição do problema e a estruturação da hierarquia, os critérios e fatores são comparados entre si utilizando a Escala Fundamental de Saaty (SAATY, 1980). Essas comparações par a par geram uma matriz de comparação, na qual os elementos são avaliados em termos relativos. Para calcular os pesos dos critérios e fatores, realiza-se a normalização da matriz de comparação, e o vetor de prioridade é obtido pela média dos valores de cada linha, refletindo a importância relativa de cada critério. A consistência das comparações é verificada por meio do Índice de Consistência (IC) e do Índice de Consistência Aleatória (ICA), conforme proposto por Saaty (1987), garantindo a validade dos resultados.

3.2. A Modelagem por Redes Bayesianas

Os primeiros registros de contribuições metodológicas e de aplicações de Redes Bayesianas foram realizados através das pesquisas de Cole (1975), Pearl (1988b), (Jessen (2014), Neil; Littlewood e Fenton (1996). A princípio, os estudos estavam ligados à solução de problemas de sistemas específicos, a partir da criação de redes desenvolvidas com base nos conhecimentos de especialistas sobre o objeto de interesse.

Com o passar dos anos, o estudo das Redes Bayesianas evoluiu, isso se deve aos avanços tecnológicos nos sistemas, tornando-os mais complexos, e gerando assim ambiente mais propício para o desenvolvimento desse método visto os benefícios de seu

uso, como a consideração de dependências funcionais entre os componentes, o comportamento temporal dos sistemas, os múltiplos estados de falha dos componentes e a incerteza no comportamento do sistema e os dados de falha (KABIR; PAPADOPOULOS, 2019).

Segundo Sefrrin; Rubi e Jaques (2013), a Rede Bayesiana (RB) consiste no modelo probabilístico que se aplica a dados incertos e é representada por uma estrutura gráfica denominada Grafo Acíclico Direcionado (DAG, sigla em inglês) ou seja, os arcos não podem formar ciclos. Nessa estrutura, os nós representam as variáveis aleatórias, podendo ser discretas ou contínuas, e os arcos representam a relação de causalidade entre as variáveis, sendo estes unidirecionais (MENÊZES; FIRMINO; DROGUETT, 2005).

Esse modelo probabilístico da RB tem como base o Teorema de Bayes e busca demonstrar a relação entre as variáveis e suas probabilidades (BARUA et al., 2016). Segundo Adedipe; Shafiee; Zio (2020), esse teorema estabelece que, na presença de uma nova evidência, o resultado do sistema deve ser atualizado para considerar essa evidência. Portanto, o Teorema de Bayes calcula a inferência probabilística entre duas variáveis aleatórias, A e B, considerando que B já ocorreu.

Segundo Torres-Toledano; Sucar (1998) e Duim; Lima e Garcia (2021), a RB está segmentada na parte qualitativa, que é representada pelo grafo acíclico composto por nós e arcos, e pela parte quantitativa, que é representada por tabelas de probabilidades condicionais com base no Teorema de Bayes.

Nesse sentido, segundo Sierra et al. (2018), a Rede Bayesiana pode ser a base de um modelo multicritério de apoio à tomada de decisão a partir de três variáveis: a de decisão, a de resultado e a de interconexão. A variável de decisão está relacionada ao tomador de decisão, enquanto a variável de resultado está relacionada às saídas do sistema e por fim, a variável de interconexão expressa a ligação entre as variáveis de decisão e as de resultado (SIERRA et al., 2018).

Portanto, no modelo da Rede Bayesiana, a relação entre as variáveis é representada graficamente, onde os nós indicam as variáveis e os arcos as relações entre elas, com base em uma distribuição de probabilidade. Esse modelo pode ser útil na identificação dos possíveis impactos existentes nos elementos analisados (SIERRA et al., 2018). Segundo Adedipe; Shafiee e Zio (2020), as Redes Bayesianas são eficazes para

apoiar decisões em problemas baseados em históricos e conhecimentos prévios dos sistemas e seus efeitos.

O artigo de Duim; Lima e Garcia (2021) também emprega redes bayesianas para a tomada de decisões em projetos de engenharia, especificadamente na indústria de óleo e gás. A modelagem bayesiana foi essencial para o desenvolvimento de um plano estratégico de manutenções durante períodos de teste e para a mitigação dos riscos associados. O estudo focou na probabilidade de falha do evento "kick" e suas consequências, utilizando a abordagem para estimar incertezas e otimizar a gestão de riscos nesse contexto industrial.

4. METODOLOGIA DE PESQUISA

Este capítulo descreve os métodos e procedimentos adotados para alcançar o objetivo da pesquisa, que foi desenvolver uma solução híbrida para apoiar agentes de decisão pública na seleção de projetos de iluminação pública, com ênfase na aplicação da tecnologia LED. A pesquisa envolveu duas principais etapas metodológicas: a revisão sistemática da literatura e a aplicação de técnicas avançadas de modelagem e tomada de decisão.

4.1. Classificação da Pesquisa

1. Quanto à Natureza

A presente pesquisa é classificada como aplicada, pois busca desenvolver uma solução prática e eficaz para a seleção de projetos de iluminação pública utilizando tecnologia LED. O foco está na aplicação direta dos resultados para melhorar a tomada de decisão em políticas públicas voltadas para a sustentabilidade e eficiência energética.

2. Quanto à Abordagem do Problema

Esta pesquisa adota uma abordagem mista, combinando métodos quantitativos e qualitativos. A abordagem qualitativa foi utilizada na revisão sistemática da literatura, permitindo a identificação e compreensão dos fatores críticos de sucesso para a implantação de uma gestão sustentável na iluminação pública das cidades. Posteriormente, uma abordagem quantitativa foi aplicada ao integrar a técnica de tomada de decisão AHP (*Analytic Hierarchy Process*) com a modelagem por Redes Bayesianas, visando a construção de uma solução híbrida.

3. Quanto aos Objetivos

A pesquisa possui um caráter exploratório e explicativo. Inicialmente, é exploratória, ao investigar e identificar os critérios mais relevantes para a gestão sustentável de projetos de iluminação pública. Em seguida, é explicativa, ao analisar como a integração das técnicas AHP e Redes Bayesianas pode influenciar e aprimorar a tomada de decisão dos agentes públicos.

4. Quanto aos Procedimentos Técnicos

A pesquisa se caracteriza como uma revisão sistemática da literatura, seguida de uma modelagem e simulação. A revisão sistemática foi fundamental para consolidar o conhecimento existente e complementar as escolhas metodológicas. Em seguida, a combinação do AHP com Redes Bayesianas permitiu a construção de um modelo híbrido que oferece suporte sólido para a seleção de luminárias públicas a LED, considerando tanto os critérios hierárquicos quanto as incertezas e interdependências dos critérios.

4.2. Instrumentos de Coleta de Dados

A metodologia adotada nesta pesquisa envolveu múltiplas etapas e instrumentos de coleta de dados, com o objetivo de assegurar a consistência e a confiabilidade dos resultados obtidos. Os principais instrumentos utilizados foram:

1. Revisão Sistemática da Literatura:

Para embasar teoricamente a pesquisa, foi realizada uma revisão sistemática da literatura utilizando a base de periódicos da CAPES. A revisão foi conduzida de acordo com o Protocolo Cochrane, permitindo a identificação e a análise de estudos relevantes sobre gestão sustentável da iluminação pública e os métodos de apoio à decisão aplicáveis. Os critérios de inclusão e exclusão foram rigorosamente definidos, assegurando a relevância e a qualidade dos artigos selecionados.

2. Aplicação do Método AHP:

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) foi empregado para determinar os pesos dos critérios utilizados na seleção de projetos de iluminação pública com tecnologia LED. O método AHP é amplamente utilizado para ordenar alternativas e calcular pesos, conforme demonstrado nos estudos de Wolde et al., (2021) e Ortega-Momtequín; Rubiera-Morollón e Pérez-Gladish (2021). As etapas de aplicação do método AHP foram realizadas conforme os princípios estabelecidos por Saaty (2008) e Solangi; Longsheng e Shah (2021):

1. **Definição do problema e do objetivo** - Determinar claramente o problema a ser resolvido e o objetivo da análise.
2. **Estruturação da hierarquia do problema** - Organizar os critérios e fatores em uma estrutura hierárquica, dividida em níveis (objetivo, critérios e fatores).
3. **Realização das comparações par a par** - Comparar os critérios dois a dois, atribuindo valores com base na Escala Fundamental de Saaty (Tabela 1).
4. **Construção da matriz de comparação** - Registrar os valores das comparações par a par em uma matriz quadrada, representando o peso relativo entre os critérios.
5. **Cálculo dos pesos dos critérios e fatores** - Normalizar a matriz (dividindo cada valor pelo total da coluna) e calcular o vetor de prioridade (média dos valores de cada linha), que representa o peso relativo de cada critério ou fator.
6. **Verificação da consistência da matriz** - Calcular o Índice de Consistência (IC) e o Índice de Consistência Aleatória (ICA) para avaliar a coerência dos julgamentos. A razão de consistência (RC), obtida pela razão entre IC e ICA, deve ser inferior a 0,1 para que os resultados sejam considerados consistentes.

A comparação par a par foi realizada pelo grupo focal com base na Escala Fundamental de Saaty (Tabela 1). A coleta de dados primários foi conduzida por meio de questionários aplicados a grupos focais compostos por especialistas e profissionais atuantes no setor de iluminação pública e gestão sustentável. Os questionários foram elaborados com base nos achados da revisão sistemática da literatura, nas normas regulamentadoras e em casos de sucesso de prefeituras. O objetivo era capturar as percepções e prioridades dos participantes ao hierarquizar os critérios relevantes na seleção de projetos de iluminação pública com tecnologia LED.

Os pesos dos critérios, obtidos por meio do método AHP, foram posteriormente utilizados na modelagem probabilística por meio de Redes Bayesianas, permitindo uma análise integrada das inter-relações entre os fatores de decisão. A Tabela 1 apresenta a Escala Fundamental de Saaty.

Tabela 1 - Escala Fundamental de Saaty

Escala numérica de intensidade	Escala conceitual
1	Igualmente importante
3	Importância moderada
5	Mais importante
7	Muito mais importante
9	Extremamente importante
2,4,6,8	Valores intermediários

Fonte: Saaty (1990).

O Índice de Consistência (IC) foi calculado a partir do maior autovalor da matriz de avaliação dos critérios. O Índice de Consistência Aleatória (ICA), proposto por Saaty (1987), é definido com base no número de critérios (n) e está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Índice de Consistência Aleatória

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ICA	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

3. Modelagem por Redes Bayesianas com *Software HUGIN*:

Após a determinação dos pesos pelo método AHP, os valores foram inseridos em uma Tabela de Probabilidade Condicional (TPC) e integrados ao *software HUGIN Expert Lite 9.1*. A modelagem por Redes Bayesianas combinou análise quantitativa (proveniente do AHP) com a análise probabilística, permitindo a simulação de diferentes cenários e a identificação das variáveis com maior impacto na tomada de decisão.

O *HUGIN Expert Lite 9.1* foi utilizado devido à sua capacidade de manipular cálculos de probabilidades condicionais e inferência estatística, possibilitando uma análise precisa das interdependências entre fatores. A modelagem envolveu os seguintes passos:

- 1 Definição da Estrutura da Rede - Foi construída uma rede com os fatores e critérios identificados na revisão sistemática e priorizados pelo método AHP.
- 2 Definição das Probabilidades Condicionais - As probabilidades foram definidas com base nos pesos atribuídos pelo método AHP, sendo ajustadas conforme a percepção dos especialistas em relação à influência dos fatores na gestão sustentável.
- 3 Simulação de Cenários - A rede foi submetida a diferentes cenários, permitindo a análise da influência dos fatores na probabilidade de sucesso na implementação de projetos de iluminação pública.
- 4 Análise dos Resultados - Os resultados foram analisados considerando tanto os pesos atribuídos pelos especialistas quanto os cálculos probabilísticos das Redes Bayesianas, permitindo a obtenção de insights sobre a relação entre os fatores.

A definição das probabilidades condicionais foi realizada por meio de consulta ao grupo focal, que respondeu à seguinte pergunta:

“De acordo com sua experiência em projetos de iluminação pública, qual a probabilidade de os seguintes fatores serem priorizados nestes projetos?”

A probabilidade de atingimento do objetivo foi determinada com base na seguinte pergunta:

“Qual o percentual de importância destas categorias para atingir um modelo de luminária LED sustentável?”

Para a definição das probabilidades, foram utilizados os pesos dos fatores calculados pelo método AHP, conforme proposto por Park et al. (2014). A probabilidade condicional de cada categoria foi obtida a partir da relação entre os fatores e o objetivo final.

4.3. Análise e Tratamento de Dados

O tratamento e a análise dos dados coletados nesta pesquisa seguiram um processo sistemático, envolvendo cinco etapas para garantir a precisão e a relevância dos resultados obtidos. As etapas foram desenvolvidas da seguinte forma:

1. Tabulação e Organização dos Dados:

Os dados coletados por meio dos questionários aplicados aos grupos focais foram inicialmente tabulados e organizados em planilhas eletrônicas. Essa etapa permitiu a visualização clara dos dados, facilitando o processo subsequente de análise.

2. Aplicação do Método AHP:

Em seguida, os dados tabulados foram submetidos ao método AHP. Cada critério identificado nos questionários foi comparado par a par, permitindo a construção de uma matriz de julgamentos que capturou as prioridades dos especialistas. A partir dessa matriz, foram calculados os pesos de cada critério, refletindo sua importância relativa no contexto estudado.

3. Validação e Consistência dos Pesos:

Para assegurar a confiabilidade dos resultados do AHP, foi verificado o Índice de Consistência (IC) dos julgamentos. O índice foi calculado para cada matriz, e apenas os resultados com IC aceitável foram considerados na análise subsequente. Esta etapa foi essencial para garantir que os pesos atribuídos refletissem de maneira precisa as prioridades dos especialistas.

4. Modelagem com Redes Bayesianas no *Software HUGIN*:

Após a definição dos pesos, os dados foram inseridos em uma modelagem por Redes Bayesianas no *software HUGIN*. As Redes Bayesianas permitiram a análise das interdependências entre os critérios e fatores, considerando as probabilidades condicionais derivadas dos pesos gerados pelo AHP. Essa modelagem possibilitou a simulação de diferentes cenários, de acordo com a percepção dos grupos focais, permitindo identificar as variáveis com maior impacto na probabilidade de sucesso na implementação de sistemas de gestão sustentável de iluminação pública.

Durante a análise com o grupo focal, foram definidas as probabilidades dos fatores a partir da seguinte pergunta: "De acordo com sua experiência em projetos de iluminação pública, qual a probabilidade de os seguintes fatores serem priorizados nestes projetos?"

A probabilidade de atingimento do objetivo foi estabelecida com base na seguinte questão: "Qual o percentual de importância destas categorias para o atingimento de um modelo de luminária LED sustentável?"

As probabilidades das categorias foram definidas com base nos pesos pelo método AHP. O cálculo da probabilidade de cada categoria foi realizado por meio de probabilidade condicional. Assim, após a aplicação do método AHP e a consulta ao grupo focal, foram definidas as probabilidades de influência (S) ou não influência (N) de cada fator e categoria sobre o objetivo da pesquisa.

5. Interpretação dos Resultados:

Os resultados gerados pelas Redes Bayesianas foram analisados em conjunto com as prioridades estabelecidas pelo AHP. A análise considerou tanto os pesos atribuídos aos critérios quanto as probabilidades calculadas pela rede, oferecendo uma visão integrada e aprofundada dos elementos determinantes para o sucesso da gestão sustentável.

4.4. Revisão Sistemática da Literatura

A revisão sistemática da literatura é um procedimento capaz de levantar estudos previamente realizados por outros pesquisadores, descrevendo o processo de seleção dos artigos científicos, os critérios de inclusão e exclusão adotados, e o processo de análise de cada artigo selecionado (GALVÃO; RICARTE, 2019). Esse tipo de revisão fornece uma base sólida para identificar lacunas na literatura e fundamentar a escolha dos métodos utilizados na pesquisa. Para suportar o presente estudo, foi aplicado o Protocolo Cochrane (CRD - CENTRE FOR REVIEWS AND DISSEMINATION, 2009), que orienta sobre as etapas de busca, seleção e análise de estudos.

O levantamento da literatura foi realizado em dois momentos distintos: o primeiro em 2021 e a atualização em 2024. Ambos os levantamentos foram conduzidos por meio do Portal de Periódicos da CAPES, utilizando as bases multidisciplinares *ISI Web of Science* (Thomson Reuters Scientific), *Scopus* e *Science Direct*.

4.4.1. Definição da Questão de Pesquisa

Segundo Higgins e Green (2011), uma revisão claramente definida e direcionada deve começar com uma pergunta de pesquisa clara, que se relaciona com o problema apresentado na introdução deste trabalho. Assim, a questão de pesquisa definida foi:

“Quais são os fatores críticos de sucesso encontrados na literatura científica sobre gestão sustentável na Iluminação Pública (IP)?”

Essa questão foi estruturada com base no acrônimo PICO (Petticrew e Roberts, 2008; Higgins e Green, 2011), que orienta sobre os limites e diretrizes para a busca. O Quadro 2 apresenta a definição da pergunta de pesquisa segundo a estrutura PICO.

Quadro 2 - Estruturação da base de busca no Acrônimo PICO

Acrônimo	Significado	Definição / Aplicação	Palavras Chaves
P	<i>Population</i>	População alvo definida para a pesquisa.	<i>cities, municipalities, territories,</i>
I	<i>Intervention</i>	Intervenção a ser observada na população definida. Nesse caso, serão os meios para as saídas que serão observadas.	<i>sustainable public management, sustainable management,</i>
C	<i>Comparison</i>	É aplicado em áreas da saúde para comparação de protocolos clínicos. Para esse caso, não é aplicável.	Não aplicável

O	<i>Outcome</i>	São as saídas esperadas da intervenção na população definida.	<i>street lighting, street lighting system, sustainable lighting, urban street lighting, resource efficiency, local energy planning</i>
----------	----------------	---	---

Fonte: Adaptado de Higgins e Green (2011)

4.4.2. Estratégia de Busca e Seleção

Para realizar a busca avançada, foi construída uma *string* (TS) de pesquisa com base na estrutura PICO, utilizando operadores booleanos OR e AND para relacionar os termos de busca. A sintaxe inicial foi elaborada para a base *ISI Web of Science* e posteriormente adaptada para a *Scopus* e *Science Direct*, que apresentam limitações no tamanho dos caracteres da *string*. A sintaxe adaptada foi:

(city OR municipality OR territory) AND ("sustainable management") AND ("street lighting" OR "sustainable lighting"). O Quadro 3 apresenta a construção da *string* de pesquisa.

Quadro 3 - Construção da *string* de pesquisa

Construção da <i>string</i> de pesquisa (TS) para busca avançada na base <i>ISI Web of Science</i> baseado no acrônimo PICO				
P	Conector booleano	I	Conector booleano	O
<i>((cit* OR municipalit* OR territori*))</i>	AND	<i>("sustainable public manag*" OR "sustainable manag*")</i>	AND	<i>("street lighting" OR "street lighting system" OR "sustainable lighting" OR "urban street lighting" OR "resource efficiency" OR "local energy planning")</i>
<i>TS=((cit* OR municipalit* OR territori*) AND ("sustainable public manag*" OR "sustainable manag*") AND ("street lighting" OR "street lighting system" OR "sustainable lighting" OR "urban street lighting" OR "resource efficiency" OR "local energy planning"))</i>				

Fonte: Elaborado pela autora.

Os critérios de inclusão e exclusão seguiram o Protocolo Cochrane (CRD – CENTRE FOR REVIEWS AND DISSEMINATION, 2009) e foram aplicados de maneira consistente nos dois levantamentos:

- Idioma: artigos publicados em inglês, português ou espanhol.
- Tipo de documento: artigos científicos e revisões.
- Relevância: artigos que abordassem diretamente a gestão sustentável na iluminação pública.

O processo de triagem ocorreu em três fases:

1. Triagem dos títulos.
2. Triagem dos resumos.
3. Triagem dos textos completos selecionados.

4.4.3. Levantamento Inicial (2021)

O levantamento inicial foi realizado entre 08 de março e 30 de abril de 2021. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foram identificados 9 artigos para análise completa, os quais foram analisados em profundidade para extrair os fatores críticos de sucesso e as lacunas na literatura.

4.4.4. Atualização da Revisão (2024)

A atualização foi realizada entre 22 e 31 de agosto de 2024, utilizando as mesmas bases de dados e critérios metodológicos aplicados na revisão inicial. Entretanto, observou-se uma redução significativa no número de documentos encontrados na *Web of Science* em comparação com a pesquisa de 2021. Essa redução pode ser atribuída a diversos fatores, como:

- Mudanças nas políticas de indexação das revistas.
- Arquivamento de artigos em repositórios específicos.
- Alterações nos critérios de indexação das bases de dados.
- Variações no acesso por assinatura.

Após a triagem e análise dos artigos, foram selecionados 7 artigos para a análise completa, sendo que alguns estudos reforçaram os achados anteriores e outros contribuíram com novos fatores críticos de sucesso.

4.4.5. Análise dos Resultados da Revisão da Literatura

A pesquisa foi realizada em dois períodos distintos: de 08 de março a 30 de abril de 2021 e de 22 a 31 de agosto de 2024, nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*. O objetivo foi identificar artigos com aderência ao tema de gestão sustentável na iluminação pública, de modo a responder à questão de pesquisa proposta.

Na primeira fase, realizada em 2021, foram obtidos inicialmente 48, 29 e 42 documentos, respectivamente, nas bases *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*. Após a aplicação de filtros para refinar a busca, considerando o tipo de documento (artigos e

revisões) e o idioma (português, inglês e espanhol), o total de documentos foi reduzido para 37, 19 e 32, respectivamente. Em seguida, foram realizados filtros adicionais com base no título, resumo e leitura completa dos artigos. O Quadro 4 apresenta as etapas e resultados consolidados.

Quadro 4 - Etapas de Seleção e Resultados de Pesquisa (2021)

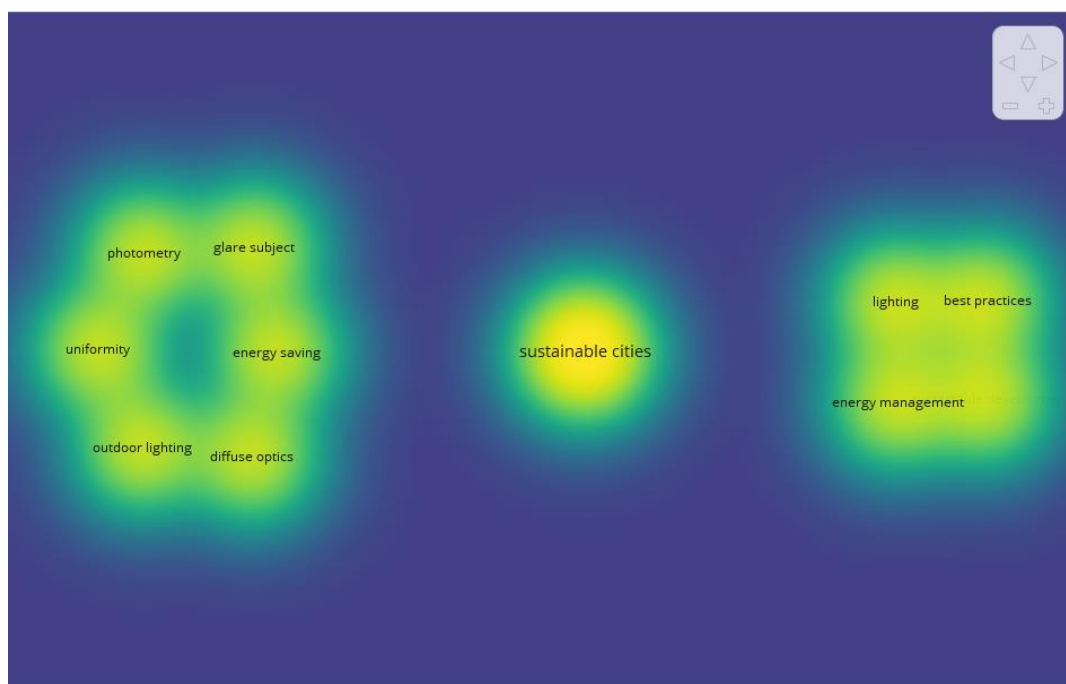
Etapas de Seleção			
Base de Pesquisa	<i>Web of Science</i>	<i>Scopus</i>	<i>Science Direct</i>
Resultado Inicial nas bases	48	29	42
Filtro 1 - Tipo de documento	Artigo; Revisão	-	Artigo; Revisão
Filtro 2 – Idioma	Inglês, Espanhol e Português	Inglês	-
Total de documentos	37	19	32
Filtro 3 - Seleção baseada em Título	12	12	14
Filtro 4 - Seleção baseada no Resumo	7	6	10
Filtro 5 - Seleção baseada na leitura diagonal	4	6	2
Filtro 6 - Seleção baseada na leitura completa	4	4	1
Total final dos documentos	4	4	1
Documentos selecionados após etapas de refinamento	9		

Fonte: Elaborado pela autora.

Como observado no Quadro 4, a consolidação das bases *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct* resultou em 09 artigos com aderência ao tema proposto pela pesquisa, a fim de responder à questão de revisão citada.

Após essa etapa, foi feito uso do *software VOSviewer (Visualizing Scientific Landscapes)*, utilizando os títulos dos trabalhos selecionados e seus respectivos resumos para visualização de atributos, a serem analisados quanto às similaridades dentre eles, como visto na Figura 7.

Figura 7 - Identificação de similaridades



Fonte: Elaborado pela autora.

Com o uso do *Software*, foi possível identificar poucas ocorrências relacionados e a falta de similaridade entre eles apontada. A análise proposta aborda as principais colocações dos autores, e seus anos de publicações relacionados à temática pretendida. Observa-se que a maioria dos periódicos selecionados estão associados à área de energia (*Emc Review - Časopis Za Ekonomiju; Economic Research-Ekonomska Istrazivanja; IEEE Transactions on Automation Science and Engineering; Energy Policy; Renewable and Sustainable Energy Reviews; Future Generation Computer Systems; EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica; Energies*).

Na segunda fase, realizada em 2024, foram retornados inicialmente 4, 9 e 56 documentos nas bases *Web of Science, Scopus e Science Direct*, respectivamente. Após a aplicação dos filtros de ano (2021 a 2024) e tipo de documento (artigos e revisões), o total de documentos foi reduzido para 1, 5 e 13, respectivamente. A partir da seleção baseada em título, resumo e leitura completa, foram selecionados 7 artigos para compor a análise final. O Quadro 5 apresenta as etapas e resultados consolidados.

Quadro 5 - Etapas de Seleção e Resultados de Pesquisa (2024)

Etapas de Seleção			
Base de Pesquisa	Web of Science	Scopus	Science Direct
Resultado Inicial nas bases	4	9	56
Filtro 1 - Ano	2021 a 2024	2021 a 2024	2021 a 2024
Filtro 2 - Tipo de documento	-	-	Artigo; Revisão
Total de documentos	1	5	13
Filtro 3 - Seleção baseada em Título	0	2	5
Filtro 4 - Seleção baseada no Resumo	0	2	5
Filtro 5 - Seleção baseada na leitura diagonal	0	2	5
Filtro 6 - Seleção baseada na leitura completa	0	2	5
Total final dos documentos	0	2	5
Documentos selecionados após etapas de refinamento	7		

Fonte: Elaborado pela autora.

Consolidando os resultados das duas fases, foram selecionados um total de 16 artigos (9 em 2021 e 7 em 2024) com aderência ao tema da gestão sustentável da iluminação pública. Os artigos abordam temas como eficiência energética, tecnologias LED, financiamento e modelos de gestão, práticas sustentáveis e impactos ambientais.

Primeira fase

Entre os artigos analisados na primeira fase, o trabalho de Salvia et al. (2019), evidencia a escassez de estudos sobre gestão sustentável na iluminação pública. Os autores revelam que as publicações na área tendem a abordar questões técnicas do setor de energia, enquanto a gestão sustentável recebe menos atenção. No entanto, destacam que a iluminação pública tem grande potencial para contribuir com a eficiência e a sustentabilidade, sendo um setor que demanda mais atenção da administração pública. O estudo investigou as principais práticas adotadas globalmente em termos de energia e eficiência da iluminação pública urbana, incluindo o incentivo ao uso de fontes alternativas de energia (renovável), como solar e eólica.

Em todas as práticas identificadas, os autores ressaltam a importância dos aspectos tecnológicos e ambientais como reguladores para promover economia de energia, redução de custos e maior eficiência nos sistemas de iluminação. Já os fatores financeiros e políticos tendem a ser mais eficazes em projetos de energia quando sustentados por planos energéticos municipais, estaduais ou nacionais que oferecem subsídios para projetos de iluminação pública sustentável.

Embora não trate especificamente da gestão sustentável, o estudo de Díaz- Díaz; Muñoz e Pérez-González (2017) apresenta um caso de iluminação pública em Santander, na Espanha. Os autores relatam a implementação de um sistema mais eficiente com tecnologia LED, incluindo ajustes na intensidade da luz conforme a localização da luminária. O projeto foi gerido por uma empresa contratada por 15 anos, com um investimento inicial de 11 milhões de euros para substituir 22.700 luminárias. O modelo prevê uma economia de 65%, dos quais 60% serão destinados à empresa e 40% à Câmara Municipal, resultando em uma redução de 2,4 milhões de quilogramas de CO₂ por ano.

Gago-Calderón et al. (2018) reforçam a eficiência das luminárias LED, estimando que a transição para essa tecnologia pode reduzir o consumo de eletricidade em até 50%. Em um teste realizado em 106 casos de 17 países europeus, foi registrada uma economia média de 55% em comparação com os sistemas originais. Os autores também mencionam o Pacto de Autarcas de 2010, no qual 4.400 municípios europeus se comprometeram com planos de ação para a energia sustentável.

Milenkovic e Duric (2020) analisam a metodologia "Value for Money" (VfM) em projetos de Parceria Público-Privada (PPP) na Sérvia. A aplicação do Comparador de Custos do Setor Público (PSC) permitiu avaliar os custos e riscos operacionais e de capital, concluindo que, nos 11 projetos analisados nos últimos dois anos, houve economias financeiras significativas para os municípios, com melhora na qualidade dos serviços de iluminação.

Strielkowski et al. (2020) exploram os determinantes da eficiência econômica em projetos de iluminação pública em cidades inteligentes na Europa. Os resultados indicam que a substituição de postes antigos por sistemas LED movidos a energia solar é economicamente viável, com um período de retorno entre 3 e 4 anos e economia energética de aproximadamente 2,6 GWh.

Carli e Dotoli (2020) propõem um modelo de decisão para otimizar o retrofit energético em sistemas de iluminação pública na cidade de Bari, Itália. A metodologia busca reduzir o consumo de energia e alocar de forma eficiente as intervenções de retrofit, considerando o orçamento disponível. O modelo preenche uma lacuna na literatura, oferecendo uma ferramenta prática de apoio à decisão para gestores de energia.

Segunda fase

O artigo de Youssef Kasseh e Abdellatif Touzani (2023), realizado no Marrocos, analisa o impacto de um Plano Diretor de Iluminação no desempenho energético e

ambiental da iluminação pública. Três anos após a implementação, foi observada uma melhoria superior a 4% no consumo anual e uma redução de até 40% em algumas áreas atualizadas, além de melhor qualidade na iluminação.

Silva et al. (2022) investigaram, por meio de uma revisão sistemática, os fatores críticos de sucesso na gestão sustentável da iluminação pública. A pesquisa identificou uma escassez de literatura científica sobre o tema, com práticas concentradas em cidades europeias. Apesar das limitações, os resultados oferecem suporte para gestores públicos na tomada de decisões sobre projetos de iluminação sustentável.

Vieira, Rua e Arias-Oliva (2023) analisam o impacto da inovação aberta em cidades inteligentes, com foco em Colônia, Alemanha. Os resultados indicam que as dimensões mais afetadas são pessoas, mobilidade e ambiente, enquanto a dimensão governo é menos impactada.

Hoang, Pham e Nguyen (2021) revisam o papel das fontes de energia renovável em cidades inteligentes, destacando desafios e oportunidades na gestão energética e no planejamento urbano para reduzir o consumo e as emissões.

Bibri, Krogstie e Alahi (2024) exploram o papel das tecnologias de IA e AIoT na construção de ecocidades. Embora promissoras, essas tecnologias apresentam desafios complexos que exigem regulamentações específicas e integração com políticas públicas.

Méndez, Prieto e Sanmartín (2024) discutem a poluição luminosa em áreas urbanas, com foco na iluminação de monumentos de pedra. O estudo aponta para a necessidade de atualizar a regulamentação para equilibrar eficiência energética e conservação ambiental.

Saheb, Dehghani e Saheb (2022) analisam o impacto ético e social da IA na sustentabilidade energética, propondo uma nova modelagem de tópicos. Os resultados sugerem direções para regulamentações que incentivem o uso sustentável da IA.

4.4.6. Correlações Teóricas entre Sustentabilidade e Iluminação Pública

Desde a elaboração do Relatório Brundtland em 1987, o conceito de desenvolvimento sustentável, bem como o conceito de cidade sustentável, vem sendo motivo de diversos estudos e definições. De acordo com a ONU (1987), desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprirem suas próprias necessidades. Pode-se afirmar que uma cidade sustentável utiliza recursos renováveis inferiores a suas taxas de geração e utiliza recursos não renováveis inferiores à taxa de desenvolvimento de alternativas

renováveis, reduzindo, ao mesmo tempo, o impacto sobre o meio ambiente (GOLDMAN; GORHAM, 2006).

Já para Sodiq et al. (2019), a cidade sustentável é baseada em conhecimento, e cada elemento constitutivo deve mostrar eficiência. A eficiência energética é um princípio da sustentabilidade que deve ser aplicado em uma cidade sustentável a fim de evitar o desperdício de energia. O desenvolvimento sustentável ganhou maior evidência a partir da Conferência Mundial das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em 1992. Na ocasião, foi aprovado o documento da Agenda 21, propondo diretrizes de sustentabilidade para a gestão do território (BOARETO, 2008).

Em 2015, foi criada a Agenda 2030 para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) por chefes de Estado, representantes de diversos países e da sociedade civil (PNUD, n.d.). A agenda, promovida pelas Nações Unidas, surgiu como um consenso global e um conjunto de diretrizes de governança para suprir a lacuna da sustentabilidade, percorrendo os desafios ecológicos, sociais e econômicos que a humanidade enfrenta Castro et al. (2021).

A sustentabilidade é um tema cada vez mais debatido pelos setores econômicos, inclusive pelo setor elétrico, em função do aumento do consumo de energia Salvia; Pilonetto e Brandli (2016). O setor energético é muito abrangente, engloba os consumos de energia elétrica, combustíveis, fontes renováveis, dentre outros. A energia elétrica, por sua vez, apresenta diversas aplicações, como os consumos residenciais, industriais, comerciais, rurais ou de iluminação pública (SALVIA; PILONETTO; BRANDLI, 2016).

De acordo com Molina-Moreno et al. (2018), o impacto da iluminação pública na energia consumida, no custo financeiro, no uso de matérias-primas e no meio ambiente vem gerando uma grande preocupação. O aumento da demanda de energia necessária para atender o crescente consumo das cidades ao redor do mundo tem levado pesquisadores a buscarem alternativas às fontes fósseis clássicas, entretanto ainda há pouca implementação dessas alternativas na iluminação pública (MOLINA-MORENO et al., 2018).

4.4.7. Levantamento de Aplicações Sustentáveis no Âmbito da IP em Escala Internacional

A iluminação pública é um elemento de extrema importância, seja na zona urbana, seja na rural, visto que aumenta a segurança das pessoas nas ruas, e é um setor que consome uma parcela expressiva de energia (AZIZ et al., 2020). Em alguns países, como

a Argélia, a maior parte da iluminação pública é composta por equipamentos ineficientes, fornecidos pela rede elétrica e/ou geradores a diesel, e isso requer a busca por alternativas de redução do consumo de energia nesse setor (AZIZ et al., 2020).

O crescente interesse em energia eficiente e sustentabilidade ambiental levou a definição de instalações mais eficientes no setor de iluminação pública (MOLINA-MORENO et al., 2018). Pesquisadores, como Lin & Huang (2009), trataram da otimização e do *retrofit* energético dos sistemas de iluminação pública existentes, enquanto Pintér et al. (2018) investigaram os benefícios econômicos de investimentos em tecnologias fotovoltaicas e LED no sistema de iluminação pública da cidade de Puztacsalád (Hungria).

Segundo Salvia et al. (2015), administrar recursos de forma eficiente requer o envolvimento de diversos níveis governamentais, exigindo o estreitamento das relações entre as partes interessadas para promover cooperação com instituições públicas e privadas, com a comunidade científica e os cidadãos. As autoridades precisam desenvolver e implementar políticas para melhorar a qualidade de vida nas áreas urbanas, garantindo, ao mesmo tempo, uma redução da extração de recursos, do consumo de energia e do desperdício de geração (DI LEO; SALVIA, 2017). Por outro lado, a eficiência de recursos é um desafio comum para os municípios. Capacitação, tecnologia e apoio ao conhecimento são fatores fundamentais para enfrentar a eficiência de recursos de forma integrada nas cidades (DI LEO; SALVIA, 2017).

Nessa perspectiva, Dall'o' et al. (2013) desenvolveram uma ferramenta abrangente e eficaz para apoiar as escolhas dos administradores públicos na programação de Planos de Ação de Energia Sustentável. Durante o projeto, segundo os autores, os municípios e funcionários adquiriram competências técnicas sobre o uso de diferentes ferramentas para apoiar a tomada de decisões em planejamento energético e gestão de resíduos. Os governos locais e regionais, negócios de todos os tamanhos, instituições de conhecimento (universidades ou consultorias privadas) e sociedade civil, na qual incluem-se organizações locais e cidadãos individuais, são esferas essenciais para a execução de planos de ação de recursos sustentáveis locais e regionais, como exemplo: planos de ação de energia sustentável (SALVIA et al., 2015). No entanto, segundo Farzaneh; Doll e Puppim de Oliveira (2016), na definição do sistema energético urbano, o governo local é o ator legítimo para regular o sistema de energia nas cidades.

Para o autor, o sucesso de qualquer plano de ação climática de cidade que vise a diminuir ou a atenuar o uso de energia depende dos vínculos entre fornecedores locais de

energia e o governo municipal. Segundo Salvia et al. (2015), as cidades respondem por cerca de 80% das emissões globais de gases do efeito estufa, já que nos centros urbanos concentram-se a maioria das atividades relacionadas com a produção e o consumo de bens e serviços, e mais de dois terços da população europeia vive nas cidades.

De acordo com Salvia et al. (2015), experiências internacionais evidenciaram que, com o engajamento das partes interessadas, o desenho das estratégias são mais bem aplicados. As trocas de informações, ideias e conhecimento resultam em um processo de planejamento democrático e transparente. Isso aumenta a disposição das pessoas em cooperar para implementar a estratégia desses planos de ação. Alguns atores municipais são essenciais nesse momento, como a pessoa do prefeito, além de outros tomadores de decisão, e a mídia local, que pode ser muito útil (SALVIA et al., 2015).

Alguns países elaboraram atividades relevantes e projetos cofinanciados pela Europa. Além disso, eles desenvolveram uma metodologia para apoiar a elaboração de planos energéticos para comunidades locais, implementando-a em comunidades rurais em quatro países: Áustria, Croácia, Grécia e Portugal (DI LEO; SALVIA, 2017). O projeto RE-SEETies – Ferramenta de Previsão de Energia, financiado por um programa do Sudeste Europeu – tem o propósito de contribuir para o desafio da eficiência de recursos, da produção de resíduos e do descarte. Esse projeto também estimula mudanças potenciais nos padrões de consumo e propõe alternativas para a formulação de políticas que possam apoiar a realização de metas de eficiência de recursos (SALVIA et al., 2015).

O centro de pesquisa e municípios da região do Sudeste da Europa vem realizando uma experiência única de cooperação internacional por meio de projetos RE-SEETies (SALVIA et al., 2015). A ferramenta está em uso nos países, como Croácia, Grécia, Hungria, Itália, Macedônia, Romênia, Eslováquia e Eslovênia (RE-SEETIES, n.d.). Um aspecto inovador da RE-SEETies trata de uma visão abrangente dos sistemas de energia urbana, atuando nos desafios da economia circular, nessa área da Europa, propondo uma abordagem integrada e transnacional para promover as fontes de energia renováveis e a eficiência energética (REUTER et al., 2019). Esse projeto apresenta discussões e lições aprendidas que devem servir de exemplo para os demais países, provando que a mudança de comportamento e a política podem estimular autoridades públicas, empresas e cidadãos a serem mais sustentáveis, tais como: questões inter-relacionadas que abrangem o processo de elaboração de políticas, o financiamento de investimentos locais de eficiência de recursos, boas práticas, ferramentas para apoiar a tomada de decisões e metodologias de avaliação (SALVIA et al., 2015).

A economia de energia na iluminação pública, geralmente, consiste na substituição das lâmpadas existentes por novas lâmpadas eficientes. Nesse contexto, o Município de Aigaleo (Grécia) planejou substituir, até 2020, todas as lâmpadas existentes por novas lâmpadas, de acordo com a evolução tecnológica de lâmpadas, refletores, integração de energia renovável e ajuste inteligente da intensidade da iluminação pública (DI LEO; SALVIA, 2017).

A agência de gestão de energia na cidade de Miercurea Ciuc (Romênia) financiou um estudo de viabilidade a fim de substituir a iluminação pública com sistema de baixa voltagem e medição inteligente das necessidades de iluminação, permitindo, assim, a redução considerável do consumo de eletricidade (DI LEO; SALVIA, 2017).

A cidade de Nitra (Eslováquia), a fim de tornar a iluminação pública mais eficiente, planejou a instalação de sistemas de controle para redução da intensidade luminosa das lâmpadas, a modernização de medidas, visando à substituição de algumas lâmpadas existentes e instalação de novas lâmpadas mais eficientes, além da substituição dos equipamentos elétricos (DI LEO; SALVIA, 2017).

A aplicação dessas ações está relacionada diretamente com a sustentabilidade no setor. No entanto, esse termo é bastante abrangente, visto que sustentabilidade pode ter inúmeras definições. Segundo Mikhailova (2004), o sentido lógico de sustentabilidade é a capacidade de se sustentar, de se manter, portanto uma atividade sustentável é aquela que pode ser mantida para sempre. Sendo assim, segundo o autor, uma sociedade sustentável é aquela que não coloca em risco os elementos do meio ambiente.

De acordo com Salvia; Pilonetto e Brandli (2016), a sustentabilidade no setor elétrico consiste, portanto, em garantir o abastecimento de energia para toda a população, a maior utilização de fontes renováveis, a fim de não afetar o meio ambiente e incentivar a eficiência energética a fazer mais consumindo menos, o que está relacionado à economia, de modo geral.

5. APLICAÇÕES DAS FERRAMENTAS DE MULTICRITÉRIO PARA ANÁLISE E APOIO À TOMADA DE DECISÃO

A combinação dos métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e Redes Bayesianas nesta pesquisa se justifica pela necessidade de uma abordagem integrada que associe a avaliação estruturada de critérios com a análise probabilística. Essa integração é particularmente relevante diante da complexidade e das incertezas inerentes ao contexto desta tese, proporcionando uma análise mais sólida, flexível e alinhada com os objetivos de pesquisa.

A aplicação do método AHP permitiu a hierarquização dos critérios de decisão, decompondo o problema em partes menores e facilitando a análise da importância relativa de cada fator. A partir dos pesos atribuídos pelo AHP, a modelagem por Redes Bayesianas acrescentou uma dimensão probabilística ao processo, permitindo incorporar incertezas, capturar relações de dependência entre os critérios e atualizar dinamicamente as probabilidades conforme novas informações são introduzidas.

Essa abordagem híbrida combina a robustez analítica do AHP - que organiza e quantifica a importância dos critérios - com a flexibilidade adaptativa das Redes Bayesianas, que possibilita a modelagem de cenários complexos e incertos. O resultado é um sistema de apoio à decisão mais completo, capaz de fornecer *insights* estratégicos e aumentar a confiabilidade das decisões em projetos de iluminação pública sustentáveis.

Neste capítulo, serão detalhados os passos seguidos na aplicação dessa metodologia integrada, os procedimentos adotados na coleta e análise de dados, e a implementação prática dos resultados. A apresentação clara e sistemática desse processo visa garantir a replicabilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos, reforçando a contribuição metodológica desta pesquisa para o campo de estudo.

A seguir, são descritas de forma detalhada as etapas do processo metodológico, desde a definição do objetivo, dos critérios e fatores até a implementação dos resultados. A apresentação clara e sistemática desse processo tem o propósito de facilitar a compreensão da aplicação prática da metodologia, assegurando a replicabilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos. O processo foi estruturado em três etapas principais, que refletem a lógica da construção metodológica e o alinhamento com os objetivos da pesquisa:

5.1. Etapa 1 - Definição do objetivo, dos critérios e fatores

O objetivo final desta pesquisa é “Identificar as características do modelo de luminária LED mais sustentável”. A definição dos critérios e fatores de risco que orientam essa análise foi fundamentada em uma base teórica e normativa sólida, combinando referências acadêmicas e técnicas reconhecidas. Foram utilizados como referência:

- **Revisão sistemática da literatura** - Para garantir uma visão abrangente das melhores práticas e tendências em iluminação pública sustentável.
- **Caso da Prefeitura de Belo Horizonte** (IP, 2018) - Para incorporar experiências práticas e diretrizes aplicadas em contextos reais de gestão pública.
- **ABNT NBR 5101:2024 - Iluminação Pública** - Para assegurar conformidade com os parâmetros técnicos e normativos estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2024).
- **Edital de Chamada Pública do Procel Reluz 2021** (ELETROBRAS, 2021) - Para alinhar o modelo de avaliação às exigências e critérios estabelecidos em programas nacionais de eficiência energética.

A definição dos critérios e fatores de risco é um componente crítico para garantir que a análise seja precisa e abrangente. A seleção cuidadosa desses elementos assegura que a avaliação das luminárias LED leve em consideração não apenas aspectos técnicos, mas também riscos e impactos associados à implementação do projeto.

Os critérios foram definidos para refletir os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais relacionados à iluminação pública sustentável. A inclusão de fatores de risco permite antecipar e mitigar problemas potenciais, aumentando a capacidade de adaptação e resposta a cenários futuros. A conformidade com normas técnicas e diretrizes de boas práticas reforça a credibilidade da análise e facilita a comparação objetiva entre diferentes modelos de luminárias LED.

O Quadro 6 apresenta em detalhes o objetivo, os critérios e os fatores definidos para este estudo, fornecendo uma visão clara e organizada dos elementos que compõem a base analítica da pesquisa.

Quadro 6 - Objetivo, critérios e fatores definidos para o estudo

Objetivo	Crítérios	Fatores
Identificar as características do modelo de luminária LED mais sustentável	C1 - Redução do consumo de energia no mínimo 45% da carga instalada média (W), por meio de efficientização do parque de iluminação pública.	F1 - Eficiência (lm/W, quanto maior a eficiência, menor poderá ser a potência instalada)
		F2 - Fator de Potência (mínimo de 0,92, quanto maior o FP, menor a potência aparente - corrente consumida)
		F3 - Redução das emissões de carbono
	C2 - Priorização da qualidade de iluminação nas áreas mais densas da cidade, com menores níveis educacionais, de renda e / ou que apresentem alto índice de ocorrência de crimes e acidentes envolvendo veículos automotores.	F4 - Inibição da violência
		F5 - Segurança no tráfego
		F6 - Fluidez do trânsito de veículos e pedestres
	C3 - Obtenção em todo o parque de IP de uma iluminância média mínima: (i) volume de tráfego intenso V1 - 30 lux; (ii) volume de tráfego médio V2 - 20 lux.	F7 - Estímulo do comércio e do turismo
		F8 - Conforto visual
		F9 - Influência na fauna e na flora
	C4 - Aspectos definidores no momento da aquisição do equipamento de IP.	F10 - Custo de energia
		F11 - Desing do equipamento
		F12 - Tempo de uso (vida útil - 25 anos)
	C5 - Descarte do equipamento de IP após sua substituição.	F13 - Reciclagem
		F14 - Reutilização
		F15 - Programa de devolução ao fabricante

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2. Etapa 2 - Definição do grupo focal

O grupo focal desta pesquisa foi composto por 15 especialistas diretamente envolvidos em projetos de iluminação pública e sustentabilidade, divididos em quatro segmentos principais: (1) o LabLux, um laboratório com metrologistas especializados em ensaios de conformidade e eficiência energética de produtos luminotécnicos; (2) um Centro de Pesquisas renomado, com décadas de experiência e acreditação, que reúne especialistas em otimização energética e sustentabilidade, vinculados ao laboratório de luminotécnica; (3) representantes de uma empresa Fabricante, uma das maiores do setor de iluminação no Brasil, que oferece luminárias LED e outros produtos, contando com uma equipe especializada em pesquisa e desenvolvimento; e (4) uma Prefeitura, que fornece perspectivas sobre a implementação e os desafios práticos da gestão pública em

iluminação. Essa composição permitiu uma visão integrada e prática sobre as necessidades, os desafios e as soluções para uma gestão sustentável da iluminação pública, aspecto essencial para o desenvolvimento e análise dos critérios do projeto.

1. Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense - Lablux-UFF

O Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense (LabLux-UFF), é um laboratório acreditador credenciado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), que é uma autarquia federal brasileira vinculada ao Ministério da Economia.

Os especialistas eram metrologistas responsáveis por ensaios de conformidade, o grupo focal era composto por 6 especialistas. A formação comum destes especialistas é a Engenharia Elétrica e partilham experiências na área de luminotécnica, condições importantes para garantir o correto entendimento do questionário e das práticas propostas.

O LabLux tem como principal função fiscalizar, garantir e promover a qualidade em medições e produtos através da metrologia e avaliações de conformidade, realizando ensaios em produtos na área de Luminotécnica, para certificação de eficiência energética.

2. Centro de Pesquisas

O Centro de Pesquisas é o maior do hemisfério sul, há quase 50 anos, contribui para o desenvolvimento da indústria e do setor elétrico brasileiros. O Organismo de Certificação de Produtos é acreditado, desde 1994, pela Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro.

Os especialistas eram todos vinculados ao laboratório responsável pelos ensaios de luminotécnica e com experiência de mais de cinco anos.

Em parceria com o meio acadêmico e com apoio das Empresas Eletrobrás, tem atuação consolidada em pesquisa, desenvolvimento e inovação nas áreas de otimização energética, análise de redes elétricas, automação de sistemas, gestão de ativos, energias renováveis e sustentabilidade, pesquisa experimental, ensaios e serviços tecnológicos.

3. Fabricante

A empresa fabricante é uma das principais empresas de iluminação do Brasil e oferecem um portfólio diversificado de soluções com luminárias LED, reatores, lâmpadas HID (*High Intensity Discharge*) refere-se ao modo de funcionamento das lâmpadas de

xenon e autotransformadores. Trabalham com alto padrão de qualidade, atendendo as normas nacionais e internacionais para fornecimento dos produtos. Possui uma unidade produtiva, no interior de São Paulo, que funciona como centro logístico e laboratório de alta tecnologia para pesquisa, desenvolvimento e controle de qualidade. É preparada para entregar a melhor solução e conta com equipe de engenharia própria, especializada na elaboração de projetos e desenvolvimento de produtos.

4. Prefeitura

A Prefeitura fica na cidade do interior do estado do Rio de Janeiro com aproximadamente 35 mil habitantes. Todo processo referente a iluminação pública é de responsabilidade de cada município, alguns montam sua própria equipe, mas na maioria das vezes o serviço de substituição e manutenção é terceirizado. Essa prefeitura conta com uma equipe de engenheiros que são responsáveis por todos os projetos.

5.3. Etapa 3: Desenvolvimento da modelagem

O desenvolvimento da modelagem foi realizado em duas fases: na primeira fase, aplicou-se o método AHP para determinar os pesos dos critérios; na segunda fase, esses pesos foram utilizados para estruturar e alimentar as Redes Bayesianas (RB), permitindo a análise probabilística e a avaliação de cenários.

5.3.1. Fase 1 - Método AHP

O método AHP foi aplicado para determinar os pesos dos critérios, com base nas respostas dos grupos focais. Essa fase seguiu os cinco passos descritos abaixo:

Passo 1 - Aplicação do questionário

Os grupos focais responderam individualmente ao questionário, realizando comparações pareadas entre critérios e fatores, com base na Escala Fundamental de Saaty (Tabela 1). A escala varia de 1 a 9, onde:

- 1 - Critérios igualmente importantes.
- 3 - Um critério é moderadamente mais importante que o outro.
- 5 - Um critério é fortemente mais importante que o outro.
- 7 - Um critério é muito mais importante que o outro.
- 9 - Um critério é extremamente mais importante que o outro.
- 2, 4, 6 e 8 - Valores intermediários.

O questionário pode ser consultado no Apêndice A.

Passo 2 - Construção da matriz de comparação

Com base nas respostas dos questionários, foi construída a matriz de comparação A , onde cada elemento a_{ij} representa a importância do critério i em relação j . A matriz é quadrada de ordem n (número de critérios):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \frac{1}{a_{3n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 8 - Matriz de comparação

	F1	F2	F3
F1	1	5	4
F2	0,20	1	2
F3	0,25	0,50	1

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores da diagonal principal são sempre 1 (porque um critério é igualmente importante em relação a si mesmo).

Passo 3 - Cálculo dos pesos por normalização e cálculo do vetor prioridade

Cada valor na matriz foi normalizado para obter os valores relativos de importância dos critérios. A normalização foi feita somando-se os valores de cada coluna da matriz e dividindo cada elemento pelo total da coluna:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

O vetor de prioridade (peso relativo de cada critério) foi obtido pela média das linhas normalizadas:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij}$$

Passo 4 - Análise de consistência da matriz

Para garantir a consistência dos julgamentos, foi calculado o Índice de Consistência (IC):

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Onde:

- λ_{max} - Maior valor próprio da matriz
- n - Número de critérios

Para validar a consistência, calcula-se a Razão de Consistência (RC), obtida pela relação entre o Índice de Consistência (IC) e o Índice de Consistência Aleatória (ICA), baseado em valores tabelados de Saaty:

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

Se $RC \leq 0,1$, os julgamentos são considerados consistentes. Caso contrário, o processo de comparação deve ser revisado.

Passo 5 – Determinação dos pesos finais

Os pesos finais dos critérios foram obtidos a partir do vetor de prioridade ω_i . Esses pesos foram utilizados como entrada na modelagem por Redes Bayesianas para a definição das probabilidades condicionais.

5.3.2. Fase 2 - Redes Bayesianas

As Redes Bayesianas foram empregadas na segunda fase do estudo para modelar as relações de influência entre os critérios previamente definidos e ponderados pelo método AHP. Essa aplicação teve como principal objetivo estruturar e quantificar as interdependências entre os fatores que impactam a gestão sustentável da iluminação pública.

A elaboração da Tabela de Probabilidades Condicionais (TPC) foi baseada nas respostas dos grupos focais e nos pesos atribuídos na etapa anterior. Esse processo

envolveu a definição consensual das probabilidades associadas a cada fator, conforme a experiência dos participantes e a literatura consultada.

A construção do modelo seguiu duas etapas:

- Segmento qualitativo – Representado por um grafo acíclico direcionado (DAG), que descreve as relações causais entre os fatores.
- Segmento quantitativo – Expresso pelas Tabelas de Probabilidades Condicionais (TPC), que quantificam essas relações probabilísticas.

O *software HUGIN EXPERT* foi utilizado para inserir as TPCs, calcular as probabilidades resultantes e analisar cenários hipotéticos que avaliam o impacto dos critérios na sustentabilidade da iluminação pública. Para isso, as probabilidades foram definidas com base na seguinte pergunta aplicada aos grupos focais: Qual a probabilidade de os seguintes fatores serem priorizados em projetos de iluminação pública sustentável?

A integração das probabilidades condicionais permitiu identificar os fatores com maior impacto para alcançar uma luminária LED sustentável, facilitando uma avaliação mais precisa e estruturada das alternativas disponíveis. Esse processo contribuiu para oferecer aos gestores públicos uma ferramenta de apoio à decisão mais robusta e fundamentada em critérios técnicos, sociais e ambientais.

6. ANÁLISE E SÍNTESE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise detalhada dos resultados com a aplicação das ferramentas multicritério, que combinaram o método AHP com as Redes Bayesianas para priorizar critérios-chave na modernização da iluminação pública com tecnologia LED. Em seguida, é feita a síntese dos resultados da revisão sistemática da literatura e da aplicação dessas ferramentas, culminando na integração e análise final dos achados.

6.1. Análise dos Resultados da Aplicação das Ferramentas Multicritério

Após a definição dos fatores e critérios, os grupos focais realizaram a comparação par a par com base na escala de importância de 1 a 9 descrita na Tabela 1. O método AHP foi aplicado para calcular os pesos de quinze fatores (F1 a F15) dos cinco critérios distintos. As Tabelas 3, 4, 5 e 6 apresentam a matriz de comparação par a par dos critérios, os pesos resultantes e os índices de consistência (ICA, IC e RC).

Tabela 3 - Pesos dos critérios com base no método AHP do grupo focal Lablux

	F1	F2	F3	Pesos	λ_{max}	3,07
F1	1	5	7	0,72	ICA (3 critérios)	0,58
F2	0,20	1	3	0,19	CI	0,03
F3	0,14	0,33	1	0,08	CR	0,06
	F4	F5	F6	Pesos	λ_{max}	3,09
F4	1	3	5	0,62	ICA (3 critérios)	0,58
F5	0,33	1	4	0,28	CI	0,04
F6	0,20	0,25	1	0,10	CR	0,07
	F7	F8	F9	Pesos	λ_{max}	3,05
F7	1	2	3	0,52	ICA (3 critérios)	0,58
F8	0,50	1	3	0,33	CI	0,03
F9	0,33	0,33	1	0,14	CR	0,05
	F10	F11	F12	Pesos	λ_{max}	3,22
F10	1	3	9	0,64	ICA (3 critérios)	0,58
F11	0,33	1	8	0,31	CI	0,05
F12	0,11	0,13	1	0,05	CR	0,09
	F13	F14	F15	Pesos	λ_{max}	3,04
F13	1	1	5	0,42	ICA (3 critérios)	0,58
F14	1,00	1	9	0,51	CI	0,02
F15	0,2	0,11	1	0,07	CR	0,03

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4 - Pesos dos critérios com base no método AHP do grupo focal Centro de Pesquisas

	F1	F2	F3	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,10
F1	1	5	4	0,68	ICA (3 critérios)	0,58
F2	0,20	1	2	0,19	CI	0,05
F3	0,25	0,50	1	0,13	CR	0,08
	F4	F5	F6	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,09
F4	1	6	5	0,72	ICA (3 critérios)	0,58
F5	0,17	1	2	0,17	CI	0,04
F6	0,20	0,50	1	0,11	CR	0,08
	F7	F8	F9	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,05
F7	1	5	5	0,70	ICA (3 critérios)	0,58
F8	0,20	1	2	0,18	CI	0,03
F9	0,20	0,50	1	0,11	CR	0,05
	F10	F11	F12	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,09
F10	1	6	5	0,72	ICA (3 critérios)	0,58
F11	0,17	1	2	0,17	CI	0,04
F12	0,20	0,50	1	0,11	CR	0,08
	F13	F14	F15	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,08
F13	1	7	6	0,75	ICA (3 critérios)	0,58
F14	0,14	1	2	0,15	CI	0,04
F15	0,17	0,50	1	0,10	CR	0,07

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5 - Pesos dos critérios com base no método AHP do grupo focal do Fabricante

	F1	F2	F3	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,00
F1	1	3	5	0,65	ICA (3 critérios)	0,58
F2	0,33	1	2	0,23	CI	0,002
F3	0,2	0,50	1	0,12	CR	0,003
	F4	F5	F6	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,04
F4	1	9	5	0,77	ICA (3 critérios)	0,58
F5	0,11	1	1	0,11	CI	0,02
F6	0,20	1,00	1	0,13	CR	0,03
	F7	F8	F9	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,02
F7	1	3	2	0,55	ICA (3 critérios)	0,58
F8	0,33	1	1	0,21	CI	0,01
F9	0,50	1,00	1	0,24	CR	0,02
	F10	F11	F12	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,05
F10	1	5	5	0,70	ICA (3 critérios)	0,58
F11	0,20	1	2	0,18	CI	0,03
F12	0,20	0,50	1	0,11	CR	0,05
	F13	F14	F15	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,04
F13	1	5	9	0,77	ICA (3 critérios)	0,58
F14	0,20	1	1	0,13	CI	0,02
F15	0,11	1,00	1	0,11	CR	0,03

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6 - Pesos dos critérios com base no método AHP do grupo focal da Prefeitura

	F1	F2	F3	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,01
F1	1	7	5	0,75	ICA (3 critérios)	0,58
F2	0,14	1	1	0,12	CI	0,01
F3	0,20	1,00	1	0,13	CR	0,01
	F4	F5	F6	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,07
F4	1	5	7	0,72	ICA (3 critérios)	0,58
F5	0,20	1	3	0,19	CI	0,03
F6	0,14	0,33	1	0,08	CR	0,06
	F7	F8	F9	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,10
F7	1	5	4	0,68	ICA (3 critérios)	0,58
F8	0,20	1	2	0,19	CI	0,05
F9	0,20	0,50	1	0,13	CR	0,08
	F10	F11	F12	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,10
F10	1	5	6	0,71	ICA (3 critérios)	0,58
F11	0,20	1	3	0,20	CI	0,05
F12	0,17	0,33	1	0,09	CR	0,08
	F13	F14	F15	Pesos	$\lambda_{\max}$	3,08
F13	1	7	6	0,75	ICA (3 critérios)	0,58
F14	0,14	1	2	0,15	CI	0,04
F15	0,17	0,50	1	0,10	CR	0,07

Fonte: Elaborado pela autora.

As razões de consistência (RC) obtidas foram inferiores a 10%, indicando coerência nos julgamentos dos especialistas e dispensando nova rodada de comparação. Dessa forma, os pesos calculados foram considerados válidos para a próxima etapa da modelagem.

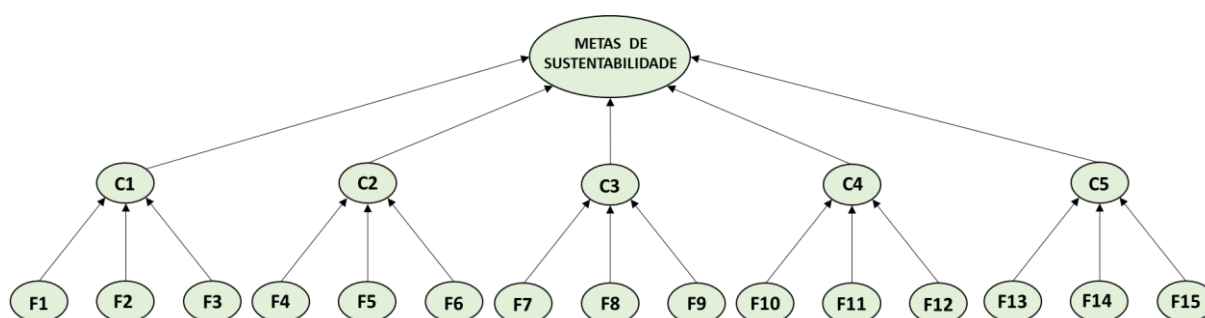
Na fase seguinte, os pesos obtidos pelo AHP foram utilizados para estruturar as Redes Bayesianas. Os grupos focais definiram as probabilidades condicionais com base em sua experiência em projetos de iluminação pública, respondendo às seguintes questões:

- Qual a probabilidade de os seguintes fatores serem priorizados nestes projetos?
- Qual o percentual de importância destes critérios para atingir um modelo de luminária LED sustentável?

As probabilidades condicionais foram calculadas a partir dos pesos definidos pelo método AHP, permitindo estabelecer a influência (S) ou não influência (N) de cada fator para o objetivo da pesquisa. A Figura 9 apresenta a rede de decisão bayesiana construída com as probabilidades condicionais resultantes.

Essa integração entre AHP e Redes Bayesianas permitiu quantificar e visualizar o impacto dos fatores na decisão, fornecendo uma análise estruturada para apoiar gestores públicos na definição de estratégias para modernização da iluminação pública com tecnologia LED. A Figura 9 apresenta a Rede de decisão bayesiana utilizada.

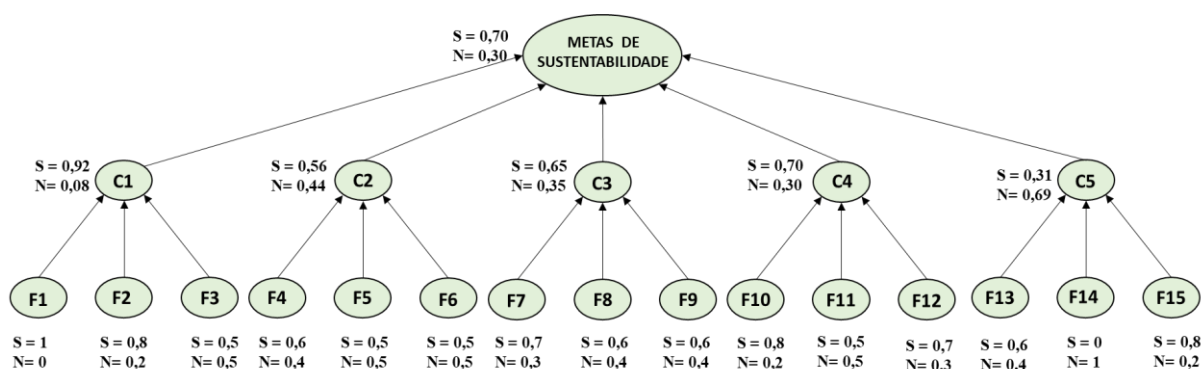
Figura 9 - Rede de decisão bayesiana



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 9 apresenta a rede de decisão bayesiana, destacando a meta principal, que é a sustentabilidade. Em seguida, estão os critérios e, por fim, os fatores correspondentes. A seguir, serão discutidos os resultados de cada grupo focal. As Figuras 10, 11, 12 e 13 exibem a rede bayesiana com os valores das probabilidades correspondentes. A Figura 10 apresenta a rede de decisão bayesiana do LabLux.

Figura 10 - Rede de decisão bayesiana referente ao resultado do LabLux



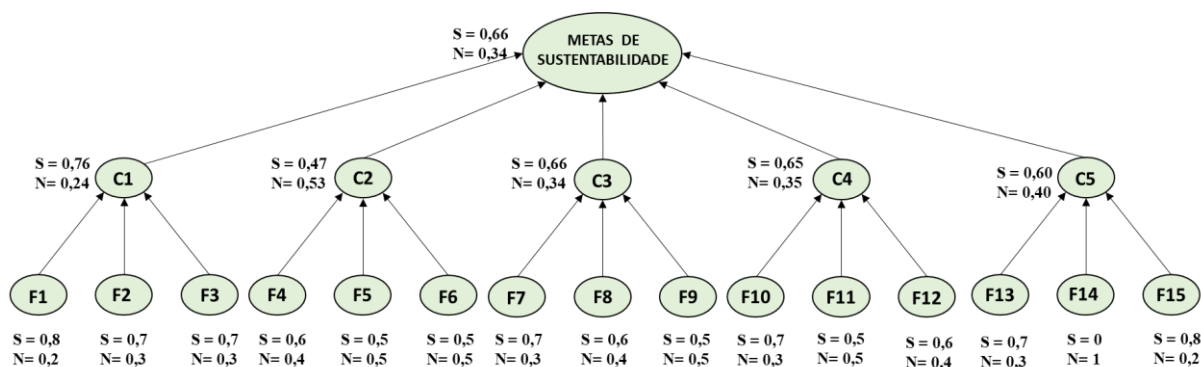
Fonte: Elaborado pela autora.

Como pode ser observado na Figura 10, a identificação de características de luminária LED tem uma probabilidade de êxito de 70%, numa visão macro, a partir dos critérios e dos fatores, considerando a opinião dos especialistas e pelas probabilidades

retiradas da análise, através da AHP. Isto é, 70% de chances de atingir a meta de sustentabilidade.

Analisando detalhadamente, observa-se que o critério 1 – C1 – redução do consumo impactou em 92% esse resultado e o fator de risco – F1 – eficiência impactou 100% esse critério contribuindo assim para esse resultado, seguido do F2 – fator de potência 80% e F3 50% – redução das emissões de carbono. O critério 4 – C4 – aquisição de equipamento impactou em 70% e o fator de risco F10 – custo de energia 80%, F12 – tempo de vida 70% e F11 – *design* do equipamento 50%. O critério 3 – C3 – iluminação impactou em 65% e o fator de risco F7 – estímulo da economia 70%, F8 – conforto visual 60% e F9 – fauna e flora 60%. O critério C2 – qualidade de iluminação com 56% e o fator de risco F4 – inibição da violência 60%, F5 – segurança no tráfego 50% e F6 – fluidez no trânsito 50%. E por último, o critério C5 – descarte do equipamento com 31% e o fator de risco F15 – devolução ao fabricante 80%, F13 – reciclagem 60% e F14 – reutilização 0%. A Figura 11 apresenta a rede de decisão bayesiana do Centro de Pesquisas.

Figura 11 - Rede de decisão bayesiana referente ao resultado do Centro de Pesquisas



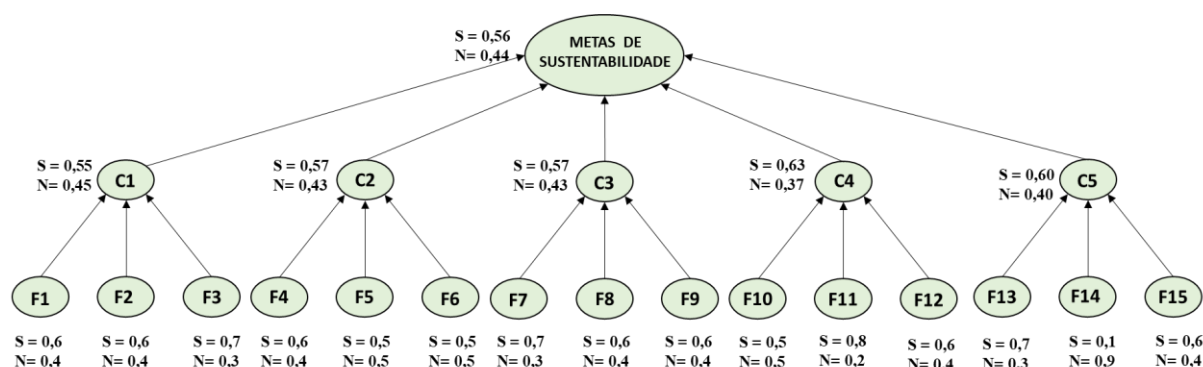
Fonte: Elaborado pela autora.

Como pode ser observado na Figura 11, a identificação de características de luminária LED tem uma probabilidade de êxito de 66%, numa visão macro, a partir dos critérios e dos fatores, considerando a opinião dos especialistas e pelas probabilidades retiradas da análise, através da AHP. Isto é, 66% de chances de atingir a meta de sustentabilidade.

Analisando detalhadamente, observa-se que o critério 1 – C1 – redução do consumo impactou em 76% esse resultado e o fator de risco – F1 – eficiência impactou 80% esse critério contribuindo assim para esse resultado, seguido do F2 – fator de

potência 70% e F3 70% – redução das emissões de carbono. O critério 3 – C3 – iluminação impactou em 66% e o fator de risco F7 – estímulo da economia 70%, F8 – conforto visual 60% e F9 – fauna e flora 50%. O critério 4 – C4 – aquisição de equipamento impactou em 65% e o fator de risco F10 – custo de energia 70%, F12 – tempo de vida 60% e F11 – *design* do equipamento 50%. O critério C5 – descarte do equipamento com 60% e o fator de risco F15 – devolução ao fabricante 80%, F13 – reciclagem 70% e F14 – reutilização 0%. E por último, critério C2 – qualidade de iluminação com 47% e o fator de risco F4 – inibição da violência 60%, F5 – segurança no tráfego 50% e F6 – fluidez no trânsito 50%. A Figura 12 apresenta a rede de decisão bayesiana do Fabricante.

Figura 12 - Rede de decisão bayesiana referente ao resultado do Fabricante



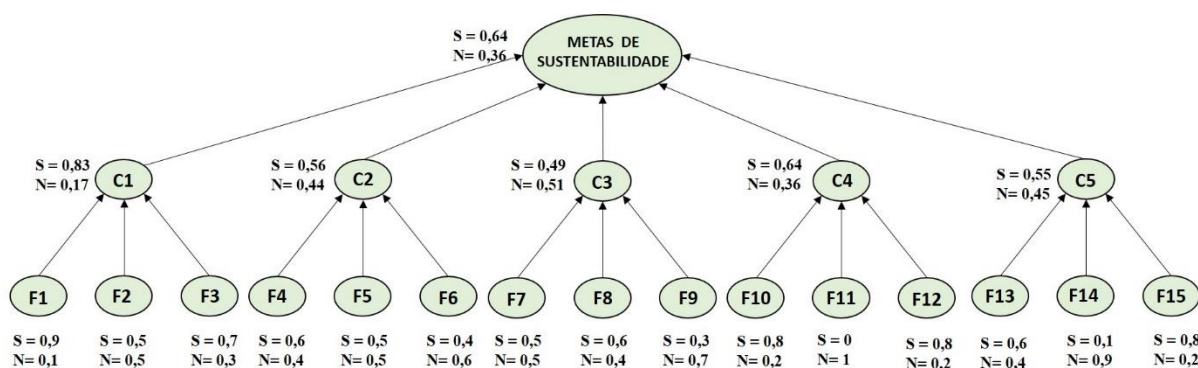
Fonte: Elaborado pela autora.

Como pode ser observado na Figura 12, a identificação de características de luminária LED tem uma probabilidade de êxito de 56%, numa visão macro, a partir dos critérios e dos fatores, considerando a opinião dos especialistas e pelas probabilidades retiradas da análise, através da AHP. Isto é, 56% de chances de atingir a meta de sustentabilidade.

Analisando detalhadamente, observa-se que o critério 4 – C4 – aquisição de equipamento impactou em 63% e o fator de risco F11 – tempo de vida 80%, F12 – custo de energia 60% e F10 – *design* do equipamento 50%. O critério C5 – descarte do equipamento com 60% e o fator de risco F13 – reciclagem 70%, fator de risco F15 – devolução ao fabricante 60%, e F14 – reutilização 1%. O critério 3 – C3 – iluminação impactou em 57% e o fator de risco F7 – estímulo da economia 70%, F8 – conforto visual 60% e F9 – fauna e flora 60%. O critério C2 – qualidade de iluminação com 57% e o fator

de risco F4 – inibição da violência 60%, F5 – segurança no tráfego 50% e F6 – fluidez no trânsito 50%. E por último, o critério 1 – C1 – redução do consumo impactou em 55% esse resultado e o fator de risco F3 70% – redução das emissões de carbono, o fator de risco – F1 – eficiência impactou 60% esse critério contribuindo assim para esse resultado, seguido do F2 – fator de potência 60%. A Figura 13 apresenta a rede de decisão bayesiana da Prefeitura.

Figura 13 - Rede de decisão bayesiana referente ao resultado da Prefeitura



Fonte: Elaborado pela autora.

Como pode ser observado na Figura 13, a identificação de características de luminária LED tem uma probabilidade de êxito de 64%, numa visão macro, a partir dos critérios e dos fatores, considerando a opinião dos especialistas e pelas probabilidades retiradas da análise, através da AHP. Isto é, 64% de chances de atingir a meta de sustentabilidade.

Analisando detalhadamente, observa-se que o critério 1 – C1 – redução do consumo impactou em 83% esse resultado e o fator de risco – F1 – eficiência impactou 90% esse critério contribuindo assim para esse resultado, F3 70% – redução das emissões de carbono e seguido do F2 – fator de potência 50%. O critério 4 – C4 – aquisição de equipamento impactou em 64% e o fator de risco F10 – custo de energia 80%, F12 – tempo de vida 80% e F11 – *design* do equipamento 0%. O critério C2 – qualidade de iluminação com 56% e o fator de risco F4 – inibição da violência 60%, F5 – segurança no tráfego 50% e F6 – fluidez no trânsito 40%. O critério C5 – descarte do equipamento com 55% e o fator de risco F15 – devolução ao fabricante 80%, F13 – reciclagem 60% e F14 – reutilização 10%. E por último, o critério 3 – C3 – iluminância impactou em 49% e o fator de risco F8 – conforto visual 60%, F7 – estímulo da economia 50% e F9 – fauna e flora 30%. O quadro 7 apresenta os resultados de cada grupo focal de forma individual.

Quadro 7 - Quadro Resumo

	META	C1	C2	C3	C4	C5
LabLux	70%	92%	55%	65%	69%	31%
Centro de Pesquisas	66%	77%	47%	66%	65%	60%
Fabricante	56%	55%	57%	57%	63%	60%
Prefeitura	64%	83%	56%	49%	64%	55%

Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os resultados de cada grupo focal individualmente e, em seguida, comparando os grupos para identificação dos padrões e diferenças.

No Grupo Focal do Lablux a prioridade alta foi o Critério C1 - Redução do consumo de energia (92%), prioridade moderada Critério C3 - Iluminância (65%) e Critério C4 - Design do equipamento (69%) e prioridade baixa o Critério C2 - Qualidade de energia (55%) e critério C5 - Descarte (31%).

No Grupo Focal do Centro de Pesquisas a prioridade alta foi o Critério C1 - Redução do consumo de energia (77%), prioridade moderada Critério C3 - Iluminância (66%) e Critério C4 - Design do equipamento (65%) e prioridade baixa o Critério C2 - Qualidade de energia (47%) e critério C5 - Descarte (60%).

No Grupo Focal do Fabricante a prioridade alta foi o Critério C4 - Design do equipamento (63%) e critério C5 - Descarte (60%), prioridade moderada o Critério C2 - Qualidade de energia (57%) e Critério C3 - Iluminância (57%) e prioridade baixa Critério C1 - Redução do consumo de energia (55%).

No Grupo Focal da prefeitura a prioridade alta foi o Critério C1 - Redução do consumo de energia (83%), prioridade moderada Critério C4 - Design do equipamento (64%) e critério C5 - Descarte (55%) e prioridade baixa o Critério C2 - Qualidade de energia (56%) e Critério C3 - Iluminância (49%).

Comparando e analisando os grupos temos que para o critério C1 - Redução do Consumo de Energia: Prioridade alta em todos os grupos, com os maiores valores no Grupo Focal do LabLux (92%) e no Grupo Focal da Prefeitura (83%), o Grupo Focal do Fabricante (55%) tem a menor prioridade para este critério.

Para o critério C2 - Qualidade de Energia: Prioridade mais baixa em todos os grupos, com valores que variam entre 47% (Grupo Focal Centro de Pesquisas) e 57% (Grupo Focal Fabricante).

Para o critério C3 - Iluminância: Os valores variam, com alta prioridade no Grupo Focal do LabLux (65%) e baixa no Grupo Focal da Prefeitura (49%), o Grupo Focal do Centro de Pesquisas e o Grupo Focal do Fabricante têm valores intermediários.

Para o critério C4 - Design do Equipamento: Considerado importante, especialmente no Grupo Focal do Fabricante (63%) e Grupo Focal da Prefeitura (64%) e menor prioridade no Grupo Focal do LabLux (69%).

Para o critério C5 - Descarte: Menos priorizado no Grupo Focal do LabLux (31%) e relativamente mais importante no Grupo Focal do Fabricante e no Grupo Focal do Centro de Pesquisas.

O critério C1 - Redução do Consumo de Energia foi consistentemente priorizado em todos os grupos, refletindo sua importância universal para sustentabilidade. O critério C2 -Qualidade de Energia foi o menos priorizado em todos os grupos, possivelmente indicando uma percepção menor de sua relevância comparada a outros critérios. O critério C3 - Design do Equipamento maior prioridade no Grupo Focal do Fabricante e Grupo Focal da Prefeitura, o que pode indicar uma ênfase em aspectos visuais e funcionais. O critério C4 – Descarte foi variável, com a menor prioridade no Grupo Focal do LabLux e maior em outros grupos, sugerindo uma diversidade de opiniões sobre a importância do descarte.

Essas análises ajudam a entender como diferentes grupos focais percebem a prioridade dos critérios e como isso pode influenciar o desenvolvimento de projetos de iluminação pública sustentáveis.

6.2. Síntese dos Resultados

Esta seção apresenta uma síntese dos resultados obtidos a partir da revisão sistemática da literatura e da aplicação das ferramentas multicritério. A abordagem híbrida adotada combina uma análise qualitativa, fundamentada na revisão da literatura, com uma análise quantitativa baseada na modelagem multicritério, proporcionando uma visão abrangente sobre a gestão sustentável em projetos de iluminação pública. Consolidando os resultados das duas fases, foram selecionados um total de 16 artigos (9 em 2021 e 7 em 2024) com aderência ao tema da gestão sustentável da iluminação pública. Os artigos abordam temas como eficiência energética, tecnologias LED, financiamento e modelos de gestão, práticas sustentáveis e impactos ambientais.

6.2.1. Síntese dos Resultados da Revisão Sistemática da Literatura

Consolidando os resultados das duas fases da revisão sistemática, foram selecionados 16 artigos (9 em 2021 e 7 em 2024) com aderência ao tema da gestão sustentável da iluminação pública. Os estudos analisados abordam temas como eficiência energética, tecnologias LED, financiamento e modelos de gestão, práticas sustentáveis e impactos ambientais.

Na primeira fase, os resultados evidenciam a escassez de estudos sobre gestão sustentável na iluminação pública, com foco predominante em questões técnicas. O trabalho de Salvia et al. (2019) destaca o potencial da iluminação pública para promover eficiência e sustentabilidade, especialmente com o uso de fontes renováveis, como solar e eólica. Díaz-Díaz, Muñoz e Pérez-González (2017) analisaram um projeto em Santander, Espanha, que resultou em economia de 65% nos custos e redução de 2,4 milhões de kg de CO₂ por ano com a implementação de tecnologia LED. Estudos como os de Gago-Calderón et al. (2018) e Milenkovic e Duric (2020) reforçam a viabilidade econômica e os benefícios ambientais da transição para sistemas LED, enquanto Carli e Dotoli (2020) propõem um modelo de decisão para *retrofit* energético que otimiza o consumo e os custos de operação.

Na segunda fase, os estudos reforçam os benefícios das tecnologias LED e modelos de gestão inovadores. Kasseh e Touzani (2023) observaram uma redução de até 40% no consumo de energia em áreas modernizadas no Marrocos. Silva et al. (2022) destacam a escassez de literatura sobre gestão sustentável em cidades fora da Europa. Vieira, Rua e Arias-Oliva (2023) analisaram o impacto da inovação aberta em cidades

inteligentes, enquanto Hoang, Pham e Nguyen (2021) abordaram o papel das energias renováveis na gestão urbana. Bibri, Krogstie e Alahi (2024) exploram o uso de IA em cidades sustentáveis, apontando desafios regulatórios. Méndez, Prieto e Sanmartín (2024) discutem a poluição luminosa, e Saheb, Dehghani e Saheb (2022) abordam os impactos éticos e sociais da IA na sustentabilidade energética.

De forma geral, a revisão sistemática revela que, embora a eficiência energética e o uso de tecnologia LED sejam bem documentados, a gestão sustentável ainda é pouco explorada, especialmente fora do contexto europeu. Os estudos destacam a necessidade de políticas públicas, incentivos financeiros e modelos de decisão estruturados para viabilizar projetos sustentáveis em larga escala.

6.2.2. Síntese dos Resultados da Aplicação das Ferramentas Multicritério

Os resultados da modelagem multicritério forneceu uma análise detalhada das prioridades atribuídas pelos grupos focais aos diferentes critérios relacionados à gestão da iluminação pública. O critério de Redução do Consumo de Energia foi consistentemente priorizado em todos os grupos, destacando sua importância universal para a sustentabilidade.

Outros critérios apresentaram variações nas prioridades, dependendo da perspectiva dos stakeholders:

- Iluminância foi altamente priorizada pelo grupo do LabLux.
- *Design* do Equipamento foi mais valorizado pelos grupos da Prefeitura e do Fabricante.
- Descarte apresentou variação de prioridade entre os grupos, refletindo diferentes percepções sobre sua importância na gestão sustentável.
- Qualidade de Energia foi, de maneira geral, considerada de menor relevância em comparação aos outros critérios.

6.2.3. Integração e Análise dos Resultados

A integração entre os achados da revisão sistemática e os resultados da modelagem multicritério oferece uma compreensão mais abrangente das práticas e prioridades na gestão da iluminação pública.

Enquanto a literatura destaca a eficiência energética e a sustentabilidade como fatores essenciais, a modelagem multicritério revela que a redução do consumo de energia é, de fato, a prioridade central para os diferentes stakeholders. No entanto, a discrepância entre a priorização de critérios como descarte e qualidade de energia sugere que as decisões práticas podem ser influenciadas por fatores técnicos e operacionais específicos.

Essa análise integrada proporciona uma base sólida para o desenvolvimento de políticas públicas mais equilibradas e eficazes, alinhando expectativas teóricas e percepções práticas na modernização da iluminação pública com tecnologia LED.

7. CONCLUSÕES

A revisão sistemática da literatura permitiu identificar que, embora existam políticas e programas de efficientização para uma gestão sustentável da iluminação pública - com a Europa sendo um exemplo notável - a aplicação desses conceitos em outros contextos ainda é limitada. A análise com o software *VOSviewer* destacou uma falta de similaridade entre os poucos atributos relacionados à sustentabilidade na iluminação pública, evidenciando uma lacuna significativa na literatura existente.

A presente pesquisa demonstrou a eficácia da combinação do Processo de Hierarquia Analítica (AHP) com a modelagem por Redes Bayesianas para apoiar a tomada de decisões em projetos de iluminação pública sustentável com tecnologia LED. A abordagem híbrida adotada permitiu:

O método AHP ser aplicado para estruturar e definir os pesos dos critérios com base nas percepções dos especialistas, proporcionando uma avaliação estruturada das prioridades.

A modelagem por Redes Bayesianas possibilitar simulações detalhadas dos resultados e cenários, oferecendo uma ferramenta robusta para justificar as decisões tomadas com base em critérios técnicos, econômicos e ambientais.

Os resultados da modelagem mostraram que o critério C1 – Redução do Consumo de Energia foi consistentemente priorizado em todos os grupos focais, refletindo sua importância universal para a sustentabilidade. Este critério está alinhado diretamente com os objetivos principais da iluminação pública sustentável, como a economia de energia e a redução das emissões de carbono, contribuindo significativamente para os aspectos ambientais e sociais da sustentabilidade.

Por outro lado, o critério C2 – Qualidade de Energia foi o menos priorizado, indicando uma percepção menor de sua relevância em comparação com outros critérios. Isso sugere a necessidade de aumentar a conscientização sobre a importância da qualidade de energia para a durabilidade e eficiência dos sistemas de iluminação.

O critério C3 – Design do Equipamento recebeu alta prioridade dos Grupos Focais do Fabricante e da Prefeitura, evidenciando a importância dos aspectos visuais e funcionais dos equipamentos de iluminação para esses *stakeholders*. Isso indica que o

design não é apenas uma questão estética, mas também uma componente funcional crucial que pode impactar a aceitação e o desempenho dos sistemas.

Em relação ao critério C4 – Descarte, foram observadas variações nas prioridades atribuídas pelos grupos focais, com menor prioridade no Grupo Focal do LabLux e maior em outros grupos. Esta diversidade reflete diferentes níveis de preocupação com o ciclo de vida completo dos produtos e a sustentabilidade, indicando a necessidade de considerar múltiplas perspectivas sobre a gestão do descarte de equipamentos.

A pesquisa reforça a importância da tecnologia LED na redução do consumo de energia elétrica nas cidades, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida urbana. A iluminação pública sustentável deve priorizar não apenas a proteção e a segurança das pessoas e bens, mas também promover a economia e alinhar-se ao desenvolvimento social, econômico e ambiental das áreas urbanas.

Assim, a gestão sustentável da iluminação pública deve englobar os três pilares da sustentabilidade:

Ambiental – Redução do consumo de recursos naturais e das emissões de CO₂.

Econômico – Potencial redução de custos a médio e longo prazo.

Social – Oferta de um serviço de maior qualidade para a população.

A adoção de práticas sustentáveis é crucial para melhorar a qualidade de vida nas cidades e para o cumprimento das metas internacionais relacionadas às mudanças climáticas, tornando a gestão da iluminação pública um fator-chave para o desenvolvimento urbano sustentável. A combinação dos métodos AHP e Redes Bayesianas mostrou-se uma abordagem eficiente para embasar a tomada de decisão, proporcionando uma análise robusta e fundamentada para o planejamento e implementação de projetos sustentáveis de iluminação pública.

REFERÊNCIAS

- ABNT/CEE-246 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LOGÍSTICA REVERSA. **ABNT NBR 10004:2004 -Resíduos sólidos - Classificação**, 2004. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/normagrid.aspx>>
- ABNT/CEE-268 CIDADES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS. **ABNT NBR ISO 37122:2020 - Cidades e comunidades sustentáveis - Indicadores de cidades inteligentes**, 2020. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/normagrid.aspx>>
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5101:2024 - Iluminação Viária - Procedimentos**, 2024.
- ACOSTA, P. **A iluminação pública como fator de segurança, inclusão e sustentabilidade**. Disponível em: <<https://www.worldbank.org/pt/news/opinion/2022/10/06/a-iluminacao-publica-como-fator-de-seguranca-inclusao-e-sustentabilidade>>. Acesso em: 12 set. 2024.
- ADEDIPE, T.; SHAFIEE, M.; ZIO, E. Bayesian Network Modelling for the Wind Energy Industry: An Overview. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 202, p. 107053, out. 2020.
- ARAÚJO, J. F. et al. **Assessment of the Technological update of Public Lighting in Brazil**. [s.l.] Universidade Federal Fluminense, 2019.
- AZIZ, H. et al. Sustainable and cost-effective configuration of street lighting system. **EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica**, v. 68, n. 1, p. 98–106, 2020.
- BARUA, S. et al. Bayesian network based dynamic operational risk assessment. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 41, p. 399–410, maio 2016.
- BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach**. Boston, MA: Springer, 2002.
- BIBRI, S. E. et al. Smarter eco-cities and their leading-edge artificial intelligence of things solutions for environmental sustainability: A comprehensive systematic review. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 19, 2024.
- BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Iluminação Pública**. Disponível em: <<https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/pt/setores/Iluminacao-Publica>>. Acesso em: 16 ago. 2024.
- BOARETO, R. A política de mobilidade urbana e a construção de cidades sustentáveis. **Revista dos Transportes Públicos - ANTP**, n. 3o e 4o trimestres, p. 143–160, 2008.
- BRASIL, P. DA R.-. **Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021**, 2021. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14133.htm>
- CARLI, R.; DOTOLI, M. A Dynamic Programming Approach for the Decentralized Control of Energy Retrofit in Large-Scale Street Lighting Systems. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, p. 1–18, 2020.

CASTRO, D. R. et al. Unleashing the convergence amid digitalization and sustainability towards pursuing the Sustainable Development Goals (SDGs): A holistic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 122204, jan. 2021.

COLE, P. V. Z. A Bayesian Reliability Assessment of Complex Systems for Binomial Sampling. **IEEE Transactions on Reliability**, v. R-24, n. 2, p. 114–117, 1975.

CRD – CENTRE FOR REVIEWS AND DISSEMINATION. **CRD's guidance for undertaking reviews in health care**, 2009.

DALL'O', G. et al. A Multi-Criteria Methodology to Support Public Administration Decision Making Concerning Sustainable Energy Action Plans. **Energies**, v. 6, n. 8, p. 4308–4330, 20 ago. 2013.

DELÉO E OLIVEIRA, R.; AVINO, F. T. Contribuições da modernização do parque de iluminação pública para o enfrentamento de crise energética. **Revista Brasileira de Energia**, v. 28, n. 3, p. 58–82, 2022.

DI LEO, S.; SALVIA, M. Local strategies and action plans towards resource efficiency in South East Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 286–305, fev. 2017.

DÍAZ-DÍAZ, R.; MUÑOZ, L.; PÉREZ-GONZÁLEZ, D. Business model analysis of public services operating in the smart city ecosystem: The case of SmartSantander. **Future Generation Computer Systems**, v. 76, p. 198–214, 2017.

DUIM, F. A. D. C.; LIMA, G. B. A.; GARCIA, P. A. D. A. **Análise de Confiabilidade do Evento Kick em Rede Bayesiana Utilizando Inferência**. 30 out. 2021 Disponível em: <<http://www.abepro.org.br/publicacoes/artigo.asp?e=enegep&a=2021&c=42274>>

ELETROBRAS. Edital De Chamada Pública-01/2021 Projetos De Iluminação Pública-Led Procel Reluz. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024 (Ano base 2023)**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet-2024.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2024.

ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS ADMINISTRATIVAS E MARKETING - ECAM. **O que é a Agenda 2030 e quais os seus objetivos?** Disponível em: <<https://ecam.org.br/blog/o-que-e-a-agenda-2030-e-quais-os-seus-objetivos/>>. Acesso em: 20 set. 2024.

EUROPEAN UNION. **Sustainable Development**. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=LEGISSUM:sustainable_development>. Acesso em: 19 set. 2024.

FARZANEH, H.; DOLL, C. N. H.; PUPPIM DE OLIVEIRA, J. A. An integrated supply-demand model for the optimization of energy flow in the urban system. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 269–285, fev. 2016.

FERREIRA PIMENTA, M. F.; NARDELLI, A. M. B. Desenvolvimento sustentável: os avanços na discussão sobre os temas ambientais lançados pela conferência das Nações Unidas sobre o desenvolvimento sustentável, Rio+20 e os desafios para os próximos 20 anos. **Perspectiva**, v. 33, n. 3, p. 1257–1277, 1 abr. 2016.

GAGO-CALDERÓN, A. et al. Evaluation of uniformity and glare improvement with low energy efficiency losses in street lighting LED luminaires using laser-sintered polyamide-based diffuse covers. **Energies**, v. 11, n. 4, 2018.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: CONCEITUAÇÃO, PRODUÇÃO E PUBLICAÇÃO. **Logeion: Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57–73, 15 set. 2019.

GOLDMAN, T.; GORHAM, R. Sustainable urban transport: Four innovative directions. **Technology in Society**, v. 28, n. 1–2, p. 261–273, jan. 2006.

HIGGINS, J. P.; GREEN, S. **Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions - Version 5.1.0 [updated March 2011]**. Disponível em: <<http://handbook-5-1.cochrane.org/>>. Acesso em: 9 abr. 2021.

HOANG, A. T.; PHAM, V. V.; NGUYEN, X. P. Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, 2021.

HUGIN EXPERT. **Bayesian Networks - Because every bit of information counts**. Disponível em: <<https://www.hugin.com/technology/>>. Acesso em: 10 abr. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>.

IP, B. **O case de Belo Horizonte - MG**. Disponível em: <<http://brasilip.com.br/casebh.php>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

IP MINAS. **Impacto ambiental da iluminação pública: Avanços sustentáveis**.

IRIGARAY, H. A. R.; STOCKER, F. ESG: novo conceito para velhos problemas. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 20, n. 4, p. 1–4, ago. 2022.

JESSEN, F. V. An Introduction to Bayesian Networks . by Finn V . Jensen Review by : Thomas Richardson Published by : American Statistical Association Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/2965591> . Your use of the JSTOR archive indicates your acceptance of the Terms. v. 92, n. 439, p. 1215–1216, 2014.

JUNQUEIRA, A. D.; IWASHITA, J. **Mudanças e novidades com publicação da NBR 5101:2024**. Disponível em: <<https://www.expersolution.com.br/single-post/mudancas-e-novidades-com-a-publicacao-da-nbr5101-2024>>. Acesso em: 7 nov. 2024.

KABIR, S.; PAPADOPOULOS, Y. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. **Safety Science**, v. 115, n. November 2018, p. 154–175, 2019.

KASSEH, Y.; TOUZANI, A. The Lighting Master Plan is a Lever for Efficient and Sustainable Management of Public Lighting in Moroccan Cities. In: KACPRZYK, J.; EZZIYYANI, M.; BALAS, V. E. (Ed.). . [s.l.] Springer, Cham, 2023. p. 302–315.

KAYASIMA, M. **Telegestão e Automação da Iluminação Pública: Um estudo para a cidade de Ilha Solteira**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2024.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. DE O.; BARROS, M. DA S. O Uso Do Método De Análise Hierárquica (AHP) Na Tomada De Decisões Gerenciais - Um Estudo. **Xli Sbpo**, p. 11, 2009.

MÉNDEZ, A. et al. Better, not more, lighting: Policies in urban areas towards environmentally-sound illumination of historical stone buildings that also halts biological colonization. **Science of the Total Environment**, v. 906, n. September 2023, 2024.

MENÊZES, R. DA C. S.; FIRMINO, P. R. A.; DROGUETT, E. L. Análise de confiabilidade humana via redes bayesianas. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (XXXVII SBPO)**, p. 678–685, 2005.

MEYER, M. et al. **Lighting Brazilian Cities: Business Models for Energy Efficient Public Street Lighting**. [s.l.] World Bank, Washington, DC, 2017.

MIKHAILOVA, I. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teróricos e os problemas da mensuração prática. **Revista Economia e Desenvolvimento**, v. 16, p. 22–41, 2004.

MILENKOVIĆ, D.; ĐURIĆ, V. VALUE FOR MONEY IN PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIP PROJECTS IN THE FIELD OF STREET LIGHTING IN THE REPUBLIC OF SERBIA. **EMC Review - Časopis za ekonomiju - APEIRON**, v. 20, n. 2, 21 set. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **MME publica 4º Plano de Aplicação de Recursos do Procel**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-publica-4o-plano-de-aplicacao-de-recursos-do-procel>>. Acesso em: 5 nov. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **São Luís mais iluminada: iluminação pública da capital maranhense está mais moderna e eficiente**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/sao-luis-mais-iluminada-iluminacao-publica-da-capital-maranhense-esta-mais-moderna-e-eficiente>>. Acesso em: 6 nov. 2024.

MOLINA-MORENO, V. et al. The Use of Led Technology and Biomass to Power Public Lighting in a Local Context: The Case of Baeza (Spain). **Energies**, v. 11, n. 7, p. 1783, 7 jul. 2018.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>>. Acesso em: 20 jul. 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Cúpula do Futuro: Oportunidade única para reformar a cooperação global e enfrentar novas e urgentes ameaças**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/278786-cúpula-do-futuro-oportunidade-única-para-reformar-cooperação-global-e-enfrentar-novas-e>>. Acesso em: 6 nov. 2024.

NEIL, M.; LITTLEWOOD, B.; FENTON, N. Applying Bayesian belief networks to system dependability assessment. In: **Safety-critical systems: The convergence of high tech and human factors**. [s.l.] Springer, 1996. p. 71–94.

NOGUEIRA, C. W. **A metodologia multicritério de apoio à decisão Analytic Hierarchy Process (AHP): um estudo de caso na priorização de traçado de pavimentação de uma estrada**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

NOGUEIRA, F. J. et al. Projeto piloto de iluminação pública empregando LEDs em substituição a lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática**, 2014.

ONU. **Our common future. Report of the United Nations Commission on Environment and Development**, 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>>

ORTEGA-MOMTEQUÍN, M.; RUBIERA-MOROLLÓN, F.; PÉREZ-GLADISH, B. Ranking residential locations based on neighborhood sustainability and family profile. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 28, n. 1, p. 49–63, 2 jan. 2021.

PARK, S. et al. Study on Nuclear Accident Precursors Using AHP and BBN. **Science and Technology of Nuclear Installations**, v. 2014, p. 1–12, 2014.

PEARL, J. **Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference**. [s.l.: s.n.].

PEARL, J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference Morgan Kaufmann, San Mateo, California 19882. **Guttman EA Suchman PF Lazarfeld SA Star and JA Classen Wiley New York 1966**, 1988b.

PETTICREW, M.; ROBERTS, H. **Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide**. [s.l.: s.n.].

PINTÉR, G. et al. Study of Photovoltaics and LED Energy Efficiency: Case Study in Hungary. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 790, 29 mar. 2018.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - MG. **PBH autoriza revitalização da iluminação pública da capital**. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/pbh-autoriza-revitalizacao-da-iluminacao-publica-da-capital>>. Acesso em: 22 jan. 2022.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, B. **Lei Federal 10.079/2004** Brasil, 2004. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14133.htm>

REUTER, M. A. et al. Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective. In: CLARKE, DR (Ed.). **ANNUAL REVIEW OF MATERIALS RESEARCH, VOL 49**. Annual Review of Materials Research. [s.l.: s.n.]. v. 49p. 253–274.

ROY, B. The Outranking Approach and the Foundations of ELECTRE Methods. In: **Multicriteria Decision Making: Advances in MCDM**. [s.l.] Springer, 1991. p. 49–73.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. **How to make a decision: The analytic hierarchy process**. **European Journal of Operational Research**. [s.l.: s.n.].

SAATY, T. L. **Decision making with the analytic hierarchy process**. **International Journal of Services Sciences**. [s.l.: s.n.].

SAHEB, T.; DEHGHANI, M.; SAHEB, T. Artificial intelligence for sustainable energy: A contextual topic modeling and content analysis. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 35, n. February, 2022.

SALVIA, A. L. **Eficiência energética em iluminação pública na gestão sustentável de**

ciudades: Estudo de Multicasos. [s.l.] Universidade de Passo Fundo, 2016.

SALVIA, A. L. et al. An analysis of the applications of Analytic Hierarchy Process (AHP) for selection of energy efficiency practices in public lighting in a sample of Brazilian cities. **Energy Policy**, v. 132, p. 854–864, set. 2019.

SALVIA, A. L.; PILONETTO, L.; BRANDLI, L. **Desafios na Aplicação da Sustentabilidade no Setor Elétrico Brasileiro.** In: IX EGEPE - ENCONTRO DE ESTUDOS EM EMPREENDEDORISMO E GESTÃO DE PEQUENAS EMPRESAS, 2016, Passo Fundo - RS

SALVIA, M. et al. Creating a sustainable and resource efficient future: A methodological toolkit for municipalities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 480–496, out. 2015.

SEFFRIN, H. M.; RUBI, G.; JAQUES, P. **Uma Rede Bayesiana aplicada à Modelagem do Conhecimento Algébrico do Aprendiz.** 22 nov. 2013Disponível em: <<http://www.br-ie.org/pub/index.php/sbie/article/view/2538>>

SENADO FEDERAL, C. DE E. T. **Lei 8.666/1993: licitações e contratos**Brasília - DF, Brasil, 2021.

SERRÃO, M.; ALMEIDA, A.; CARESTIATO, A. **Sustentabilidade: Uma questão de todos nós.** São Paulo: Editora Senac, 2020.

SIERRA, L. A. et al. Bayesian network method for decision-making about the social sustainability of infrastructure projects. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 521–534, mar. 2018.

SILVA, L. L. F. DA. **ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL: ASPECTOS ENERGÉTICOS E INSTITUCIONAIS.** [s.l.] UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, L. M. DA et al. Identification of critical success factors for implementing sustainable public lighting management in cities: literature-based applications. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 4, p. 1562, 13 set. 2022.

SODIQ, A. et al. Towards modern sustainable cities: Review of sustainability principles and trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 972–1001, ago. 2019.

SOLANGI, Y. A.; LONGSHENG, C.; SHAH, S. A. A. Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: An integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach. **Renewable Energy**, v. 173, p. 209–222, ago. 2021.

SPAHIU, A.; DHAMO, L.; ZAVALANI, O. LED Street lighting application in municipality of Tirana. **IEEE CANDO-EPE 2018 - IEEE International Conference and Workshop in Obuda on Electrical and Power Engineering**, p. 211–216, 2018.

STRIELKOWSKI, W. et al. Economic efficiency and energy security of smart cities. **Economic Research-Ekonomska Istraživanja**, v. 33, n. 1, p. 788–803, 1 jan. 2020.

TIOSSI, F. M.; SIMON, A. T. ECONOMIA CIRCULAR: SUAS CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DA SUSTENTABILIDADE / CIRCULAR ECONOMY: YOUR CONTRIBUTIONS TO THE DEVELOPMENT OF SUSTAINABILITY. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 11912–11927, 2021.

TORRES-TOLEDANO, J. G.; SUCAR, L. E. Bayesian Networks for Reliability Analysis of Complex Systems. In: [s.l: s.n.]. p. 195–206.

UN WOMEN. **The Shadow Pandemic: Violence against women during COVID-19.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.unwomen.org/en/news/in-focus/in-focus-gender-equality-in-covid-19-response/violence-against-women-during-covid-19>>.

UNITED NATIONS. **Secretary-General's report on "Our Common Agenda"**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.un.org/en/content/common-agenda-report/>>.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME - UNDP. **Human Development Report 2019.** [s.l: s.n.].

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **Global Environment Outlook (GEO).** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.unep.org/geo/>>.

VIEIRA, M.; RUA, O. L.; ARIAS-OLIVA, M. Impact of open innovation in smart cities: The case study of Köln (Germany). **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, v. 9, n. 2, jun. 2023.

WOLDE, Z. et al. Indicators of Land, Water, Energy and Food (LWEF) Nexus Resource Drivers: A Perspective on Environmental Degradation in the Gidabo Watershed, Southern Ethiopia. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 10, p. 5181, 13 maio 2021.

YOON, C.-L. H. E. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications Survey.** New York: Springer, 1981.

APÊNDICE A - Questionário aplicado a pesquisa

Pesquisa sobre o grau de importância dos critérios que compoem um projeto de atualização do parque de iluminação pública.

Essa pesquisa tem como objetivo obter informações acerca da importância dos critérios para os projetos de atualização do parque de iluminação pública brasileira.

As informações registradas aqui serão utilizadas somente para compor as respostas de especialistas no assunto. Portanto, não serão divulgados os dados que permitam identificar os respondentes e suas instituições nos resultados da pesquisa e publicações posteriores.

Agradecemos a sua disponibilidade em responder este questionário e a nos auxiliar no desenvolvimento desta pesquisa.

Nome:

Instituição:

Cargo:

Grau de formação:

Tempo de experiência no tema:

Para preenchimento desta seção faz-se necessário que o respondente decida e/ou escolha quais das dimensões listadas em cada uma das perguntas abaixo possuem o maior nível de importância no momento de se definir um projeto iluminação pública, conforme uma escala de importância de 1 (igualmente importante) a 5 (extremamente importante).

Escala de grau de importância:

Igualmente importante

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

 Extremamente importante

Grau de importância

1. Para a redução de consumo de energia de no mínimo 45% da carga instalada média (W), por meio de eficiência de consumo de IP, opine em relação ao nível de importância entre os seguintes fatores:

- 1.1. Qual o grau de importância da Eficiência em relação ao Fator de Potência?
- 1.2. Qual o grau de importância da Eficiência em relação a Redução das emissões de carbono.
- 1.3. Qual o grau de importância do Fator de Potência em relação a Redução das emissões de carbono?

2. Para a Priorização da qualidade de iluminação nas áreas mais densas da cidade, com menores níveis educacionais, de renda e/ou que apresentem alto índice de ocorrência de crimes e acidentes envolvendo veículos automotores, opine em relação ao nível de importância entre os seguintes fatores:

- 2.1. Qual o grau de importância do alto índice de violência em relação ao risco de acidente de trânsito do local?
- 2.2. Qual o grau de importância do alto índice de violência em relação a fluidez da mobilidade urbana?
- 2.3. Qual o grau de importância do risco de acidente no trânsito em relação a fluidez da mobilidade urbana?

3. Para a obtenção em todo o parque de IP de uma iluminância média mínima (E_{med,mín} – lux), opine em relação ao nível de importância entre os seguintes fatores:

- 3.1. Qual o grau de importância do Estímulo do comércio e turismo (possibilita a população usufruir plenamente do espaço público, cooperando para o crescimento econômico e coletivo da população) em relação ao conforto visual?
- 3.2. Qual o grau de importância do Estímulo do comércio e turismo (possibilita a população usufruir plenamente do espaço público, cooperando para o crescimento econômico e coletivo da população) em relação a influência na fauna e na flora?
- 3.3. Qual o grau de importância do conforto visual em relação a influência na fauna e na flora?

4. Com relação aos aspectos definidores no momento da aquisição do equipamento de IP, opine em relação ao nível de importância entre os seguintes fatores:

- 4.1. Qual o grau de importância do custo de energia elétrica em relação ao tempo de uso (vida útil = 25 anos)?
- 4.2. Qual o grau de importância do custo de energia elétrica em relação ao desing do equipamento de IP instalado?
- 4.3. Qual o grau de importância do tempo de uso (vida útil = 25 anos) em relação ao desing do equipamento instalado?

5. Com relação ao descarte do equipamento de IP após sua substituição, opine em relação ao nível de importância entre os seguintes fatores:

- 5.1. Qual o grau de importância da reciclagem em relação a reutilização do equipamento de IP?
- 5.2. Qual o grau de importância da reciclagem em relação ao programa de devolução ao fabricante?
- 5.3. Qual o grau de importância da reutilização do equipamento de IP em relação ao programa de devolução ao fabricante?

ANEXO 1

PRODUÇÕES TÉCNICAS E TECNOLÓGICAS

Como consequência da presente pesquisa, foram apresentados e publicados em anais de Simpósios, os seguintes artigos:

1 - “Identificação dos fatores críticos de sucesso para a implantação de uma gestão sustentável na iluminação pública das cidades: um levantamento da literatura” nos Anais 3rd NIIC (ISSN: 2763-6186) - Anexos I-a e I-b;

2 - “Aspectos de sustentabilidade em projetos de iluminação no Brasil com suporte de AHP e Rede Bayesiana” no XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2023) e o X Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2023), realizados entre os dias 15 e 18 de outubro de 2023 em Manaus, Amazonas - Anexos II-a e II-b;

E foram publicados os seguintes artigos:

1 - “Impactos da gestão de energia e eficiência energética na redução de demanda de ponta e economia de energia – Estudo de caso: Programa Luz Solidária Enel Rio de Janeiro” na Revista Gestão em Foco – Edição n. 12 – Ano: 2021 - Anexo III

2 - “Identification of critical success factors for implementing sustainable public lighting management in cities: literature-based applications” na BJOPM - Brazilian Journal of Operations & Production Management - Anexo IV. DOI: 10.14488/BJOPM.1562.2022

ANEXO I-a



3rd NIIC – NECSOS' International and Interinstitutional Colloquium
Educação em tempos de pandemia: desafios experimentados e
expectativas
www.niic.com.br | 24 e 26 de Maio de 2021

Identificação dos fatores críticos de sucesso para a implantação de uma gestão sustentável na iluminação pública das cidades: um levantamento da literatura

Luana Merenciano da Silva
Universidade Federal Fluminense
luanamerenciano@id.uff.br

Fernanda Ribeiro Ramos Lopes
Universidade Federal Fluminense
feribeiroramos@gmail.com

Chrystiane Gerth Silveira Abreu
CEFET/RJ
chrysgerth@gmail.com

Gilson Brito Alves Lima
Universidade Federal Fluminense
glima@id.uff.br

Márcio Zamboti Fortes
Universidade Federal Fluminense
mzamboti@id.uff.br

RESUMO

O objetivo deste estudo foi realizar uma pesquisa exploratória na literatura capaz de identificar os fatores críticos de sucesso para a implantação de uma gestão sustentável na iluminação pública das cidades. O método utilizado para tanto foi o levantamento sistemático da literatura aplicado nas bases de periódicos *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*. Como resultado, o estudo evidencia que há escassez de literatura científica publicada em periódicos referente à interseção entre a gestão sustentável e a iluminação pública. Além disso, ficou evidente que as principais práticas realizadas, por meio da temática, estão localizadas nas cidades da Europa.

Palavras-Chave: Sistema de Iluminação de Rua. Iluminação Sustentável. Iluminação Urbana. Eficiência de Recursos. Planejamento energético local.

ABSTRACT

The objective of this study was to conduct an exploratory literature search capable of identifying the critical success factors for the implementation of sustainable management in public lighting in cities. The method used for this was the systematic literature survey applied in the *Web of Science*, *Scopus*, and *Science Direct* journal databases. As a result, the study shows that there is a scarcity of scientific literature published in journals regarding the intersection between sustainable management and public

ANEXO I-b

CERTIFICADO DE PUBLICAÇÃO DE ARTIGO

Certificamos que

LUANA MERENCIANO DA SILVA
FERNANDA RIBEIRO RAMOS LOPES
CHRYSTYANE GERTH SILVEIRA ABREU
GILSON BRITO ALVES LIMA
MÁRCIO ZAMBOTI FORTES

publicaram o artigo intitulado "Identificação dos fatores críticos de sucesso para a implantação de uma gestão sustentável na iluminação pública das cidades: um levantamento da literatura" nos Anais 3rd NIIC (ISSN: 2763-6186).



PROF^a. DR^a. CHRYSTYANE GERTH
Coordenadora Geral do 3rd NIIC
CEFET/RJ



PROF. DR. FERNANDO ARAUJO
Coordenador Científico do 3rd NIIC
Universidade Federal Fluminense

ANEXO II-a

Aspectos de sustentabilidade em projetos de iluminação no Brasil com suporte de AHP e Rede Bayesiana

Luana Merenciano da Silva* Tainá da Silva Rocha Paz**
 Robson Alves Santos*** Lincoln Campelo Dias****
 Gilson Brito Alves Lima***** Márcio Zamboti Fortes*****

*Universidade Federal Fluminense – Niterói – Brasil
 (Tel: 21-26295240; email: luanamerenciano@id.uff.br)

**Universidade Federal Fluminense – Niterói – Brasil
 (email: tainapaz@id.uff.br)

***Universidade Federal Fluminense – Niterói – Brasil
 (email: ralvesantos@gmail.com)

****Universidade Federal Fluminense – Niterói – Brasil
 (email: lincolndias@id.uff.br)

*****Universidade Federal Fluminense – Niterói – Brasil
 (email: glima@id.uff.br)

*****Universidade Federal Fluminense – Niterói – Brasil
 (email: mzamboti@id.uff.br)

Abstract: Objective of this study was to include a support approach, in order to help the public manager in decision-making, in projects related to the modernization and efficientization of the public lighting park by LED (*Light Emitting Diode*) technology combined with multicriteria method AHP (*Analytic Hierarchy Process*) and Bayesian Networks, through probabilistic analysis that most impact the sustainability aspects. The method consists of a quantitative survey that was composed of the development of a new methodological approach with the combination of the AHP method and the Bayesian Network. In conclusion, the results obtained from the Bayesian Network modeling provided invaluable support to the experts involved in the decision-making process. This approach not only made it possible to make complex decisions in a more informed way, but also established a determining parameter for the action to be taken, as well as enriching the process of justification. It is therefore clear that this methodology represents a substantial advance in the ability to address the challenges of sustainability in the management of public lighting systems.

Resumo: O objetivo deste estudo foi incluir uma abordagem de suporte, a fim de apoiar o gestor público na tomada de decisão, em projetos relacionados com a modernização e efficientização do parque de iluminação pública por tecnologia LED (Diodo Emissor de Luz) aliada a combinação do método multicritério AHP (Análise Hierárquica de Processo) e Redes Bayesianas, através de análise probabilística que mais impactem os aspectos de sustentabilidade. O método consiste em uma pesquisa quantitativa que foi composta pelo desenvolvimento de uma nova abordagem metodológica com a combinação do método AHP e da Rede Bayesiana. Em conclusão, os resultados obtidos a partir da modelagem por Rede Bayesiana proporcionaram um suporte inestimável aos especialistas envolvidos no processo decisório. Através desta abordagem, não somente se viabilizou a tomada de decisões complexas de forma mais embasada, mas também se estabeleceu um parâmetro determinante para a ação a ser adotada, além de enriquecer o processo de justificação. Portanto, fica evidente que essa metodologia representa um avanço substancial na capacidade de abordar os desafios da sustentabilidade na gestão de sistemas de iluminação pública.

Keywords: Public Policies; Public Lighting; AHP; Bayesian Network; Sustainability.

Palavras-chaves: Políticas Públicas; Iluminação Pública; AHP; Rede Bayesiana; Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade envolve o uso responsável dos recursos naturais para evitar danos ao meio ambiente e proteger as futuras gerações, especialmente em um contexto de

crescimento urbano e busca pelo progresso econômico. Isso destaca a importância da sustentabilidade, especialmente nas cidades, onde o aumento da população torna o desafio ainda maior. Para abordar essa questão, esforços estão sendo feitos para melhorar a eficiência energética, com foco na redução do consumo de energia, incluindo projetos de iluminação pública que não apenas beneficiam economicamente e

ANEXO II-b



ANEXO III

Revista Gestão em Foco - Edição nº 12 – Ano: 2021

Impactos da gestão de energia e eficiência energética na redução de demanda de ponta e economia de energia – Estudo de caso: Programa Luz Solidária Enel Rio de JaneiroThamires Ferreira de Souza ¹Adriano Pinheiros Fragoso ¹Márcio Zamboti Fortes ¹Luana Merenciano da Silva¹Luiz Octávio Gavião²Gilson Brito Alves Lima ¹¹ Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói – RJ, Brasil.² Escola Superior de Guerra – ESG, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.**Resumo:**

O presente trabalho apresenta um estudo de caso cuja finalidade é analisar o impacto da gestão de energia e eficiência energética do Programa Luz Solidária Enel. Este programa vem incentivando clientes de natureza residencial da Enel Distribuição Rio a adquirir eletrodomésticos com selo *PROCEL* no que diz respeito a redução de demanda de ponta e economia de energia. A análise foi seccionada com base na área de concessão da Enel Distribuição Rio, onde os clientes de tipologia residencial participantes da campanha vendas tiveram os dados de consumo de energia dos eletrodomésticos eficiente e ineficiente, coletados de acordo com a resolução normativa nº 556/2013 do Procedimento do Programa de Eficiência Energética, regidos pela *ANEEL*. Foram analisados os *retrofits* dos sistemas de refrigeração, climatização e iluminação, que no setor residencial possuem o maior índice de consumo de energia e para efeito do impacto na demanda de energia foi verificado o consumo de energia evitada e redução de demanda de ponta.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Refrigeração, Climatização, Iluminação, Redução do Consumo de Energia e Demanda de ponta.

Abstract:

This work presents a case study whose evaluation is the impact of energy management and energy efficiency of the Enel Solidary Light Program. This program has been encouraging residential customers of Enel Distribuição Rio to purchase appliances with the Procel seal in terms of demand reduction cutting edge and energy saving. The analysis was sectioned based on the concession area of Enel Distribuição Rio, where the residential customers participating in the sales campaign had their energy consumption data for the efficient and inefficient appliances collected in accordance with Normative Resolution nº. 556/2013 of the Procedure

ANEXO VI

Identification of critical success factors for implementing sustainable public lighting management in cities: literature-based applications



ISSN 2237-8960 (Online) |



LITERATURE REVIEW

Identification of critical success factors for implementing sustainable public lighting management in cities: literature-based applications

Luana Merenciano da Silva¹, Fernanda Ribeiro Ramos Lopes¹, Chrystiane Gerth Silveira Abreu², Gilson Brito Alves Lima¹, Mário Zamboti Fortes¹, Fernando Oliveira de Araujo¹

¹Fluminense Federal University (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

²Federal Center for Technological Education of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

How to cite: Silva, L. M. (2022). "Identification of critical success factors for implementing sustainable public lighting management in cities: literature-based applications", *Brazilian Journal of Operations and Production Management*, Vol. 19, No. 4, special edition e20221562. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2022.1562>

ABSTRACT

Goal: The objective of this study was to conduct an exploratory literature search capable of identifying the critical success factors for the implementation of sustainable public lighting management in cities.

Design / Methodology / Approach: To accomplish this, the chosen method was a systematic literature survey conducted according to the Cochrane protocol, using the Web of Science, Scopus, and Science Direct journal databases.

Results: As a result, the study shows that there is a scarcity of scientific literature published in journals regarding the intersection between sustainable management and public lighting. In addition, it became clear that the main practices carried out in this area occur in European cities.

Limitations of the investigation: VOSviewer software was used to build and visualize the bibliometric networks and only two correlated attributes were identified, which shows a lack of similarity between them and demonstrates a limitation of this study.

Practical applications: As a practical implication, the present study supports public managers in decision-making regarding sustainable public lighting, demonstrating the need to implement projects in this field.

Originality/Value: Although this is an extremely important subject, the search showed few studies published in this field.

Keywords: Street lighting system; Sustainable lighting; Urban street lighting; Resource efficiency; Local energy planning.

1. INTRODUCTION

Public lighting (PL) is an essential service that plays a relevant role in the development, progress, function, safety, socialization, and valuing of cities. In Brazil, providing PL service is a responsibility of the municipal administrations and the service itself is provided by power companies as well as by the municipal administrations. According to the United Nations Development Program (PNUD, 2021), the world population's access to electricity increased by 5% between 2000 and 2013, going from 79.31% to 84.58%.

* This article is from the 3rd NIIC - NECSOS' International and Interinstitutional Colloquium and was invited to be published in the December/2022 Special Issue of the Brazilian Journal of Operations & Production Management, due to its relevance and contribution to the field.

Financial support: None.

Conflict of interest: The authors have no conflict of interest to declare.

Corresponding author: luanamerenciano@id.uff.br

Received: 07 June, 2022.

Accepted: 07 June, 2022.

Editors: Dr. Chrystiane Gerth Silveira Abreu, Dr. Fernando Oliveira de Araujo, Dr. Istefani Carisio de Paula and Dr. Marcia Elisa Echeveste.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and

1/8

Brazilian Journal of Operations & Production Management, Vol. 19, No. 4 special edition e20221562 | <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2022.1562>