

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

JÚLIA FERNANDES ARAUJO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS (EMI)
PRODUZIDAS POR LÂMPADAS LED: UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO

NITERÓI, RJ

2019

JÚLIA FERNANDES ARAUJO
MATRÍCULA: M054.118.010

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS (EMI)
PRODUZIDAS POR LÂMPADAS LED: UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Márcio Zamboti Fortes, DSc.

Co-orientadora: Prof^{ta}. Nissia Carvalho Rosa Bergiante, DSc.

Niterói, RJ

2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

JÚLIA FERNANDES ARAUJO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS (EMI)
PRODUZIDAS POR LÂMPADAS LED: UMA ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Aprovado em ___/___/___.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcio Zamboti Fortes, DSc. (Orientador)

Universidade Federal Fluminense

Profª. Nissia Carvalho Rosa Bergiante, DSc. (Co-orientadora)

Universidade Federal Fluminense

Prof. Henrique de Oliveira Henriques, DSc.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Luiz Octávio Gavião, DSc

Escola Superior de Guerra (ESG)

Niterói, RJ

2019

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Jubert Araujo e Ana Paula Araujo, que acima de qualquer coisa priorizaram e apoiaram os meus estudos, permitindo a minha caminhada na vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pelo seu amor infinito que me proporcionou força, saúde, sabedoria, paciência e fé para esta caminhada.

À minha família que me apoiou, me deu amor e suporte emocional para encarar as adversidades impostas pela vida, em especial aos meus pais, Jubert Araujo e Ana Paula Araujo, e ainda aos meus amados irmãos, Paulo Estevão Araujo e Rafael Araujo.

Ao meu companheiro de vida Evaldo Junior, que nesses últimos dois anos compreendeu as minhas ausências e esteve ao meu lado todos os dias, acompanhando e facilitando a minha rotina, e ainda por escutar as tantas lamentações durante as madrugadas de estudo.

A todos os funcionários e amigos do LABLUX que me apoiaram durante a coleta de dados e verificação de cada ensaio, sempre dispostos a ajudar e esclarecer qualquer dúvida necessária.

Aos amigos que a UFF me proporcionou, em especial a Luana Merenciano, que esteve comigo desde o início e me ajudou até aqui. A Lorena Baptista que sempre foi a calma em meio ao caos, aos amigos Lucas D'Oliveira e Ranther Melo, que estão comigo desde a graduação e estiveram ao meu lado na batalha diária do curso de mestrado.

Aos amigos que mesmo não citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa, à medida que compreenderam, me deram apoio e aceitaram a minha ausência em muitos momentos.

À minha co-orientadora Níssia Bergiante, que pude conhecer no final do curso, mas que se preocupou e defendeu com afinco cada detalhe deste trabalho, além de compreender cada momento da minha rotina de trabalho, e sobretudo, por ser uma exímia profissional.

E por último, porém não menos importante, a pessoa que segurou a minha mão no projeto proposto, o meu querido orientador e amigo Márcio Zamboti Fortes, que foi muito mais que um orientador, pois sempre acreditou mais em mim do que eu mesma. Tornou-se um exemplo de vida e profissionalismo.

RESUMO

O mercado brasileiro tem adotado o LED na iluminação, seja ela aplicada à indústria, comércio ou residência. Na última década, observou-se um aumento no número de fabricantes desta tecnologia no Brasil, e no interesse, por parte dos consumidores, pela realização dos projetos de *retrofits* buscando a redução do consumo de energia. Entretanto, a influência EMI (Interferência Eletromagnética) proveniente das lâmpadas LEDs, já foram observadas em faixas de frequência de rádio amadora, interferências em sinais de transmissão de TVs e rádios, instalações hospitalares e torres de controle dos aeroportos. À vista disso, o consumidor assume uma difícil tarefa na escolha do produto, dentre os variados modelos disponíveis nas prateleiras. Neste trabalho será apresentada uma metodologia que considera a tomada de decisão a partir de uma análise multicritério, para avaliar o desempenho energético de lâmpadas LEDs com *driver* integrado no mercado brasileiro, auxiliando o consumidor na escolha da melhor alternativa disponível. Para realização deste estudo, utilizou-se a abordagem da ferramenta TOPSIS com pesos por entropia. Para tanto, foram selecionados múltiplos fabricantes da tecnologia LED com características técnicas semelhantes, com intuito de se avaliar através de ensaios em laboratório, os diversos critérios exigidos pelas Portarias do Inmetro nº 144/2015 e nº 389/2014, e ainda pela a ABNT NBR IEC/CISPR15, os quais regulam os ensaios de acreditação e conformidade desta tecnologia no Brasil. Três cenários de análise foram propostos. Além dos resultados de eficiência energética, resultados de qualidade de energia, qualidade de luminotécnica, os resultados das emissões eletromagnéticas conduzidas e radiadas, também foram avaliados, e foram os principais parâmetros de comparação deste estudo. Comprovou-se neste estudo que o aspecto EMC (Compatibilidade Eletromagnética), a princípio desconsiderado no processo classificatório, foi critério diferenciador no ranqueamento proposto. O cenário que considerou critérios luminoenergéticos e relativos a EMC apresentou mesma ordenação do cenário no qual apenas aspectos EMC foram incluídos. Entretanto, uma ordenação diferente foi obtida quando apenas critérios luminoenergéticos foram computados. Isso significa que o aspecto EMC possui relevância qualitativa no processo de classificação da lâmpada LED.

Palavras-chave: Lâmpadas LED, Eficiência Energética, Qualidade de Energia Elétrica, Qualidade Luminotécnica, Emissões Eletromagnéticas, Multicritério, TOPSIS.

ABSTRACT

The Brazilian market has adopted LED in lighting, whether applied to industry, commerce or residence. In the last decade there has been increase in the number of manufacturers of this technology in Brazil and in the interest of consumers in the implementation of retrofit projects aiming to reduce energy consumption. However, the EMI influence from LED lamps has already been observed in amateur radio frequency bands, interferences in TV and radio transmission signals, hospital facilities and airport control towers. As a result, the consumer assumes a difficult task in choosing the product among the various models available on the markets. In this work it will be presented a methodology that considers decision making based on Multi-criteria Analysis to evaluate the energy performance of LED lamps with integrated driver in the Brazilian market, helping the consumer to choose the best available alternative. For the accomplishment of this study, the TOPSIS tool approach with weights by entropy was used. To that end, multiple manufacturers of LED technology with similar technical characteristics were selected in order to evaluate through laboratory tests the various criteria required by the Inmetro Ordinances nº 144/2015 and nº 389/2014, and also by the ABNT NBR IEC / CISPR15, which regulate the accreditation and compliance tests of this technology in Brazil. Three analysis scenarios were proposed. In addition to the results of energy efficiency, results of energy quality, quality of light, results of conduction and radiated electromagnetic emissions were also evaluated, being the main parameters of comparison of this study. In this study, it was verified that the EMC (Electromagnetic Compatibility) aspect, initially disregarded in the classification process, was a differentiating criterion in the proposed classification. The scenario that considered luminoenergetic criteria and also related to EMC presented the same order of the scenario in which only EMC aspects were included. However, different ordering was obtained when only lumino-energetic criteria were computed. This means that the EMC aspect has qualitative relevance in the LED lamp classification process.

Keywords: LED Lamps, Energy Efficiency, Electric Power Quality, Lighting Quality, Electromagnetic Emissions, Multicriteria, TOPSIS.

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
1.1	Motivação.....	3
1.2	Objetivos.....	5
1.3	Contextualização Inicial.....	7
1.4	Estrutura do documento.....	7
2	Revisão Conceitual.....	9
2.1	Evolução do LED.....	9
2.2	Regulamentações Normativas para o LED.....	11
2.3	Interferência eletromagnética.....	12
2.3.1	Emissão Conduzida.....	14
2.3.2	Emissão Radiada.....	14
2.4	Fontes EMI.....	15
2.5	Limites Permissíveis.....	16
2.5.1	Tensões de perturbação em terminais de alimentação.....	18
2.5.2	Perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo Magnético).....	19
2.5.3	Perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo elétrico).....	21
2.6	Técnicas de Análise Multicritérios.....	23
2.6.2	Métodos de utilidade multiatributo.....	26
2.6.3	Métodos Outranking.....	26
2.6.4	Métodos Compromisso.....	27
2.6.5	Outros métodos MCDM.....	27
2.6.6	Escolha do Método TOPSIS.....	28
3	Metodologia e Descrição do Caso.....	32
3.1	Problema Proposto.....	32
3.2	Descrição do Método Utilizado: TOPSIS.....	34
3.2.1	Etapas do Método TOPSIS.....	36
3.3	Seleção de Critérios.....	40
3.3.1	Definição dos Critérios.....	41
3.4	Critérios Para Seleção de Amostras.....	49
3.4.1	Descrição dos Testes e Ensaios.....	50
3.5	Cenários de Análise.....	61

3.5.1	Primeiro Cenário – Parâmetros Lumino-energéticos.....	61
3.5.2	Segundo Cenário – Parâmetros de Compatibilidade Eletromagnética (EMC)	67
3.5.3	Terceiro Cenário – Combinação dos Parâmetros Lumino-energéticos e Compatibilidade Eletromagnética – EMC.....	75
4	Resultados e Análises.....	80
4.1	Resultados da Aplicação do Método TOPSIS: Avaliação do Primeiro Cenário – Parâmetros Lumino-energéticos.....	81
4.2	Resultados da Aplicação do Método TOPSIS: Avaliação do Segundo Cenário – Parâmetros de Compatibilidade Eletromagnética (EMC)	87
4.3	Resultados da Aplicação do Método TOPSIS: Avaliação do Terceiro Cenário – Parâmetros Lumino-energéticos + Parâmetros de Compatibilidade Eletromagnética (EMC)	93
4.4	Análise Crítica da Proposta.....	101
5	Considerações Finais.....	105
	Referências Bibliográficas.....	109

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Lâmpada LED [20].....	9
Figura 2 - Espectro Eletromagnético - Adaptado de [42]	17
Figura 3 - <i>Setup</i> dos equipamentos utilizados durante a medição das tensões de perturbação nos terminais de alimentação das lâmpadas [17].....	19
Figura 4 – Antena Loop.	20
Figura 5 - <i>Setup</i> dos equipamentos utilizados durante a medição de perturbações radiadas (campo elétrico) das lâmpadas [17].....	21
Figura 6 – Equipamento CDN utilizado durante o ensaio de perturbação radiada (campo elétrico).	22
Figura 7 - Métodos de Decisão Multicritério [46].	25
Figura 8 - Distribuição de Trabalhos de 1995 a 2015 [52].	30
Figura 9 – Esquema Metodológico.	32
Figura 10 - Distância euclidiana de dois pontos (A1 e A2) até a solução ideal positiva e solução anti-ideal no espaço bidimensional. Fonte: autor, baseado em [55].	36
Figura 11 - Fluxo Luminoso (Φ) emitido por uma lâmpada [63].	42
Figura 12 - Reprodução de cores e seus índices [7]......	46
Figura 13 – Reprodução de Cor [71].....	46
Figura 14 - Temperaturas de cor típicas [72].	47
Figura 15 – Fonte luminosa [63].	47
Figura 16 - Ângulo sólido ω correspondente à área $S = 1\text{m}^2$ em uma esfera de raio $r = 1\text{m}$ [75].	48
Figura 17 – Ângulo de Facho [76].	48
Figura 18 - Equipamentos Utilizados nas Medições dos Parâmetros Elétricos e Fotométricos: (a) Esfera integradora de Ulbricht e (b) Fonte de Tensão. Fonte: o autor. Erro! Indicador não definido.	
Figura 19 - Equipamentos Utilizados nas Medições dos Parâmetros Elétricos e Fotométricos: (a) Espectroradiômetro, (b) Wattímetro, (c) Computador e (d) Goniofotômetro. Fonte: o autor. Erro! Indicador não definido.	
Figura 20 - Espectro de Frequência - Terminal Neutro (dB μ V) - 127V. Fonte: Gráfico gerado no <i>Software</i> EMC Engineer v4.10 e retirado do relatório de ensaio do LABLUX.....	57

Figura 21 - Tensão de ensaio: 127V – Eixo X da antena Loop, Fonte: Gráfico gerado no <i>Software</i> EMC Engineer v4.10 e retirado do relatório de ensaio do LABLUX.....	59
Figura 22 - Espectro de Frequência - 127V. Fonte: Gráfico gerado no <i>Software</i> EMC Engineer v4.10 e retirado do relatório de ensaio do LABLUX.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites das Tensões de Perturbação nos Terminais de Alimentação	19
Tabela 2 – Limites de Perturbação Radiada nas Frequências de 9 kHz a 30 MHz.....	20
Tabela 3 – Limites de Tensão nos Terminais em Modo Comum, Método CDN. Limites de Perturbação Radiada nas Frequências de 30 MHz a 300 MHz	22
Tabela 4 - Distribuição de artigos sobre TOPSIS ao longo dos anos	29
Tabela 5 - Métodos MCDA para os diferentes problemas.....	31
Tabela 6 - Terminal Neutro (dB μ V) - 127V	57
Tabela 7 - Tensão de ensaio: 127V – Eixo X da antena Loop.....	59
Tabela 8 - Tensão de ensaio: 127V	60
Tabela 9-a - Cenário 1 - Parâmetros Lumino-energéticos – Modelo Referência: Lâmpada LED Tubular 18W - (6000 – 6500) K - 127V	62
Tabela 10-a - Emissão Conduzida -Terminal Neutro-127V	68
Tabela 11-a - Emissão Conduzida-Terminal Fase-127V	69
Tabela 12-a - Emissão Conduzida - Minimax $\{\Delta f(N \text{ e } F)\}$ - 127V	70
Tabela 13-a - Emissão Radiada pela Componente Magnética - Eixo X - 127V.....	72
Tabela 14-a - Emissão Radiada pela Componente Magnética - Eixo Y - 127V.....	72
Tabela 15-a - Emissão Radiada pela Componente Magnética - Eixo Z - 127V	73
Tabela 16-a - Emissão Radiada pela Componente Elétrica - 127V	74
Tabela 17-a - Emissão Radiada pela Componente Magnética – Minimax $\{\Delta f(X, Y, Z)\}$ - 127V.....	75
Tabela 18-a – Segundo Cenário - Parâmetros de Compatibilidade Eletromagnética – EMC – 127V.....	76
Tabela 19-a – Terceiro Cenário - Parâmetros Lumino-Energéticos + Parâmetros de Compatibilidade Eletromagnética – EMC – 127V	78
Tabela 20 - Tabela resumo dos critérios selecionados e consolidados para a avaliação multicritério.....	81
Tabela 21 – Primeiro Cenário - Tabela Resumo	81
Tabela 22 – Segundo Cenário - Tabela Resumo	82
Tabela 23 – Terceiro Cenário - Tabela Resumo	82
Tabela 24 - Etapas TOPSIS - Tabela Resumo	84

Tabela 25-a – Primeiro Cenário - Parâmetros Lumino-energéticos - Resultado Ranqueamento - 127V.....	89
Tabela 26-a - Segundo Cenário - Parâmetros EMC – Resultado Ranqueamento – 127V	96
Tabela 27-a - Terceiro Cenário - Parâmetros Lumino-energéticos + EMC – Resultado Ranqueamento – 127V.....	105
Tabela 28-a - Cenários Propostos - Comparação – Resultado Ranqueamento – 127V	106

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AHP	The Analytical Hierarchy Process
ANP	Analytic network process
CDN	<i>Coupling/Decoupling Network</i>
ELECTRE	<i>Elimination Et Choix Traduisant la Realité</i>
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
EMS	<i>Electromagnetic Susceptibility</i>
ENCE	<i>Alternative Transient Program</i>
LFC	Lâmpadas Fluorescentes Compactas
GaAS	Arsenieto de Galio
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MCA	<i>Multicriteria Analyse</i>
MCDA	<i>Multicriteria Decision Analyse</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
MR	<i>Multifaceted Reflector</i>
NIS	Solução Negativa Ideal
P	<i>Lâmpada de Bulbo Tubular Pear Shape</i>
PAR	<i>Parabolic Aluminium Reflector</i>
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>
RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade
RTQ	Regulamento Técnico de Qualidade
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution
VIKOR	ViseKriterijumskaOptimizacija i KompromisnoResenje

1. INTRODUÇÃO

Com a recente crise energética que fomenta o Brasil na última década, sendo mais expressiva nas grandes capitais, diversos setores da economia buscam alternativas para mitigar os efeitos deste atual cenário, sendo assim, é imprescindível a redução do consumo de energia em suas variadas formas. Estudos afirmam que 20% do consumo residencial de eletricidade do Brasil é gasto em iluminação, além do crescente consumo comercial. Deste modo, é consenso que o uso racional da energia, no que tange também a iluminação, é uma solução para este problema [1].

Atualmente, a iluminação assume um importante patamar do consumo de energia dos países. Segundo relatório emitido em 2010 pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, o consumo com iluminação atingiu 18% do consumo total de eletricidade. Por este motivo, e considerando que o indicador populacional do Brasil mostra uma aproximação com os Estados Unidos [2], a prática de projetos de *retrofits* vem sendo incentivada por parcerias públicas privadas em países desenvolvidos e em desenvolvimento [3].

Nas últimas décadas, o segmento da iluminação vem passando por constantes mudanças, uma vez que a tecnologia LED (*Light Emitting Diode*) se acentua no mercado dentre as demais tecnologias. O diodo emissor de luz, o LED, destaca-se ainda pela qualidade do iluminamento além de ser energeticamente mais eficiente e, ademais, assegura-se que até 2023 o LED alcançará um percentual de 74% das vendas no setor comercial, no que concerne a extensa gama de projetos de *retrofits*. Pode-se dizer que o remodelamento do mercado de iluminação com a inserção desta tecnologia equipara-se a revolução provocada pela eclosão da lâmpada incandescente de Thomas Edison no ano de 1879 [4].

No que tange ao consumidor, pode-se dizer que os recorrentes aumentos das tarifas de energia impulsionaram ao uso desta nova tecnologia. Entretanto, tal tecnologia conta com diversos parâmetros frente às Lâmpadas Fluorescentes Compactas (LFCs), pois além das diversas opções de potência e níveis de eficiência energética, o LED conta com a qualidade de iluminamento e um favorável desempenho energético, e ainda contribui significativamente com as questões ambientais, reduzindo a emissão de CO₂ na matriz energética, de acordo com diversos estudos [5, 6].

As LFCs já contam com a etiqueta Etiqueta Nacional de Eficiência Energética (ENCE), criada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) para facilitar a escolha do consumidor, a partir de uma escala sequenciada de A a E. Esta etiqueta é padronizada no Brasil para as LFCs desde 2001, e contém informações de alguns parâmetros como fluxo luminoso, potência elétrica e o valor da eficiência energética e, ainda, o organismo que certificou o produto [7].

No ano de 2016 a ENCE passou a ser obrigatória para o LED, segundo exigências da Portaria nº144/2015 [8]. Todavia, esta etiqueta é utilizada no Brasil para indicar o menor desempenho energético aceitável. No entanto, a tecnologia LED excede em qualidades, ou seja, apresenta uma significativa quantidade de parâmetros frente as tecnologias anteriores, tornando a escolha de uma lâmpada uma complexa tarefa.

Com o recente avanço da tecnologia LED, e a sua disseminação no mercado devido ao aumento da sua vida útil, economia de energia, não agressão ao meio ambiente e recorrente diminuição no custo comercial, esta inovação tecnológica ganhou notoriedade diante do consumidor, e passou ser considerada uma forte substituta às soluções hoje empregadas na iluminação artificial. Diante deste avanço, inicia-se uma nova época na indústria de iluminação, uma vez que o crescente acesso a esta tecnologia permite ao consumidor um gama de benefícios, como cores e formatos variados, além de sua vida útil mais longa. Por estes e outros inúmeros proventos, o consumidor poderá ter dúvidas ao decidir sobre a escolha do produto para melhor adequar-se às suas necessidades.

Atualmente, ainda não existe uma padronização que auxilie o consumidor nesta escolha, principalmente aquele que consome em escala comercial e industrial, no que tange qual fabricante possui a melhor eficiência energética ou melhor qualidade de iluminação (luz emitida), e estas características dependerão da qualidade do material que constitui o LED. Um importante parâmetro que deve ser avaliado é qualidade de energia, uma vez que a mesma é uma fonte de ruído eletromagnético, e possui grande impacto na rede elétrica.

Ainda neste mesmo contexto, a compatibilidade eletromagnética será um relevante parâmetro a ser considerado neste trabalho, uma vez que, recentemente, esta foi adicionada aos critérios de certificação da lâmpada, regidos pela Portaria nº389/2014 [9] que estabelece os requisitos que devem ser atendidos pela lâmpada LED, e ainda pela ABNT NBR IEC/CISPR 15:2014 [10], que avalia limites mínimos permissíveis para as medições das radioperturbações

características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares. Esta inclusão dar-se-á devido aos constantes problemas de ruídos causados pelas lâmpadas LEDs nas faixas de frequências de rádio amadora. Ademais, já foram constatados eventos de interferências de sinais em transmissão de TVs e rádio resultantes do uso da tecnologia LED. Incômodos como estes já relatados podem ocorrer em locais com grande relevância, como por exemplo instalações hospitalares, torres de controle de aeroportos e aviões, que poderão infringir em riscos para usuários caso os limites estabelecidos pela normativa sejam excedidos [11].

Hoje, já existem alguns trabalhos que fazem referência à avaliação da qualidade de dispositivos de iluminação, como a análise da qualidade de energia em lâmpadas incandescentes, fluorescentes e LED [1], propostas de soluções para problemas de qualidade de energia devido ao uso massivo de lâmpadas fluorescentes compactas [12], e ainda diversos estudos aplicando a tecnologia LED aos sistemas de iluminação pública [13].

À face do exposto, este trabalho tem o propósito de realizar uma avaliação do desempenho energético total da lâmpada LED, levando em consideração a eficiência energética, qualidade de energia, qualidade de luminotécnica, e compatibilidade eletromagnética. Este estudo será realizado seguindo a linha de pesquisa comparativa de tecnologias e critérios de avaliação apresentados em [14, 15].

Por conseguinte, será utilizada nesta avaliação a ferramenta de análise multicritério TOPSIS, que define a melhor performance dentre as alternativas por meio da similaridade da mesma com a solução ideal. Deste modo, o TOPSIS será aplicado para ranquear os fabricantes de melhor desempenho energético, e ainda classificar os níveis de compatibilidade eletromagnética frente a este desempenho.

1.1 MOTIVAÇÃO

Na última década, percebe-se um aumento significativo de inúmeros fabricantes da tecnologia LED no mercado brasileiro e, somado a isso, um acentuado interesse por parte dos consumidores para a realização dos projetos de *retrofits* para uma maior redução do consumo de energia. Dado este panorama, o consumidor assume uma difícil tarefa na escolha do produto, visto que ainda não existem estudos apresentados com foco na utilização de ferramentas multicritérios como apoio a tomada de decisão na classificação dos variados modelos disponíveis nas prateleiras.

Entre os temas de pesquisas e debates no setor eletroenergético que abordam curiosidades e inovações deste, o assunto que tem tomado a cena em debates é a questão de como definir a melhor lâmpada LED para a realização dos diversos projetos de *retrofit* em indústrias, residências, comércios, e em outros ambientes onde deseja-se implantar esta tecnologia, e ainda de como conceituar uma maneira de classificá-la com o melhor parâmetro para o objetivo final do consumidor [16]. Para tanto já foi apresentado em [17] uma alternativa que propõe uma classificação e alteração da etiqueta do PROCEL, evidenciando para que tipo de consumidor a lâmpada será mais indicada, seja ele, residencial, industrial ou comercial, avaliando os critérios de eficiência, iluminação e energia.

Ademais, outros critérios também devem ser analisados quando da implantação da tecnologia LED, pois a substituição dessas lâmpadas não é uma tarefa tão simples como substituir uma lâmpada incandescente, onde avalia-se somente a potência em watts (W). Merecem destaque, fatores como impacto sobre níveis de distorção harmônica exigida para que não afetem a operação de equipamentos sensíveis, como por exemplo um radar dentro de uma embarcação. Outro importante parâmetro a ser avaliado são as interferências eletromagnéticas que as lâmpadas poderiam causar, e este requisito geralmente encarece os valores de aquisição do produto [18].

Neste trabalho além de avaliar-se alguns dos mesmos parâmetros propostos em [17], será também utilizada a ferramenta TOPSIS, a fim de ranquear os fabricantes de melhor desempenho luminoenergético, e assim classificar os níveis de compatibilidade eletromagnética frente a este desempenho.

Nesse contexto, o trabalho contará com os resultados dos ensaios de certificação realizados no laboratório de iluminação da Universidade Federal Fluminense, o LABLUX, onde este é um Organismo de Certificação do Produto (OCP) do INMETRO, e neste caso, certifica as diversas categorias de iluminação hoje existentes, sendo estas as lâmpadas, reatores e luminárias. Estes resultados serão selecionados de acordo com a metodologia proposta neste estudo, e com embasamento principal nas regulamentações hoje existentes para a fabricação de lâmpadas LED no Brasil.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é avaliar através da ferramenta de análise multicritério TOPSIS, critérios facilitadores para definir dentre a gama de benefícios que a tecnologia LED propõe, a melhor escolha para um modelo de lâmpada a ser implantada no ambiente do consumidor, seja ele residencial, industrial ou comercial. Desta maneira, este trabalho permitirá a categorização da tecnologia para atender a necessidade de acordo com o perfil do consumidor, isto é, apoiar os usuários finais sobre o melhor produto no mercado. E para tanto, este estudo irá investigar como a influência do aspecto Interferência Eletromagnética (*Electromagnetic Interference* - EMI), a princípio desconsiderado como processo classificatório, poderá atribuir um impacto diferenciador no ranqueamento a ser realizado. Deste modo, pretende-se com este estudo apresentar às organizações regulamentoras, novos aspectos qualitativos que deverão ser considerados, devido à inserção massiva desta nova tecnologia no mercado brasileiro.

Sendo assim, este estudo avalia todos os parâmetros de certificação nacional para o LED, contemplando blocos como qualidade de eficiência energética, qualidade de energia, qualidade de luminotécnica, e a qualidade das emissões eletromagnéticas, sendo estas as conduzidas, as radiadas eletromagnéticas, e as radiadas elétricas, onde os fatores de Compatibilidade Eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility* - EMC) serão os principais parâmetros de comparação desta pesquisa, frente ao desempenho luminoenergético da lâmpada LED.

Através destas análises será elaborado um ranqueamento a fim de verificar o desempenho luminoenergético total das lâmpadas avaliadas, assim como investigar o comportamento desta ordenação quando as emissões eletromagnéticas são consideradas nesta comparação. O objetivo deste ranqueamento tem o propósito de apoiar os usuários finais sobre o melhor produto no mercado, uma vez que os parâmetros técnicos a serem considerados são inúmeros e moderadamente disseminados.

E ainda como proposta base, este estudo vislumbra evidenciar para as organizações regulamentoras novos aspectos qualitativos que devem ser considerados devido à inserção massiva desta nova tecnologia no mercado brasileiro. Deste modo, busca-se comprovar neste trabalho que os aspectos de EMC, que hoje são desconsiderados para o processo classificatório das etiquetas do PROCEL e do INMETRO, impulsionarão um impacto diferenciador no ranqueamento proposto para esta tomada de decisão pelo consumidor final.

A partir dos ensaios coletados no LABLUX e a fim de atingir o objetivo do trabalho, foram selecionados os seguintes critérios para a ordenação do ranqueamento, que também são testados para obtenção da certificação:

- a) Potência (W);
- b) Fluxo Luminoso (lm);
- c) Eficiência Luminosa (lm/W);
- d) Manutenção do fluxo luminoso (%);
- e) Corrente (mA);
- f) Fator de Potência Nominal;
- g) Distorção Harmônica - THD(%);
- h) Índice de Reprodução de Cor - IRC ou Ra;
- i) Índice de Reprodução de Cor - R9;
- j) Temperatura de Cor Correlatada - TCC(K);
- k) Ângulo de Facho (°);
- l) Intensidade Luminosa de Pico (cd);
- m) Análise de Interferência Eletromagnética;
 - Emissões Conduzidas;
 - Emissões Radiadas Magnéticas;
 - Emissões Radiadas Elétricas;

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO INICIAL

O mercado brasileiro tem adotado o LED como destaque na iluminação, seja ela aplicada à indústria, comércio ou residência. Dentre os países da América Latina, estima-se que o Brasil contribua significativamente com a receita para o mercado de iluminação LED dessa região entre 2017-2023. O crescimento da tecnologia no mercado brasileiro pode ser atribuído ao declínio do custo de produção de LEDs e ao aumento da demanda por iluminação eficiente e sustentável. A escolha pelo LED aumenta continuamente nas aplicações de iluminação residencial, comercial e industrial, podendo representar 84% das vendas de iluminação até 2030 [19]. Segundo estatísticas, 70% das lâmpadas mais comercializadas no mercado de iluminação frente às demais tecnologias são os LEDs, e ainda pode-se afirmar que há uma perspectiva de que a principal fonte luminosa do país na próxima década seja o LED [20]. O LED é uma tecnologia única que por ser recente no mercado, ainda não existem literaturas específicas sobre a mesma, e deste modo, alguns parâmetros devem ser observados quanto aos cenários da tecnologia.

A aplicação massiva de uma tecnologia, quando não analisada de uma forma mais crítica, pode causar efeitos adversos a uma gama de equipamentos, entre eles a EMI, que é considerada como requisito certificador, mas não elemento classificador na embalagem do produto da dada tecnologia. Por conseguinte, este trabalho irá utilizar ferramentas para fundamentar a importância do critério EMC a ser inserido também como elemento classificador para o consumidor final, visto que estas interferências já foram observadas nas faixas de frequências de rádio amadora, interferências de sinais em transmissão de TVs, rádios, e ainda podem ocorrer em locais com grande relevância, como por exemplo instalações hospitalares, torres de controle de aeroportos e aviões [11].

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Esta pesquisa está dividida em cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório ao tema principal deste trabalho, que engloba a descrição do problema e sua contextualização, assim como objetivos, motivações e contribuições, além da estrutura deste, que será apresentada a seguir:

- No Capítulo 2, "REVISÃO CONCEITUAL", são apresentados alguns conceitos com o intuito de introduzir o leitor no tema abordado, introduzindo conhecimentos sobre a evolução do LED, as regulamentações normativas, o

surgimento das interferências eletromagnéticas provenientes da iluminação LED e suas classificações, além de apresentar alguns conceitos circundantes para o melhor entendimento da compatibilidade eletromagnética.

- O Capítulo 3, "METODOLOGIA", apresenta de forma detalhada todos os testes que são realizados no laboratório para as lâmpadas LED, o qual nos fornece embasamento e dados para avaliar o desempenho luminoenergético total da lâmpada LED, levando em consideração a eficiência energética, qualidade de energia, qualidade de luminotécnica e ainda os parâmetros de compatibilidade eletromagnética. A partir dos dados obtidos em laboratório, será realizada uma análise multicritério a partir da ferramenta TOPSIS, para avaliar os critérios adotados frente às classificações hoje existentes na embalagem do produto, a fim de ranquear os fabricantes de melhor desempenho luminoenergético, e assim classificar os níveis de compatibilidade eletromagnética frente a este desempenho. Neste capítulo será apresentado cada cenário analisado, bem como todas as considerações adotadas para obtenção dos resultados.
- No Capítulo 4, "RESULTADOS E ANÁLISES", mostram-se os resultados das análises realizadas com base na teoria descrita. Este capítulo dedica-se a apresentar o ranqueamento fornecido pelo uso da ferramenta TOPSIS a partir dos dados disponíveis para cada cenário analisado, assim como a comparação do ranqueamento para o cenário luminoenergético quando adicionados os parâmetros de EMC nesta análise. Nesse capítulo também são consolidados todos os resultados obtidos de forma a visualizar de uma maneira geral e subsidiar conclusões.
- O Capítulo 5, "CONCLUSÕES", apresenta as principais conclusões deste trabalho, comentando as contribuições efetivamente alcançadas e apresentando possibilidades de trabalhos futuros.

2 REVISÃO CONCEITUAL

Nesse capítulo será apresentada a revisão de literatura para a tecnologia de iluminação LED, bem como as normas vigentes para a mesma. Neste mesmo capítulo serão abordados alguns exemplos de interferência EMI provenientes de lâmpadas LED, assim como a classificação e definições destas emissões eletromagnéticas, além de apresentar os limites permissíveis para que a tecnologia LED opere sem ocasionar interrupções em outros equipamentos eletroeletrônicos.

Ainda nesta revisão conceitual, e considerando que a ferramenta de apoio neste estudo é o TOPSIS, serão apresentadas as principais técnicas de análise multicritérios, bem como a justificativa do método adotado nesta análise.

2.1 EVOLUÇÃO DO LED

O LED é uma sigla originada do termo em inglês *Light Emitting Diode* que significa Diodo Emissor de Luz. Os LEDs são dispositivos semicondutores que convertem a eletricidade em fótons de luz de frequências variáveis, incluindo o espectro visível, ou seja, radiação sob a forma de luz quando estimulado por uma corrente elétrica, o que difere da maioria dos componentes eletrônicos que liberam energia através do calor. O LED é capaz de liberar a energia que excede em forma de luz [21]. A luz do LED é gerada por meio de uma peça sólida de um material semicondutor (o que diverge do tubo de vácuo ou gás em lâmpadas incandescentes e fluorescentes tradicionais), por isso, a iluminação LED é conhecida e classificada como “iluminação de estado sólido” [22], e seu esquemático é mostrado na Figura 1.

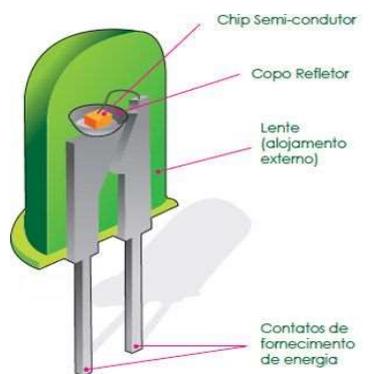


Figura 1 - Lâmpada LED [20].

A primeira observação do fenômeno de emissão de luz a partir de um semicondutor foi em 1907, apesar de ser uma tecnologia disseminada nos tempos modernos, tal acontecimento foi observado por Henry Joseph Round que, acidentalmente descobriu os efeitos físicos da eletroluminescência ou seja a conversão de energia elétrica em luz. Na época, Henry ainda publicou que o cristal de SiC emitiu uma luz amarela ao ser submetido a uma pequena tensão elétrica, entretanto este fato não foi estudado, pois a pesquisa abordada era sobre rádio transmissão [23].

No ano de 1961, pesquisadores da *Texas Instruments*, Robert Biard e Gary Pittman transformam o futuro da iluminação, pois descobrem que o Arsenieto de Galio (GaAs), quando percorrido por uma corrente elétrica, emitia uma radiação infravermelha, invisível ao olho nu. Apesar de Biard e Pittman patentarem a descoberta, em 1962 o cientista norte-americano Nick Holonyak Jr. da *General Electric* foi denominado o “pai do LED”, pois foi ele quem conseguiu tornar a luz emitida pelo semicondutor visível, e assim foi introduzido o primeiro diodo vermelho no mercado. Em 1971, as pesquisas se impulsionaram, e outros especialistas conseguiram aumentar a sua intensidade e surgiram no mercado tonalidades de verde, amarelo e laranja. Entretanto, neste mesmo ano surge o LED azul, ainda com intensidade luminosa muito baixa, mas em 1989 são aprimorados e disponibilizados ao uso comercial, em aplicações como as TVs de LED, painéis RGB, entre outros. Apenas em 1993 os LEDs atingem o setor de iluminação, onde ocorreu sob uma nova perspectiva a descoberta da luz branca pelo japonês Shuji Nakamura, que iria proporcionar iluminação ambiente com economia de energia, além de durabilidade e com baixo prejuízo ao meio ambiente. Essa descoberta rendeu ao Dr. Nakamura o Prêmio Nobel de Física de 2014, juntamente com Isamu Akasaki e Hiroshi Amano, todos pesquisadores japoneses [24, 25].

No ano de 2008 surge o LED de alto desempenho, com uma eficiência de até 120 lm/W, com IRC de 80-89%. Atualmente, grandes fabricantes investem demasiadamente para conseguir proporcionar produtos LEDs de qualidade, aptos a competir com as lâmpadas tradicionais, chegando a faixa de 200 lm/W. Estes produtos de alta performance ainda não chegaram na iluminação residencial [26].

A aplicação da tecnologia LED na construção de lâmpadas é uma engenharia moderna, mas em processo de expansão. Os LEDs apresentam um novo conceito nos setores da

iluminação, proporcionando uma maior durabilidade e eficiência energética em equiparação com as demais lâmpadas há anos já consolidadas no mercado [27].

2.2 REGULAMENTAÇÕES NORMATIVAS PARA O LED

No Brasil, com o fim da fabricação da lâmpada incandescente no ano de 2016 e fim da comercialização geral em 2017 [8], o interesse pelo LED ganhou uma maior visibilidade. Diante da crescente ascensão do LED no mundo, os critérios para comercialização deste se intensificaram à medida que as importações se tornaram maiores e competitivas. Nos dias atuais, para comercializar o LED dentro do território brasileiro é necessário seguir uma série normativas e regulamentações técnicas. Dentre estas, estão os critérios de certificação do INMETRO regido pela Portaria nº 144, de 13 de Março de 2015 [8], e Portaria nº 389, de 25 de Agosto de 2014 [9], e os requisitos necessários para atender as exigências do selo PROCEL e a etiqueta ENCE, a qual passou a ser obrigatória para a tecnologia LED no ano de 2016, conforme redação inserida na RAC (Requisitos de Avaliação da Conformidade). Ainda para esta certificação, é necessário cumprir os limites e métodos de medição para a verificação da influência EMI ou Susceptibilidade Eletromagnética (*Electromagnetic Susceptibility - EMS*), e o grau de EMC por esta tecnologia, que são regidos pela ABNT NBR IEC/CISPR 15:2014 [10].

A ABNT NBR IEC/CISPR 15:2014 [10] é a normativa responsável por verificar a compatibilidade eletromagnética, pois define os *Limites e métodos de medição das radioperturbações características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares*.

A Portaria nº 144, de 13 de Março de 2015 [8], referida acima, é a RAC que estabelece os requisitos de avaliação da conformidade para lâmpadas LED com dispositivo integrado à base, ou seja, define o modelo de avaliação e como se dará o funcionamento da certificação, e a Portaria nº 389, de 25 de Agosto de 2014 [9], é o Regulamento Técnico de Qualidade (RTQ) para lâmpadas LEDs com dispositivos de controle integrado à base, o qual define todos os ensaios a serem realizados, assim como os critérios de aprovação dos mesmos.

A vida nominal mínima para o LED é de 25.000 horas, segundo a RAC [8], e com garantia de três anos. Anualmente os fabricantes são ensaiados por laboratórios acreditados para a manutenção da certificação.

Os ensaios de desempenho que devem ser previstos e mencionados nas embalagens do produto são: potência elétrica, fator de potência, corrente, THD, fluxo luminoso, eficiência

luminosa, índice de reprodução de cor (IRC), temperatura de cor correlata (TCC), ângulo de fecho, valor da intensidade luminosa de pico e manutenção do fluxo luminoso.

Mediante as crescentes exigências para que a tecnologia esteja apta para a comercialização, e levando em consideração que os dispositivos LED apresentaram influência EMI em faixas de frequências coincidentes com rádios amadoras, TVs, dentre outros equipamentos, este trabalho visa investigar a necessidade da indicação de EMC para determinado ambiente nas embalagens do produto LED para a comercialização.

2.3 INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

A interferência eletromagnética é definida como um campo ou onda elétrica e magnética, podendo alterar o funcionamento ou até mesmo danificar um equipamento, dispositivo ou aparelho e, deste modo, interromper a transferência de dados ou energia entre os mesmos [28, 29]. O fenômeno EMI pode ocorrer no ambiente ou nos cabos de uma instalação que estão próximos ou conectados à mesma rede de alimentação. Tal fenômeno equipara-se a um sinal ou ruído de alta frequência que pode ser irradiado através do ar ou propagado através dos cabos elétricos e de rádio frequência [30, 29].

A interferência eletromagnética é um fenômeno recorrente na rotina de trabalho dos engenheiros e técnicos que atuam no ramo da eletrônica e eletrônica de potência [31]. Entretanto, com a intensa demanda dos aparelhos eletrônicos, que vão desde o uso no ambiente de trabalho e residencial aos momentos de lazer, essas perturbações estão cada vez mais perceptíveis no dia-a-dia dos profissionais da área assim como na rotina da população, uma vez que, estes aparelhos atuam prejudicando o funcionamento de outros aparelhos, principalmente quando interferem com outro aparelho eletrônico, pois estes são mais sensíveis às emissões eletromagnéticas.

Na última década, pôde-se observar a intensa busca pela economia de energia, e junto a esta, os inúmeros projetos de iluminação de *retrofit* pelas lâmpadas LEDs, tanto na área residencial, quanto na comercial e industrial. Como os projetos de eficiência energética se tornaram mais frequentes, a tecnologia LED se tornou uma realidade para a iluminação eficiente, e por ela ser composta em sua grande parte por componentes eletrônicos, surgiu a necessidade da verificação da compatibilidade eletromagnética quando da certificação. Ademais, a LED trouxe ao mercado diversos tipos e modelos de lâmpadas, onde em sua grande

maioria são importadas e não apresentam todas informações técnicas necessárias em seus catálogos, ocasionando grandes dúvidas aos consumidores [32, 31].

Diante das informações descritas, surge a necessidade de regulamentar o mercado de lâmpadas LEDs no Brasil. Como já foi apresentado neste capítulo, a regulamentação da tecnologia LED iniciou-se com a portaria nº 144 [8], e em seguida pela portaria nº 389 [9] que são a RAC e a RTQ, respectivamente. Dentre estas, destaca-se a obrigatoriedade do cumprimento da normativa brasileira ABNT NBR IEC/CISPR 15 [10], que elucida a compatibilidade eletromagnética em equipamentos de iluminação e similares [31].

As emissões eletromagnéticas são tratadas no campo científico como EMI, ou EMS, que combinadas formam a EMC. A primeira define a quantidade de ruído eletromagnético que determinado equipamento poderá inserir ao ambiente, seja de forma conduzida ou radiada. Já a susceptibilidade se refere à robustez de determinado equipamento às perturbações eletromagnéticas, ou seja, mensura o quanto a blindagem deste equipamento é confiável [32, 31].

Um sistema é dito eletromagneticamente compatível com o seu ambiente quando atende três critérios essenciais para a EMC, sendo estes:

- O de não provocar interferência com outros sistemas;
- O de não ser suscetível a emissões de outros sistemas;
- O de não provocar interferência em si mesmo.

Portanto, a compatibilidade eletromagnética pode ser definida quando um sistema ou dispositivo elétrico e eletrônico é capaz de funcionar de maneira compatível com outros sistemas eletrônicos, e deste modo, não produzir ou ser suscetível à interferência [33].

As influências EMI podem ser de forma radiada (via ar), conduzida (via condutores), ou ainda induzida (normalmente acima de 30MHz) ou a combinação das mesmas [28]. As formas mais presentes em nosso meio são as conduzidas, as radiadas pelo campo eletromagnético e as radiadas pelo campo elétrico. Por este motivo, as interferências radiadas e conduzidas são abordadas de maneiras distintas nas diversas etapas de um projeto.

2.3.1 EMISSÃO CONDUZIDA

As emissões conduzidas são ditas como o ruído eletromagnético que é transferido de um sistema para as linhas de alimentação de um outro sistema em corrente contínua ou alternada, ou seja, estas emissões são as correntes que circundam o circuito elétrico como os cabos de alimentação de um equipamento, os condutores terra, os cabos de sinais, as linhas de transmissão, entre outros [34, 35].

As correntes que circundam o circuito elétrico, podem ser de modo comum ou de modo diferencial. A corrente de modo comum é a corrente que entra no equipamento pelo terminal de fase e neutro, retornando pelo terra do circuito [33]. Esta gera o ruído de modo comum, medido entre fase e terra ou neutro e terra [34, 35]. A corrente de modo diferencial, por outro lado, entra no equipamento pela fase e retorna pelo neutro do circuito [33]. Esta gera o ruído de modo diferencial, medido entre fase e neutro [34, 35].

Os níveis de ruídos apresentados podem ser prejudiciais, visto que em um circuito elétrico podem haver outros dispositivos ou sistemas alimentados na mesma rede que podem absorvê-lo. Para a análise da emissão conduzida é necessário obter os valores correspondentes dos dois níveis de ruídos conduzidos e somar os valores entre eles para encontrar a resultante total [34].

2.3.2 EMISSÃO RADIADA

As emissões radiadas são sinais ou ruídos eletromagnéticos que são emitidos por um dispositivo ou sistema que podem ser assimilados por outros dispositivos ou sistemas que encontram-se inseridos no mesmo ambiente eletromagnético, causando entre eles a interferência eletromagnética [34]. Pode-se ainda afirmar que as emissões radiadas são relacionadas com os campos elétricos e magnéticos radiados pelo equipamento e que interferem em outros equipamentos [36].

As emissões radiadas são classificadas em dois tipos, sendo estas, a emissão pelo ruído associado ao campo elétrico, que são propagadas quando há uma variação ou oscilação de tensão e ainda, há a emissão pelo ruído associado ao campo magnético, que são propagadas quando há uma variação ou oscilação de corrente [34, 36].

2.4 FONTES EMI

Os diversos estudos já realizados em EMI, afirmam que um centelhador a gás, ou do inglês, *spark gap*, gera ondas eletromagnéticas que são abundantes em conteúdo espectral, ou seja, em componentes de frequência. Estas ondas podem causar interferência ou ruído em diversos dispositivos eletrônicos e elétricos, como receptores de rádio e centrais telefônicas. Podem-se citar diversas outras fontes de emissões eletromagnéticas como relâmpagos, relés, motores elétricos CC e lâmpadas fluorescentes, onde estas também produzem ondas eletromagnéticas que são ricas em conteúdo espectral e podem causar interferência em outros dispositivos [33, 31].

Recentemente estas componentes de frequência vêm ganhando expressividade nas lâmpadas LED, pois sua composição em grande parte é por dispositivos eletrônicos. Além do mais, os novos produtos de LED que estão disponíveis no mercado possuem uma maior capacidade de iluminação com uma menor potência em watts (W), portanto são mais eficientes. As LEDs passam muitas vezes por novos processos e usam novas matérias-primas (*chip* de LED). As novidades surgem em quase todos os componentes, e aos poucos a microeletrônica vai miniaturizando os componentes que compõem o LED [37].

Diversos eventos foram evidenciados nos últimos anos, juntamente com a eclosão da tecnologia LED. A população não percebeu o avanço das interferências eletromagnéticas nas rádios de Modulação em Amplitude (*Amplitude Modulation* - AM), entretanto, atualmente vem percebendo através do uso de lâmpadas que provocam ruídos em seus aparelhos de TV e rádios de Modulação em Frequência (*Frequency Modulation* - FM).

A explosão da tecnologia não considerou alguns fatores que deveriam ser observados nos diversos modelos de lâmpadas antes da fabricação, tais como irradiação de qualquer tipo, nociva à saúde humana e animal, e a irradiação de interferência em outros equipamentos, como já exemplificado neste trabalho. Houve casos de lâmpadas LED que provocaram constantes interferências em TVs domésticas, como aconteceu com o fabricante TASCHIBRA, que produziu uma lâmpada que conseguiu interferir desde 100 kHz na banda de ondas longas, até nas frequências VHF (*Very High Frequency*) fazendo uma varredura nas bandas de comunicação [38].

Podem-se citar exemplos de interferências eletromagnéticas nos navios através dos rádios VHF que são largamente utilizados na navegação, e quando uma luminária LED está

gerando interferência eletromagnética, compromete-se a comunicação entre navegações, além de tornar o navio facilmente detectável pelo inimigo em operações, pois muitas dessas interferências são captadas pelos radares inimigos tornando-o um alvo fácil em casos de guerra. Recentemente, também foram observadas interferências através dos rádios utilizados em faróis de mina, onde ocorre a mineração a céu aberto, e principalmente a subterrânea, onde a comunicação a rádio é fundamental para a atividade [18, 39].

Outro exemplo que pode ser citado são as interferências causadas pelas luzes de natal na rede Wi-Fi. Os “pisca-picas” de natal, como são conhecidos, são pequenas lâmpadas LEDs as quais não passam pelo processo de certificação do INMETRO [40], e, portanto, não possuem blindagem nos seus cabos de modo a evitar que a radiofrequência se propague e cause interferência na rede de internet sem fio. Esta conclusão foi dada através de uma pesquisa realizada pela reguladora do serviço de telefonia britânico, a Ofcom, que analisou as redes de comunicação no Reino Unido e concluiu que os adereços natalinos atrapalham o sinal da rede sem fio, uma vez que o encontro entre os sinais das luzes de LED e a emissão do Wi-Fi pode gerar uma interferência que faz a conexão sem fio não alcançar sua velocidade máxima [41, 42, 43].

À face do exposto, ao se projetar um equipamento eletroeletrônico é necessário, além de se avaliar o desempenho funcional desejado, verificar também o quão compatível eletromagneticamente é este equipamento, e assim atender aos requisitos normativos nacionais e internacionais para que este possa ser comercializado. Deste modo, evita-se o desperdício de esforço ao se projetar um produto eletroeletrônico para realizar uma nova função, caso ele não seja colocado no mercado por não atender normas de compatibilidade eletromagnética. As técnicas e metodologia de projeto de EMC tornaram-se uma parte integrante dos projetos de eletrônica de potência [33].

2.5 LIMITES PERMISSIVEIS

As perturbações eletromagnéticas possuem seu espaço no espectro eletromagnético de frequências. A perturbação eletromagnética pode ser definida como o fenômeno eletromagnético com potencial para degradar o desempenho de um dispositivo, equipamento ou sistema, ou ainda de atingir negativamente a matéria viva ou inerte. Uma perturbação eletromagnética pode ser um ruído eletromagnético, um sinal não desejado ou uma modificação do próprio meio de propagação. Deste modo, os termos “perturbação eletromagnética” e

A norma define três ensaios para avaliação da compatibilidade eletromagnética em lâmpadas LED, sendo estes:

1. Tensões de perturbação em terminais de alimentação;
2. Perturbações eletromagnéticas radiadas – pelo campo magnético;
3. Perturbações eletromagnéticas radiadas – pelo campo elétrico.

Os testes para verificar a EMC são realizados para a certificação das lâmpadas LED, os quais são realizados segundo a norma ABNT NBR IEC/CISPR-15 [10] que, como já foi explicitada anteriormente, é uma norma internacional que aborda os limites e métodos de medição das rádios perturbações características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares. Pode-se aplicar os limites estabelecidos nesta norma para as emissões radiadas e conduzidas. A faixa de frequência abrangida pela norma estende-se de 9kHz a 400GHz [18, 10].

A norma ABNT NBR IEC/CISPR-15 [10] estabelece que para realizar os testes de EMC, primeiramente deve-se utilizar um aparelho para detectar os valores de pico nas faixas de frequência de 9kHz até 30MHz , para assim encontrar os maiores valores de perturbações e em seguida, utilizar as frequências correspondentes dos pontos que serão selecionados, e então utilizar o equipamento para detectar os valores de quase pico para serem comparados com os limites exigidos em norma [18].

Os ensaios para avaliação da compatibilidade eletromagnética em lâmpadas LED serão apresentados a seguir.

2.5.1 TENSÕES DE PERTURBAÇÃO EM TERMINAIS DE ALIMENTAÇÃO

É um ensaio utilizado para verificar a emissão conduzida, onde pode-se medir a tensão de perturbação nos terminais de alimentação das lâmpadas ou luminárias, compreendendo a faixa de frequência de 9kHz a 30MHz .

Para configuração deste ensaio, é utilizado alguns equipamentos específicos, entre eles, a Rede de Estabilização de Impedância de Linha (*Line Impedance Stabilization Network - LISN*), pré-seletor, o analisador de espectro e um computador para compilar os dados. O esquema de ligação está representado pela Figura 3 [18].

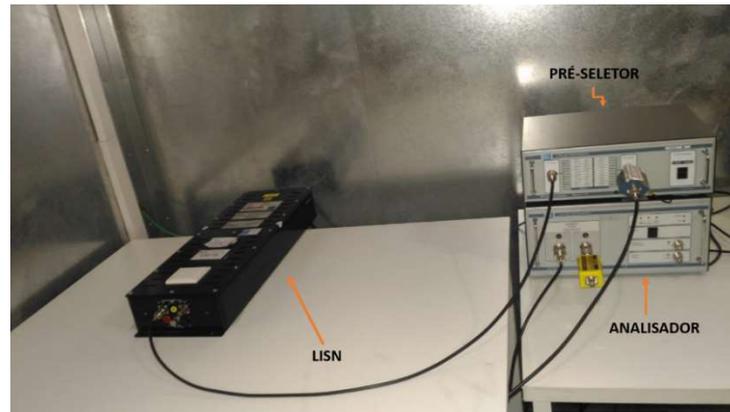


Figura 3 - *Setup* dos equipamentos utilizados durante a medição das tensões de perturbação nos terminais de alimentação das lâmpadas [18].

Na Tabela 1 são apresentados os limites de quase pico e média exigidos pela ABNT NBR IEC/CISPR-15 [10] para as tensões de perturbação nos terminais de alimentação.

Tabela 1 – Limites das Tensões de Perturbação nos Terminais de Alimentação

Faixa de frequência	Limites (dB μ V)*	
	Quase Pico	Média
9 kHz a 50 kHz	110	-
50 kHz a 150 kHz	90 a 80 **	-
150 kHz a 0,50 MHz	66 a 56 **	56 a 46 **
0,5 MHz a 5 MHz	56	46
5 MHz a 30 MHz	60	50

Fonte: Adaptado da Norma ABNT NBR IEC/CISPR-15, 2014 [10].

*Na frequência de transição, o limite inferior se aplica.

**O limite decresce linearmente com o logaritmo da frequência.

2.5.2 PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS RADIADAS (CAMPO MAGNÉTICO)

É um ensaio utilizado para verificar a emissão radiada na faixa de frequência compreendida entre 9 kHz até 30 MHz. Este ensaio é realizado por meio de uma antena *Loop* (Figura 4) de dois metros de diâmetro. A emissividade é determinada pela corrente induzida pelo campo magnético gerado através das lâmpadas colocadas no centro da antena *Loop*. Esta

antena possui três *loop* circulares com dois metros de diâmetro cada e estão mutualmente perpendiculares apoiados em uma base não metálica, permitindo que emissividade possa ser medida em três direções, sendo elas, os eixos x, y e z. Na configuração deste ensaio utilizam-se equipamentos específicos, como a antena *loop*, o analisador de espectro e um computador. [18].



Figura 4 – Antena Loop.

Na Tabela 2 são apresentados os limites de quase pico exigidos pela ABNT NBR IEC/CISPR-15 [10] para as perturbações radiadas pelo campo magnético.

Tabela 2 – Limites de Perturbação Radiada nas Frequências de 9 kHz a 30 MHz

Faixa de frequência	Limites para antena loop de 2m de diâmetro (dBμA)*
9 kHz a 50 kHz	88
70 kHz a 150 kHz	88 a 58 **
150 kHz a 3 MHz	58 a 22 **
3 MHz a 30 MHz	22

Fonte: Adaptada da ABNT NBR IEC/CISPR-15, 2014 [10].

*Na frequência de transição, o limite inferior se aplica.

**O limite decresce linearmente com o logaritmo da frequência.

2.5.3 PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS RADIADAS (CAMPO ELÉTRICO)

Neste ensaio é utilizado um método independente para uma perturbação eletromagnética radiada na faixa de 30 MHz a 300 MHz, este método é estipulado na CISPR 32:2012 [34]. Para configuração deste ensaio é utilizado a Rede de Acoplamento/Desacoplamento (*Coupling/Decoupling Network* - CDN), que atua como analisador de espectro. Além disso, são utilizados o filtro passa alta conectado ao atenuador e um computador, conforme apresentado no esquema da Figura 5.



Figura 5 - Setup dos equipamentos utilizados durante a medição de perturbações radiadas (campo elétrico) das lâmpadas [18].

O CDN é o equipamento utilizado para realizar o acoplamento e o desacoplamento dos circuitos. É no circuito de acoplamento que é transferida a energia de um circuito para o outro com uma impedância previamente definida. Já o circuito de desacoplamento é responsável por prevenir que os sinais de teste aplicados nas lâmpadas afetem outros dispositivos que não estão no ensaio. Na Figura 6 pode-se observar individualmente este equipamento [18].

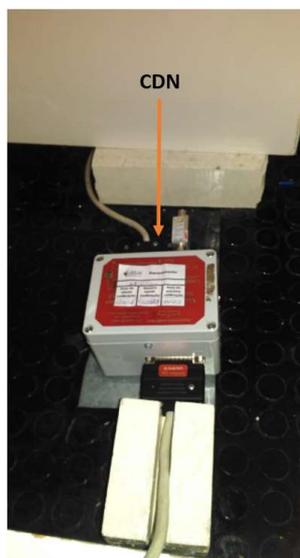


Figura 6 – Equipamento CDN utilizado durante o ensaio de perturbação radiada (campo elétrico) [18].

A Tabela 3 expõe os limites de quase pico exigidos pela ABNT NBR IEC/CISPR-15 [10] para este ensaio.

Tabela 3 – Limites de Tensão nos Terminais em Modo Comum, Método CDN. Limites de Perturbação Radiada nas Frequências de 30 MHz a 300 MHz

Faixa de frequência (MHz)	Limites de quase pico (dBμV)*
30 a 100	64 a 54 **
100 a 230	54
230 a 300	61

Fonte: Adaptada da ABNT NBR IEC/CISPR-15, 2014 [10].

*Na frequência de transição, o limite inferior se aplica.

**O limite decresce linearmente com o logaritmo da frequência.

Diante do exposto, é possível afirmar que a tecnologia LED pode atuar como uma fonte EMI caso os limites compreendidos em norma sejam demasiadamente excedidos. Para tanto, este trabalho visa também elucidar a importância do conhecimento de tal parâmetro ao consumidor final.

2.6 TÉCNICAS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIOS

A tomada de decisão sempre despertou interesse dos pensadores de várias épocas. Sentenciar ou tomar decisões acerca de algo é uma tarefa que todas as pessoas fazem constantemente, desde a decisão mais simples como a escolha do almoço à mais complexa como em que tipo de negócio investir, e ainda a todos os níveis das atividades individuais, como a escolha das próximas férias e viagem, assim como organização da agenda semanal para a rotina pessoal. Deste modo, para esses processos de decisão, solicita-se ajuda, aconselhamento ou apoio aos amigos, peritos, empresas consultoras, entre outros [45].

O estudo sobre a forma de como as pessoas tomam decisões ou a forma como as pessoas devem tomar decisões ou definir suas escolhas, possivelmente é tão antiga quanto a história registrada da humanidade. É consenso afirmar que nem todas as análises foram qualificadas pelas rígidas abordagens científicas encontradas na literatura atualmente. Todavia, observa-se que a literatura acerca da tomada de decisão ainda é limitada e continua em expansão. Entretanto, o desdobramento do método ideal para a tomada de decisão na vida real ainda é uma meta longínqua, onde a contradição entre o avanço do estudo sobre este assunto e a indefinição da aplicabilidade na vida real dos resultados constitui um paradoxo da tomada de decisão [46].

A Tomada de Decisão por Multicritérios (*Multi-Criteria Decision Making - MCDM*) é um dos métodos mais conhecidos para tomada de decisão. A análise multicritério eclodiu nos anos 60 enquanto objeto de apoio à decisão, e possui aplicabilidade na análise comparativa de projetos alternativos ou medidas dissonantes que contam com diversos critérios, em simultâneo, na análise de uma situação complexa [46].

As técnicas de análise multicritério propiciam um apoio à tomada de decisão quando os problemas apresentam particularidades que vão além da tangibilidade. Por conseguinte, diante destas técnicas, é possível estabelecer as prioridades para uma análise multicritério, fornecendo ao processo de decisão mais racionalidade e robustez, à medida que incorporam-se à análise de informações qualitativas relevantes [47].

De acordo com os dados do *Department For Communities And Local Government Of London* publicados em 2009, o método de análise multicritério apresenta variadas técnicas, que são aplicadas quando o número de dados torna a tomada de decisão complexa. Diante da

necessidade de os tomadores de decisão obterem objetivos múltiplos e comumente conflitantes, estas técnicas emergiram como o apoio para tomada de decisão [17].

O apoio à tomada de decisão por multicritério não investiga uma solução ótima para a problemática como ocorre nas pesquisas tradicionais, mas uma solução de compromisso, visando a consonância entre as partes envolvidas. Os principais questionamentos da avaliação multicritério são a estruturação do problema a ser resolvido que culmina na decisão a tomar, a confiabilidade da informação, o tempo de coleta das informações, custo da aquisição destas informações, além dos critérios a serem adotados e o desenho das alternativas que resultam nas possíveis soluções para realizar a seleção da melhor opção a partir de um conjunto de dados disponíveis [48].

O MDCM é um processo metodológico que busca auxiliar ao decisor a escolha da melhor alternativa, dentro um universo finito de alternativas, que são avaliadas sob variados pontos de vista, ou seja, a partir de variados critérios. Na revisão de literatura realizada por Chai *et al.* [49] é abordado um problema estrutural da seleção de fornecedores, que é um fator relevante neste trabalho. Este problema, é comumente considerado um problema MCDM. Deste modo, pode-se afirmar que muitas técnicas MCDM são utilizadas para solucionar problemas como a seleção de fornecedores [46, 49].

As escolas Americana e Francesa foram as precursoras no emprego do MCDM nas décadas de 70 e 80, em substituição dos modelos de pesquisa operacional. Dentre as muitas classificações empregadas e que serão apresentadas nesta revisão de literatura, existe a subclassificação de acordo com estas escolas, e pode-se subdivir os métodos em dois grandes grupos, com base na classificação das escolas francesa e americana [48].

2.6.1.1 ESCOLA FRANCESA OU EUROPEIA

Nesta subclassificação, são empregados os métodos de subordinação ou outranking, pois adotam uma modelagem mais flexível do problema, e não necessariamente admitem a comparabilidade entre as demais alternativas. São exemplos desta classificação, os métodos [48]:

- *Elimination et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE);

- *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE)

2.6.1.2 ESCOLA AMERICANA

A escola americana adota o método de agregação a um critério único de síntese. Neste caso, pesos são atribuídos aos critérios diante de outros com mais ou menos relevância, permitindo a definição de uma função que investiga valores de cada alternativa classificada em cada critério. Pode-se observar o efeito *trade-off* ou “taxa de substituição” de um atributo em relação a outro, agregando todas as informações acerca do problema que pretende-se resolver por meio de uma função utilidade que deverá ser otimizada. São exemplos desta classificação, os métodos [48]:

- *The Analytical Hierarchy Process* (AHP);
- *Analytic Network Process* (ANP);
- *Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution* (TOPSIS).

A Figura 7 demonstra os principais métodos utilizados:

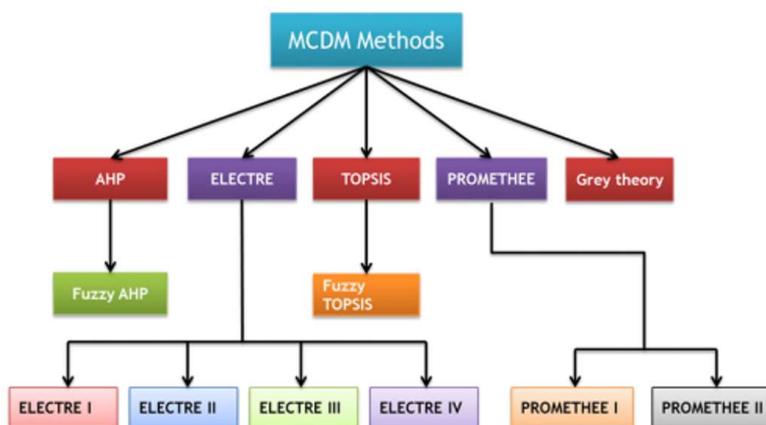


Figura 7 - Métodos de Decisão Multicritério [50].

O número de técnicas MCA ou MCDM tem expandido ao longo dos anos, e por isso somente algumas técnicas serão apresentadas neste trabalho. Ainda, de acordo com Chai *et al.* [49] os métodos baseados nas teorias das técnicas MCDM podem ser agrupados em quatro categorias.

2.6.2 MÉTODOS DE UTILIDADE MULTIATRIBUTO

O processo hierárquico analítico (*Analytic Hierarquic Process* - AHP) e o processo de rede analítico (*Analytic Network Process* - ANP) são exemplos de método de utilidade multiatributo. Estes métodos essencialmente buscam atribuir um valor utilitário ou peso a cada alternativa, e este valor representa o grau de preferência que é a base para a classificação ou escolha. O AHP utiliza comparações de pares entre os critérios e alternativas, juntamente com avaliações de especialistas para lidar com a medição dos aspectos quantitativos, e ainda os qualitativos ou intangíveis [46, 49].

O AHP se divide em estruturação, julgamentos e síntese dos resultados. Este método é amplamente utilizado para análises de custo benefício, planejamento estratégico, escolhas tecnológicas, priorização de investimentos, priorização de desenvolvimentos turísticos, avaliação de novos serviços de telecomunicação, entre outras aplicações [48].

O ANP é uma extensão ou generalização do AHP, ou seja, é uma teoria geral de medida dos aspectos qualitativos ou intangíveis. O ANP proporciona retroalimentação entre as conexões, e permite ao decisor investigar a possível existência de dependências entre os fatores de decisão e discorrer o efeito do feedback decorrentes dessas dependências. O ANP é realizado por julgamentos e uso de medições por escalas proporcionais [48, 49].

2.6.3 MÉTODOS OUTRANKING

São exemplos do método *outranking* o ELECTRE e o PROMETHEE. Estes métodos baseiam-se na definição do conceito de sobreclassificação, do inglês, *outranking*, ou ainda de prevalência [48].

A técnica *outranking* estabelece uma comparação par a par entre as alternativas, examinando uma relação de sobreclassificação, isto é, procura eliminar alternativas que são “dominadas”, realizando a atribuição de pesos para enfatizar um critério ao invés do outro. Quando uma alternativa apresenta um desempenho maior em um critério considerável, e ao mesmo tempo não é superada por outra alternativa no sentido de gravar um desempenho significativamente inferior em qualquer um dos critérios, neste sentido, ela poderá ser considerada *outranking*. As alternativas são prontamente avaliadas em termos da extensão em que elas manifestam. A abordagem *outranking* depende de definições arbitrárias que constituem uma sobreclassificação ou *outranking* [17, 51].

2.6.4 MÉTODOS COMPROMISSO

Os métodos TOPSIS, do inglês *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* que significa em português “Técnica de ordem de preferência por Similaridade para a Solução Ideal” e VIKOR, do sérvio *ViseKriterijumskaOptimizacija i KompromisnoResenje* que significa “Otimização Multicritério e Solução de Compromisso”, são considerados como métodos que assumem uma solução de compromisso. Pode-se dizer que uma solução de compromisso é a mais próxima de uma solução ideal, e um compromisso demonstra um acordo com base em concessões mútuas. Considerados como métodos típicos de programação de compromisso, tanto TOPSIS como VIKOR baseiam-se numa função agregação que representa a proximidade com o ideal [46, 49].

O TOPSIS é uma estrutura metodológica que investiga uma solução que mais se aproxime da solução ideal e, ao mesmo tempo, se distancie da solução anti-ideal, ou seja, o objetivo desta técnica é avaliar o desempenho através da similaridade com a solução ideal, onde a alternativa escolhida deve ter a menor distância entre a Solução Ideal Positiva (PIS) e a maior distância a partir da Solução Negativa Ideal (NIS) [48].

O VIKOR busca determinar um ranqueamento de compromisso, uma solução de compromisso e os intervalos de estabilidade de peso para a estabilidade preferencial da solução de compromisso obtido com os pesos iniciais. O VIKOR baseia-se na elaboração de um ranqueamento a partir de um conjunto de alternativas de critérios distintos, o qual apresenta uma classificação multicritério com base na medida particular de proximidade com a solução ideal [52].

Pode-se afirmar que o método TOPSIS utiliza normalização linear para eliminar as unidades da função critério, enquanto o método VIKOR utiliza o vetor normalização [49].

O método TOPSIS será abordado e detalhado na metodologia por ser um dos objetos de estudo desta dissertação.

2.6.5 OUTROS MÉTODOS MCDM

Há uma imensa gama de métodos multicritérios presentes na literatura, os quais utilizam abordagem distintas para a ordenação sob a visão multicriterial. São exemplos dos variados métodos MCDM existentes os métodos SMART e DEMATEL, e ainda o método de BORDA.

2.6.5.1 SMART E DEMATEL

O método SMART é uma técnica de classificação que utiliza o método da soma dos pesos para obter os índices das classificações. Esta técnica pode tratar critérios quantitativos e qualitativos, entretanto, não manipula informações hipotéticas e indefinidas de maneira eficaz, como termos linguísticos, valores de intervalo e vários valores fuzzy. O DEMATEL é um método que analisa a relação de influência entre os critérios de avaliação complexos [46, 49].

2.6.5.2 MÉTODO DE BORDA

O método de Borda classifica-se na categoria dos métodos ordinais. Existem problemas e situações reais onde a avaliação intracritério das alternativas só pode ser obtida a partir de uma escala ordinal, impossibilitando o uso dos outros métodos multicritérios que utilizam outras abordagens como utilidade de multiatributo, critério único de síntese, entre outros. É importante ressaltar que um método outranking poderá ser adequado com algumas exceções [51].

Proposto por Jean-Charles de Borda em 1781, e posteriormente enriquecido por Nurmi em 1983 *apud* Almeida [51], o método de Borda é um procedimento para agregar o julgamento de vários membros de um júri, considerando cada critério como um dos membros do júri [51]. Todavia, trata a variante mais simples do método e calcula os *scores* de cada alternativa por meio da soma de coeficientes relativos aos ranqueamentos em cada critério. Os coeficientes de Borda podem adotar valores canônicos, ou pontuações que irão destacar a alternativa com maior vantagem no ranqueamento. São exemplos de situações reais, as competições esportivas, quando da contagem de pontos, onde o primeiro colocado recebe mais pontos que o segundo e os demais [53].

2.6.6 ESCOLHA DO MÉTODO TOPSIS

A tomada de decisão multicritério (MCDM), é uma das metodologias de decisão mais empregadas nas ciências, nos negócios, no governo e na engenharia, e tem o propósito de ajudar a melhorar a qualidade das decisões, possibilitando a resolução de um problema com segurança e redução da possibilidade de erro [54].

Dentre os muitos métodos MCDA/MCDM desenvolvidos para resolver os problemas de decisão do mundo real, tem-se o método TOPSIS que atende apropriadamente a diversas áreas de aplicação, sendo um método caracterizado por sua fácil utilização e robustez de

resultados, o que culminou em sua ampla utilização, seja de forma individual ou combinada com outros métodos. A revisão de literatura de Behzadian *et al.* [55], apresenta diversas aplicações existentes do TOPSIS, onde em seu estudo os autores consideraram os artigos acadêmicos publicados entre os anos de 2000 e 2010, e neste universo foram encontrados cerca de 266 trabalhos publicados em 103 revistas diferentes, que permeavam assuntos distintos tais como gerenciamento da cadeia de suprimentos e logística, sistemas de projeto, engenharia e manufatura, gerenciamento de negócios e *marketing*, gestão de saúde, segurança e meio ambiente, gestão de recursos humanos, gestão de energia, engenharia química, gestão de recursos hídricos, dentre outros [17, 55].

A Tabela 4 apresenta a quantidade de trabalhos publicados utilizando o TOPSIS de 2000 até 2010. Este levantamento foi realizado por Behzadian *et al.* [55]. Pode-se observar que o interesse global no método TOPSIS cresceu exponencialmente nesses anos [17, 55].

Tabela 4 - Distribuição de artigos sobre TOPSIS ao longo dos anos

Ano	Número de Publicações	Porcentagem do Total
2000-2001	5	1,9%
2002-2003	12	4,5%
2004-2005	13	4,9%
2006-2007	41	15,4%
2008-2009	65	24,4%
2010	130	48,9%
Total	266	100,0%

Fonte: Autor, adaptado de [55].

Ainda fundamentando a escolha do método TOPSIS, em 2018 foi realizado um estudo por Jayant e Sharma [56], onde foi revisada uma série de estudos compreendidos entre 1995 até 2015, investigando a metodologia, o desenvolvimento das técnicas PROMETHEE, ELECTRE, VIKOR e TOPSIS, além do uso destes métodos na literatura, estudos de caso, e o

desenvolvimento de métodos híbridos, quando combinados com outras técnicas multicritérios. Os resultados deste mesmo estudo mostraram que cerca de 80% dos trabalhos que utilizam as técnicas PROMETHEE, ELECTRE, VIKOR e TOPSIS foram desenvolvidos nos últimos sete anos (2009-2015), o que trouxe maior notoriedade e visibilidade para as técnicas MCDM incentivando pesquisas futuras. É possível verificar a distribuição de trabalhos de 1995 a 2015 na Figura 8.

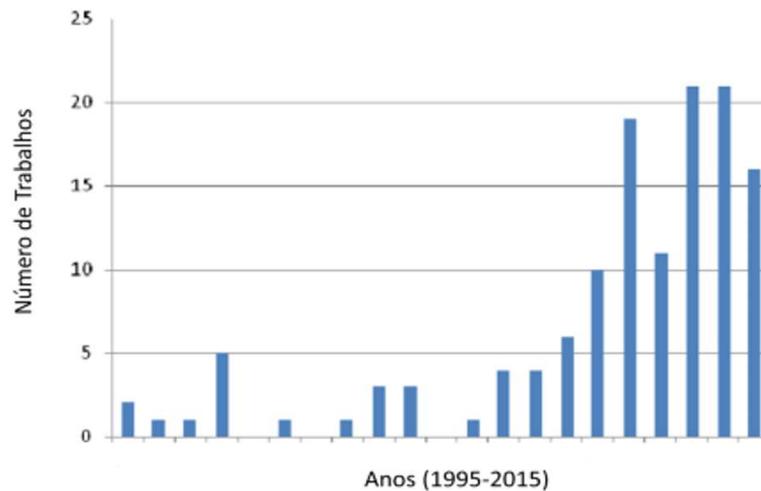


Figura 8 - Distribuição de Trabalhos de 1995 a 2015 [56].

Segundo Ishizaka e Nemery [57], a maior parte dos métodos MCDA / MCDM podem ser classificados como problemas de escolha, de classificação e de ranqueamento. Deste modo, dada a análise que se deseja realizar, escolhe-se um método em detrimento de outro. Na Tabela 5 é possível verificar alguns exemplos de métodos utilizados para cada tipo de problema MCDA/MCDM [17, 57].

Tabela 5 - Métodos MCDA para os diferentes problemas

Escolha	<i>Ranking</i>	Classificação
AHP	AHP	AHP SORT
ANP	ANP	---
MAUT/UTA	MAUT/UTA	UTADIS
MACBETH	MACBETH	---
PROMETHEE	PROMETHEE	Flow Sort
ELECTRE I	ELECTRE I	ELECTRE-Tri
TOPSIS	TOPSIS	---
DEA	DEA	---

Fonte: Autor, adaptado de [57].

O TOPSIS apresenta alguns privilégios, como a facilidade de aplicação e a objetividade em abordar problema de decisão comparando duas situações hipotéticas, a ideal e a anti-ideal, além da velocidade em constatar a melhor alternativa [58].

O método TOPSIS pode ser desenvolvido a partir de uma planilha eletrônica, como por exemplo o Excel, não sendo necessário um *software* específico para seu desenvolvimento. Portanto, além de ser de fácil utilização, é um método que possui transparência, disponibilidade de *software* e possibilidade de conferência dos resultados [58].

Diante do exposto em relação ao TOPSIS, no que diz respeito a disponibilidade do método, facilidade de manuseio e o uso deste em problemas de ranqueamento em diferentes bibliografias, optou-se por utilizar para a análise realizada nesta dissertação a técnica de ordenamento preferencial pela similaridade com a solução ideal (TOPSIS). Como neste estudo há a necessidade de ordenar a melhor alternativa do problema proposto, o método TOPSIS será o mais adequado para a avaliação.

3 METODOLOGIA E DESCRIÇÃO DO CASO

Neste capítulo será apresentado o método utilizado para avaliar o desempenho energético total da lâmpada LED. Para tanto, segue o seguinte fluxo conforme Figura 9 esquematizada abaixo: (1) apresentar o contexto do problema, isto é, o objetivo do trabalho contextualizado; (2) selecionar as amostras que comporão a análise, (3) detalhar a ferramenta de análise multicritério utilizada para realizar a ordenação das amostras; (4) selecionar os critérios que comporão a análise; (5) descrição de todos os testes e condições de cada ensaio que foram realizados no laboratório para as lâmpadas LED, o qual nos fornece embasamento para avaliar o desempenho energético total da lâmpada LED, levando em consideração a eficiência energética, qualidade de energia, qualidade de luminotécnica e compatibilidade eletromagnética.

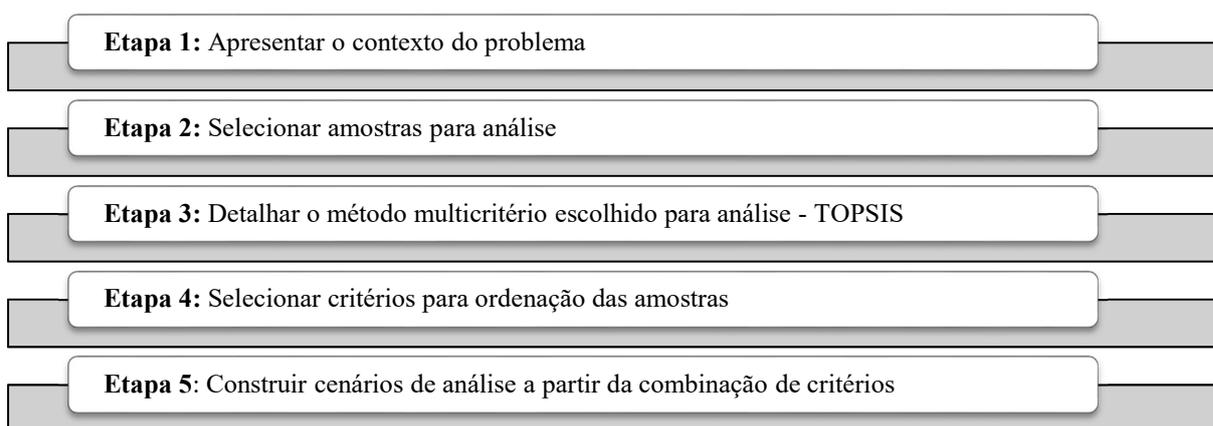


Figura 9 – Esquema Metodológico.

3.1 PROBLEMA PROPOSTO

Diante do recente avanço da tecnologia LED, a sua disseminação e maior variedade no mercado, é de se esperar que o consumidor tenha dúvidas ao decidir sobre o produto que melhor adequa-se às suas necessidades, seja por desconhecimento ou pelo maior volume de parâmetros disponíveis. Portanto, realizar uma análise comparativa para escolha de um modelo ou fabricante tornou-se um desafio ao cliente. Todavia, o estudo proposto visa disponibilizar um mecanismo para auxiliar o consumidor na compra de lâmpadas LED, tendo em vista a inserção dos parâmetros de EMC, que avalia a qualidade das emissões eletromagnéticas provenientes da lâmpada LED, e deste modo inserir os níveis de EMI na rotulagem existente para comercialização, em conjunto com as informações já disponibilizadas a respeito do desempenho luminoenergético da lâmpada LED.

Como discutido nos Capítulos 1 e 2, tal estudo se justifica uma vez que as interferências eletromagnéticas advindas das lâmpadas LED, observáveis a partir do parâmetro EMC, podem gerar diversos incômodos. Entretanto, o parâmetro supramencionado é um critério apenas certificador, porém não classificatório para o usuário final, significando que não há disponibilização desta informação ao consumidor. Deste modo, este estudo pretende apresentar às organizações regulamentadas novos aspectos qualitativos que devem ser considerados na etiqueta do produto, devido a inserção massiva desta nova tecnologia no mercado brasileiro.

O impacto destes novos aspectos qualitativos será observado através de uma análise comparativa entre as lâmpadas de uma amostra disponível em laboratório com fins de observar o impacto dos critérios propostos na ordenação de lâmpadas, isto é, o que se deseja responder, com este estudo é: dado o objetivo do consumidor, como auxiliá-lo a escolher o modelo de lâmpada que melhor lhe atende? Assim, a fim de avaliar o impacto da inserção de dados eletromagnéticos como proposta de um novo aspecto qualitativo que poderá ser considerado na etiqueta do produto, neste caso a lâmpada LED, foi realizado um estudo de caso utilizando lâmpadas tubulares LED.

Para realização desta análise comparativa e posterior ordenação entre as alternativas, será utilizada uma ferramenta multicritério para o auxílio a tomada de decisão, através da ferramenta TOPSIS com pesos por entropia, a qual define o melhor desempenho dentre as alternativas por meio da similaridade da mesma com uma solução ideal. Esta ferramenta será detalhada no subitem 3.2.

Nesse âmbito, o trabalho contará com os resultados dos ensaios de certificação realizados no LABLUX sendo assim, este estudo estará condicionado quanto ao número de amostras e modelos disponíveis no laboratório, uma vez que foram selecionadas somente modelos que tiveram aprovação em todos os relatórios emitidos pelo LABLUX, relatórios estes que são obrigatórios para a certificação da lâmpada e que contemplam todos os critérios que foram julgados relevantes para esta análise.

Dentro do conjunto disponível no laboratório foram selecionados múltiplos fornecedores da tecnologia LED com características técnicas semelhantes, com intuito de se utilizar os resultados dos ensaios já realizados pelo laboratório para os diversos critérios exigidos pelo RTQ [9] e ABNT NBR IEC/CISPR15 [10], os quais regulam os ensaios de acreditação desta tecnologia no Brasil. Entretanto, para além dos resultados de eficiência

energética, resultados de qualidade de energia, qualidade de luminotécnica também serão avaliados os resultados das emissões eletromagnéticas conduzidas e radiadas, compondo os principais parâmetros deste estudo comparativo.

As lâmpadas escolhidas para a realização deste trabalho são do tipo tubular LED de 18W com TCC na faixa de 6000K a 6500K. As amostras selecionadas para este estudo são modelos da família PAI que participam do ensaio de concessão, onde realizam-se nestas amostras ensaios e acompanhamentos de todos os testes para a emissão completa do relatório de certificação. Essa modalidade será detalhada na descrição dos testes que fundamentam esta dissertação. Entretanto, esta modalidade foi um fator limitador quanto ao número de amostras, por possuir medições requisitadas de acordo com a eleição dos critérios adotados. Ademais, foram eleitas as lâmpadas aprovadas em todas as etapas e requisitos para certificação da lâmpada LED, e ainda consideradas as lâmpadas tubulares, pois estas realizam a medição de THD, critério considerado na avaliação de qualidade de energia sendo assim, mais dois fatores limitadores no número de amostras para esta avaliação.

Desta forma, no estudo foram utilizadas 80 amostras de lâmpadas tubulares LED de 8 modelos e/ou fabricantes distintos, na modalidade concessão da família PAI. Todos os dados coletados são provenientes dos ensaios que são rotineiramente realizados no laboratório, e então comparados aos limites mínimos e máximos estipulados pelas normas, regulamentos e portarias vigentes. Os nomes dos fornecedores das lâmpadas não poderão ser divulgados, por questões de confidencialidade do LABLUX.

3.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO: TOPSIS

A ferramenta de análise TOPSIS será utilizada para realizar a avaliação comparativa das alternativas à luz dos critérios escolhidos, permitindo com isso ordenar as alternativas existentes, colocando-as em ordem de desempenho. Esta avaliação será realizada perante as classificações hoje existentes na embalagem do produto a fim de ordenar os fabricantes de melhor desempenho energético, e assim classificar os níveis de compatibilidade eletromagnética frente a este desempenho e, para tanto, serão simulados alguns cenários.

O método multicritério TOPSIS tiveram como criadores principais Ching-Lai Hwang e Kwangsun Paul Yoon (1981), entretanto recebeu posteriores contribuições para expansão do método por Zeleny (1982), Hall (1989), e sendo enriquecido por Yoon (1987) apud Pomerol e

Barba-Romero (2000) [58]. Este método multicritério é conhecido pela sua simplicidade e facilidade de aplicação. O TOPSIS discorre um problema pela comparação de duas situações hipotéticas, sendo uma situação ideal, que atribui o melhor nível para todos os atributos considerados, e não ideal ou anti-ideal, a qual possui os piores valores de atributos [48].

O TOPSIS, portanto, investiga quais alternativas mais se aproximam da solução ideal e simultaneamente se distanciam da solução não ideal, como sugerido pelo significado do termo que conceitua o método. Deste modo, a avaliação de desempenho da alternativa é processada por meio da similaridade com a solução ideal, onde a alternativa melhor ranqueada deve ter a menor distância entre a Solução Ideal Positiva (PIS) e a maior distância da Solução Negativa Ideal (NIS). A função PIS potencializa os critérios de “benefício”, a saber, critérios que deseja-se maximizar, isto é, quanto maior melhor, e deprecia os critérios de “custo”, que são critérios que deseja-se minimizar, isto é, quanto menor melhor. Em contrapartida, a função NIS é antagonica [48]. A solução ideal positiva agrega os valores de maior destaque e atingíveis dos critérios ou benefícios, isto é, a PIS caracteriza uma alternativa constituída com as melhores pontuações para cada critério, e a NIS uma alternativa com as piores pontuações. O TOPSIS é um método afamado para hierarquização, sendo uma evolução da Programação de Compromisso, que pondera em sua análise apenas a distância à solução ideal [58].

Matematicamente, há diversas medidas de distâncias, tais como Manhattan, Euclidiana, Caótica, Tchebichev etc. O método TOPSIS aplica a métrica Euclidiana para minimizar a distância da solução ideal e maximizar a distância para a solução anti-ideal. O cálculo é realizado com a minimização da raiz quadrada da soma das distâncias ao quadrado para as soluções ideais, que é a medida da distância de separação de cada critério com relação ao ideal positivo Si^+ (PIS), e ao ideal negativo Si^- (NIS). O cálculo das distâncias euclidianas equipara-se ao teorema de Pitágoras. A exatidão da distância de uma alternativa à PIS e à NIS é o ponto demasiadamente categórico para o método TOPSIS [51, 58].

Na Figura 10 tem-se um exemplo da distância Euclidiana de dois pontos, onde A1 supera desempenho quando comparado a alternativa A2 em relação à solução ideal positiva A+ e a solução anti-ideal A-.

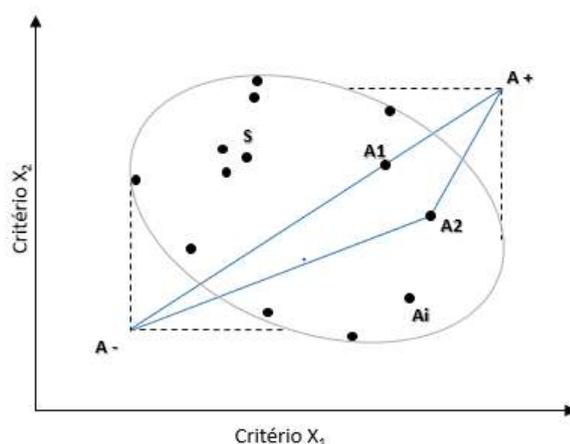


Figura 10 - Distância euclidiana de dois pontos (A1 e A2) até a solução ideal positiva e solução anti-ideal no espaço bidimensional. Fonte: autor, baseado em [59].

3.2.1 ETAPAS DO MÉTODO TOPSIS

Pode-se representar o método multicritério TOPSIS em uma série de passos. Para um melhor entendimento, apresenta-se esta técnica por meio de oito etapas, segundo diversos estudos [51, 58, 60, 59]:

- **1º Etapa:** Definir as alternativas (A_i) e critérios (X_i) a serem avaliados

Nesta etapa define-se de maneira objetiva e quantitativa os critérios e alternativas do problema e ainda se estabelece, para cada alternativa, valores numéricos que representem o desempenho dessa alternativa frente a cada critério [51].

Em problemas multicritérios, exige-se a escolha de uma família coerente de critérios que deve atender a algumas propriedades. Entretanto, estas serão melhor detalhadas no item 3.3.

- **2º Etapa:** Construção da Matriz de Decisão

A partir da definição das alternativas (A_i) e critérios (X_i), é possível a montagem inicial de uma matriz de decisão (D) $m \times n$, que neste caso, “m” são as alternativas (A_i) dispostas nas linhas da matriz, e “n” são os critérios (X_i) de avaliação, dispostos nas colunas.

$$D = \begin{matrix} & \mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 & \dots & \mathbf{X}_j & \dots & \mathbf{X}_n \\ \mathbf{A}_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \mathbf{A}_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_i & x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mathbf{A}_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{matrix}, \quad (1)$$

onde:

A_i = i – ésima alternativa considerada;

x_{ij} = valor numérico da i -ésima alternativa com relação ao j -ésimo critério.

3º Etapa: Normalização dos dados contidos na Matriz de Decisão

O processo de normalização da matriz decisão dar-se-á pela possibilidade da comparação dos dados contidos nesta, e este processo pode ser realizado sob variadas formas, segundo alguns autores [51, 58, 60, 59].

Entretanto, neste trabalho será utilizado a normalização por vetor, conforme metodologia apresentada por Hwang e Yoon [59], os criadores do TOPSIS. Neste processo, a normalização por vetor é realizada quando cada elemento da matriz, ou seja, cada critério “ x ” é dividido pelo vetor “critério” normalizado. O vetor critério normalizado é a raiz quadrada da soma dos quadrados referentes a todas as alternativas, onde é possível obter o valor normalizado “ r ” para cada critério por meio da equação (2):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad i = 1, 2 \dots m; \quad j = 1, 2 \dots n, \quad (2)$$

onde:

x_{ij} = valor numérico da i -ésima alternativa com relação ao j -ésimo critério,

r_{ij} = valor numérico normalizado da i -ésima alternativa com relação ao j -ésimo critério.

4º Etapa: Ponderação dos Dados - Atribuição de Pesos à Matriz de Decisão Normalizada

Nesta etapa a matriz normalizada é multiplicada pelos pesos atribuídos aos critérios. Estes pesos comumente são subjetivos e são determinados conforme juízo de valor do decisor

ou de um grupo de decisores. Ainda nesta etapa, é definido um vetor $W = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n)$, sendo $\sum_{i=1}^n W = 1$, que será multiplicado a matriz decisão normalizada.

Para a ponderação destes dados utiliza-se a equação (3)

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad (3)$$

onde w_j é o peso definido para cada atributo ou critério.

A matriz com os valores normalizados e ponderados é representada por

$$V = \begin{pmatrix} w_1.r_{11} & w_2.r_{12} & \dots & & w_j.r_{1j} & \dots & w_n.r_{1n} \\ w_1.r_{12} & w_2.r_{22} & \dots & & w_j.r_{2j} & \dots & w_n.r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \dots & \vdots \\ & \ddots & & \ddots & & \ddots & \\ w_1.r_{i1} & w_2.r_{i2} & \dots & & w_j.r_{ij} & \dots & w_n.r_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_1.r_{m1} & w_2.r_{m2} & \dots & & w_j.r_{mj} & \dots & w_n.r_{mn} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Neste estudo, utilizou-se o modelo por “entropia” para realizar a atribuição dos pesos aos critérios. A entropia de Shannon (1947) descreve a quantidade de informação da matriz de decisão [61].

Os pesos calculados para cada critério atendem a equação (5)

$$e_j = - \frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}), \quad \text{com } i = 1, \dots, m \text{ e } j = 1, \dots, n. \quad (5)$$

O grau de diversidade das informações contidas em cada critério é calculado a partir da equação (6)

$$d_j = 1 - e_j, \text{ com } j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Desta forma, o peso para cada critério pelo método da entropia é calculado de acordo com a equação (7)

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}. \quad (7)$$

5º Etapa: Determinação da solução ideal (PIS) e ideal-negativa (NIS)

Para o cálculo da solução ideal positiva (PIS) e da solução ideal negativa (NIS), que são representadas pelos vetores (S+) e (S-)0 respectivamente, são selecionados os maiores e menores valores de cada critério, ou seja, de cada coluna da matriz para identificação da PIS e da NIS. Para determinação destas soluções, utilizam-se as equações (8) e (9).

$$S^+ = \{(max_i v_{ij} | j \in J), (min_i v_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+, \quad (8)$$

$$S^- = \{(min_i v_{ij} | j \in J), (max_i v_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-, \quad (9)$$

onde, os conjuntos:

$$J = \{j = 1, 2, \dots, n | j \text{ relacionado aos critérios de benefício}\},$$

$$J' = \{j = 1, 2, \dots, n | j \text{ relacionado aos critérios de custo}\}.$$

Segundo Hwang e Yoon (1981) [59], o valor de cada critério atribuído à determinada alternativa pode maximizar a preferência pelo critério "benefício" e minimizar a preferência pelo critério "custo" quanto maior é o seu valor numérico. Deste modo, pode-se afirmar que o inverso também é autêntico, uma vez que quanto menor o valor atribuído à x_{ij} , menor é a preferência pelo "benefício" e maior pelo "custo".

6º Etapa: Cálculos das distâncias D^+ e D^- para cada alternativa - Distâncias Euclidianas

Após determinação das soluções ideal (PIS) e anti-ideal (NIS), é necessário o cálculo das distâncias euclidianas. Para cada alternativa é calculada uma medida de separação, uma em relação a solução ideal (Di^+) e outra em relação a solução anti-ideal (Di^-). As distâncias (Di^+) e (Di^-) estão apresentadas nas equações (10) e (11), respectivamente.

$$Di^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - s_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (10)$$

$$Di^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - s_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (11)$$

7º Etapa: Cálculo da similaridade para a posição ideal positiva - Coeficientes C para cada alternativa

Nesta etapa é calculada a proximidade relativa entre as alternativas e a solução ideal positiva. É neste momento que se chega ao resultado da aproximação à situação ou alternativa ideal (A_i).

A proximidade relativa entre A_i e S^+ é empregada pela equação (12)

$$C_i = \frac{Di^-}{Di^+ + Di^-}, 0 < C_i^+ < 1, i = 1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

Após o cálculo dos coeficientes C para cada alternativa, estas são comparadas com a solução ideal positiva (S_i^+) e com a solução ideal negativa (S_i^-). Para solução ideal, é necessário que $C_i = 1$, deste modo $A_i = S_i^+$. Analogamente, quando $C_i = 0$ esta alternativa será a solução ideal negativa. Quanto maior o valor da aproximação relativa “ A_i ”, mais próxima da solução ideal é a alternativa e, por conseguinte, mais afastada da solução ideal negativa.

8º Etapa: Ordenação das Alternativas

Nesta última etapa acontece a definição da hierarquização das alternativas. Após o cálculo de C_i^+ é possível ordenar os valores relativos as alternativas em ordem decrescente e assim obter o produto final desta análise, que é a construção do ranqueamento onde as alternativas avaliadas são ordenadas.

3.3 SELEÇÃO DE CRITÉRIOS

Para cada objetivo previamente estabelecido deverá existir uma variável que possa medir o grau de desempenho que se pode obter nesse objetivo, sendo estes atributos ou critérios também conhecidos como “medida de eficiência” e “medida de performance” [51]. Deste modo, a definição dos critérios a serem considerados é uma tarefa de elevada complexidade, sendo assim é importante ressaltar que as condições de uma família coerente de critérios sejam atendidas [62].

Segundo Roy e Bouyssou, pode-se julgar uma família de critérios como um conjunto F de critérios utilizados em uma situação de apoio à decisão, onde cada critério F refere-se a um tipo de preferência restrito e seu conjunto deverá permitir modelar as preferências em um nível global. Ainda neste mesmo contexto, os autores afirmam que três condições devem ser

satisfeitas para a definição de uma família coerente de critérios, sendo estas a exaustividade, coesão e não-redundância [63].

Estas condições ou propriedades são conhecidas como os “axiomas de Roy”, e podem ser conceituadas segundo diversos autores [62, 51, 63, 64] em:

- i) Exaustividade: impõe a necessidade de descrever o problema, considerando todos os aspectos relevantes, ou seja, todos os critérios devem estar presentes no sentido de representar todos os objetivos do problema.
- ii) Não-redundância: obriga a exclusão de critérios que estejam avaliando características já avaliadas por outro critério.
- iii) Coesão: obriga a correta análise de quais devem ser os critérios de maximização e quais os de minimização, isto é, as preferências do decisor em relação a cada critério devem ser coerentes com a avaliação global.

3.3.1 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS

Os parâmetros elétricos e eletromagnéticos adotados como critérios para comparação das alternativas neste estudo serão apresentados neste subitem, a fim de possibilitar ao leitor o entendimento de cada dado utilizado neste trabalho. Os critérios foram selecionados de acordo com as medições que foram realizadas no laboratório em relação aos requisitos básicos para a certificação da lâmpada LED, e conseqüentemente, a circulação desta em mercado nacional.

Diante dos conceitos já apresentados, este estudo irá eliminar dois critérios contidos nos relatórios emitidos pelo LABLUX, sendo estes Potência (W) e Fluxo Luminoso (lm) e, deste modo, irá atender ao axioma de “não-redundância” imposto pela família coerente de critérios, uma vez que o critério Eficiência (lm/W) será considerado nesta avaliação de multicritérios. Os critérios também serão classificados em duas categorias: quanto maior melhor e quanto menor melhor, a saber, estas categorias são utilizadas na literatura como critérios de benefícios e custos, isto é, critérios que deseja-se maximizar ou minimizar, respectivamente.

3.3.1.1 POTÊNCIA NOMINAL (W)

A potência elétrica nominal é a quantidade de conversão de energia que pode ser realizado em certo período, ou seja, é uma grandeza física que mede a energia que está sendo

transformada na unidade de tempo, deste modo mede o trabalho realizado por um determinado equipamento na unidade de tempo. Normalmente, a potência elétrica das lâmpadas é dada em Watts (W). A potência nominal está representada na equação (13) [65]. O critério potência elétrica será desconsiderado nesta análise para atender as condições de satisfação da família coerente de critérios.

$$P = \frac{\tau}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \quad (13)$$

3.3.1.2 FLUXO LUMINOSO

O fluxo luminoso, representado por Φ , é definido como a potência de radiação capaz de ser percebida pelo olho humano, emitida por uma lâmpada e distribuída a todas as direções do espaço, ou seja, representa a potência luminosa emitida ou observada. O lúmen (lm) é a sua unidade de medida que corresponde à quantidade de energia radiante capaz de sensibilizar o olho humano. O fluxo luminoso é medido dentro de uma esfera integradora que recebe o nome de Ulbricht. A Figura 11 ilustra o fluxo luminoso emitido por uma lâmpada [66]. Todavia, o critério fluxo luminoso também será desconsiderado nesta análise para atender as condições de satisfação da família coerente de critérios.



Figura 11 - Fluxo Luminoso (Φ) emitido por uma lâmpada [67].

3.3.1.3 EFICIÊNCIA LUMINOSA

Pode ser definida como a relação entre o fluxo luminoso emitido em lúmens, e a energia elétrica consumida por unidade de tempo em Watts de uma determinada fonte de luz. Quanto maior a eficiência luminosa de uma lâmpada ou luminária, menor será o seu consumo de energia [38]. Sendo assim, a escolha ideal será uma lâmpada com maior fluxo luminoso e menor potência. A eficiência luminosa é dada em lúmens/Watt (lm/W), ou seja, em fluxo luminoso por potência, e por este motivo, este critério foi escolhido em detrimento dos dois anteriores (potência e fluxo luminoso) desconsiderados nesta avaliação de multicritério [7].

A unidade de medida da eficiência luminosa é calculada pela equação (14):

$$\eta = \frac{\phi}{P}, \quad (14)$$

onde:

η = eficiência Luminosa, em lúmen / Watt,

ϕ = fluxo Luminoso, em lúmen,

P = potência consumida, em Watt.

3.3.1.4 MANUTENÇÃO OU DEPRECIÇÃO DO FLUXO LUMINOSO

É o percentual de diminuição do fluxo luminoso ou redução da emissão de luz de uma lâmpada, durante um período de operação, isto é, vida útil. Esta redução é intrínseca a todas as lâmpadas e luminárias elétricas [7].

3.3.1.5 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência (FP) é a relação entre a potência aparente (S), ou potência total [VA], e a potência ativa (P) [W], expresso pela equação (15). Essa relação representa o quanto de energia é entregue e o quanto desta energia entregue é realmente transformada em trabalho. O FP também pode ser expresso pela equação (16), onde pode-se verificar a dependência do ângulo de defasagem entre a corrente e tensão, expresso em (17), e da distorção na forma de onda da corrente de alimentação [17].

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\phi, \quad (15)$$

$$FP = \frac{\cos\phi}{\sqrt{1 + THD^2}}, \quad (16)$$

$$\cos\phi = \frac{P_1}{S_1}, \quad (17)$$

onde:

P =Potência ativa (W),

S =Potência reativa,

$\cos \varnothing$ = Ângulo entre a forma de onda de corrente e tensão,

P1 =Potência ativa da fundamental,

S1 =Potência reativa da fundamental.

Vale ressaltar que $\cos\varnothing$ se relaciona unicamente a frequência fundamental e, na presença de harmônicas, é diferente do fator de potência FP [17].

3.3.1.6 CORRENTE

A corrente elétrica designa o deslocamento ordenado de cargas elétricas, a saber, íons ou elétrons dentro de um sistema condutor, ou seja, a corrente elétrica é um fluxo de elétrons que circula por um condutor quando houver uma diferença de potencial elétrico entre suas extremidades, e esta diferença de potencial chama-se tensão. Este deslocamento busca reestabelecer o equilíbrio desfeito pela ação de um campo elétrico, entre outros meios, como reação química, atrito, luz, etc.

Logo, pode-se afirmar que a corrente elétrica é o fluxo de cargas que atravessa a seção reta de um condutor na unidade de tempo, e se este fluxo for constante, denomina-se ampère a relação, conforme as equações (18) e (19) [68]

$$1 \text{ ampère} = 1 \frac{\text{coulomb}}{\text{segundo}}, \quad (18)$$

ou ainda,

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (19)$$

3.3.1.7 DISTRORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DHT OU TOTAL HARMONIC DISTORTION - THD)

O termo “distorção” em qualidade de energia significa a deformidade da forma de onda da tensão ou corrente alternada senoidal e, quando essas duas grandezas são distorcidas, perdem-se a suas conformidades senoidais [69].

A distorção harmônica é causada por dispositivos não lineares existentes no sistema de potência. Um dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada, ou seja, enquanto a tensão aplicada é perfeitamente senoidal, a corrente resultante é

distorcida. Um pequeno aumento da tensão pode fazer com que a corrente duplique e assuma uma forma de onda diferente. Esta é a fonte da maioria das distorções harmônicas em um sistema de energia [70].

O parâmetro utilizado para quantificar a distorção harmônica de um determinado sistema é o *Total Harmonic Distortion* (THD) ou distorção harmônica total, e o seu monitoramento é uma questão relevante para haja a preservação da qualidade de um sistema elétrico [71].

Em sistemas gerais, a distorção de tensão harmônica total não deve exceder 5%, medida em qualquer ponto de acoplamento comum, com qualquer distorção de tensão harmônica individual que não exceda 3% do valor da tensão fundamental. A faixa de harmônicos a ser levada em conta deve ser até o 50º harmônico [72]. Vale ressaltar, que para sistemas com tensão nominal $\leq 1\text{kV}$, o PRODIST indica que o limite aceitável para DDT_{95} é de 10% [73].

i) TAXA DE HARMÔNICA INDIVIDUAL

É a porcentagem de harmônica de ordem h dividida pela fundamental, dada pela equação (20)

$$i_h(\%) = 100 \frac{I_h}{I_1}. \quad (20)$$

ii) TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

É definida pela relação entre o valor RMS das componentes harmônicas da corrente e a fundamental segundo a equação (21), e pode atingir valores maiores do que 1.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}. \quad (21)$$

3.3.1.8 ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR (IRC OU RA)

O índice de reprodução de cor representa a capacidade de reprodução da cor de um objeto diante de uma fonte de luz. O IRC faz uma correspondência entre a cor real de um objeto e que ele está apresentando diante da fonte de luz. O IRC varia de 0 a 100% e está de acordo

com a fonte luminosa e o ambiente a que se destina. Quanto mais alto o IRC, melhor é a fidelidade das cores. A Figura 12 mostra a reprodução de cores e seus respectivos índices [7]

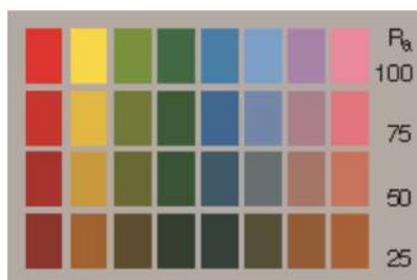


Figura 12 - Reprodução de cores e seus índices [7].

3.3.1.9 ÍNDICE R9

O IRC é normativo e foi criado na década de 60 pela *Comission Internationale de l'Eclairage* (CIE) e a faz a análise de fidelidade de cor, considerando 14 cores. O IRC surgiu com 8 cores, seleccionadas no sistema Munsell. Além de serem poucas, não representam cores saturadas por serem cores em tons pastéis, cores com baixo croma. Atualmente o IRC é analisado com mais 6 cores adicionais (R9 à R14), que representam cores mais saturadas e cores encontradas na natureza: vermelho intenso (R9), amarelo intenso (R10), verde intenso (R11), azul intenso (R12), tom de pele caucasiano (R13) e verde oliva tom de folha (R14).

Para a lâmpada a certificação da lâmpada LED é solicitado o ensaio para o vermelho intenso [74].

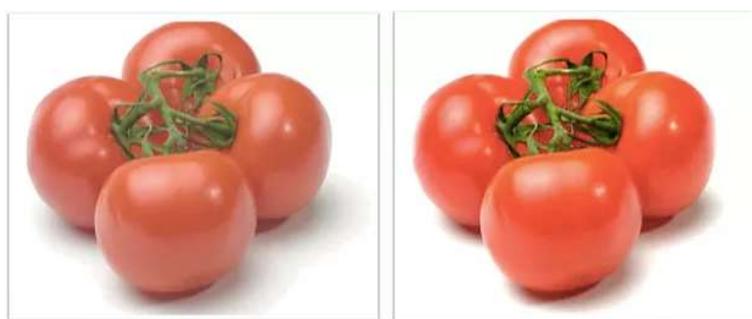


Figura 13 – Reprodução de Cor [75].

3.3.1.10 TEMPERATURA DE COR CORRELATADA (TCC)

Pode-se fazer uma analogia à cromaticidade, pois a temperatura de cor expressa a aparência da cor da luz emitida pela fonte de luz. Sua medida é dada em Kelvin (K). Quanto mais alta a temperatura de cor, mais clara é a tonalidade de cor da luz, isto é, quanto mais quente

ou fria, não faz referência a temperatura da lâmpada, e sim à tonalidade de cor que ela irradia no ambiente que esta instalada [7].

As temperaturas de cores típicas estão apresentadas na Figura 14.

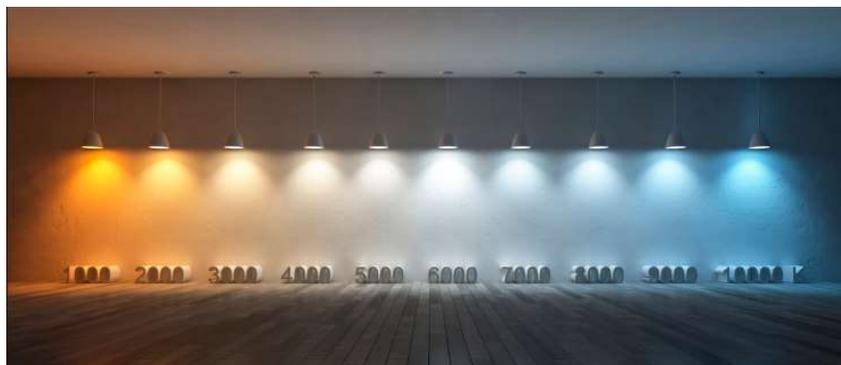


Figura 14 - Temperaturas de cor típicas [76].

3.3.1.11 INTENSIDADE LUMINOSA DE PICO (CD)

Sabe-se que uma fonte luminosa não emite uniformemente em todas as direções o mesmo fluxo luminoso, ou seja, em uma determinada direção o fluxo luminoso é maior do que em outras. Assim, o fluxo luminoso em uma determinada direção denomina-se intensidade luminosa. Sua unidade de medida é a Candela (cd). A intensidade luminosa (I) pode ser determinada pela expressão dada na equação (22)

$$I = \frac{\phi}{\omega}, \quad (22)$$

onde ϕ corresponde ao fluxo luminoso (em lm) e ω ao ângulo sólido (esterorradiano - sr) [77].



Figura 15 – Fonte luminosa [67].

3.3.1.12 ÂNGULO OU ABERTURA DE FACHO

Trata-se do ângulo sólido luminoso formado em um plano tridimensional através do eixo do centro óptico de um refletor, cuja iluminância é projetada em um plano de trabalho. É medido em graus, entre duas direções nas quais a luminosidade é 50% da intensidade máxima medida em um plano nominal da linha central do fecho [78]. O ângulo de fecho de uma lâmpada dá a idéia de como o fecho de luz se espalha à medida que se distancia do fecho central, como mostrado nas Figuras Figura 16 e Figura 17.

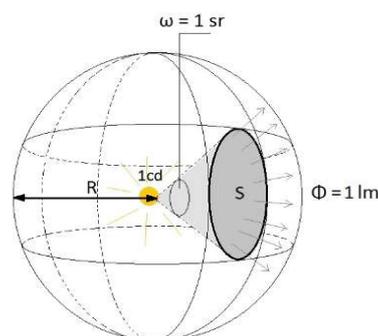


Figura 16 - Ângulo sólido ω correspondente à área $S = 1\text{m}^2$ em uma esfera de raio $r = 1\text{m}$ [79].

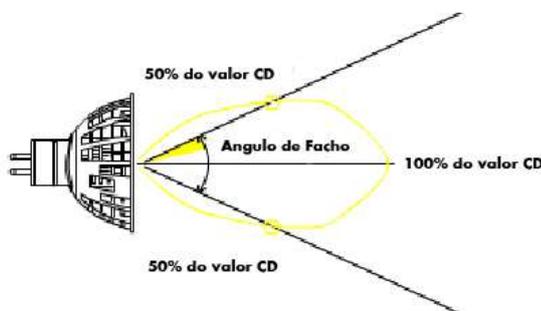


Figura 17 – Ângulo de Fecho [80].

Além dos critérios apresentados, têm-se os critérios eletromagnéticos que relacionam as emissões conduzidas e radiadas (pelo campo elétrico e magnético). Entretanto, estes já foram apresentados e detalhados no capítulo 2.

3.4 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE AMOSTRAS

Os dados referentes às amostras ensaiadas utilizadas neste estudo, como já mencionado na descrição do problema proposto deste capítulo, são coletados no LABLUX. As amostras são entregues pelo fabricante diretamente no laboratório, e posteriormente essas amostras são

inspeccionadas e identificadas para início dos ensaios. O LABLUX é acreditado pelo Inmetro para realizar, dentre outros, ensaios em lâmpadas LED com dispositivo integrado à base.

Os ensaios realizados são designados para o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) em produtos com o objetivo da concessão da Etiqueta Nacional de Eficiência Energética - ENCE, concedida pelo INMETRO. Ademais, também são realizados ensaios para o Acompanhamento da Produção do Programa Brasileiro de Etiquetagem em produtos de luminotécnica, com o objetivo de verificar se os índices de eficiência e vida obtidos na concessão da ENCE ainda permanecem válidos.

Foram considerados somente os ensaios totalmente aprovados, para que uma amostra reprovada não impactasse no critério de seleção e escolha pois, na caracterização de aprovação parcial a amostra pode ter sido aprovada em um critério e ser melhor em outro logo, estas questões influenciariam o modelo a ser estudado.

Existem 3 (três) tipos de ensaios, a saber, CONCESSÃO, ACP e ROTINA. Tais ensaios, são definidos e classificados a seguir:

a) Concessão

O ensaio de concessão é uma modalidade de ensaio na qual o fabricante solicita diretamente ao laboratório acreditador do Inmetro ensaios de avaliação da conformidade, buscando a obtenção da etiqueta ENCE e do Selo PROCEL, adquirindo assim o direito de comercialização do seu produto em território nacional.

b) Ensaio de Acompanhamento de Produção (ACP)

Ensaio de Acompanhamento da produção (ACP) é uma modalidade de ensaio em que o Inmetro solicita a coleta de produtos no mercado/estoque para verificar se os índices de desempenho alcançados na fase da concessão estão sendo mantidos, uma vez que os produtos já estão sendo comercializados.

c) Rotina

Ensaio de Rotina é uma modalidade onde são realizados quaisquer tipos de ensaios que o cliente desejar contratar como controle interno de qualidade, verificação dos índices mínimos

da RAC, entre outros. Ademais, este tipo de ensaio não tem o objetivo de concessão da ENCE, e os relatórios destes são enviados exclusivamente para o cliente.

Para este estudo foram selecionados modelos da família PAI do ensaio de concessão, por ser realizado ensaio completo nesse tipo de modelo.

3.4.1 DESCRIÇÃO DOS TESTES E ENSAIOS

Todas as medições foram realizadas para lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base ou corpo constituindo uma peça única, não destacável, sendo destinadas para operação em rede de distribuição de corrente alternada de 60 Hz, para tensões nominais de 127 V e/ou 220 V, ou faixas de tensão que englobem as mesmas ou em corrente contínua (DC ou CC), com proteção contra surto, tensão de alimentação até 250 V, previstas para uso doméstico e similar até 60W de potência nominal, atendendo assim, todos os requisitos ambientais de ensaio da portaria 389/2014 [9], considerando a temperatura ambiente de 25 ± 1 °C, umidade relativa máxima admitida de 65 %, e fluxo de ar limitado àquele gerado pela própria lâmpada, ou com velocidade relativa limitada a 0,2 m/s.

Além das portarias e norma já citadas na introdução deste trabalho, os testes de certificação da lâmpada também atendem aos requisitos estipulados nas portarias 143/2015 [81] e 20/2017 [82]. A Portaria Inmetro nº 143, de 13 de março de 2015 [81] refere-se a um complemento para a portaria 389/2014 [9], ou seja, ajustes no Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED com Dispositivo Integrado à Base. Enquanto a Portaria Inmetro nº 20, de 15 de fevereiro de 2017 [82], refere-se às diretrizes para a certificação de lâmpadas e luminárias que irão atender a iluminação pública.

Como já explicitado no início deste item, as medições e ensaios das amostras adotadas neste estudo foram na modalidade concessão da família PAI. Para tanto, os modelos “pais de família”, ou seja, da mesma família fabril a serem ensaiados devem conter 24 (vinte e quatro) unidades, sendo 10 (dez) utilizadas nos ensaios fotoelétricos e ensaio de vida, 3 (três) para medição no gônio, 4 (quatro) para segurança elétrica, 3 (três) para o ensaio de ciclo térmico e comutação, 3 (três) para ensaio do capacitor e 1 (um) para o ensaio de compatibilidade eletromagnética.

A escolha das amostras utilizadas para esta avaliação conta com os ensaios que são realizados pela fotometria na esfera integradora, no goniofotômetro e ainda com os ensaios de manutenção de fluxo, vida nominal e de compatibilidade eletromagnética.

Para realização dos ensaios as lâmpadas precisam ser previamente estabilizadas. O tempo necessário para estabilização da lâmpada LED deve ser no máximo de 2h, e é obtida quando a variação de pelo menos três medições sucessivas de emissão de luz e potência elétrica em um intervalo de 15min altera menos que 0,5 %. Portanto, para garantir a estabilização da lâmpada é indispensável que a variação na emissão de luz (fluxo luminoso) e da potência elétrica sejam acompanhadas ao longo do tempo [9].

3.4.1.1 ENSAIOS DE FOTOMETRIA E GONIOFOTOMETRIA

Os ensaios de fotometria na esfera integradora avaliam os critérios de corrente e potência elétrica, fator de potência, THD, distorção harmônica de $\{2^a, 3^a, 5^a, 7^a, \dots, 39^a\}$, fluxo luminoso, temperatura de cor, IRC, R9 e eficiência. Já os ensaios realizados no goniofotômetro consideram os critérios de distribuição luminosa, valor de intensidade luminosa de pico e ângulo de fecho luminoso. Estes ensaios são iniciais.

Os ensaios fotometria são realizados com 10 (dez) amostras de lâmpadas de cada modelo e/ou fabricante. Estas 10 (dez) unidades são fotometradas na esfera integradora de Ulbrich e, se durante os ensaios 1 (uma) destas 10 (dez) unidades submetidas a fotometria queimarem, o modelo será reprovado. Enquanto os ensaios no gônio contam com 3 (três) amostras de lâmpadas para as medições.

Após a medição de todas as amostras do processo deve ser elaborado o Relatório Inicial. Este relatório é elaborado para os ensaios de Concessão e é enviado somente ao fabricante com objetivo de informar os dados técnicos que devem ser inseridos na embalagem do produto. Os modelos aprovados no Ensaio Inicial devem seguir para os Ensaios de 3000h.

Para as medições dos parâmetros elétricos e fotométricos, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Esfera integradora de Ulbricht (Figura 18-(a));

- Fonte de tensão modelo PACIFIC Smart Source (Figura 18-(b)), para garantir a frequência de 60Hz e tensão de ensaio nominal da rede elétrica, 127 VCA ou 220 VCA, estável dentro de 0,2 % no momento da medição;
- Espectrorradiômetro modelo HAAS 2000 da Everfine (Figura 18-(c));
- Wattímetro modelo WT 210 da Yokogawa (Figura 18-(d));
- Computador com o *software* (Figura 19-(a)) para tratamento dos dados;
- Goniofotômetro (Figura 19-(b)) para medir a luz emitida pelas luminárias testadas em diferentes ângulos.

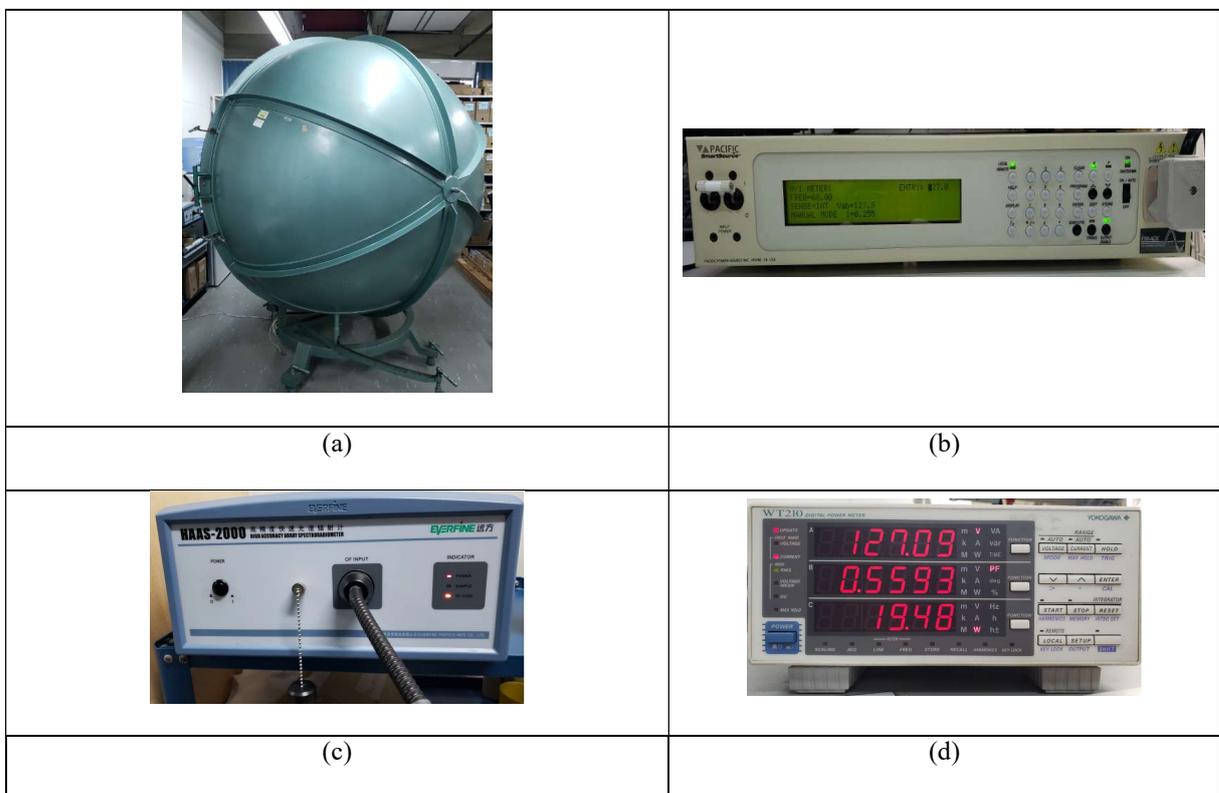


Figura 18 - Equipamentos Utilizados nas Medições dos Parâmetros Elétricos e Fotométricos: (a) Esfera integradora de Ulbricht, (b) Fonte de Tensão, (c) Espectrorradiômetro e (d) Wattímetro. (e) Computador e (f) Goniofotômetro. Fonte: o autor.

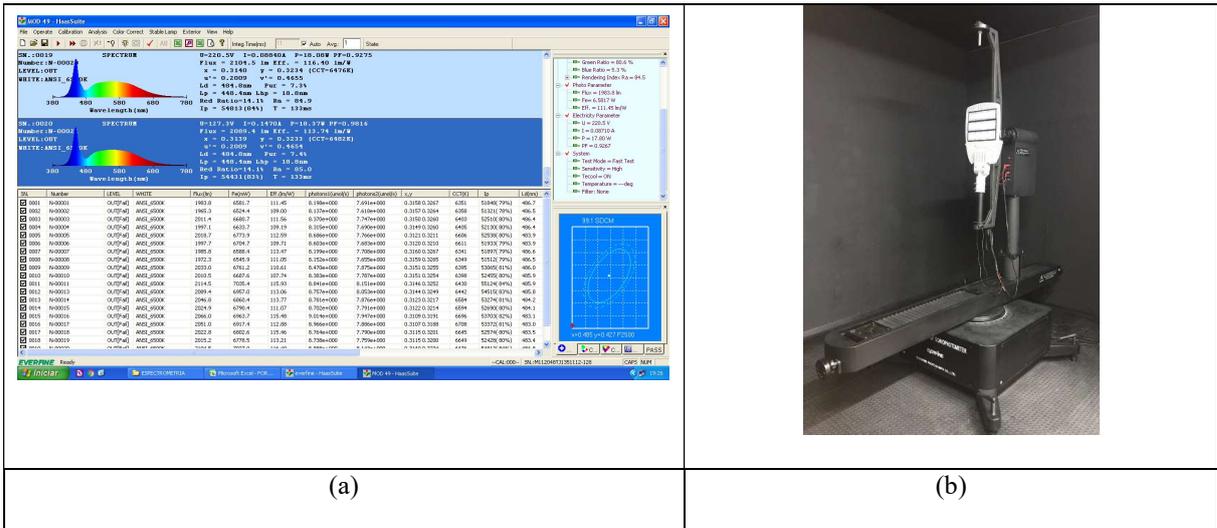


Figura 19 - Equipamentos Utilizados nas Medições dos Parâmetros Elétricos e Fotométricos: (a) Computador e (b) Goniofotômetro. Fonte: o autor.

3.4.1.2 ENSAIOS DE 3000H

Após aprovação dos modelos no ensaio inicial deverão ser realizados os ensaios de 3000h. No Ensaio de 3000h, as amostras devem ser energizadas de forma ininterrupta por um período de 3000h. Para o caso das lâmpadas tubulares, 50% com o dissipador para cima e os outros 50 % com o dissipador para baixo. Assim como no Ensaio Inicial, caso ocorra a queima de uma lâmpada ou mais de um mesmo modelo, os ensaios deste modelo devem ser interrompidos, pois ele já estará reprovado.

Nas medições fotoelétricas de 3000h as instruções são similares às apresentadas nas medições fotométricas iniciais. Entretanto, diferem na apresentação das especificações nas etiquetas, pois estas devem ser referentes aos ensaios de 3000h. As medições de 3000h devem ser registradas no mesmo formulário utilizado na medição inicial.

Após a medição de todas as amostras dos modelos, devem ser elaborados os relatórios dos ensaios de 3000h. Este relatório apresenta todas as informações referentes aos ensaios e ao parecer final do modelo ensaiado, com a indicação para cada item especificado no RTQ, como CONFORME e NÃO CONFORME.

3.4.1.3 ENSAIOS DE MANUTENÇÃO DE FLUXO E VIDA NOMINAL

Para o ensaio de manutenção de fluxo e vida nominal, utilizando como base a portaria nº 389/2014, a determinação da vida nominal pode ser antecipada pela comparação entre os

valores obtidos em 3000h com os valores informados pelo fabricante. Todavia, se o fabricante não tiver estes dados, deve-se continuar os ensaios até completar 6000h.

3.4.1.4 ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

No capítulo 2 deste trabalho discutiu-se de forma breve a respeito dos ensaios de EMC, apresentando os limites permissíveis com base na norma regulamentadora ABNT NBR IEC/CISPR 15 [10]. Entretanto, neste item serão detalhadas as etapas destes ensaios.

Os ensaios de compatibilidade eletromagnética são realizados a partir de uma amostra que é selecionada quando o laboratório recebe os modelos do fabricante. Logo, pode-se afirmar que cada modelo a ser ensaiado contém 1 (uma) amostra a ser utilizada no ensaio de compatibilidade eletromagnética.

a) Ensaios de emissão conduzida

Os equipamentos e materiais utilizados e necessários para a montagem dos ensaios para verificação dos níveis de emissão conduzidas são:

- Plano de terra vertical e/ou horizontal aterrada com dimensões mínimas de 2m x 2m (plano de referência);
- Mesa de material não condutor com altura mínima de 80 cm;
- Rede Artificial tipo V (LISN);
- Receptor de EMI. Alternativamente pode-se utilizar um Analisador de Espectro EMC em conjunto com um Pré-seletor que para trabalhe nas Bandas de frequência A e B. O pre seletor funciona com 11 filtros passa faixa, a banda A considera as faixas de frequência até 150kHz e a banda B, as faixas até 30MHz;
- Fonte de alimentação de $\pm 2\%$ de desvio da tensão nominal.

Nos ensaios referentes à emissão conduzida, devem ser realizadas medições de Quase Pico (QP - *Quasi Peak*) e medições de Média (AV - *Average*) das tensões de perturbação.

b) Ensaios de emissão radiada

Os ensaios de emissão radiada são divididos por faixas de frequência. Nele, medem-se as perturbações eletromagnéticas radiadas no intervalo compreendo entre 9kHz à 30MHz, e mede-se também o intervalo entre 30MHz à 300MHz.

Os equipamentos e materiais necessários para montagem do ambiente de ensaio das perturbações eletromagnéticas radiadas no intervalo compreendido entre 9kHz à 30MHz são:

- Analisador de espectro EMC;
- Fonte de alimentação de $\pm 2\%$ de desvio da tensão nominal;
- Antena de *Loop Large Loop* e caixa comutadora de três eixos;
- Mesa de material não condutor. Para este ensaio, deve-se colocar o *Equipment Under Test* (EUT), ou seja, equipamento em ensaio no centro da antena *Loop*, localizando-o em cima de uma mesa de material não condutor. A antena, por sua vez, é conectada à entrada referente à faixa de frequências de 9kHz a 30MHz do analisador de espectro, utilizando-se um cabo coaxial blindado. Vale ressaltar que este ensaio deve ser realizado para os 3 (três) eixos da antena (x, y, z).

Nos ensaios referentes à emissão radiada devem ser realizadas medições de Quase Pico da componente magnética.

Os equipamentos e materiais necessários para montagem do ambiente de ensaio das perturbações eletromagnéticas radiadas no intervalo compreendido entre 30MHz à 300MHz são:

- Analisador de Espectro EMC;
- Fonte de alimentação de $\pm 2\%$ de desvio da tensão nominal;
- CDN (Rede de Acoplamento-Desacoplamento); - Atenuador Coaxial de 6 dB / 50 Ω ;

- Filtro passa-alta de 30 MHz; Para a realização do ensaio de emissão radiada na faixa de 30 MHz – 300 MHz serão utilizadas os requisitos do anexo B da norma ABNT NBR CISPR 15:2014.

Nos ensaios referentes à emissão radiada devem ser realizadas medições de Quase Pico da componente elétrica.

Após a medição de todos os modelos do processo de certificação, é elaborado um relatório de EMC. Este relatório, nos ensaios de Concessão, tem objetivo de informar ao fabricante se o modelo está em conformidade aos limites de interferência eletromagnética estabelecidos em norma, permitindo ou não a certificação para Compatibilidade Eletromagnética.

Os limites permissíveis estabelecidos em norma já foram apresentados nas Tabelas Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 no capítulo 2. As medições realizadas nos ensaios de EMC fornecem os valores dos detectores de frequência de QP e AV para a emissão conduzida e do detector de frequência de QP para a emissão radiada.

A partir destes valores medidos podem-se comparar os resultados com os limites permissíveis e, ao realizar a subtração destes, será obtido o valor da margem em dB, a saber, este valor determinará a conformidade ou não-conformidade para os testes de EMC, devendo este ser positivo.

No teste de emissão conduzida são escolhidos 12 (doze) pontos entre os detectores de frequência QP e AV, conforme a Figura 20, obtido por meio do *software EMC Engineer v4.10*.

A Tabela 6 exemplifica como os dados de EMC são coletados e comparados com os limites estabelecidos em norma. Nesta tabela pode-se verificar que os valores de margem (dB) são todos positivos, o que caracteriza uma lâmpada LED classificada como CONFORME, ou seja, não irá provocar interferência eletromagnética por emissão conduzida.

É importante ressaltar que para os testes de emissão conduzida, além das medições serem realizadas em 127V e 220V, também são realizadas medições para os terminais neutro e fase para ambas tensões nominais.



Figura 20 - Espectro de Frequência - Terminal Neutro (dB μ V) - 127V. Fonte: Gráfico gerado no *Software EMC Engineer v4.10* e retirado do relatório de ensaio do LABLUX.

Tabela 6 - Terminal Neutro (dB μ V) - 127V

Item	Frequência (MHz)	Resultado (dB μ V)	Limite (dB μ V)	Margem (dB)	Detector
1	0.01374	60	110	50	QP
2	0.08443	74	85	11	QP
3	0.1680	56	65	9	QP
3	0.1680	45	55	10	AV
4	0.1872	55	64	9	QP
4	0.1872	45	54	9	AV
5	0.2299	53	62	9	QP
5	0.2299	37	52	15	AV
6	0.2517	56	62	6	QP
6	0.2517	43	52	9	AV
7	0.5182	50	56	6	QP
7	0.5182	39	46	7	AV

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no *Software EMC Engineer v4.10*.

A Tabela 6 é elaborada com base nos limites permissíveis referente ao item 4.3.1 da CISPR 15 [10].

Nos testes de emissão radiada são escolhidos 6 (seis) pontos com a referência do detector de frequência QP, conforme a plotado pelo *software EMC Engineer*.



Figura 21 - Espectro de Frequência – Eixo X da antena Loop - Fonte: Gráfico gerado no *Software EMC Engineer v4.10* e retirado do relatório de ensaio do LABLUX.

Entretanto, os ensaios de emissão radiada pela componente magnética são realizados por meio de uma antena *Loop*, e esta possui três *loops* circulares com dois metros de diâmetro cada e são mutuamente perpendiculares e apoiados em uma base não metálica, permitindo assim que emissividade seja medida em três direções, sendo elas, os eixos x, y e z. Deste modo, os resultados dos ensaios são compilados para os 3(três) planos.

A Tabela 7 exemplifica como os dados de EMC são coletados e comparados com os limites estabelecidos em norma. Nesta tabela pode-se verificar que os valores de margem(dB) são todos positivos, o que caracteriza uma lâmpada LED classificada como CONFORME, ou seja, não irá provocar interferência eletromagnética por emissão radiada pela componente magnética.



Figura 21 - Tensão de ensaio: 127V – Eixo X da antena Loop, Fonte: Gráfico gerado no *Software EMC Engineer v4.10* e retirado do relatório de ensaio do LABLUX.

Tabela 7 - Tensão de ensaio: 127V – Eixo X da antena Loop

Item	Frequência (MHz)	Resultado (dB μ A)	Limite (dB μ A)	Margem (dB)	Detector
1	0.03504	29	88	59	QP
2	0.05459	20	88	68	QP
3	0.1841	20	56	36	QP
4	0.3671	12	47	35	QP
5	0.8018	10	38	28	QP
6	1.021	5	35	30	QP

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no *Software EMC Engineer v4.10*.

A Tabela 7 é elaborada com base nos limites permissíveis referentes ao item 4.4.1 da CISPR 15 [10].

Para os ensaios de emissão radiada pela componente elétrica também são escolhidos 6 (seis) pontos com a referência do detector de frequência QP, conforme a Figura 22, plotado pelo *software EMC Engineer v4.10*. Entretanto, para este ensaio é utilizado o CDN, que é o analisador de espectro, explicitado no capítulo 2.

A Tabela 8 exemplifica como os dados de EMC são coletados e comparados com os limites estabelecidos em norma. Nesta tabela pode-se verificar que os valores de margem (dB) são todos positivos, o que caracteriza uma lâmpada LED classificada como CONFORME, ou

seja, não irá provocar interferência eletromagnética por emissão radiada pela componente elétrica.



Figura 22 - Espectro de Frequência - 127V. Fonte: Gráfico gerado no *Software EMC Engineer v4.10* e retirado do relatório de ensaio do LABLUX.

Tabela 8 - Tensão de ensaio: 127V

Item	Frequência (MHz)	Resultado (dBμV)	Limite (dBμV)	Margem (dB)	Detector
1	64.97	45	58	13	QP
2	76.37	49	56	7	QP
3	80.03	48	56	8	QP
4	86.17	47	55	8	QP
5	89.12	47	55	8	QP
6	133.00	42	54	12	QP

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no *Software EMC Engineer v4.10*.

A Tabela 8 é elaborada com base nos limites permissíveis referente ao item 4.4.2 da CISPR 15 [10].

É importante ressaltar que os testes de emissão conduzida e radiada também são realizados na tensão nominal de 220V e serão melhor detalhados na sessão de resultados deste estudo.

3.5 CENÁRIOS DE ANÁLISE

A partir dos fabricantes e modelos selecionados para o estudo da tecnologia LED, quanto ao apoio aos usuários finais sobre o melhor produto no mercado, este estudo visa analisar e combinar os critérios em 3 (três) cenários, uma vez que os parâmetros técnicos a serem considerados são inúmeros e moderadamente disseminados. O primeiro modelo que será rodado no TOPSIS refere-se ao cenário dos parâmetros luminoenergéticos da lâmpada, o segundo quanto aos parâmetros de EMC e o terceiro seria a combinação dos 2 (dois) cenários anteriores. Os modelos estão combinados de modo a atender os resultados de eficiência energética, resultados de qualidade de energia, resultados de qualidade luminotécnica e os resultados das emissões eletromagnéticas conduzidas e radiadas, onde as emissões são os principais parâmetros de comparação deste estudo.

No fim deste capítulo será apresentada uma tabela resumo com os cenários estudados e seus respectivos objetivos, assim como as categorias atribuídas a cada critério selecionado para esta avaliação.

3.5.1 PRIMEIRO CENÁRIO – PARÂMETROS LUMINO-ENERGÉTICOS

A combinação dos critérios em modelo para o primeiro cenário foi realizada em 3 (três) grupos, sendo estes, eficiência energética, qualidade de energia e qualidade luminotécnica. Os critérios foram ordenados conforme disposição das Tabelas Tabela 9-a e Tabela 9-b para as tensões nominais de 127V e 220V, respectivamente.

As Tabelas Tabela 9-a e Tabela 9-b foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão que será apresentada na sessão de resultados deste estudo. É importante ressaltar que cada linha desta refere-se a uma alternativa, ou seja, fabricante/modelo de lâmpada diferente, logo, neste contexto, note-se que 8 (oito) fabricantes são estudados.

Tabela 9-a - Cenário 1 - Parâmetros Lumino-energéticos – Modelo Referência: Lâmpada LED Tubular 18W - (6000 – 6500) K - 127V

Descrição da Amostra	Eficiência Energética		Qualidade da Energia			Qualidade Luminotécnica				
	Eficiência (lm/w)	Mnt. do fluxo luminoso (%)	Fator de potência	Corrente (mA)	THD (%)	IRC	R9	TCC (K)	Ângulo de fecho (°)	Intensidade luminosa de pico (cd)
A	103,1	96	0,96	147,6	25	82,9	10	6961,4	181,9	264,6
B	105,2	96,3	0,99	142,7	8,4	85,4	22	6933,3	128,9	423,4
C	121,9	96,4	0,98	145,8	10,6	85,2	19	6597,1	147,6	409,5
D	116,8	95,9	0,98	145,9	10,1	84,2	14	6594	182,5	337,6
E	110,6	96,8	0,98	144,7	9,8	85,1	20	6753,5	184,2	296,6
F	105,2	97,1	0,99	137,4	7,6	85,1	16	6822,8	175	305,4
G	113,2	97,5	0,98	145,7	10,9	84,9	27	6499,6	245,7	289,2
H	102,5	96	0,99	143,6	8,2	85	14	6366,7	125,8	543,4
Peso	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Impacto	Positivo ^a	Positivo	Positivo	Negativo ^b	Negativo	Positivo	Positivo	Negativo	Negativo	Positivo

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos nos Softwares HaasSuite e GoSoft 2.0.

^aPositivo = Impacto Positivo → critério “Quanto maior Melhor”

^bNegativo = Impacto Negativo → critério “Quanto menor Melhor”

A combinação dos critérios em modelo para o primeiro cenário foi realizada em 3 (três) grupos, sendo estes, eficiência energética, qualidade de energia e qualidade luminotécnica. Os critérios foram ordenados conforme disposição das Tabelas Tabela 9-a e Tabela 9-b para as tensões nominais de 127V e 220V, respectivamente.

As Tabelas Tabela 9-a e Tabela 9-b foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão que será apresentada na sessão de resultados deste estudo. É importante ressaltar que cada linha desta refere-se a uma alternativa, ou seja, fabricante/modelo de lâmpada diferente, logo, neste contexto, note-se que 8 (oito) fabricantes são estudados.

Tabela 9-b - Cenário 1 - Parâmetros Lumino-energéticos – Modelo Referência: Lâmpada LED Tubular 18W - (6000 – 6500) K - 220V

Descrição da Amostra	Eficiência Energética		Qualidade da Energia			Qualidade Luminotécnica				
	Eficiência (lm/w)	Mnt. do fluxo luminoso (%)	Fator de potência	Corrente (mA)	THD (%)	IRC	R9	TCC (K)	Ângulo de fecho (°)	Intensidade luminosa de pico (cd)
A	102,4	96,2	0,92	91,6	18,5	82,8	10	6951,6	181,9	264,6
B	104,37	96,6	0,95	85,7	11,7	85,4	22	6926,6	128,9	423,4
C	125,2	96,4	0,9	87,7	15,3	85,1	19	6586,3	147,6	409,5
D	118,6	95,9	0,95	84,1	4,4	84,1	13	6577	182,5	337,6
E	112,5	96	0,96	83,5	4,3	85,1	19	6739,4	184,2	296,6
F	108,5	96,7	0,94	85,7	15,8	85,1	16	6815	175	305,4
G	115,6	96,9	0,93	87,8	15,4	84,9	27	6492,7	245,7	289,2
H	101,9	96,2	0,92	89,3	15,4	84,9	14	6356	125,8	543,4
Peso	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Impacto	Positivo ^a	Positivo	Positivo	Negativo ^b	Negativo	Positivo	Positivo	Negativo	Negativo	Positivo

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos nos Softwares

HaasSuite e GoSoft 2.0.

^aPositivo = Impacto Positivo → critério “Quanto maior Melhor”

^bNegativo = Impacto Negativo → critério “Quanto menor Melhor”

O laboratório recebe uma gama de amostras de cada modelo para os ensaios de acreditação do Inmetro. Deste modo, os dados das Tabelas Tabela 9-a e Tabela 9-b são compilados a partir da média aritmética destas amostras, a saber, os dados de eficiência, fator de potência, corrente, THD, IRC, R9 e TCC são dados a partir da média de 10 (dez) amostras que são ensaiadas na esfera integradora. Todavia, os dados de manutenção do fluxo luminoso, ângulo de fecho e intensidade luminosa de pico são dados provenientes do goniofotômetro, onde a média das amostras são realizadas com apenas 3 unidades.

É possível notar que para cada critério adotado foi designado um peso e um impacto. Na 4^o etapa do método TOPSIS ‘Ponderação dos Dados - Atribuição de Pesos à Matriz de Decisão Normalizada’ é possível atribuir os pesos a cada critério a fim de valorizar ou não um critério em detrimento do outro. Entretanto, neste trabalho optou-se por não priorizar nenhum critério e, deste modo, os pesos foram atribuídos pela definição de entropia já evidenciada na revisão de literatura. Neste caso, como existem 10 critérios neste cenário, atribui-se o valor de 0,1 para cada critério em análise.

Os impactos são atribuídos de maneira a condicionar a definição do PIS e do NIS para cada critério. Na 5^o etapa do método TOPSIS ‘Determinação da solução ideal (PIS) e ideal-negativa (NIS)’ determina-se quais serão os critérios de benefício e de custo, isto é, define-se quais critérios deseja-se maximizar e minimizar para que o objetivo do modelo seja alcançado.

Ademais, as soluções ideal S+ e anti-ideal S- são obtidas a partir da determinação dos maiores e menores valores de cada coluna da matriz decisão.

Neste estudo faremos uma analogia para identificar os critérios de custo e benefício dentro do universo abordados nesta dissertação. Sabe-se que a função PIS potencializa os critérios de “benefício”, sendo estes os critérios que se deseja maximizar, isto é, quanto maior melhor, e deprecia os critérios de “custo”, que são critérios que deseja-se minimizar, isto é, quanto menor melhor. Em contrapartida, a função NIS é antagônica. Todavia, quando o critério for de benefício, será atribuído ao critério o impacto “positivo”, e quando o critério for de custo será atribuído ao critério um impacto “negativo”. Deste modo, ao visualizar o termo “positivo” nesta análise, deve-se ler “quanto maior melhor”, e ao visualizar “negativo” deve-se ler “quanto menor melhor”.

As considerações acima em relação a atribuição de pesos e categorização dos critérios também são válidas para os demais cenários a serem apresentados.

3.5.1.1 GRUPO 1 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O primeiro grupo contido nas Tabelas Tabela 9-a e Tabela 9-b são os dados de eficiência energética, contendo os critérios de eficiência luminosa da lâmpada em (lm/W), onde este critério foi escolhido para eliminar a redundância entre os critérios de potência (W) e fluxo luminoso (lm) medidos no laboratório, e ainda este grupo contém o critério de manutenção do fluxo luminoso dado em (%).

Pode-se notar que impacto atribuído sob o critério de eficiência luminosa (lm/W) é positivo, uma vez que, quanto maior a eficiência luminosa da lâmpada, esta terá uma maior classificação em termos de eficiência energética. Todavia, entende-se que o impacto deste critério deva ser positivo, pois é possível classificá-lo na categoria de quanto maior melhor, neste caso, quanto maior o valor do critério, melhor ele será. Sendo assim, o critério eficiência é categorizado na literatura como um critério de benefício.

De forma análoga, pode-se atribuir o impacto positivo para o critério de manutenção do fluxo luminoso (%), pois quanto mais perto de 100% estará o valor deste critério, menor será a depreciação da lâmpada, ou seja, quanto maior o valor manutenção do fluxo, melhor classificação terá a lâmpada, sendo também incluído na categoria de quanto maior melhor.

3.5.1.2 GRUPO 2 – QUALIDADE DE ENERGIA

O segundo grupo contido nas Tabelas Tabela 9-a e Tabela 9-b, são os dados de qualidade de energia, contendo os critérios de fator de potência, corrente dado em (mA) e TDH dado em (%).

O critério fator de potência recebe uma atribuição de impacto positivo, pois o fator de potência é a relação entre potência ativa (W) medida e potência reativa (VAr) medida. Desta maneira quanto mais próximo de 1(um) está essa relação, melhor será o fator de potência desta lâmpada, indicando assim a eficiência com a qual a energia está sendo utilizada, pois maior será o percentual de potência útil consumida pela lâmpada. Sendo assim é possível classificá-lo na categoria de quanto maior melhor. Neste caso, quanto maior e mais próximo de 1(um) o valor do critério, melhor ele será.

Em contrapartida, a corrente (mA) e o THD (%) recebem atribuição de impacto negativo, tendo em vista que estes critérios estão diretamente relacionados com a potência nominal da lâmpada e, considerando que as lâmpadas ensaiadas possuem mesma potência nominal, pode-se dizer que quanto maior for a distância entre a potência nominal e a potência ativa medida, maior consumo de energia elétrica e uma pior classificação terá esta lâmpada. Deste modo, pode-se afirmar que o aumento dos valores de corrente e distorção harmônica prejudicam o posicionamento da alternativa, atribuindo assim impactos negativos a estes critérios, pois neste âmbito entende-se que quanto menor os valores de corrente e distorção harmônica melhor será o critério para a alternativa.

3.5.1.3 GRUPO 3 – QUALIDADE LUMINOTÉCNICA

O terceiro grupo, contido Tabelas Tabela 9-a e Tabela 9-b são os dados de qualidade luminotécnica, contendo os critérios de IRC, R9, TCC dados em (K), ângulo de fecho dado em (°) e intensidade luminosa de pico dado em (cd), respectivamente.

Os impactos atribuídos sob os critérios IRC e R9 são positivos, pois causam efeito diretamente na qualidade da luz emitida. O IRC varia de 0 a 100% que está de acordo com a fonte luminosa e o ambiente a que se destina, logo quanto mais alto o IRC melhor é a fidelidade das cores. O R9 refere-se ao ensaio para o vermelho intenso. Desta maneira, quanto maior e mais positivo o valor medido, melhor será a classificação da lâmpada neste quesito. Sendo assim, ambos os critérios são categorizados como quanto maior melhor. Estes critérios

favorecem as alternativas, pois quanto maior os valores medidos em cada um deles melhor posicionada estará a alternativa em comparação às demais.

O critério TCC expressa a aparência da cor da luz emitida pela fonte de luz, e quanto mais alta a temperatura de cor mais clara é a tonalidade de cor da luz, isto é, quanto mais quente ou fria, não faz referência à temperatura da lâmpada e sim à tonalidade de cor que ela irradia no ambiente que esta instalada. Apesar da análise em primeiro momento parecer ser quanto maior melhor, o valor do TCC medido em uma lâmpada LED não pode ultrapassar a tolerância de TCC da categoria que foi indicada pelo fornecedor responsável. Neste caso, para o nominal de 6000K tem-se um TCC objetivo e tolerância de $6000 \pm 413\text{K}$, e para o nominal 6500K atribui-se $6532 \pm 510\text{K}$ [9]. O critério TCC (K) recebe atribuição de impacto negativo nesta avaliação, uma vez que é analisado pelo distanciamento entre o TCC nominal e o TCC medido. Deste modo, quanto mais próximo o TCC medido estiver do TCC nominal e dentro da tolerância permitida, melhor será o critério. Ademais, vale ressaltar que as amostras selecionadas tiveram valores de TCC medido acima do nominal, sendo assim, o critério foi categorizado como custo, isto é, quanto menor melhor.

No entanto, ângulo de fecho é categorizado como critério de benefício nesta avaliação. Neste caso, atribui-se um impacto positivo. Este ângulo é o ângulo entre duas linhas imaginárias em um plano através do eixo do fecho óptico, de tal forma que estas linhas passam através do centro da face frontal da lâmpada, e através de pontos em que a intensidade luminosa é 50% da intensidade do centro do fecho [9].

Segundo a RTQ, o ângulo do fecho luminoso, quando declarado pelo fornecedor responsável deve ser medido e não deve desviar em mais de 25% do valor nominal informado. Todavia este ângulo de fecho é medido de acordo com a distribuição luminosa, sendo estas de três tipos: direcionais, não-direcionais e semi-direcionais. As lâmpadas estudadas nesta análise são LEDs tubulares e classificadas como não-direcionais, sendo lâmpadas que apresentam uma distribuição de intensidade luminosa uniforme no entorno de seu corpo. Deste modo, devem apresentar distribuição uniforme da intensidade luminosa na zona entre o ângulo de 0° e 135° , simetricamente em torno do eixo vertical, e não menos que 5 % do fluxo luminoso total (fluxo luminoso zonal) deve ser emitido na zona entre 135° e 180° [9]. Logo, pode-se afirmar que, para lâmpadas do tipo não-direcional, como a tubular LED em análise, este ângulo poderá estar compreendido no mínimo entre 0° e 180° , uma vez que, o ângulo de fecho, é ângulo sólido

medido em esterorradiano – (sr), conforme a Figura 16 do item 3.3.1.12, e ainda, dependendo da especificidade da lâmpada. Este critério inclui-se na categoria de benefício, isto é, quanto maior melhor.

O impacto atribuído sob o critério intensidade luminosa é positivo, uma vez que uma fonte luminosa não emite uniformemente em todas as direções o mesmo fluxo luminoso, ou seja, em uma determinada direção o fluxo luminoso é maior do que em outras. O fluxo luminoso em uma determinada direção denomina-se intensidade luminosa. Deste modo, pode-se afirmar que quanto maior o valor medido mais chances o fluxo luminoso terá para se difundir em mais direções. Sendo assim, classificado na categoria de quanto maior melhor.

É imprescindível ressaltar, que as Tabelas Tabela 9-a e Tabela 9-b apresentam os dados para as tensões nominais de 127V e 220V, respectivamente.

3.5.2 SEGUNDO CENÁRIO – PARÂMETROS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (EMC)

A combinação dos critérios em modelo para o segundo cenário envolve as emissões conduzidas e radiadas, e estes ensaios são verificados com base em apenas uma amostra do modelo fornecido pelo fabricante. Entretanto, para esta análise algumas considerações foram realizadas devido a complexidade da análise dos dados medidos, já exemplificados na descrição dos testes.

Como já evidenciado, a partir dos valores medidos nos ensaios pode-se comparar os resultados em (dB μ V) ou (dB μ A) com os limites permissíveis estabelecidos em norma, e ao realizar a subtração destes será obtido o valor da margem em dB, que neste estudo vamos denomina-lo como o delta de frequência (Δf) e, como sabido, este valor determinará a conformidade ou não-conformidade para os testes de EMC, devendo este valor sempre ser positivo. Deste modo, todos os critérios de EMC analisados, neste caso o delta de frequência (Δf) são categorizados como critérios de benefícios, ou seja, quanto maior melhor, sendo assim os impactos atribuídos sob estes critérios serão sempre positivos, uma vez que quanto maior e mais positivo o valor da margem em dB, melhor será a classificação da lâmpada, ou seja, estará conforme para comercialização.

3.5.2.1 CONSIDERAÇÕES - EMISSÕES CONDUZIDAS

A primeira consideração para este modelo a ser rodado é em relação aos dados medidos para a emissão conduzida, uma vez que os resultados são fornecidos de acordo com os detectores de frequência QP e AV. A Tabela 6 mostra a disposição destes dados e detectores utilizados para cada delta de frequência (Δf) obtido. Deste modo, pode-se verificar no gráfico contido na Figura 20 que as curvas traçadas para os detectores QP e AV são indefinidas, logo a faixa de frequência medida poderá ou não atingir determinado detector. Ademais, no tratamento de dados das amostras estudadas foi possível observar que os detectores QP captam maior um maior número de picos de frequência se comparado ao detector AV. Sendo assim, optou-se por neste trabalho tratar os dados sem a distinção do detector, conforme exemplo das Tabelas Tabela 10-a, Tabela 10-b, Tabela 11-a e Tabela 11-b.

Tabela 10-a - Emissão Conduzida -Terminal Neutro-127V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f7$	$\Delta f8$	$\Delta f9$	$\Delta f10$	$\Delta f11$	$\Delta f12$	$\Delta f(\text{Fase})$ Max.
A	6	9	34	29	11	10	10	7	13	8	9	2	34
B	50	11	9	10	9	9	9	15	6	9	6	7	50
C	31	22	4	8	2	7	3	9	6	9	11	9	31
D	56	56	56	56	56	56	56	46	9	29	3	29	56
E	56	56	56	56	56	56	52	46	12	10	31	26	56
F	48	49	27	25	27	25	21	18	18	17	18	19	49
G	16	15	23	28	35	39	24	32	16	10	16	9	39
H	14	18	13	16	15	18	15	16	17	17	16	17	18

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 10-b - Emissão Conduzida -Terminal Neutro-220V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f7$	$\Delta f8$	$\Delta f9$	$\Delta f10$	$\Delta f11$	$\Delta f12$	$\Delta f(\text{Fase})$ Max.
A	11	12	11	11	10	20	14	16	14	14	14	14	20
B	12	22	9	20	15	19	13	17	13	16	12	16	22
C	27	32	8	18	6	17	11	16	10	16	11	12	32
D	29	27	13	14	12	12	12	9	15	12	14	11	29
E	31	29	3	4	14	11	16	12	14	11	12	10	31
F	74	71	21	23	20	20	17	17	15	15	13	16	74
G	21	40	19	24	27	26	17	15	19	15	21	17	40
H	12	19	11	17	7	11	8	12	10	15	11	16	19

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 11-a - Emissão Conduzida-Terminal Fase-127V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f7$	$\Delta f8$	$\Delta f9$	$\Delta f10$	$\Delta f11$	$\Delta f12$	$\Delta f(\text{Fase})$ max
A	7	31	9	6	10	2	7	2	8	2	6	2	31
B	34	12	7	9	3	8	5	8	5	6	8	6	34
C	30	21	1	6	2	8	4	8	10	8	11	8	30
D	56	56	56	56	56	45	9	30	7	27	12	2	56
E	56	56	56	56	56	56	56	49	11	28	5	25	56
F	45	51	20	18	19	18	16	17	15	16	17	17	51
G	66	63	63	15	34	38	22	31	13	10	14	8	66
H	12	17	11	15	14	18	13	17	13	17	14	16	18

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 11-b - Emissão Conduzida-Terminal Fase-220V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f7$	$\Delta f8$	$\Delta f9$	$\Delta f10$	$\Delta f11$	$\Delta f12$	$\Delta f(\text{Fase})$ max
A	11	12	10	11	10	20	16	21	17	15	16	16	21
B	10	20	8	19	14	19	13	16	13	17	16	18	20
C	27	33	8	18	6	16	10	16	9	15	10	13	33
D	29	27	16	17	13	13	14	11	20	15	16	12	29
E	31	28	14	16	13	11	12	9	11	9	11	10	31
F	74	75	20	20	18	19	20	20	24	21	25	21	75
G	21	39	19	23	25	25	17	15	21	17	20	14	39
H	11	18	6	11	6	11	9	13	11	15	14	16	18

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

O tratamento de dados sem a distinção do detector, ou ainda considerando que grande parte dos picos de frequência das emissões conduzidas, ou seja, das medições referentes às tensões de perturbação, são captadas pelo detector QP, tornou-se possível a comparação entre as emissões eletromagnéticas, pois as emissões radiadas são captadas apenas pelo detector QP.

A segunda consideração para este modelo, ainda tratando de emissão conduzida, foi escolher dentre os 12 pontos medidos entre os detectores de frequência QP e AV, neste contexto, entre os critérios Δf disponíveis ($\Delta f1$, $\Delta f2$... $\Delta f12$) o valor máximo do (Δf) obtido dentre as 8 amostras disponíveis para este estudo, conforme apresentado nas Tabelas Tabela 10-a, Tabela 10-b, Tabela 11-a e Tabela 11-b, elegendo assim para cada amostra a melhor medida

de cada fase que possui o maior delta de frequência captado pelo detector, neste caso, (Δf_{\max}) e ainda de modo a evitar a redundância entre os critérios.

A terceira consideração para este modelo também trata-se das emissões conduzidas, e é possível justificar através das Tabelas Tabela 10-a, Tabela 10-b, Tabela 11-a e Tabela 11-b, uma vez que as tensões de perturbação são medidas através dos terminais neutro e fase. Deste modo, optou-se neste trabalho por extrair o mínimo valor entre os critérios $\Delta f(\text{Neutro})_{\max}$ e o $\Delta f(\text{Fase})_{\max}$ eleitos, afim de facilitar o tratamento de dados para rodar o modelo, e novamente eliminar a redundância entre os critérios, além de evitar qualquer tendência que influencie o resultado do estudo. O menor delta de frequência medido nos terminais neutro e fase máximos eleitos ($\Delta f_{\min}(\text{N e F})_{\max}$) está disposto nas Tabelas Tabela 12-a e Tabela 12-b. Para melhor entendimento nomeia-se esta consideração como a função $\text{Minimax}\{\Delta f(\text{N e F})\}$, dita a teoria da decisão.

Tabela 12-a - Emissão Conduzida - $\text{Minimax}\{\Delta f(\text{N e F})\}$ - 127V

$\Delta f(\text{Neutro})_{\max}$	$\Delta f(\text{Fase})_{\max}$	$\text{Minimax}\{\Delta f(\text{N e F})\}$
34	31	31
50	34	34
31	30	30
56	56	56
56	56	56
49	51	49
39	66	39
18	18	18

Tabela 12-b - Emissão Conduzida - $\text{Minimax}\{\Delta f(\text{N e F})\}$ - 220V

$\Delta f(\text{Neutro})_{\max}$	$\Delta f(\text{Fase})_{\max}$	$\text{Minimax}\{\Delta f(\text{N e F})\}$
20	21	20
22	20	20
32	33	32
29	29	29
31	31	31
74	75	74
40	39	39
19	18	18

É imprescindível ressaltar que as Tabelas Tabela 10-a, Tabela 10-b, Tabela 11-a, Tabela 11-b, Tabela 12-a e Tabela 12-b apresentam os dados para as tensões nominais de 127V e 220V.

3.5.2.2 CONSIDERAÇÕES - EMISSÕES RADIADAS

Como já mencionado na descrição dos testes, os ensaios de emissão radiada são divididos por faixas de frequência, onde mede-se as perturbações eletromagnéticas radiadas no intervalo compreendido entre 9kHz à 30MHz, ou seja, emissões provenientes da componente magnética, e mede-se também o intervalo entre 30MHz à 300MHz que são as emissões provenientes da componente elétrica.

A quarta consideração a ser realizada para este modelo é em relação às emissões radiadas, pois nos testes em laboratório são escolhidos 6 (seis) pontos com a referência do detector de frequência QP, conforme os gráficos exemplos contidos nas Figuras Figura 20 e Figura 22. Deste modo, de maneira análoga às emissões conduzidas, optou-se neste trabalho por considerar os 6 pontos medidos com referência ao detector de frequência QP, neste contexto, entre os critérios Δf disponíveis ($\Delta f_1, \Delta f_2 \dots \Delta f_6$), o valor máximo do (Δf) obtido dentre as 8 amostras disponíveis para este estudo, conforme apresentado nas Tabelas Tabela 13-a, Tabela 13-b,

Tabela 14-a,

Tabela 14-b, Tabela 15-a, Tabela 15-b, Tabela 16-a e Tabela 16-b, elegendo assim para cada amostra a melhor medida de cada eixo que possui o maior delta de frequência captado pelo detector, neste caso o (Δf_{max}), e ainda de modo a evitar a redundância entre os critérios.

Tabela 13-a - Emissão Radiada pela Componente Magnética - Eixo X - 127V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f(X)_{max}$
A	59	66	33	38	34	30	66
B	59	68	36	35	28	30	68
C	63	66	32	42	29	29	66
D	68	68	67	78	45	26	78
E	68	65	76	53	43	26	76
F	65	66	30	41	27	28	66
G	56	64	41	29	28	31	64
H	60	64	41	36	30	30	64

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 13-b - Emissão Radiada pela Componente Magnética - Eixo X - 220V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f(X)_{max}$
A	59	66	33	37	29	30	66
B	59	66	35	37	37	27	66
C	63	66	33	39	30	31	66
D	67	71	71	50	45	26	71
E	67	71	71	50	50	45	71
F	64	65	33	39	26	29	65
G	64	39	33	29	32	29	64
H	60	64	33	36	29	28	64

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 14-a - Emissão Radiada pela Componente Magnética - Eixo Y - 127V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f(Y)_{max}$
A	66	67	38	19	20	16	67
B	67	68	39	19	20	16	68

C	66	70	47	47	19	18	70
D	67	70	73	55	50	26	73
E	68	69	74	77	52	26	77
F	69	70	44	42	19	18	70
G	67	36	22	17	20	17	67
H	67	67	39	38	16	19	67

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 14-b - Emissão Radiada pela Componente Magnética - Eixo Y - 220V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f(Y)_{max}$
A	66	67	39	18	20	18	67
B	66	67	39	38	18	19	67
C	68	69	41	31	21	19	69
D	88	88	88	58	49	22	88
E	67	69	71	77	51	26	77
F	70	73	70	44	16	20	73
G	66	41	23	16	23	19	66
H	65	67	39	19	21	19	67

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 15-a - Emissão Radiada pela Componente Magnética - Eixo Z - 127V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f(Z)_{max}$
A	62	65	41	33	18	18	65
B	63	65	39	32	18	17	65
C	64	67	43	39	17	18	67
D	67	69	77	55	50	26	77
E	67	69	72	78	52	26	78
F	67	69	42	45	18	18	69
G	66	39	18	15	19	17	66
H	63	64	41	17	24	21	64

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 15-b - Emissão Radiada pela Componente Magnética - Eixo Z - 220V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	$\Delta f(Z)_{max}$
A	62	64	40	19	22	16	64
B	62	65	41	33	19	18	65
C	65	66	46	40	15	19	66
D	67	72	77	55	50	26	77
E	67	70	74	77	54	26	77
F	68	70	42	42	17	18	70
G	65	37	40	19	18	22	65
H	62	64	40	31	19	19	64

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 16-a - Emissão Radiada pela Componente Elétrica - 127V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	Δf_{max}
A	9	1	1	2	5	10	10
B	13	7	8	8	8	12	13
C	11	9	8	6	7	6	11
D	9	8	10	12	12	13	13
E	11	10	14	13	14	16	16
F	15	23	12	7	7	4	23
G	4	3	1	4	1	1	4
H	5	2	1	2	4	5	5

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

Tabela 16-b - Emissão Radiada pela Componente Elétrica - 220V

Amostra	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f4$	$\Delta f5$	$\Delta f6$	Δf_{max}
A	3	1	1	5	9	12	12
B	7	7	8	10	7	8	10
C	7	7	6	7	6	6	7
D	17	14	13	12	8	13	17
E	15	14	9	8	7	13	15
F	13	22	12	8	9	6	22
G	2	2	2	1	2	3	3
H	12	3	5	1	2	17	17

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos no Software EMC Engineer v4.10.

A quinta consideração a ser realizada neste modelo refere-se às emissões radiadas pelo campo magnético, uma vez que a emissividade é medida em três direções, sendo elas os eixos X, Y e Z. Deste modo, como os resultados dos ensaios são compilados para os 3 (três) planos, conforme apresentados nas Tabelas Tabela 13-a, Tabela 13-b,

Tabela 14-a,

Tabela 14-b, Tabela 15-a e Tabela 15-b optou-se neste trabalho por extrair o mínimo valor entre os critérios $\Delta f(X)_{\max}$, $\Delta f(Y)_{\max}$ e $\Delta f(Z)_{\max}$ eleitos, a fim de facilitar o tratamento de dados para rodar o modelo e novamente eliminar a redundância entre os critérios, além de evitar qualquer tendência que influencie o resultado do estudo. O menor delta de frequência medido dentre as 3 (três) componentes magnéticas máximas eleitas ($\Delta f_{\min}(X,Y,Z)_{\max}$) está disposto nas Tabelas Tabela 17-a e Tabela 17-b. Para melhor entendimento, nomeia-se esta consideração como a função $\text{Minimax}\{\Delta f(X, Y, Z)\}$, dita a teoria da decisão.

Tabela 17-a - Emissão Radiada pela Componente Magnética – $\text{Minimax}\{\Delta f(X, Y, Z)\}$ - 127V

$\Delta f(X)_{\max}$	$\Delta f(Y)_{\max}$	$\Delta f(Z)_{\max}$	$\text{Minimax}\{\Delta f(X, Y, Z)\}$
66	67	65	65
68	68	65	65
66	70	67	66
78	73	77	73
76	77	78	76
66	70	69	66
64	67	66	64

64	67	64	64
----	----	----	----

Tabela 17-b - Emissão Radiada pela Componente Magnética – Minimax $\{\Delta f(X, Y, Z)\}$ - 220V

$\Delta f(X)_{\max}$	$\Delta f(Y)_{\max}$	$\Delta f(Z)_{\max}$	Minimax $\{\Delta f(X, Y, Z)\}$
66	67	64	64
66	67	65	65
66	69	66	66
71	88	77	71
71	77	77	71
65	73	70	65
64	66	65	64
64	67	64	64

O modelo a ser avaliado pelo método TOPSIS para o segundo cenário está diposto nas Tabelas Tabela 18-a e Tabela 18-b, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão que será apresentada na seção de resultados deste estudo.

Tabela 18-a – Segundo Cenário - Parâmetros de Compatibilidade Eletromagnética – EMC – 127V

	Emissão Conduzida Terminal Neutro e Fase	Emissão Radiada Magnética Eixos X, Y e Z	Emissão Radiada Elétrica
Descrição da Amostra	Minimax $\{\Delta f(N \text{ e } F)\}$	Minimax $\{\Delta f(X, Y, Z)\}$	Δf_{\max}
A	31	65	10
B	34	65	13
C	30	66	11
D	56	73	13
E	56	76	16
F	49	66	23
G	39	64	4
H	18	64	5
Peso	0,333	0,333	0,333
Impacto	Positivo ^a	Positivo	Positivo

^aPositivo = Impacto Positivo → critério “Quanto maior Melhor”

Tabela 18-b - Segundo Cenário - Parâmetros de Compatibilidade Eletromagnética – EMC – 220V

	Emissão Conduzida Terminal Neutro e Fase	Emissão Radiada Magnética Eixos X, Y e Z	Emissão Radiada Elétrica
Descrição da Amostra	Minimax { $\Delta f(N e F)$ }	Minimax { $\Delta f(X, Y, Z)$ }	Δf_{max}
A	20	64	12
B	20	65	10
C	32	66	7
D	29	71	17
E	31	71	15
F	74	65	22
G	39	64	3
H	18	64	17
Peso	0,333	0,333	0,333
Impacto	Positivo ^a	Positivo	Positivo

^aPositivo = Impacto Positivo → critério “Quanto maior Melhor”

É imprescindível ressaltar que nas Tabelas Tabela 13-a, Tabela 13-b,

Tabela 14-a,

Tabela 14-b, Tabela 15-a, Tabela 15-b, Tabela 16-a, Tabela 16-b, Tabela 17-a, Tabela 17-b,
Tabela 18-a e Tabela 18-b os dados são para as tensões nominais de 127V e 220V.

3.5.3 TERCEIRO CENÁRIO – COMBINAÇÃO DOS PARÂMETROS LUMINO-ENERGÉTICOS E COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA – EMC

O modelo a ser rodado no TOPSIS para o terceiro cenário está disposto nas Tabelas **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-a** e **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-b**, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão que será apresentada na seção de resultados deste estudo. Importante ressaltar que o terceiro cenário contempla o primeiro cenário com a inserção dos dados do segundo cenário nesta análise.

Tabela 19-a – Terceiro Cenário - Parâmetros Lumino-Energéticos + Parâmetros de Compatibilidade Eletromagnética – EMC – 127V

Eficiência Energética			Qualidade da Energia			Qualidade Luminotécnica				Qualidade EMC			
Descrição da Amostra	Efic. (lm/w)	Mnt. do Fluxo Lum. (%)	FP	Cor. (mA)	THD (%)	IRC	R9	TCC (K)	Âng. de fecho	Intens. Lum. de pico (cd)	Emis. Cond. Terminal Neut. e Fase Minimax { $\Delta f(N e F)$ }	Emis. Rad. Mag. Eixos X, Y e Z Minimax { $\Delta f(X, Y, Z)$ }	Emis. Rad. Elétr. Δf Max.
A	103,1	96	0,96	147,6	25	82,9	10	6961,4	181,9	264,6	31	65	10
B	105,2	96,3	0,99	142,7	8,4	85,4	22	6933,3	128,9	423,4	34	65	13
C	121,9	96,4	0,98	145,8	10,6	85,2	19	6597,1	147,6	409,5	30	66	11
D	116,8	95,9	0,98	145,9	10,1	84,2	14	6594	182,5	337,6	56	73	13
E	110,6	96,8	0,98	144,7	9,8	85,1	20	6753,5	184,2	296,6	56	76	16
F	105,2	97,1	0,99	137,4	7,6	85,1	16	6822,8	175	305,4	49	66	23
G	113,2	97,5	0,98	145,7	10,9	84,9	27	6499,6	245,7	289,2	39	64	4
H	102,5	96	0,99	143,6	8,2	85	14	6366,7	125,8	543,4	18	64	5
Peso	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077
Impacto	Pos. ^a	Pos.	Pos.	Neg. ^b	Neg.	Pos.	Pos.	Neg.	Neg.	Pos.	Pos.	Pos.	Pos.

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos nos Softwares HaasSuite, GoSoft 2.0 e EMC Engineer v4.10.

^aPos = Impacto Positivo → critério “Quanto maior Melhor”

^bNeg = Impacto Negativo → critério “Quanto menor Melhor”

Terceiro Cenário – Combinação dos Parâmetros Lumino-energéticos e Compatibilidade Eletromagnética – EMC

O modelo a ser rodado no TOPSIS para o terceiro cenário está disposto nas Tabelas **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-a** e **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-b**, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão que será apresentada na seção de resultados deste estudo. Importante ressaltar que o terceiro cenário contempla o primeiro cenário com a inserção dos dados do segundo cenário nesta análise.

Tabela 19-b – Terceiro Cenário- Parâmetros Lumino-Energéticos + Parâmetros de Compatibilidade Eletromagnética – EMC – 220V

Eficiência Energética			Qualidade da Energia			Qualidade Luminotécnica				Qualidade EMC			
Descrição da Amostra	Efic. (lm/w)	Mnt. do Fluxo Lum. (%)	FP	Cor. (mA)	THD (%)	IRC	R9	TCC (K)	Âng. de fecho	Intens. Lum. de pico (cd)	Emis. Cond. Terminal Neut. e Fase Minimax { $\Delta f(N e F)$ }	Emis. Rad. Mag. Eixos X, Y e Z Minimax { $\Delta f(X, Y, Z)$ }	Emis. Rad. Elétr. Δf Max.
A	102,4	96,2	0,92	91,6	18,5	82,8	10	6951,6	181,9	264,6	20	64	12
B	104,37	96,6	0,95	85,7	11,7	85,4	22	6926,6	128,9	423,4	20	65	10
C	125,2	96,4	0,9	87,7	15,3	85,1	19	6586,3	147,6	409,5	32	66	7
D	118,6	95,9	0,95	84,1	4,4	84,1	13	6577	182,5	337,6	29	71	17
E	112,5	96	0,96	83,5	4,3	85,1	19	6739,4	184,2	296,6	31	71	15
F	108,5	96,7	0,94	85,7	15,8	85,1	16	6815	175	305,4	74	65	22
G	115,6	96,9	0,93	87,8	15,4	84,9	27	6492,7	245,7	289,2	39	64	3
H	101,9	96,2	0,92	89,3	15,4	84,9	14	6356	125,8	543,4	18	64	17
Peso	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077
Impacto	Pos. ^a	Pos.	Pos.	Neg. ^b	Neg.	Pos.	Pos.	Neg.	Neg.	Pos.	Pos.	Pos.	Pos.

Fonte: Adaptada do relatório de ensaio do LABLUX, proveniente dos dados medidos nos Softwares HaasSuite, GoSoft 2.0 e EMC Engineer v4.10.

^aPos = Impacto Positivo → critério “Quanto maior Melhor”

^bNeg = Impacto Negativo → critério “Quanto menor Melhor”

A Tabela 20 explicita cada critério utilizado direta ou indiretamente nesta avaliação, assim com o impacto atribuído para cada um destes e a categoria a qual faz parte, ou seja, benefício ou custo, que torna o valor do critério quanto maior melhor e quanto menor melhor, respectivamente.

Tabela 20 - Tabela resumo dos critérios selecionados e consolidados para a avaliação multicritério

	Critérios	Impacto	Categoria	Indicador
I	Potência (W);	Negativo	Menor Melhor	↓
II	Fluxo Luminoso (lm);	Positivo	Maior Melhor	↑
III	Eficiência Luminosa (lm/W);	Positivo	Maior Melhor	↑
IV	Manutenção do fluxo luminoso (%);	Positivo	Maior Melhor	↑
V	Corrente (mA);	Negativo	Menor Melhor	↓
VI	Fator de Potência Nominal;	Positivo	Maior Melhor	↑
VII	Distorção Harmônica – THD (%);	Negativo	Menor Melhor	↓
VIII	Índice de Reprodução de Cor - IRC ou Ra;	Positivo	Maior Melhor	↑
IX	Índice de Reprodução de Cor - R9;	Positivo	Maior Melhor	↑
X	Temperatura de Cor Correlatada - TCC(K);	Negativo	Menor Melhor	↓
XI	Ângulo de Facho (°);	Negativo	Menor Melhor	↓
XII	Intensidade Luminosa de Pico (cd);	Positivo	Maior Melhor	↑
XIII	Emissões Conduzidas (dB μ V);	Positivo	Maior Melhor	↑
XIV	Emissões Radiadas Magnéticas (dB μ A);	Positivo	Maior Melhor	↑
XV	Emissões Radiadas Elétricas (dB μ V);	Positivo	Maior Melhor	↑

As Tabelas Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23 são as tabelas-resumo do esquema metodológico apresentado neste capítulo. Estas tabelas evidenciam os critérios selecionados em cada cenário estudado de forma simplificada, bem como a categoria de cada critério.

- **Primeiro Cenário:** Avalia os parâmetros lumino-energéticos do LED.

Tabela 21 – Primeiro Cenário - Tabela Resumo

	Critérios	Impacto	Categoria	Indicador
III	Eficiência Luminosa (lm/W);	Positivo	Maior Melhor	↑
IV	Manutenção do fluxo luminoso (%);	Positivo	Maior Melhor	↑
V	Corrente (mA);	Negativo	Menor Melhor	↓
VI	Fator de Potência Nominal;	Positivo	Maior Melhor	↑
VII	Distorção Harmônica - THD (%);	Negativo	Menor Melhor	↓
VIII	Índice de Reprodução de Cor - IRC ou Ra;	Positivo	Maior Melhor	↑
IX	Índice de Reprodução de Cor - R9;	Positivo	Maior Melhor	↑
X	Temperatura de Cor Correlatada - TCC(K);	Negativo	Menor Melhor	↓
XI	Ângulo de Facho (°);	Negativo	Menor Melhor	↓
XII	Intensidade Luminosa de Pico (cd);	Positivo	Maior Melhor	↑

- **Segundo Cenário:** Avalia os parâmetros de compatibilidade eletromagnética (EMC) do LED.

Tabela 22 – Segundo Cenário - Tabela Resumo

	Critérios	Impacto	Categoria	Indicador
XIII	Emissões Conduzidas (dB μ V);	Positivo	Maior Melhor	↑
XIV	Emissões Radiadas Magnéticas (dB μ A);	Positivo	Maior Melhor	↑
XV	Emissões Radiadas Elétricas (dB μ V);	Positivo	Maior Melhor	↑

- **Terceiro Cenário:** Avalia os parâmetros lumino-energéticos com a inserção dos parâmetros de compatibilidade eletromagnética (EMC) na mesma análise para o LED.

Tabela 23 – Terceiro Cenário - Tabela Resumo

	Critérios	Impacto	Categoria	Indicador
III	Eficiência Luminosa (lm/W);	Positivo	Maior Melhor	↑
IV	Manutenção do fluxo luminoso (%);	Positivo	Maior Melhor	↑
V	Corrente (mA);	Negativo	Menor Melhor	↓
VI	Fator de Potência Nominal;	Positivo	Maior Melhor	↑
VII	Distorção Harmônica – THD (%);	Negativo	Menor Melhor	↓
VIII	Índice de Reprodução de Cor - IRC ou Ra;	Positivo	Maior Melhor	↑
IX	Índice de Reprodução de Cor - R9;	Positivo	Maior Melhor	↑
X	Temperatura de Cor Correlatada - TCC(K);	Negativo	Menor Melhor	↓
XI	Ângulo de Facho (°);	Negativo	Menor Melhor	↓
XII	Intensidade Luminosa de Pico (cd);	Positivo	Maior Melhor	↑
XIII	Emissões Conduzidas (dB μ V);	Positivo	Maior Melhor	↑
XIV	Emissões Radiadas Magnéticas (dB μ A);	Positivo	Maior Melhor	↑
XV	Emissões Radiadas Elétricas (dB μ V);	Positivo	Maior Melhor	↑

À vista do exposto, é importante ressaltar que os critérios selecionados para simulação dos cenários propostos consideraram as medições que são exigidas pelas portarias e normas vigentes, onde estas foram satisfatórias para a eleição dos critérios estudados. Os critérios eleitos para cada cenário tiveram a análise para a família coerente de critérios, onde a exaustividade, não-redundância e coesão foram avaliadas.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo dedica-se a apresentar os resultados das análises realizadas com as lâmpadas LED com base na teoria descrita para a ferramenta de multicritério TOPSIS. O ranqueamento dos critérios que foi proposto na metodologia deste estudo será fornecido nesta etapa a partir dos dados medidos e os resultados encontrados quando as lâmpadas LEDs são submetidas a testes em laboratório e comparadas aos parâmetros mínimos exigidos nas portarias e normas regulamentadoras vigentes.

Como já explicado na Metodologia, neste capítulo serão apresentados ranqueamentos para os 3 (três) cenários propostos, sendo o primeiro cenário dedicado aos parâmetros luminoenergéticos, o segundo aos parâmetros de compatibilidade eletromagnética (EMC) e o terceiro será aplicado à união dos 2 (dois) cenários anteriores, de modo a comparar o ranqueamento para o cenário luminoenergético quando adicionado os parâmetros de EMC nesta análise. Além disso, o capítulo também irá discutir as diferenças encontradas nos resultados de cada cenário proposto, de forma a visualizar de uma maneira geral e subsidiar conclusões, e assim sugerir possíveis novos aspectos qualitativos que possam ser considerados nas regulamentações vigentes.

Os resultados consolidados neste capítulo foram elaborados por meio das comparações entre os dados obtidos nos ensaios realizados pelo LABLUX e os valores requisitados pelas portarias nº 144, de 13 de Março de 2015 [8], e portaria nº 389, de 25 de Agosto de 2014 [9]. Além de contar com os limites e métodos de medição para a verificação da influência EMI pela tecnologia LED, que são regidos pela ABNT NBR IEC/CISPR 15:2014 [10].

Para a avaliação e ranqueamento de todos os cenários propostos, o método de análise multicritério TOPSIS foi utilizado. Conforme já detalhado no item 3.2.1 deste estudo, o método TOPSIS foi dividido em oito etapas (Tabela 24), cuja aplicação apresentar-se-á nesta sessão de resultados.

Tabela 24 - Etapas TOPSIS - Tabela Resumo

Etapa	Objetivo
1°	Definir as alternativas (Ai) e critérios (Xi) a serem avaliados
2°	Construção da Matriz de Decisão
3°	Normalização dos dados contidos na Matriz de Decisão
4°	Ponderação dos Dados - Atribuição de Pesos à Matriz de Decisão Normalizada
5°	Determinação da solução ideal (PIS) e ideal-negativa (NIS)
6°	Cálculos das distâncias D+ e D- para cada alternativa – Distâncias Euclidianas
7°	Cálculo da similaridade para a posição ideal positiva – Coeficientes C para cada alternativa
8°	Ordenação das Alternativas

4.1 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO TOPSIS: AVALIAÇÃO DO PRIMEIRO CENÁRIO – PARÂMETROS LUMINO-ENERGÉTICOS

ETAPA 1: Definir as alternativas (Ai) e critérios (Xi) - Primeiro Cenário

A avaliação do primeiro cenário irá investigar dados resultantes de 3 (três) grupos de critérios, sendo estes, eficiência energética, qualidade de energia e qualidade luminotécnica. Os critérios e alternativas a serem avaliados já foram definidos conforme disposição nas Tabelas Tabela 9 e Tabela 10, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão e apresentada no capítulo anterior no item 3.5.1.

Estes grupos contemplam os critérios:

X₁: eficiência luminosa da lâmpada em (lm/W);

X₂: manutenção do fluxo luminoso dado em (%);

X₃: fator de potência,

X₄: corrente dado em (mA);

X₅: THD dado em (%),

X₆: IRC;

X₇: R9;

X₈: TCC dado em (K);

X₉: ângulo de fecho dado em (°) e;

X₁₀: intensidade luminosa de pico dado em (cd).

A avaliação para ranqueamento destes critérios leva em conta os requisitos máximos e mínimos estipulados nas normas e portarias vigentes. Entretanto, devido à faixa de tensão de entrada, as medições foram realizadas nas tensões nominais de 127V e 220V.

ETAPA 2, 3 e 4:

Admitindo-se que os critérios e alternativas a serem avaliados já foram definidos na metodologia deste trabalho, a matriz decisão será construída conforme utilização da Equação (1) e conseqüentemente, será realizada a normalização e ponderação desta através da Equação (4). A matriz decisão e a matriz decisão normalizada ponderada referentes as Tabelas Tabela 9 e Tabela 10 para consolidação do ranqueamento neste cenário, são apresentadas pelas matrizes **D** e **V** que foram definidas nas etapas 2, 3 e 4 do método TOPSIS.

• ETAPA 2: Matriz Decisão - Primeiro Cenário

→ 127V

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
A1	103,1	96,0	0,96	147,6	25	82,9	10	6961,4	181,9	264,6
A2	105,2	96,3	0,99	142,7	8,4	85,4	22	6933,3	128,9	423,4
A3	121,9	96,4	0,98	145,8	10,6	85,2	19	6597,1	147,6	409,5
A4	116,8	95,9	0,98	145,9	10,1	84,2	14	6594,0	182,5	337,6
A5	110,6	96,8	0,98	144,7	9,8	85,1	20	6753,5	184,2	296,6
A6	105,2	97,1	0,99	137,4	7,6	85,1	16	6822,8	175,0	305,4
A7	113,2	97,5	0,98	145,7	10,9	84,9	27	6499,6	245,7	289,2
A8	102,5	96,0	0,99	143,6	8,2	85,0	14	6366,7	125,8	543,4

→ 220V

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
A1	102,4	96,2	0,92	91,6	18,5	82,8	10	6951,6	181,9	264,6
A2	104,37	96,6	0,95	85,7	11,7	85,4	22	6926,6	128,9	423,4
A3	125,2	96,4	0,90	87,7	15,3	85,1	19	6586,3	147,6	409,5
A4	118,6	95,9	0,95	84,1	4,4	84,1	13	6577,0	182,5	337,6
A5	112,5	96,0	0,96	83,5	4,3	85,1	19	6739,4	184,2	296,6
A6	108,5	96,7	0,94	85,7	15,8	85,1	16	6815,0	175,0	305,4
A7	115,6	96,9	0,93	87,8	15,4	84,9	27	6492,7	245,7	289,2
A8	101,9	96,2	0,92	89,3	15,4	84,9	14	6356,0	125,8	543,4

- **ETAPA 3 e 4: Matriz Decisão Normalizada e Ponderada - Primeiro Cenário**

→ 127V

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
A1	0,0331	0,0352	0,0346	0,0362	0,0707	0,0346	0,0192	0,0368	0,0367	0,0253
A2	0,0338	0,0353	0,0357	0,0350	0,0238	0,0356	0,0422	0,0366	0,0260	0,0405
A3	0,0392	0,0353	0,0353	0,0357	0,0300	0,0356	0,0364	0,0348	0,0298	0,0392
A4	0,0375	0,0351	0,0353	0,0358	0,0286	0,0351	0,0268	0,0348	0,0368	0,0323
A5	0,0355	0,0355	0,0353	0,0355	0,0277	0,0355	0,0383	0,0357	0,0372	0,0284
A6	0,0338	0,0356	0,0357	0,0337	0,0215	0,0355	0,0307	0,0360	0,0353	0,0292
A7	0,0364	0,0357	0,0353	0,0357	0,0308	0,0354	0,0518	0,0343	0,0496	0,0277
A8	0,0329	0,0352	0,0357	0,0352	0,0232	0,0355	0,0268	0,0336	0,0254	0,0520

→ 220V

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
A1	0,0325	0,0353	0,0348	0,0372	0,0482	0,0346	0,0194	0,0368	0,0367	0,0253
A2	0,0331	0,0354	0,0360	0,0348	0,0305	0,0357	0,0427	0,0366	0,0260	0,0405
A3	0,0397	0,0354	0,0341	0,0357	0,0398	0,0355	0,0369	0,0348	0,0298	0,0392
A4	0,0376	0,0352	0,0360	0,0342	0,0115	0,0351	0,0252	0,0348	0,0368	0,0323
A5	0,0357	0,0352	0,0363	0,0339	0,0112	0,0355	0,0369	0,0357	0,0372	0,0284
A6	0,0344	0,0355	0,0356	0,0348	0,0411	0,0355	0,0310	0,0361	0,0353	0,0292
A7	0,0367	0,0356	0,0352	0,0357	0,0401	0,0354	0,0524	0,0343	0,0496	0,0277
A8	0,0323	0,0353	0,0348	0,0363	0,0401	0,0354	0,0272	0,0336	0,0254	0,0520

ETAPA 5: Cálculo da solução ideal positiva (PIS) e da solução ideal negativa (NIS) - Primeiro Cenário

A partir da definição da matriz decisão normalizada e ponderada é possível realizar o cálculo da solução ideal positiva (PIS) e da solução ideal negativa (NIS), que são representadas pelos vetores (S^+) e (S^-), respectivamente, onde são selecionados os maiores e menores valores de cada critério de cada coluna da matriz, referentes a etapa 5 do método TOPSIS. Esses vetores são calculados a partir da utilização das Equações (8) e (9). Os vetores (S^+) e (S^-), foram obtidos a partir da inspeção da matriz V.

- **Solução Ideal (PIS)**

→ 127V

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
S^+	[0,0392	0,0357	0,0357	0,0337	0,0215	0,0356	0,0518	0,0336	0,0496	0,0520]

→ 220V

$$S^+ = \begin{matrix} & \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} & \mathbf{X4} & \mathbf{X5} & \mathbf{X6} & \mathbf{X7} & \mathbf{X8} & \mathbf{X9} & \mathbf{X10} \\ [0,0397 & 0,0356 & 0,0363 & 0,0339 & 0,0112 & 0,0357 & 0,0524 & 0,0336 & 0,0496 & 0,0520] \end{matrix}$$

- Solução Ideal-Negativa (NIS)

→ 127V

$$S^- = \begin{matrix} & \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} & \mathbf{X4} & \mathbf{X5} & \mathbf{X6} & \mathbf{X7} & \mathbf{X8} & \mathbf{X9} & \mathbf{X10} \\ [0,0329 & 0,0351 & 0,0346 & 0,0362 & 0,0707 & 0,0346 & 0,0192 & 0,0368 & 0,0254 & 0,0253] \end{matrix}$$

→ 220V

$$S^- = \begin{matrix} & \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} & \mathbf{X4} & \mathbf{X5} & \mathbf{X6} & \mathbf{X7} & \mathbf{X8} & \mathbf{X9} & \mathbf{X10} \\ [0,0323 & 0,0352 & 0,0341 & 0,0372 & 0,0482 & 0,0346 & 0,0194 & 0,0368 & 0,0254 & 0,0253] \end{matrix}$$

ETAPA 6: Cálculo das Distâncias Euclidianas - Primeiro Cenário

Após determinação dos vetores (S^-) e (S^+), ou seja, a definição das soluções ideal (PIS) e anti-ideal (NIS), é possível calcular as distâncias euclidianas. Como já mencionado no item 3.2.1, na etapa 6 do método TOPSIS, onde para cada alternativa é calculada uma medida de separação, sendo uma em relação a solução ideal (D_i^+) e outra em relação a solução anti-ideal (D_i^-), conforme definido nas Equações (10) e (11) desta etapa. As distâncias (D_i^+) e (D_i^-) estão apresentadas na matriz D_i .

→ 127V

$$D_i = \begin{matrix} & & D_i^+ & D_i^- \\ \mathbf{A1} & [& 0,0665 & 0,0113 \\ \mathbf{A2} & & 0,0287 & 0,0545 \\ \mathbf{A3} & & 0,0295 & 0,0470 \\ \mathbf{A4} & & 0,0351 & 0,0452 \\ \mathbf{A5} & & 0,0309 & 0,0487 \\ \mathbf{A6} & & 0,0347 & 0,0518 \\ \mathbf{A7} & & 0,0263 & 0,0571 \\ \mathbf{A8} & & 0,0354 & 0,0552 \end{matrix}$$

→ 220V

$$D_i = \begin{matrix} & D_i^+ & D_i^- \\ \mathbf{A1} & [0,0584 & 0,0113] \\ \mathbf{A2} & [0,0347 & 0,0331] \\ \mathbf{A3} & [0,0403 & 0,0255] \\ \mathbf{A4} & [0,0360 & 0,0401] \\ \mathbf{A5} & [0,0312 & 0,0430] \\ \mathbf{A6} & [0,0459 & 0,0177] \\ \mathbf{A7} & [0,0380 & 0,0421] \\ \mathbf{A8} & [0,0460 & 0,0292] \end{matrix}$$

ETAPA 7 e 8: Cálculo dos Coeficientes e Ordenação das Alternativas - Primeiro Cenário

Após as distâncias euclidianas serem calculadas, é então possível realizar cálculo da similaridade para a posição ideal positiva, isto é, os coeficientes C para cada alternativa. Este cálculo é realizado na etapa 7 do método TOPSIS, e é neste momento que é calculada a proximidade relativa entre as alternativas e a solução ideal positiva, chegando ao resultado da aproximação à alternativa ideal (A_i). Essa proximidade relativa é calculada através da equação (12).

Deste modo, pode-se afirmar que quanto mais perto de 1 (um) for o valor do coeficiente C, mais perto da solução ideal estará a alternativa relacionada a este coeficiente, e mais afastada da solução anti-ideal, uma vez que, o valor de C_i deve estar compreendido entre 0(zero) e 1(um). Analogamente, quanto mais perto de zero o valor de C_i , mais próximo da solução anti-ideal estará a alternativa relacionada a este coeficiente.

A partir dos valores dos coeficientes C definidos será possível alcançar a última etapa do método TOPSIS, neste caso, a etapa 8. Esta etapa contempla a ordenação dos valores relativos às alternativas, de modo a construir o ranqueamento das alternativas que serão avaliadas.

A matriz C_i relaciona os valores dos coeficientes C de cada alternativa analisada com a ordenação destes para a avaliação do ranqueamento do primeiro cenário.

→ 127V

		Ci	Ordenação
$C_i =$	A1	0,1456	8
	A2	0,6550	2
	A3	0,6147	3
	A4	0,5629	7
	A5	0,6123	4
	A6	0,5988	6
	A7	0,6847	1
	A8	0,6093	5

→ 220V

		Ci	Ordenação
$C_i =$	A1	0,1627	8
	A2	0,4882	4
	A3	0,3869	6
	A4	0,5269	2
	A5	0,5795	1
	A6	0,2780	7
	A7	0,5259	3
	A8	0,3877	5

Os resultados do ranqueamento para o primeiro cenário estão apresentados nas Tabelas Tabela 25-a e Tabela 25-b referentes às tensões nominais 127V e 220V respectivamente.

Tabela 25-a – Primeiro Cenário - Parâmetros Lumino-energéticos - Resultado Ranqueamento - 127V

Alternativas	Descrição da Amostra	Ranqueamento
A1	A	8
A2	B	2
A3	C	3
A4	D	7
A5	E	4
A6	F	6
A7	G	1
A8	H	5

Tabela 25-b - Primeiro Cenário - Parâmetros Lumino-energéticos - Resultado Ranqueamento - 220V

Alternativas	Descrição da Amostra	Ranqueamento
A1	A	8
A2	B	4
A3	C	6
A4	D	2
A5	E	1
A6	F	7
A7	G	3
A8	H	5

No primeiro cenário, onde são considerados apenas os parâmetros lumino-energéticos, as lâmpadas referentes as amostras G e E apresentaram o melhor resultado segundo o método utilizado, em 127V e 220V respectivamente.

Pode-se observar que quando o tratamento de dados ocorre em 220V, o ranqueamento difere em 2 (duas) posições, pois quando se analisa também o fator energético essa resposta é esperada, visto que os testes realizados em laboratório utilizam equipamentos que trabalham com uma ampla faixa de tensões, onde estas podem variar entre 80-250V dependendo do modelo da lâmpada. Soma-se a isso, os valores do critério corrente que são considerados, divergem moderadamente quando avaliados em 220V.

4.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO TOPSIS: AVALIAÇÃO DO SEGUNDO CENÁRIO – PARÂMETROS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (EMC)

ETAPA 1: Definir as alternativas (Ai) e critérios (Xi) - Segundo Cenário

A avaliação do segundo cenário irá investigar dados resultantes das emissões eletromagnéticas conduzidas e radiadas provenientes da lâmpada LED, podendo esta última ser radiada pelo campo magnético nas direções X, Y e Z, ou radiada pelo campo elétrico. Os critérios e alternativas a serem avaliados já foram definidos conforme disposição nas Tabelas Tabela 18-a e Tabela 18-b, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão e apresentada no capítulo anterior no item 3.5.2.

Entretanto, para esta análise algumas considerações foram realizadas devido a complexidade da análise dos dados medidos e já justificadas na descrição da metodologia.

Este cenário contempla os critérios que são designados como delta de frequência (Δf) dados em (dB), e como sabido, este valor determinará a conformidade ou não conformidade para os testes de EMC, sendo estes:

- X_1 : emissão conduzida: o menor delta de frequência extraído entre os terminais neutro e fase, neste caso entre os valores máximos já admitidos para esta análise, como segue a representação, **minimax** $\{\Delta f(N \text{ e } F)\}$;
- X_2 : emissão radiada pelo campo magnético: o menor delta de frequência extraído para as 3 (três) componentes (X, Y, Z), neste caso, entre os valores máximos já admitidos para esta análise, como segue a representação, **minimax** $\{\Delta f(X, Y, Z)\}$;
- X_3 : emissão radiada pelo campo elétrico: o delta de frequência máximo medido, já admitido para esta análise, como segue a representação, **Δf_{max}** .

Os critérios acima mencionados estarão dispostos na matriz decisão nesta ordem, compondo a avaliação de 8 (oito) alternativas sob um conjunto de 3 (três) critérios.

A avaliação para ranqueamento destes critérios leva em conta os requisitos máximos e mínimos estipulados nas normas e portarias vigentes. Entretanto, devido à faixa de tensão de entrada, as medições foram realizadas nas tensões nominais de 127V e 220V.

ETAPA 2, 3 e 4:

Admitindo-se que os critérios e alternativas a serem avaliados já foram definidos na metodologia deste trabalho, a matriz decisão será construída conforme utilização da Equação (1) e conseqüentemente, será realizada a normalização e ponderação desta através da Equação (4). A matriz decisão e a matriz decisão normalizada ponderada referentes às Tabelas Tabela 18-a e Tabela 18-b para consolidação do ranqueamento neste cenário são apresentadas pelas matrizes D e V que foram definidas nas etapas 2, 3 e 4 do método TOPSIS.

- **ETAPA 2: Matriz Decisão - Segundo Cenário**

→ 127V

$$D = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}$$

→ 220V

$$D = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}$$

- **ETAPA 3 e 4: Matriz Decisão Normalizada e Ponderada - Segundo Cenário**

→ 127V

$$V = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}$$

→ 220V

$$V = \begin{matrix} & \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} \\ \mathbf{A1} & [0,0637 & 0,1137 & 0,1003] \\ \mathbf{A2} & [0,0637 & 0,1155 & 0,0836] \\ \mathbf{A3} & [0,1019 & 0,1173 & 0,0585] \\ \mathbf{A4} & [0,0924 & 0,1262 & 0,1422] \\ \mathbf{A5} & [0,0988 & 0,1262 & 0,1254] \\ \mathbf{A6} & [0,2358 & 0,1155 & 0,1840] \\ \mathbf{A7} & [0,1242 & 0,1137 & 0,0251] \\ \mathbf{A8} & [0,0573 & 0,1137 & 0,1422] \end{matrix}$$

ETAPA 5: Cálculo da solução ideal positiva (PIS) e da solução ideal negativa (NIS) - Segundo Cenário

A partir da definição da matriz decisão normalizada e ponderada, é possível realizar o cálculo da solução ideal positiva (PIS) e da solução ideal negativa (NIS), que são representadas pelos vetores (S^+) e (S^-), respectivamente, onde são selecionados os maiores e menores valores de cada critério de cada coluna da matriz, referentes à etapa 5 do método TOPSIS. Esses vetores são calculados a partir da utilização das equações (8) e (9). Os vetores (S^+) e (S^-) foram obtidos a partir da inspeção da matriz V.

- Solução Ideal (PIS)

→ 127V

$$S^+ = \begin{matrix} \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} \\ [0,1604 & 0,1327 & 0,2060] \end{matrix}$$

→ 220V

$$S^+ = \begin{matrix} \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} \\ [0,2358 & 0,1262 & 0,1840] \end{matrix}$$

- Solução ideal-negativa (NIS)

→ 127V

$$S^- = \begin{matrix} \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} \\ [0,0516 & 0,1117 & 0,0358] \end{matrix}$$

→ 220V

$$S^- = \begin{matrix} & \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} \\ & [0,0573 & 0,1137 & 0,0251] \end{matrix}$$

ETAPA 6: Cálculo das distâncias Euclidianas - Segundo Cenário

Após determinação dos vetores (S^+) e (S^-), ou seja, a definição das soluções ideal (PIS) e anti-ideal (NIS), é possível calcular as distâncias euclidianas. Como já mencionado no item 3.2.1, na etapa 6 do método TOPSIS, onde para cada alternativa é calculada uma medida de separação, sendo uma em relação a solução ideal (D_i^+) e outra em relação a solução anti-ideal (D_i^-), conforme definido nas Equações (10) e (11) desta etapa. As distâncias (D_i^+) e (D_i^-) estão apresentadas na matriz D_i .

→ 127V

$$D_i = \begin{matrix} & & D_i^+ & D_i^- \\ \mathbf{A1} & [& 0,1380 & 0,0654 \\ \mathbf{A2} & [& 0,1112 & 0,0928 \\ \mathbf{A3} & [& 0,1319 & 0,0716 \\ \mathbf{A4} & [& 0,0897 & 0,1364 \\ \mathbf{A5} & [& 0,0627 & 0,1544 \\ \mathbf{A6} & [& 0,0266 & 0,1920 \\ \mathbf{A7} & [& 0,1782 & 0,0602 \\ \mathbf{A8} & [& 0,1957 & 0,0090 \end{matrix}$$

→ 220V

$$D_i = \begin{matrix} & & D_i^+ & D_i^- \\ \mathbf{A1} & [& 0,1917 & 0,0755 \\ \mathbf{A2} & [& 0,1994 & 0,0589 \\ \mathbf{A3} & [& 0,1836 & 0,0559 \\ \mathbf{A4} & [& 0,1493 & 0,1228 \\ \mathbf{A5} & [& 0,1490 & 0,1093 \\ \mathbf{A6} & [& 0,0107 & 0,2389 \\ \mathbf{A7} & [& 0,1945 & 0,0669 \\ \mathbf{A8} & [& 0,1837 & 0,1171 \end{matrix}$$

ETAPA 7 e 8: Cálculo dos Coeficientes e Ordenação das Alternativas

Quando as distâncias euclidianas são calculadas, é então possível realizar cálculo da similaridade para a posição ideal positiva, isto é, os coeficientes C para cada alternativa. Este

cálculo é realizado na etapa 7 do método TOPSIS, e é neste momento que é calculada a proximidade relativa entre as alternativas e a solução ideal positiva, chegando ao resultado da aproximação à alternativa ideal (A_i). Essa proximidade relativa é calculada através da equação (12).

Deste modo, pode-se afirmar que quanto mais perto de 1 (um) for o valor do coeficiente C , mais perto da solução ideal estará a alternativa relacionada a este coeficiente, e mais afastada da solução anti-ideal, uma vez que o valor de C_i deve estar compreendido entre 0 (zero) e 1 (um). Analogamente, quanto mais perto de zero o valor de C_i , mais próximo da solução anti-ideal estará a alternativa relacionada a este coeficiente.

A partir dos valores dos coeficientes C definidos, será possível alcançar a última etapa do método TOPSIS, neste caso, a etapa 8. Esta etapa contempla a ordenação dos valores relativos às alternativas, de modo a construir o ranqueamento das alternativas que serão avaliadas.

A matriz C_i relaciona os valores dos coeficientes C de cada alternativa analisada com a ordenação destes para a avaliação do raqueamento do segundo cenário.

→ 127V

	Ci	Ordenação
A1	0,3215	6
A2	0,4548	4
A3	0,3518	5
A4	0,6032	3
A5	0,7112	2
A6	0,8784	1
A7	0,2524	7
A8	0,0438	8

→ 220V

	Ci	Ordenação
A1	0,2826	5
A2	0,2280	8
A3	0,2333	7
A4	0,4513	2
A5	0,4231	3
A6	0,9573	1
A7	0,2529	6
A8	0,3893	4

Os resultados do ranqueamento para o segundo cenário estão apresentados nas Tabelas Tabela 26-a e Tabela 26-b referentes as tensões nominais 127V e 220V respectivamente.

Tabela 26-a - Segundo Cenário - Parâmetros EMC – Resultado Ranqueamento – 127V

Alternativas	Descrição da Amostra	Ranking
A1	A	6
A2	B	4
A3	C	5
A4	D	3
A5	E	2
A6	F	1
A7	G	7
A8	H	8

Tabela 26-b - Segundo Cenário - Parâmetros EMC – Resultado Ranqueamento – 220V

Alternativas	Descrição da Amostra	Ranking
A1	A	5
A2	B	8
A3	C	7
A4	D	2
A5	E	3
A6	F	1
A7	G	6
A8	H	4

No segundo cenário, onde são considerados apenas os parâmetros de compatibilidade eletromagnética (EMC), a lâmpada referente a amostra F apresentou o melhor resultado segundo o método utilizado em ambas as tensões nominais de 127V e 220V.

Este cenário elucidou a comparação entre as emissões eletromagnéticas conduzidas, radiadas pelo campo magnético e radiadas pelo campo elétrico, totalizando 3 (três) critérios para esta avaliação. Vale ressaltar que nesta ordenação, a alternativa F foi classificada como a melhor colocada em ambas as tensões nominais de 127V e 220V, não havendo mudança de posição no ranqueamento quando o tratamento ocorre em tensões nominais distintas. Entretanto, é possível notar que o ranqueamento difere quando compara-se ao resultado do primeiro cenário.

4.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO TOPSIS: AVALIAÇÃO DO TERCEIRO CENÁRIO – PARÂMETROS LUMINO-ENERGÉTICOS + PARÂMETROS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (EMC)

ETAPA 1: Definir as alternativas (A_i) e critérios (X_i) - Terceiro Cenário

A avaliação do terceiro cenário irá investigar dados resultantes da união do primeiro e segundo cenário, de modo a comparar o ranqueamento para o cenário luminoenergético quando são adicionados os parâmetros de EMC nesta análise. Os critérios e alternativas a serem avaliados já foram definidos conforme disposição nas Tabelas Terceiro Cenário – Combinação dos Parâmetros Lumino-energéticos e Compatibilidade Eletromagnética – EMC

O modelo a ser rodado no TOPSIS para o terceiro cenário está diposto nas Tabelas **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-a** e **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-b**, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão que será apresentada na seção de resultados deste estudo. Importante ressaltar que o terceiro cenário contempla o primeiro cenário com a inserção dos dados do segundo cenário nesta análise.

Tabela 19-a e Terceiro Cenário – Combinação dos Parâmetros Lumino-energéticos e Compatibilidade Eletromagnética – EMC

O modelo a ser rodado no TOPSIS para o terceiro cenário está diposto nas Tabelas **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-a** e **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-b**, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão que será apresentada na seção de resultados deste estudo. Importante ressaltar que o terceiro cenário contempla o primeiro cenário com a inserção dos dados do segundo cenário nesta análise.

Tabela 19-b, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão e apresentada no capítulo anterior no item 3.5.3.

Estes grupos contemplam os critérios de eficiência luminosa da lâmpada em (lm/W), manutenção do fluxo luminoso dado em (%), fator de potência, corrente dado em (mA), THD dado em (%), IRC, R9, TCC dado em (K), ângulo de fecho dado em ($^{\circ}$) e intensidade luminosa de pico dado em (cd), emissão conduzida, emissão radiada pela componente magnética, e emissão radiada pela componente elétrica, sendo as emissões avaliadas pelos deltas de frequência (Δf) dados em (dB) e já descritos neste estudo.

Estes grupos contemplam os critérios:

- X_1 : eficiência luminosa da lâmpada em (lm/W);
- X_2 : manutenção do fluxo luminoso dado em (%);
- X_3 : fator de potência;
- X_4 : corrente dado em (mA);
- X_5 : THD dado em (%);
- X_6 : IRC;
- X_7 : R9;
- X_8 : TCC dado em (K);
- X_9 : ângulo de fecho dado em ($^{\circ}$);
- X_{10} : intensidade luminosa de pico dado em (cd);
- X_{11} : emissão conduzida;*
- X_{12} : emissão radiada pela componentes magnética;*
- X_{13} : emissão radiada pela componente elétrica.*

Os critérios marcados com “*” contemplam as emissões avaliadas pelos deltas de frequência (Δf) dados em (dB) e já descritos neste estudo.

Os dados correspondentes a cada critério estarão dispostos na matriz decisão nesta ordem, compondo a avaliação de 8 (oito) alternativas sob um conjunto de 13 (treze) critérios.

A avaliação para ranqueamento destes critérios leva em conta os requisitos máximos e mínimos estipulados nas normas e portarias vigentes. Entretanto, devido à faixa de tensão de entrada as medições foram realizadas nas tensões nominais de 127V e 220V.

ETAPA 2, 3 e 4:

Admitindo-se que os critérios e alternativas a serem avaliados já foram definidos na metodologia deste trabalho, a matriz decisão poderá ser construída conforme utilização da Equação (1) e conseqüentemente, será possível realizar a normalização e ponderação desta através da Equação (4). A matriz decisão e a matriz decisão normalizada ponderada referentes às Tabelas Terceiro Cenário – Combinação dos Parâmetros Lumino-energéticos e Compatibilidade Eletromagnética – EMC

O modelo a ser rodado no TOPSIS para o terceiro cenário está diposto nas Tabelas **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-a** e **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-b**, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão que será apresentada na seção de resultados deste estudo. Importante ressaltar que o terceiro cenário contempla o primeiro cenário com a inserção dos dados do segundo cenário nesta análise.

Tabela 19-a e Terceiro Cenário – Combinação dos Parâmetros Lumino-energéticos e Compatibilidade Eletromagnética – EMC

O modelo a ser rodado no TOPSIS para o terceiro cenário está diposto nas Tabelas **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-a** e **Erro! Autoreferência de indicador não válida.-b**, as quais foram elaboradas de forma análoga à matriz decisão que será apresentada na seção de resultados deste estudo. Importante ressaltar que o terceiro cenário contempla o primeiro cenário com a inserção dos dados do segundo cenário nesta análise.

Tabela 19-b para consolidação do ranqueamento neste cenário são apresentadas pelas matrizes D e V que foram definidas nas etapas 2, 3 e 4 do método TOPSIS.

- **ETAPA 2: Matriz Decisão Terceiro Cenário**

→ 127V

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
A1	103,1	96,0	0,96	147,6	25,0	82,9	10	6961,4	181,9	264,6	31	65	10
A2	105,2	96,3	0,99	142,7	8,4	85,4	22	6933,3	128,9	423,4	34	65	13
A3	121,9	96,4	0,98	145,8	10,6	85,2	19	6597,1	147,6	409,5	30	66	11
A4	116,8	95,9	0,98	145,9	10,1	84,2	14	6594,0	182,5	337,6	56	73	13
A5	110,6	96,8	0,98	144,7	9,8	85,1	20	6753,5	184,2	296,6	56	76	16
A6	105,2	97,1	0,99	137,4	7,6	85,1	16	6822,8	175,0	305,4	49	66	23
A7	113,2	97,5	0,98	145,7	10,9	84,9	27	6499,6	245,7	289,2	39	64	4
A8	102,5	96,0	0,99	143,6	8,2	85,0	14	6366,7	125,8	543,4	18	64	5

→ 220V

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
A1	102,4	96,2	0,92	91,6	18,5	82,8	10	6951,6	181,9	264,6	20	64	12
A2	104,37	96,6	0,95	85,7	11,7	85,4	22	6926,6	128,9	423,4	20	65	10
A3	125,2	96,4	0,90	87,7	15,3	85,1	19	6586,3	147,6	409,5	32	66	7
A4	118,6	95,9	0,95	84,1	4,4	84,1	13	6577,0	182,5	337,6	29	71	17
A5	112,5	96,0	0,96	83,5	4,3	85,1	19	6739,4	184,2	296,6	31	71	15
A6	108,5	96,7	0,94	85,7	15,8	85,1	16	6815,0	175	305,4	74	65	22
A7	115,6	96,9	0,93	87,8	15,4	84,9	27	6492,7	245,7	289,2	39	64	3
A8	101,9	96,2	0,92	89,3	15,4	84,9	14	6356,0	125,8	543,4	18	64	17

- **ETAPA 3 e 4: Matriz Decisão Normalizada e Ponderada – Terceiro Cenário**

→ 127V

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
A1	0,0255	0,0271	0,0266	0,0278	0,0544	0,0266	0,0147	0,0283	0,0282	0,0195	0,0205	0,0262	0,0207
A2	0,0260	0,0271	0,0274	0,0269	0,0183	0,0274	0,0324	0,0282	0,0200	0,0312	0,0225	0,0262	0,0269
A3	0,0301	0,0272	0,0272	0,0275	0,0231	0,0273	0,0280	0,0268	0,0229	0,0302	0,0198	0,0226	0,0227
A4	0,0289	0,0270	0,0272	0,0275	0,0220	0,0270	0,0206	0,0268	0,0283	0,0249	0,0370	0,0294	0,0269
A5	0,0273	0,0273	0,0272	0,0273	0,0213	0,0273	0,0295	0,0274	0,0286	0,0218	0,0370	0,0306	0,0331
A6	0,0260	0,0274	0,0274	0,0259	0,0165	0,0273	0,0236	0,0277	0,0272	0,0225	0,0324	0,0266	0,0475
A7	0,0280	0,0275	0,0272	0,0275	0,0237	0,0273	0,0398	0,0264	0,0381	0,0213	0,0258	0,0258	0,0083
A8	0,0253	0,0271	0,0274	0,0271	0,0178	0,0273	0,0206	0,0259	0,0195	0,0400	0,0119	0,0258	0,0103

→ 220V

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
A1	0,0250	0,0272	0,0268	0,0286	0,0371	0,0266	0,0149	0,0283	0,0282	0,0195	0,0147	0,0262	0,0232
A2	0,0255	0,0273	0,0277	0,0268	0,0234	0,0274	0,0328	0,0282	0,0200	0,0312	0,0147	0,0267	0,0193
A3	0,0306	0,0272	0,0262	0,0274	0,0306	0,0273	0,0284	0,0268	0,0229	0,0302	0,0235	0,0271	0,0135
A4	0,0290	0,0271	0,0277	0,0263	0,0088	0,0270	0,0194	0,0268	0,0283	0,0249	0,0213	0,0291	0,0328
A5	0,0275	0,0271	0,0280	0,0261	0,0086	0,0273	0,0284	0,0274	0,0286	0,0218	0,0228	0,0291	0,0289
A6	0,0265	0,0273	0,0274	0,0268	0,0316	0,0273	0,0239	0,0277	0,0272	0,0225	0,0544	0,0267	0,0425
A7	0,0282	0,0273	0,0271	0,0275	0,0308	0,0273	0,0403	0,0264	0,0381	0,0213	0,0287	0,0262	0,0058
A8	0,0249	0,0272	0,0268	0,0279	0,0308	0,0273	0,0209	0,0259	0,0195	0,0400	0,0132	0,0262	0,0328

ETAPA 5: Cálculo da solução ideal positiva (PIS) e da solução ideal negativa (NIS) - Terceiro Cenário

A partir da definição da matriz decisão normalizada e ponderada, é possível realizar o cálculo da solução ideal positiva (PIS) e da solução ideal negativa (NIS), que são representadas pelos vetores (S+) e (S-), respectivamente, onde são selecionados os maiores e menores valores de cada critério de cada coluna da matriz, referentes a etapa 5 do método TOPSIS. Esses vetores são calculados a partir da utilização das Equações (8) e (9). Os vetores (S+) e (S-), foram obtidos a partir da inspeção da matriz V.

- **Solução ideal (PIS)**

→ 127V

$$S^+ = \begin{matrix} & \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} & \mathbf{X4} & \mathbf{X5} & \mathbf{X6} & \mathbf{X7} & \mathbf{X8} & \mathbf{X9} & \mathbf{X10} & \mathbf{X11} & \mathbf{X12} & \mathbf{X13} \\ [0,0301 & 0,0275 & 0,0274 & 0,0259 & 0,0165 & 0,0274 & 0,0398 & 0,0259 & 0,0381 & 0,0400 & 0,0370 & 0,0306 & 0,0475] \end{matrix}$$

→ 220V

$$S^+ = \begin{matrix} & \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} & \mathbf{X4} & \mathbf{X5} & \mathbf{X6} & \mathbf{X7} & \mathbf{X8} & \mathbf{X9} & \mathbf{X10} & \mathbf{X11} & \mathbf{X12} & \mathbf{X13} \\ [0,0306 & 0,0273 & 0,0280 & 0,0261 & 0,0086 & 0,0274 & 0,0403 & 0,0259 & 0,0381 & 0,0400 & 0,0544 & 0,0291 & 0,0425] \end{matrix}$$

- Solução ideal-negativa (NIS)

→ 127V

$$S^- = \begin{matrix} & \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} & \mathbf{X4} & \mathbf{X5} & \mathbf{X6} & \mathbf{X7} & \mathbf{X8} & \mathbf{X9} & \mathbf{X10} & \mathbf{X11} & \mathbf{X12} & \mathbf{X13} \\ [0,0253 & 0,0270 & 0,0266 & 0,0278 & 0,0544 & 0,0266 & 0,0147 & 0,0283 & 0,0195 & 0,0195 & 0,0119 & 0,0258 & 0,0083] \end{matrix}$$

→ 220V

$$S^- = \begin{matrix} & \mathbf{X1} & \mathbf{X2} & \mathbf{X3} & \mathbf{X4} & \mathbf{X5} & \mathbf{X6} & \mathbf{X7} & \mathbf{X8} & \mathbf{X9} & \mathbf{X10} & \mathbf{X11} & \mathbf{X12} & \mathbf{X13} \\ [0,0249 & 0,0271 & 0,0262 & 0,0286 & 0,0371 & 0,0266 & 0,0149 & 0,0283 & 0,0195 & 0,0195 & 0,0132 & 0,0262 & 0,0058] \end{matrix}$$

ETAPA 6: Cálculo das distâncias Euclidianas - Terceiro Cenário

Após determinação dos vetores (S^+) e (S^-), ou seja, a definição das soluções ideal (PIS) e anti-ideal (NIS), é possível calcular as distâncias euclidianas. Como já mencionado no item 3.2.1, na etapa 6 do método TOPSIS, onde para cada alternativa é calculada uma medida de separação, sendo uma em relação a solução ideal (D_i^+) e outra em relação a solução anti-ideal (D_i^-), conforme definido nas Equações (10) e (11) desta etapa. As distâncias (D_i^+) e (D_i^-) estão apresentadas na matriz D_i .

- **Cálculo das Distâncias Euclidianas**

→ 127V

$$D_i = \begin{matrix} & & D_i^+ & D_i^- \\ \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \\ A6 \\ A7 \\ A8 \end{matrix} & \left[\begin{matrix} 0,0602 & 0,0174 \\ 0,0339 & 0,0471 \\ 0,0380 & 0,0398 \\ 0,0340 & 0,0469 \\ 0,0278 & 0,0517 \\ 0,0274 & 0,0596 \\ 0,0458 & 0,0461 \\ 0,0527 & 0,0425 \end{matrix} \right] \end{matrix}$$

→ 220V

$$D_i = \begin{matrix} & & D_i^+ & D_i^- \\ \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \\ A6 \\ A7 \\ A8 \end{matrix} & \left[\begin{matrix} 0,0630 & 0,0195 \\ 0,0532 & 0,0289 \\ 0,0525 & 0,0234 \\ 0,0442 & 0,0419 \\ 0,0419 & 0,0416 \\ 0,0354 & 0,0568 \\ 0,0536 & 0,0359 \\ 0,0552 & 0,0351 \end{matrix} \right] \end{matrix}$$

ETAPA 7 e 8: Cálculo dos Coeficientes e Ordenação das Alternativas- Terceiro Cenário

Quando as distâncias euclidianas são calculadas, é então possível realizar cálculo da similaridade para a posição ideal positiva, isto é, os coeficientes C para cada alternativa. Este cálculo é realizado na etapa 7 do método TOPSIS, e é neste momento que é calculada a proximidade relativa entre as alternativas e a solução ideal positiva, chegando ao resultado da

aproximação à alternativa ideal (A_i). Essa proximidade relativa é calculada através da equação (12).

Deste modo, pode-se afirmar que quanto mais perto de 1 (um) for o valor do coeficiente C , mais perto da solução ideal estará a alternativa relacionada a este coeficiente, e mais afastada da solução anti-ideal, uma vez que, o valor de C_i deve estar compreendido entre 0 (zero) e 1 (um). Analogamente, quanto mais perto de zero o valor de C_i , mais próximo da solução anti-ideal estará a alternativa relacionada a este coeficiente.

A partir dos valores dos coeficientes C definidos, será possível alcançar a última etapa do método TOPSIS, neste caso, a etapa 8. Esta etapa contempla a ordenação dos valores relativos as alternativas, de modo a construir o ranqueamento das alternativas que serão avaliadas.

A matriz C_i relaciona os valores dos coeficientes C de cada alternativa analisada com a ordenação destes para a avaliação do ranqueamento do terceiro cenário.

→ 127V

	C_i	Ordenação
A1	0,2244	8
A2	0,5816	3
A3	0,5117	5
A4	0,5795	4
A5	0,6504	2
A6	0,6852	1
A7	0,5013	6
A8	0,4462	7

→ 220V

$$C_i = \begin{matrix} & C_i & \text{Ordenação} \\ \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \\ A6 \\ A7 \\ A8 \end{matrix} & \left[\begin{matrix} 0,2362 & 8 \\ 0,3519 & 6 \\ 0,3086 & 7 \\ 0,4865 & 3 \\ 0,4980 & 2 \\ 0,6158 & 1 \\ 0,4012 & 4 \\ 0,3886 & 5 \end{matrix} \right] \end{matrix}$$

Os resultados do ranqueamento para o terceiro cenário estão apresentados nas Tabelas Tabela 27-a e Tabela 27-b referentes às tensões nominais 127V e 220V, respectivamente.

Tabela 27-a - Terceiro Cenário - Parâmetros Lumino-energéticos + EMC – Resultado Ranqueamento – 127V

Alternativas	Descrição da Amostra	Ranqueamento
A1	A	8
A2	B	3
A3	C	5
A4	D	4
A5	E	2
A6	F	1
A7	G	6
A8	H	7

Tabela 27-b - Terceiro Cenário - Parâmetros Lumino-energéticos + EMC – Resultado Ranqueamento – 220V

Alternativas	Descrição da Amostra	Ranqueamento
A1	A	8
A2	B	6
A3	C	7
A4	D	3
A5	E	2
A6	F	1
A7	G	4
A8	H	5

No terceiro cenário, foi apresentado uma avaliação quando combina-se os critérios luminoenergéticos com os critérios de EMC na mesma matriz decisão. Sendo assim, analisou-se o desempenho do LED quando há inserção dos aspectos EMC para avaliar a possível influência EMI provenientes das lâmpadas LED, quando investigado junto aos parâmetros já considerados na classificação e eleição do produto para comercialização. Ainda assim, a

alternativa F se manteve como a alternativa melhor colocada para ambas tensões nominais, quando os parâmetros luminoenergéticos são combinados com os aspectos de EMC. Vale ressaltar, mais uma vez, que não houve mudança de posição no ranqueamento quando o tratamento ocorreu em tensões nominais distintas, e ainda é possível notar que o ranqueamento manteve-se idêntico ao segundo cenário no que refere-se à alternativa vencedora da ordenação, e por conseguinte distinto do primeiro cenário.

A análise sob o aspecto EMC irá subsidiar a conclusão deste estudo, como já esperado, uma vez que possui impacto diferenciador no ranqueamento realizado. Entretanto, análises fundamentadas serão descritas na análise crítica da proposta, e nas considerações finais deste trabalho.

4.4 ANÁLISE CRÍTICA DA PROPOSTA

O resultado do ranqueamento para os 3 (três) cenários propostos e estudados estão apresentados lado a lado nas Tabelas Tabela 28-a e Tabela 28-b referentes às tensões nominais 127V e 220V respectivamente:

Tabela 28-a - Cenários Propostos - Comparação – Resultado Ranqueamento – 127V

Amostra	Primeiro Cenário	Segundo Cenário	Terceiro Cenário
A	8	6	8
B	2	4	3
C	3	5	5
D	7	3	4
E	4	2	2
F	6	1	1
G	1	7	6
H	5	8	7

Tabela 28-b - Cenários Propostos - Comparação – Resultado Ranqueamento – 220V

Amostra	Primeiro Cenário	Segundo Cenário	Terceiro Cenário
A	8	5	8
B	4	8	6
C	6	7	7
D	2	2	3
E	1	3	2
F	7	1	1
G	3	6	4
H	5	4	5

Ao investigar as Tabelas Tabela 28-a e Tabela 28-b, nota-se que o ranqueamento encontrado para o primeiro cenário divergiu em 2 (duas) posições quando o tratamento ocorreu em 220V. As alternativas melhores colocadas em 127V e 220V considerando apenas o desempenho lumino-energético são as alternativas G e E, respectivamente.

Essa distinção dar-se-á, pois, para os ensaios realizados em tensões nominais distintas quando se analisa também o fator energético de uma lâmpada, resultados distintos podem ser esperados para 127V e 220V, uma vez que as amostras recebidas no laboratório contemplam diferentes fabricantes, e apesar dos equipamentos possuírem características técnicas semelhantes, estes podem operar com uma faixa de tensão que compreende um intervalo entre 80-250V, dependendo do modelo da lâmpada, que poderá influenciar diretamente no valor dos dados medidos. Somando-se a isso, os valores do critério corrente que são considerados divergem moderadamente quando avaliados em 220V.

O segundo cenário realizou o ranqueamento apenas para as emissões eletromagnéticas, e é possível observar que quando a comparação é realizada envolvendo os 3 (três) tipos de emissões possíveis, a melhor alternativa no desempenho EMC será a alternativa F, tanto para 127V quanto para 220V.

Neste momento já é possível verificar que a alternativa eleita para o primeiro cenário diverge moderadamente do segundo cenário para ambas as tensões nominais analisadas. À vista disso, é necessária uma reflexão para qual modelo de lâmpada irá se adquirir, uma vez que, quando são analisadas segundo a um parâmetro hoje desconsiderado na classificação, apresenta um impacto diferenciador no ranqueamento e que agora poderá auxiliar o consumidor na escolha do modelo.

Em contrapartida, ao unificar ambos os cenários já estudados e obter o terceiro cenário, a alternativa F se mantém como a alternativa melhor colocada quando os parâmetros lumino-energéticos são combinados com os aspectos de EMC. Vale ressaltar que os parâmetros luminoenergéticos também são considerados na classificação e eleição da lâmpada, enquanto parâmetros de EMC são considerados apenas na certificação do produto.

Esta análise evidenciou que o aspecto de EMC é um fator mandatório nesta avaliação, uma vez que, ao ser inserido junto aos demais parâmetros para a avaliação multicritério, mantém a posição no ranqueamento de maneira permanente, neste caso, elegendo a alternativa

F como melhor alternativa disponível ao consumidor, levando em consideração os critérios avaliados. Deste modo, há necessidade de valorização destes parâmetros e esclarecimento da influência EMI provenientes das lâmpadas LEDs aos usuários finais desta tecnologia.

Atualmente a influência EMI proveniente das lâmpadas LEDs, ou ainda o aspecto EMC, não é considerado na classificação do produto para ofertar ao usuário final como é evidenciado a eficiência energética de uma lâmpada, por exemplo. Tais influências devem ser consideradas como elemento classificador para o consumidor, visto que estas interferências estão sendo observadas nas faixas de frequências de rádio amadora que são amplamente utilizadas e aplicadas em diversas atividades e profissões distintas, como a comunicação em uma operação policial ou ainda em uma escavação ou mineração, assim como nas interferências em sinais de transmissão de TVs e rádios, e ainda podendo ocorrer em locais com elevada importância, como por exemplo, as instalações hospitalares, rádios VHF utilizados em operações de navegação e em torres de controle dos aeroportos e aviões.

A partir destes resultados, apresenta-se a sugestão da inserção desta classificação na embalagem do produto, permitindo que os consumidores leigos possam realizar uma correta escolha da lâmpada sem que haja necessidade de conhecimento específico sobre os critérios utilizados na avaliação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi avaliar através da ferramenta de análise de multicritério TOPSIS os critérios que fazem parte do processo de certificação da tecnologia LED para disponibilização ao mercado brasileiro, de modo que os resultados encontrados com a aplicação do método auxiliassem na melhor escolha para um modelo de lâmpada a ser implantada no ambiente do consumidor, seja ele residencial, industrial ou comercial. Deste modo, este estudo possibilitou a categorização da tecnologia para atender a necessidade ou perfil do consumidor, apoiando os usuários finais sobre o melhor produto disponível no mercado, considerando-se somente aqueles aprovados conforme regulamento do Inmetro. Para tanto, foram selecionados 8 (oito) fabricantes da tecnologia LED com características técnicas semelhantes, onde avaliaram-se através de ensaios em laboratório diversos parâmetros exigidos pela RAC [8], RTQ [9] e a ABNT NBR IEC/CISPR15 [10], os quais regulam os ensaios de acreditação desta tecnologia no Brasil.

A fim de investigar possíveis contribuições nas normas e portarias vigentes, este estudo propôs uma avaliação sob os aspectos de eficiência energética, qualidade de energia, qualidade luminotécnica e emissões eletromagnéticas conduzidas e radiadas. Entretanto, o aspecto EMC considerado na certificação do LED, a princípio desconsiderado no processo classificatório, obteve impacto diferenciador no ranqueamento realizado.

Neste estudo, foram considerados três cenários de ranqueamento das alternativas de lâmpadas. O primeiro cenário avalia os parâmetros luminoenergéticos, os quais envolvem aspectos de eficiência energética, qualidade de energia e qualidade luminotécnica. O segundo faz análise dos parâmetros de EMC, sendo estes as emissões eletromagnéticas conduzidas e radiadas. O terceiro cenário avalia a união dos 2 (dois) cenários anteriores, de modo a comparar o ranqueamento para o cenário luminoenergético quando adicionado os parâmetros de EMC nesta análise.

Ao realizar uma análise comparativa entre os resultados dos ranqueamentos encontrados para cada cenário proposto, conforme as Tabelas Tabela 28-a e Tabela 28-b, foi possível concluir que a amostra F é melhor alternativa disponível ao consumidor, considerando a análise realizada quando os parâmetros luminoenergéticos são combinados com os parâmetros de EMC uma vez que, além de não ocorrer mudança de posição no ranqueamento quando o tratamento ocorre em tensões nominais distintas, também foi possível verificar que o ranqueamento do terceiro

cenário manteve-se idêntico ao segundo cenário no que refere-se a alternativa vencedora da ordenação, e por conseguinte, distinto do primeiro cenário. Esta distinção observada em relação ao primeiro cenário evidencia a necessidade de valorização dos parâmetros de EMC e ainda o esclarecimento sobre a influência EMI provenientes das lâmpadas LED aos usuários finais desta tecnologia.

A partir destes resultados, apresenta-se a sugestão da inserção desta classificação na embalagem do produto, permitindo que os consumidores leigos possam realizar uma correta escolha da lâmpada sem que haja necessidade de conhecimento específico sobre os critérios utilizados na avaliação.

Vislumbra-se neste estudo, diante da inserção massiva da tecnologia LED no mercado brasileiro, apresentar às organizações regulamentadoras os novos aspectos qualitativos que deverão ser considerados para o LED. Deste modo, pleiteia-se que os aspectos de EMC possam ser inseridos na etiqueta do produto, contribuindo significativamente com a sociedade, uma vez que parâmetros como a eficiência ou potência da lâmpada já são evidenciados em sua embalagem para informar e auxiliar o consumidor na escolha do produto. Sendo assim, dependendo do perfil do consumidor e para qual fim a lâmpada LED será utilizada, o aspecto EMC poderá se tornar relevante na aquisição do produto. Ademais, as interferências eletromagnéticas, como já definido neste trabalho, podem alterar o funcionamento ou até mesmo danificar um equipamento, dispositivo ou aparelho, e deste modo, interromper a transferência de dados ou energia entre os mesmos, o que dependendo do contexto ou atividade relacionada, podem causar prejuízos irreparáveis para o usuário.

Pretende-se ainda, um indicativo na etiqueta ENCE, de modo que o consumidor possa identificar o enquadramento do seu perfil e ambiente (residencial, comercial e industrial) para aquisição da lâmpada quando a relevância da influência EMI proveniente do LED for um fator prejudicial ao ambiente de instalação do LED.

Propõe-se neste trabalho a expansão do estudo para um maior número de amostras, uma vez que este trabalho foi realizado a partir dos dados provenientes do LABLUX existentes nos relatórios consolidados para a certificação da lâmpada. De acordo com a eleição dos critérios adotados e modelo de lâmpada escolhida, os dados coletados possuem restrições quanto ao número de amostras e modelos disponíveis já ensaiados e aprovados para a certificação.

Vislumbra-se também como trabalho futuro a aplicação da análise multicritério para ranqueamento e classificação de luminárias, além de expandir esta avaliação para outros modelos de lâmpadas e ainda para a iluminação pública.

A análise proposta neste trabalho poderá ser avaliada juntamente com a continuidade de outros trabalhos que também abordem uma avaliação multicritério para os parâmetros que classificam uma lâmpada LED. Ademais, neste trabalho a análise foi desenvolvida através do TOPSIS, método multicritério que possui facilidade de aplicação, uma vez que pode ser desenvolvido a partir de uma planilha eletrônica, como por exemplo o Excel, não sendo necessário um software específico para seu desenvolvimento, possuindo um moderado esforço computacional. Soma-se a isso, método que possui transparência, disponibilidade de software e possibilidade de conferência dos resultados. Todavia, a simplicidade do método possui algumas limitações, como a atribuição de pesos para cada critério e ainda a utilização de um simples *software* para consolidar o resultado.

Apresenta-se também como avaliação futura, a utilização de um *software* com maior esforço computacional para rodar os modelos que foram propostos neste estudo, de modo a minimizar os possíveis erros e tendências, ou ainda a utilização de outros métodos multicritérios para uma análise comparativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PEREIRA, A. M. E. et al, Power Quality Analysis of Domestic Lamps Available in the Brazilian Market. **WSEAS Transactions on Circuits and Systems**, [S.l.]. vol. 14, pp. 388-398, 2015.
- [2] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Núcleo de Estudos Estratégicos. **Ranking Mundial de Energia e Socioeconomia (anos 2012/13/14)**. Brasília, 2011. [Online]. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139093/Ranking+Mundial+de+Energia+2015.pdf/f088fe16-e0d2-49ad-b72c-8376f749c661>>. Acesso em 23 mar. 2019.
- [3] AMAN, M. M. et al. Analysis of the performance of domestic lighting lamps. **Energy Policy**, vol. 52, p. 482–500, 2013.
- [4] B. Moreira. Led conquista mercado no Brasil e no mundo. **O Setor Elétrico**, São Paulo, 2015. [Online]. Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/led-conquista-mercado-no-brasil-e-no-mundo>>. Acesso em 8 dez. 2018.
- [5] ENERGY FOCUS, Energy Focus Case Studies: U.S. NAVY CASE STUDY. [Online]. Disponível em: <<https://www.energyfocus.com/resource/mission-ready-navy>>. Acesso em 17 fev. 2019.
- [6] ALMEIDA, A. de et al. Solid state lighting review–Potential and challenges in Europe, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. [S.l.]. vol. 34, pp. 30-48, fev. 2014.
- [7] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Eletrobrás. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Manual de Iluminação Procel. Rio de Janeiro, 2011. [Online]. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/MANUAL+DE+ILUMINACAO+-+PROCEL_EPP+-AGOSTO+2011.pdf>. Acesso em 20 abr. 2019.
- [8] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Portaria nº 144/2015, de 13 de março de 2015. Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Lâmpadas LED com

- Dispositivo Integrado à Base. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002235.pdf>>. Acesso em 18 nov. 2018.
- [9] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria nº 389/2014, de 25 de agosto de 2014. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à Base. Rio de Janeiro, 2014. [Online]. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002154.pdf>>. Acesso em 18 nov. 2018.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR IEC/CISPR 15:2014: Limites e métodos de medição das radioperturbações características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares, Rio de Janeiro, 2014. 56 p.
- [11] IASHITA, J. Compatibilidade eletromagnética em lâmpadas de led, **Blog de especialistas da EXPER**. Cotia - SP, 2015. [Online]; Disponível em: <<https://www.expersolution.com.br/single-post/2015/12/02/Compatibilidade-eletromagn%C3%A9tica-em-l%C3%A2mpadas-de-led>>. Acesso em 20 nov. 2018.
- [12] FASSARELA, J. E. V. et al. Analysis and suggested solution of Power quality problems in Lighting Laboratory. **IEEE Latin America Transactions**, [S.l.]. vol. 12, nº 6, pp. 1019-1026, set. 2014.
- [13] PEREIRA, A. et al. Some Considerations about LED Technology in Public Lighting. In: **Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)**, 2015, Santiago, *Anais...* IEEE, 2016.
- [14] RYCKAERT, W. et al. Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation. **Energy and Buildings**. [S.l.]. vol. 49, pp. 429-436, 2012.
- [15] PETCHARAT, S.; CHUNGPAIBULPATANA, S.; RAKKWAMSUK, P. Assessment of potential energy saving using cluster analysis: A case study of lighting systems in buildings, **Energy and Buildings**. [S.l.]. vol. 52, pp. 145-152, 2012.

- [16] KAWASAKI, J. I. Precauções no retrofit com Leds, **O Setor Elétrico**, São Paulo, 2011. [Online]. Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/precaucoes-no-retrofit-com-leds>>. Acesso em 17 fev. 2019.
- [17] OLIVEIRA, L. B. de. **Ferramenta de Análise de Dados na Certificação de Produtos Luminotécnicos - Um Estudo de Caso para Lâmpadas LED**. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018).
- [18] GOUVEIA, L. de C. dos S. **Avaliação da Troca de Tecnologia de Iluminação em Embarcações Militares**. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018).
- [19] LUXFOR. Mercado de iluminação LED vai ultrapassar US \$ 70,2 bilhões até 2023. [Online]. Disponível em: <<https://luxfordbrasil.com/iluminacao-publica/mercado-de-iluminacao-led-crescera-at-c3-a9-2023>>. Acesso em 20 jun. 2019.
- [20] LÂMPADAS leds superam expectativa na comercialização, aponta pesquisa. **O Setor Elétrico**, São Paulo, 2018. [Online]. Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/pesquisa-produtos-e-sistemas-de-iluminacao-2/>>. Acesso em 8 dez. 2018.
- [21] NOVA, D. C. M. V.; ARAUJO, J. F. **Estudo de caso para iluminação e aquecimento de água com análise energética e econômica**. 140 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- [22] GEREFFI, G.; DUBAY, K.; LOWE, M. **Manufacturing Climate Solutions: Carbon-Reducing Technologies and U.S. Jobs**. Durham: Duke University: Center on Globalization, Governance, and Competitiveness, 2008. 79 p.
- [23] ZHELUDEV, N. The life and times of the LED — a 100-year history, **Nature Photonics**. [S.l.]. vol. 1, pp. 189-192, 2007.
- [24] WANDERLEY, T. C., A evolução das lâmpadas e a grande revolução dos LEDs. **Revista Especialize On-line IPOG**, [S.l.]. vol. 01/2014, nº 8, p. 17, dez. 2014.

- [25] SERRADURA, R., O LED na Arquitetura”. **Revista Arqitetonline**, [S.l.]. vol. 3, pp. 64-67, 2010.
- [26] SILVA, M. L. da. **Led - A Luz Dos Novos Projetos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012, 144 p.
- [27] CASSIOLATO, C. EMI – Interferência Eletromagnética, **Associação PROFIBUS Brasil**. [Online]. Disponível em: http://www.profibus.org.br/artigos/EMI_Interferencia_Eletromagnetica.pdf. Acesso em 30 jun. 2017.
- [28] SILVA, L. M. et al. Evaluation of the impact of EMI on Ethernet, **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**. [S.l.]. vol. 33, nº 2, p. 249–259, out. 2018.
- [29] MEHL, E. L. M., Qualidade da Energia Elétrica, Universidade Federal do Paraná. [Online]. Disponível em: <http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/mehl/posgrad/qualidade-energia.pdf>. Acesso em 30 jun 2017.
- [30] PEDRONI, R. **Técnicas de Mitigação de Interferência Eletromagnética em Equipamentos de Iluminação a LED**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- [31] BOMILCAR, A. Entenda como uma lâmpada LED fora do padrão de qualidade pode interferir no funcionamento de eletroeletrônicos, **ABilumi**. [Online]. Disponível em: <http://www.abilumi.org.br/lampada-led-fora-padroo-de-qualidade-intefere-no-funcionamento-de-eletroeletronicos>>. Acesso em 20 dez. 2018.
- [32] PAUL, C. R., **Introduction to Electromagnetic Compatibility**, 2 ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006, 1016 p.
- [33] SEVERINO, F. Z. **Contribuição ao Estudo da Interferência Eletromagnética em Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- [34] MORAES, F. B. de, **Avaliação das Emissões Conduzidas e Radiadas Geradas por Unidade Eletrocirúrgica e Sistema de Iluminação com Lâmpadas Fluorescente em**

- Equipamentos Médicos.** 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- [35] RAIZER, A. Compatibilidade Eletromagnética. Universidade do Porto. 2005. 37 Slides. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~ee05161/ficheiros/artigos/Slides%20CEM%20-%20Adroaldo%20Raizer.pdf>>. Acesso em 17 mar. 2019.
- [36] BLUM, G. Não há limites para a evolução do LED. *Abilumi*. dez. 2018. [Online]. Disponível em: <<http://www.abilumi.org.br/artigo-nao-ha-limites-para-evolucao-led>>. Acesso em 20 dez. 2018.
- [37] RODRIGUES, W. Lâmpadas LED e as interferências no rádio. **DX Clube do Brasil**, [Online]. Disponível em: <<https://www.ondascurtas.com/matutando/lampadas-led-e-as-interferencias-no-radio>>. Acesso em 10 nov. 2018.
- [38] RODRIGUES, F. Z. Faróis de Trabalho LED causam interferência eletromagnética?. *Pesagem & Cia*. [Online]. Disponível em: <<https://balancaparapacarregadeira.com.br/farois-de-trabalho-led-causam-interferencia-eletromagnetica>>. Acesso em 15 nov. 2018.
- [39] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Informação ao Consumidor. 14 jun. 1007. [Online]. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/pisca.asp>>. Acesso em 20 jun. 2019.
- [40] LUZES de Natal podem atrapalhar a sua internet sem fio. **Revista Super Interessante**, São Paulo, dez. 2015. [Online]. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/tecnologia/luzes-de-natal-podem-atrapalhar-a-sua-internet-sem-fio>>. Acesso em 8 dez. 2018.
- [41] MALINE, L. Luzes de Natal podem prejudicar sinal de Wi-Fi, garante pesquisa. **Tech Tudo**, [Online]. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2015/12/luzes-de-natal-podem-prejudicar-sinal-de-wi-fi-garante-pesquisa.html>>. Acesso em 10 nov. 2018.

- [42] FRANCO, C. Pisca-piscas podem atrapalhar sua conexão Wi-Fi. **PSafe**, [Online]. Disponível em: < <https://www.psafe.com/blog/pisca-piscas-podem-atrapalhar-sua-conexao-wi-fi> >. Acesso em 10 nov. 2018.
- [43] LIZ, M. B. de. **Contribuição para a redução da interferência eletromagnética em fontes chaveadas**. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [44] ROCHA, M. C. da S. P. **Métodos de Classificação Multicritério com Classes Parcialmente Ordenadas**. 182 f. Tese (Doutorado em Gestão - Ciência Aplicada à Decisão), Universidade de Coimbra. Coimbra, 2011.
- [45] MENDES, L. P. L. de S. **Análise dos Métodos de Seleção de Fornecedores**. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.
- [46] BARBIERI, A. C.; P. INÁCIO, P. A.; LIMA, J. P. Métodos de Análise Multicritério Aplicados as Transportes: Uma Revisão Sistemática, **Plataforma UnB Aprender**. [Online]. Disponível em: <https://aprender.ead.unb.br/pluginfile.php/409390/mod_resource/content/3/1_264_AC_M%C3%89TODOS%20DE%20AN%C3%81LISE%20MULTICRIT%C3%89RIO%20APLICADOS%20A%20TRANSPORTES.pdf>. Acesso em 30 mar. 2019.
- [47] MARANHÃO, C. E.-J. **TOPSIS VERSUS AHP: Métodos Multicritérios aplicados em um estudo de caso**. 76 f. Monografia (Especialização em Business Intelligence), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [48] CHAI, J.; LIU, J. N.; NGAI, E. W. Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. **Expert Systems with Applications**. [S.l.]. vol. 40, nº 10, p. 3872–3885, 2013.
- [49] ARULDOSS, M.; LAKSHMI, T. M.; VENKATESAN, V. P. A survey on multi criteria decision making methods and its applications. **American Journal of Information Systems**. [S.l.]. vol. 1, nº 1, pp. 31-43, 2013.

- [50] ALMEIDA, A. T. de. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Atlas, 2013, 256 p.
- [51] KEUNECKE, L.; HEIN, N.; KROENKE, A. Avaliação de Insumos por Meio do Método Vikor - Um Estudo Multicriterial na Indústria Têxtil. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 47, 2015, Porto de Galinhas, Anais...** SOBRAPO, 2015.
- [52] ZELENY, M.; COCHRANE, J. L. Multi criteria decision making. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [53] AIRES, R. F. de F.; FERREIRA, L. Uma Análise Sobre Reversão de Ranking no Método TOPSIS. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 46, 2014, Salvador, Anais...** SOBRAPO, 2014.
- [54] BEHZADIAN, M. et al. A state-of the-art survey of TOPSIS applications. **Expert Systems with Applications**. [S.l.]. vol. 39, nº 17, pp. 13051-13069, 2012.
- [55] JAYANT, A.; SHARMA, J. A comprehensive literature review of MCDM techniques ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR and TOPSIS applications in business competitive environment. **International Journal of Current Research**. [S.l.]. vol. 10, nº 1, pp. 65461-65477, feb. 2018.
- [56] ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. Multi-Criteria Decision Analysis-Methods and Software. Chichester: John Wiley & Sons, 2013, 310 p.
- [57] VALLADARES, C. F. G. **O Processo para Seleção de Gestores de Fundos de Investimento Utilizando o Método Multicritério TOPSIS**. 110 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Administração), Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Rio de Janeiro, 2011.
- [58] Hwang, C.-L.; YOON, K. P. Multiple attributes decision-making: methods and applications. Berlin: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1981, 259 p.
- [59] COSTA, L. S. da. Uma Metodologia para a Pré-Seleção de Ações Utilizando o Método Multicritério TOPSIS. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 45, 2013, Natal, Anais...** SOBRAPO, 2013.

- [60] PEIXOTO, D. de O. **Aplicação aa Técnica Multicritério de Auxílio à Tomada de Decisão Topsis na Escolha Modal de Percíveis**. 71 f. Monografia (Graduação em Administração) – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2010.
- [61] GOMES JUNIOR, S. F. et al. Integração de métodos multicritério na busca da sustentabilidade agrícola para a produção de tomates no município de São José de Ubá-RJ. **Pesquisa Operacional**. [S.l.]. vol. 31, nº 1, pp. 157-171, jun. 2011.
- [62] ROY, B.; BOUYSSOU, D. Aide multicritère à la décision: méthodes et cas. Paris: Économica, 1993, 695 p.
- [63] MELLO, J. C. C. B. S. de et al. Conceitos básicos do Apoio Multicritério à Decisão e sua aplicação no Projeto Aerodesign. **Engevista**, [S.l.]. vol. 5, nº 8, pp. 22-35, 2003.
- [64] SILVA, D. C. M da. Potência elétrica. [Online]. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/potencia-eletrica.htm>>. Acesso em 20 jun. 2019.
- [65] MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 914p.
- [66] POWER LUME, Lúmen, Candela e Lux. 2019. [Online]. Disponível em: <www.powerlume.com.br/lumen-candela-e-lux-conceitos-basicos>. Acesso em 10 jun. 2019.
- [67] CREDER, H. Instalações Elétricas. 15 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 427p.
- [68] Antunes, F.; LEÃO, R.; SAMPAIO, R. Harmônicos em Sistemas Elétricos. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014.
- [69] DUGAN, R. C. Electrical Power Systems Quality, 2 ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- [70] RODRIGUES, T. A. et al. Impact of electric propulsion on the electric power quality of vessels. **Electric Power Systems Research**. [S.l.]. vol. 155, pp. 350-362, 2018.
- [71] AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. Guidance Notes on Control of Harmonics in Electrical Power Systems. Houston: 2006 240 p. [Online]. Disponível em <

- http://www.harmonicsolutions-oilandgas.com/wp-content/uploads/2014/08/ABS-Harmonics-Guidance-Notes-_May-2006_Pub-150.pdf > Acesso em 10 jun. 2019.
- [72] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Rio de Janeiro, 2013. [Online]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>. Acesso em 18 nov. 2018.
- [73] LUMICENTER LIGHTING, “Reprodução de cores: Métodos de avaliação das fontes luminosas”. São Paulo, 2017. [Online]. Disponível em: <<http://www.lumicenteriluminacao.com.br/reproducao-de-cores-irc-e-tm-30>>. Acesso em 10 jun. 2019.
- [74] IASHITA, J. Um novo método para análise da reprodução de cor. **Blog de especialistas da EXPER**. Cotia - SP, 2015. [Online]. Disponível em: <<https://www.expersolution.com.br/single-post/2015/10/06/Um-novo-m%C3%A9todo-para-an%C3%A1lise-da-reprodu%C3%A7%C3%A3o-de-cor>>. Acesso em 20 nov. 2018.
- [75] RODRIM, J. Temperatura da cor: como ela influencia nos ambientes comerciais. **TRANCIL**. Contagem, 2018. [Online]. Disponível em: <<http://www.trancil.com.br/pb/temperatura-da-cor-como-ela-influencia-nos-ambientes-comerciais/>> Acesso em 20 nov. 2018.
- [76] NISKIER, J. Instalações Elétricas. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001, 552p.
- [77] LUMINARE, Guia de Informações de A a Z sobre luminárias e iluminação. [Online]. Disponível em: <<http://www.luminare.com.br/sobre.pdf>>. Acesso em 17 fev. 2019.
- [78] VIANA, D. Entenda o que é luminotécnica. **Guia da Engenharia**, 2019. [Online]. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/luminotecnica>>. Acesso em 10 jun 2019.

- [79] LEDDEPOT, Ângulo de Facho (Beam Angle). 2019. [Online]. Disponível em: <<http://leddepot.com.br/duvidas/o-que-e-beam-angle-angulo-de-facho.html>>. Acesso em 10 jun 2019.
- [80] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Portaria nº 143/2015, de 13 de março de 2013. Altera o ano de norma e as notas descritas no item 3. Rio de Janeiro, 2013. [Online]. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002234.pdf>>. Acesso em 18 nov. 2018.
- [81] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Portaria nº 20/2017, de 15 de fevereiro de 2017. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Luminárias para Iluminação Pública Viária, inserto no Anexo I desta Portaria, que estabelece os requisitos de cumprimento obrigatório referentes ao desempenho e segurança do produto. Rio de Janeiro, 2017. [Online]. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002452.pdf>>. Acesso em 18 nov. 2018.