

Evaluation of the Energy Performance in LED Lamps with Integrated Driver through Multicriteria Analysis

A. Fragoso, G. Lima, M. Fortes, *Senior Member, IEEE*, L. Gavião, G. Ney, and A. Pereira

Abstract—The lighting industry is having a great change with the advancement of LED technology, allowing the consumer use a more efficient product with longer lifespan, varied colors and shapes. These facts are beneficial to the consumer, but bring with them, a greater difficulty in choosing the product of better energy performance. In this work, a multicriteria analysis will be performed to evaluate the energy performance of LED bulbs with integrated driver in the Brazilian market. In this research, a hybrid multi-criteria approach TOPSIS with entropy weights was used. For this, ten different suppliers with similar technical characteristics were chosen and the tests required by the Technical Regulation of the Quality in LED lamps with integrated driver, Inmetro Order n° 389/2014 that regulate these product in Brazil were carried out. In addition to the energy efficiency results, the results of energy quality and the quality of the emitted light were also evaluated. Through these analyzes, a ranking was elaborated with the total energetic performance of the evaluated lamps, with the objective of support the end users about the best product, since; there are several technical parameters to be considered.

Index Terms—LED, multicriteria analysis, energy efficiency, power quality.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos 20 anos a indústria da iluminação vem passando por uma grande transformação com a utilização da tecnologia LED comparada à que ocorreu com o surgimento da lâmpada incandescente de Thomas Edison em 1879. No que tange ao mercado brasileiro, as lâmpadas LED vêm apresentando um crescimento exponencial no país. Para quantificar este crescimento, o número de unidades comercializadas era 4 milhões de unidades em 2011 e chegou a 81 milhões em 2015. Até 2023 a tecnologia LED representará 74% das vendas de lâmpadas para projetos de

retrofit voltados ao segmento de iluminação comercial conforme dados da Associação Brasileira da Indústria de Iluminação [1].

No que tange ao consumidor, a escolha de uma lâmpada era uma tarefa relativamente simples, em que se resumia na escolha da potência elétrica, com a tecnologia incandescente, podendo ser de 60W, 100W, 150W entre outras poucas opções. Com o surgimento da tecnologia da lâmpada fluorescente compacta, LFC, o consumidor passou a ter mais opções de potência, formato, temperatura de cor e diferentes níveis de eficiência energética, além do parâmetro de qualidade de energia elétrica e fator de potência. Para facilitar essa escolha, o Inmetro criou a Etiqueta Nacional de Eficiência Energética (ENCE) para lâmpada fluorescente compacta, que auxilia o consumidor através de uma classificação de eficiência energética. As lâmpadas com classificação “A” são mais eficientes, ao passo que a classificação “B” são a de menor eficiência que a “A” e em sequência apresentam-se as de classificação “C”, “D” e “E”. Na etiqueta padronizada no Brasil para LFC existem as informações de fluxo luminoso, potência elétrica e o valor da eficiência energética. Alguns trabalhos referentes a avaliação da qualidade de dispositivos de iluminação são: análise da qualidade de energia em lâmpadas incandescentes, fluorescentes e LED [2], propostas de soluções para problemas de qualidade de energia devido ao uso massivo de lâmpadas fluorescentes compactas [3] e a tecnologia LED aplicada a sistemas de iluminação pública [4].

Na tecnologia LED, a quantidade de parâmetros é bem superior que as tecnologias anteriores, tornando a escolha de uma lâmpada uma tarefa nada trivial. Além disso, até o presente momento, não há uma classificação que auxilie o consumidor a escolher qual fabricante possui a melhor eficiência energética. Outro parâmetro importante que deve ser avaliado é a qualidade de energia, uma vez que a mesma é uma fonte de ruído elétrico e que tem grande impacto na rede elétrica, e também a qualidade da luz emitida, que por sua vez, dependerá da qualidade do material que constitui o LED.

Dado o exposto, o presente trabalho tem por objetivo realizar uma avaliação do desempenho energético total da lâmpada LED, levando em consideração a eficiência energética, qualidade de energia e qualidade da luz, seguindo a linha de pesquisa comparativa de tecnologias e critérios de avaliação apresentados em [5-7]. Para isso, será utilizada a ferramenta de análise multicritério TOPSIS, para ordenar e ranquear os fabricantes de melhor desempenho energético. A

A.P. Fragoso, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, adrianofragoso@id.uff.br

G.B.A. Lima, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, glima@id.uff.br

M.Z.Fortes, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Brasil, mzf@vm.uff.br

L.O. Gavião, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, luz.gaviao67@gmail.com

G.M.A. Ney, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, glorianey1612@gmail.com

A.M.E. Pereira, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, am_estrela@id.uff.br

aplicação do TOPSIS está se difundindo em diferentes linhas de pesquisa, em que destacam-se: avaliação do desempenho de sistemas de ar condicionado considerando o conforto térmico [8-9], avaliação de locais para instalação de unidades fotovoltaicas [10] e análise de sistemas de cogeração [11].

II. AVANÇO DA TECNOLOGIA LED

Embora aparentemente ser uma tecnologia moderna, a primeira observação do fenômeno de emissão de luz a partir de um semicondutor foi em 1907, por Henry Joseph Round que, acidentalmente descobriu os efeitos físicos da eletroluminescência. Na época, Henry publicou que o cristal de SiC emitiu uma luz amarela ao ser submetido a uma pequena tensão elétrica, fato esse que ficou por muito tempo esquecido, porque a pesquisa em andamento era sobre radio transmissão. [12].

Em 1962, o primeiro diodo vermelho é introduzido no mercado, com a tecnologia de fosfeto de arseneto de gálio, por Nick Holonyark Jr., da General Elétric, por esse feito, ficou conhecido como o “pai do diodo emissor de luz”, pois foi ele quem conseguiu tornar a luz visível. Outros especialistas conseguiram aumentar a sua intensidade e surgiram no mercado tonalidades de verde, amarelo e laranja no ano de 1971. [13]

Em 1993, é criado o primeiro diodo de nitreto de gálio e índio, que emite luz na cor azul, comercialmente viável, pelo Dr. Shuji Nakamura. Essa descoberta é considerada um grande marco na indústria de iluminação mundial, pelo fato do LED azul ser a base para o LED branco que conhecemos hoje. Essa descoberta rendeu ao Dr. Nakamura o Prêmio Nobel de Física de 2014, juntamente com Isamu Akasaki e Hiroshi Amano, todos pesquisadores japoneses.

Em 2008, surge o LED de alto desempenho, chegando a uma eficiência de até 120 lm/W, com IRC de 80-89%. Atualmente, grandes empresas investem muito para conseguir oferecer produtos LEDs de qualidade, capazes de competir com as lâmpadas tradicionais, chegando a na faixa de 200 lm/W. Estes produtos de alta performance ainda não chegaram na iluminação residencial.

A aplicação de LEDs para construção de lâmpadas é uma tecnologia recente, mas em crescente expansão. Os LEDs trazem consigo um novo conceito na área de iluminação, com maior durabilidade e eficiência energética em comparação com as demais lâmpadas há anos já consolidadas no mercado [14].

III. REGULAMENTAÇÃO DAS LÂMPADAS LED NO BRASIL

O Inmetro regulamentou a fabricação, importação e comercialização das lâmpadas LED com driver integrado no Brasil através da Portaria nº 389, de 25 de Agosto de 2014 [15] e Portaria nº 144, de 13 de Março de 2015 [16]. A primeira define todos os ensaios a serem realizados, assim como os critérios de aprovação dos mesmos, enquanto a segunda define o modelo de avaliação e como se dará o funcionamento da certificação.

As lâmpadas obrigadas a realizar a certificação são os modelos de bulbo A (que aparentam ser uma lâmpada incandescente comum) nomeadas como: *tubular* (T), *pear shape* (P), *multifaceted reflector* (MR), *parabolic aluminium*

reflector (PAR ou AR), *reflector* (R), *globe shape* (G) e *tubular shape with lens in crown* (TL) até 60W.

A regulamentação exige uma vida nominal mínima de 25.000 horas, garantia de três anos e anualmente os fabricantes são ensaiados por laboratórios acreditados para a manutenção da certificação.

Uma lâmpada LED certificada deve apresentar na embalagem a Etiqueta Nacional de Eficiência Energética, onde podem ser verificados a potência, fluxo luminoso, eficiência energética e o organismo que certificou o produto. Esta etiqueta é usada no Brasil desde 2001 para indicar a menor desempenho energética aceitável [17] e inclui-se neste programa de etiquetagem as edificações [18].

Os ensaios de desempenho previstos e que devem constar nas embalagens do produto são: potência elétrica, fator de potência, THD, fluxo luminoso, eficiência luminosa, índice de reprodução de cor (IRC), temperatura de cor correlata – TCC (destacando-se que a grandeza TCC descreve a tonalidade da cor e não influencia no desempenho energética), ângulo de fecho e valor da intensidade luminosa de pico.

IV. METODOLOGIA E DESCRIÇÃO/RESULTADOS DOS TESTES

Para realização deste estudo foram escolhidos 10 fabricantes do modelo tubular LED 18W, 220V, 6400K e realizadas todas as medições previstas no Regulamento Técnico do Inmetro de lâmpadas LED. Essas medições foram divididas em três grupos: eficiência energética, qualidade de energia e qualidade luminotécnica, conforme as Tabelas I, II e III.

TABELA I
RESULTADO DAS MEDIÇÕES – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
TUBULAR 18 W 220 V 6400 K

DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	POTÊNCIA (W)	FLUXO (lm)	EFICIÊNCIA (lm/W)
A	20,2	2180,5	107,7
B	20,4	1867,2	91,5
C	20,2	2183,1	108,1
D	18	2030,2	112,8
E	17,9	2086,4	116,5
F	18,7	1863,6	99,8
G	17,9	2074	115,6
H	18,2	1852	101,9
I	18,1	1853,8	102,4
J	20,3	2295,3	113

TABELA II
RESULTADO DAS MEDIÇÕES – QUALIDADE DA ENERGIA
TUBULAR 18 W 220 V 6400 K

DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	MANUTENÇÃO DO FLUXO LUMINOSO (%)	FATOR DE POTÊNCIA	THDi (%)
A	96,8	0,92	22,8
B	97,3	0,94	14,1
C	96	0,92	19,3
D	96,6	0,96	10,6
E	98,1	0,93	15,5
F	96	0,92	16,7
G	96,9	0,93	15,4
H	96,2	0,92	15,4
I	96,2	0,92	18,5
J	96,1	0,94	14,4

TABELA III. RESULTADO DAS MEDIÇÕES – QUALIDADE LUMINOTÉCNICA

DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	TUBULAR 18 W 220 V 6400 K		ÂNGULO DE FACHO	INTENSIDADE LUMINOSA DE PICO (CD)
	IRC	R9		
A	84,4	12,1	166,5	364,6
B	86,1	22,9	226,4	255
C	84,4	12,1	166,1	361
D	83,4	9,2	198,6	269,1
E	85,6	32,2	205,9	264,3
F	83,3	4	163,8	306,8
G	84,9	27,2	245,7	289,2
H	84,9	13,5	125,8	543,4
I	82,8	10	181,9	264,6
J	85,9	21,2	122,2	601,2

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense (LABLUX - acreditado no Inmetro para realização de ensaios em lâmpadas LED) e representam a média aritmética de dez lâmpadas ensaiadas para cada fabricante, em temperatura controlada de 25 ± 1 °C e os métodos de ensaio foram em conformidade com a IESNA LM-79-08[19]. Outras pesquisas relacionadas ao tema Luminotécnica realizados pelo LABLUX estão reportadas em [2-4;20-24].

V. ANÁLISE MULTI CRITÉRIO

A. O Método TOPSIS

O TOPSIS é uma técnica de apoio à decisão multicritério, desenvolvida por Hwang e Yoon [25]. De maneira geral, o método estabelece uma ordenação das alternativas, com base no princípio de que a melhor alternativa é aquela que, simultaneamente, possua a menor distância para a referência positiva (PIS) e a maior distância para a referência negativa (NIS). Essas referências PIS e NIS podem ser consideradas alternativas virtuais, elaboradas a partir das melhores e piores avaliações x_{ij} da i -ésima alternativa do j -ésimo critério, respectivamente. O TOPSIS apresenta cálculos simples e sua lógica intuitiva encontra aplicações nas mais variadas áreas do conhecimento. As equações de (1) a (7) descrevem os procedimentos de cálculo dos coeficientes TOPSIS para cada alternativa, cuja ordem dos coeficientes estabelece a sugestão de preferência para a tomada de decisão.

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

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

$$PIS = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\}, \quad v_j^* = \max_j v_{ij} \quad (3)$$

$$NIS = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}, \quad v_j^- = \min_j v_{ij} \quad (4)$$

$$D_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (5)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (6)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^* + D_i^-} \quad (7)$$

Em que:

m : quantidade de alternativas

i : índice de ordem da alternativa

n : quantidade de critérios

j : índice de ordem do critério

x_{ij} : avaliação da i -ésima alternativa no j -ésimo critério

r_{ij} : valor normalizado de x_{ij}

w_j : peso do critério

v_{ij} : valor normalizado e ponderado de x_{ij}

PIS : vetor de valores máximos dos v_j

NIS : vetor de valores mínimos dos v_j

D_i^* : distância da i -ésima alternativa para a PIS

D_i^- : distância da i -ésima alternativa para a NIS

C_i : coeficiente de similaridade da i -ésima alternativa

Os cálculos do TOPSIS podem ser organizados em cinco etapas. Na primeira etapa, a base de dados deve ser normalizada, tendo em vista a diferença de escala entre as avaliações nos critérios da matriz de decisão. Os valores x_{ij} são transformados em r_{ij} e usualmente se emprega a Eq. (1) [26]. Na segunda etapa, os valores normalizados são multiplicados pelos pesos w_j , conforme a Eq. (2). Os pesos devem ser previamente estabelecidos. Os valores r_{ij} são ponderados e transformados em v_{ij} . Na terceira etapa, são identificados os vetores PIS e NIS, conforme as Eqs. (3) e (4). Na quarta etapa, são calculadas as distâncias D_i^* e D_i^- de cada alternativa para a PIS e a NIS conforme as Eqs. (5) e (6), respectivamente. A distância euclidiana é a mais usual nos cálculos do TOPSIS. Por fim, o coeficiente de similaridade C é obtido a partir da Eq. (7). A ordem de preferência é estabelecida a partir do maior C , que caracteriza a melhor alternativa.

Duas informações adicionais são necessárias ao cálculo do TOPSIS: o impacto e os pesos dos critérios. O impacto se refere à interferência positiva ou negativa de um critério na tomada de decisão, com o aumento da avaliação. Os critérios com impacto negativo requerem a inversão dos operadores “max-min” das Eqs. (3) e (4), respectivamente, para determinar os vetores PIS e NIS. Os pesos dos critérios devem ser previamente obtidos de forma a serem utilizados na segunda etapa do TOPSIS. Nessa pesquisa, o TOPSIS foi calculado com pesos unitários e por entropia dos dados, sendo os resultados da ordenação posteriormente conjugados com o método de Borda.

B. Pesos por Entropia

A técnica de atribuição de pesos por entropia foi proposta por Zeleny [27]. Os próprios dados indicam o peso a ser considerado em cada critério, sem a necessidade de interferência de especialistas ou do decisor. Dessa forma, o autor buscava eliminar a subjetividade na escolha dos pesos aos critérios. A ideia chave é atribuir o maior peso ao critério

que represente a maior quantidade de informação, que está associada a capacidade de discriminar as alternativas. Zeleny buscou na teoria da informação de Shannon a medida de dispersão, indicada com a entropia de um canal de informação para o cálculo dos pesos dos critérios. Em termos práticos, o critério com maior variância receberá maior peso por estar associado à maior quantidade de informação. As equações de (8) a (12) são utilizadas para a determinação dos pesos por entropia com base exclusivamente nas características dos dados, sem recorrer à subjetividade da opinião de especialistas ou agentes tomadores de decisão.

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum x_{ij}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$k = \frac{1}{\log(m)} \quad (9)$$

$$E_j = -k \sum a_{ij} \log(a_{ij}) \quad (10)$$

$$D_j = 1 - E_j \quad (11)$$

$$w_j = \frac{D_j}{\sum D_j} \quad (12)$$

Em que:

a_{ij} : valor normalizado de x_{ij}

k : constante

E_j : entropia do critério

D_j : medida de dispersão

Os pesos por entropia podem ser calculados conforme as equações de (8) a (12) [26]. A Eq. (8) normaliza a base de dados. A Eq.(9) apresenta o cálculo da constante k a partir da quantidade de alternativas. A Eq. (10) indica o cálculo da entropia E , cujo valor próximo da unidade indica a uniformidade dos dados, enquanto valores próximos a zero indicam elevada variância. Assim, a medida de dispersão D da Eq. (11) é calculada a partir do complemento da entropia. Por fim, a Eq.(12) normaliza os pesos w_{ij} .

C. Método de Borda

Um dos métodos ordinais mais antigos que data do final do século XVIII, foi desenvolvido pelo cientista francês Jean-Charles de Borda. De uma forma geral, a variante mais simples do método calcula os escores de cada alternativa por meio da soma de coeficientes associados aos *rankings* em cada critério. Esses coeficientes de Borda podem assumir valores canônicos (i.e. 1, 2, 3, ..., m , para m alternativas), ou pontuações que valorizem as alternativas melhor ranqueadas. Isto se verifica com frequência em competições esportivas, quando o primeiro colocado recebe mais pontos que o segundo e os demais (i.e. pontuação de competições automobilísticas), como destacados em [27].

O procedimento para identificar a preferência da a -ésima alternativa também é simples. Inicialmente as m alternativas são ordenadas para cada critério, em que r_{ij} é a ordem de cada alternativa i para cada critério j .

Em seguida são atribuídos m números inteiros k como os coeficientes de Borda (i.e. $k_1 > k_2 > k_3 \dots k_m \geq 0$). Dessa forma, as alternativas, para cada critério j , formam uma cadeia de preferências, em que a notação “>” indica a estrita preferência de uma alternativa em relação às demais e “≈” significa indiferença entre duas ou mais delas. A Eq. (13) demonstra a cadeia de preferências entre as alternativas, para um resultado genérico da aplicação do método de Borda.

$$a_{3j} \succ a_{2j} \approx a_{4j} \succ \dots \succ a_{1j} \quad (13)$$

Eventuais empates na ordem de preferência podem ocorrer, em decorrência da indiferença entre as alternativas sob um dado critério. Nesse caso aplica-se o método de Kendall, que atribui a média aritmética dos coeficientes de Borda que essas alternativas receberiam caso não houvesse indiferença. O escore final de cada alternativa corresponde à soma dos coeficientes de Borda obtidos em cada critério. A alternativa com maior número de pontos torna-se a de maior preferência, até a última ordenada [28].

Nessa pesquisa, a ordenação final dos fabricantes de lâmpadas decorreu da aplicação dos métodos TOPSIS e Borda. Dois resultados do TOPSIS, para pesos unitários e por entropia produziram classificações das alternativas, que foram convertidas em coeficientes de Borda. A soma desses coeficientes produziu o resultado final. Esses resultados estão apresentados na Tabela IV.

TABELA IV
RESULTADOS DAS ANÁLISES MULTICRITÉRIO

TUBULAR 18 W 220 V 6400 K			
RANQUEAMENTO			
DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS	MÉTODO TOPSIS POR ENTROPIA	MÉTODO TOPSIS UNITÁRIO	MÉTODO TOPSIS MAIS BORDA
A	7	8	8
B	3	3	3
C	6	7	5
D	9	4	5
E	1	1	1
F	10	9	10
G	2	2	2
H	5	10	8
I	8	6	7
J	4	5	4

Podemos observar primeiramente que o ranqueamento dos três resultados está bem coerente. Os fabricantes E e G apresentaram o melhor desempenho energético, fato esse que acompanha a maneira tradicional de avaliação de produto, onde se leva em consideração apenas a eficiência luminosa. Porém, o terceiro melhor desempenho foi alcançado pelo fabricante B, que apresentou a pior eficiência energética. Este fato se deu por que a análise multicritério leva em consideração todos os parâmetros envolvidos.

VI. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma análise multicritério para a avaliação energética de lâmpadas LED, que possui na sua embalagem várias informações técnicas. O artigo mostrou que para um produto de iluminação com tecnologia LED, além das informações de eficiência energética, há dados de qualidade de energia e qualidade da luz que influenciam na decisão de escolha do produto de maior desempenho energético.

O fabricante E apresentou o melhor desempenho energético, porque além de alcançar a maior eficiência energética, obteve também bons resultados em qualidade de energia e qualidade da luz. Por outro lado, o fabricante B apresentou o terceiro melhor desempenho e alcançou valores mais equilibrados nos outros parâmetros, muito embora tenha apresentado a pior eficiência energética.

As avaliações usuais aplicadas nos regulamentos de certificações dos produtos não levam em consideração todos os parâmetros técnicos medidos e que de alguma forma também influenciam do desempenho do produto como um todo, servindo de base para estudos de novas metodologias de avaliações de produto.

Este trabalho apresentou a análise multicritério como ferramenta de análise do desempenho energético de uma lâmpada LED, levando em consideração, além da eficiência luminosa, a qualidade de energia elétrica e parâmetros de qualidade luminotécnica. Esta forma de análise apresenta-se como uma metodologia mais rica e equilibrada, permitindo uma análise global do desempenho energético como um todo e podendo ser melhor estudada e aplicada pelos órgãos regulamentadores no sentido de aprimorar suas metodologias de análises e classificação dos produtos.

REFERÊNCIAS

- [1] ABILUX, *Abilux na mídia*. Disponível em <<http://www.abilux.com.br/portal/abilux-na-midia-lista>> Acesso em 15 de Outubro de 2016.
- [2] A.M.E. Pereira, V.A. Teixeira, M.Z. Fortes, G.M. Tavares, V.H. Ferreira. "Power Quality Analysis of Domestic Lamps available in the Brazilian Market", *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 14, p.389-399, 2015.
- [3] J.E.V. Fassarella, M.Z. Fortes, A.P. Fragoso, G.M.Tavares. "Analysis and Suggested Solution of Power Quality Problems in Lighting Laboratory", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 12, p. 1019-1026, 2014. doi: 10.1109/TLA.2014.6893995.
- [4] A.M.E. Pereira, V.A. Teixeira, M.Z. Fortes, A.P. Fragoso, G.M. Tavares. "Some considerations about LED technology in public lighting", In: Proceedings of 2015 Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2015. doi: 10.1109/Chilecon.2015.7400433.
- [5] W.R. Ryckaert, K.A.G. Smet, I.A.A. Roelands, M. Van Gils, P. Hanselaer, "Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation", *Energy and Buildings*, Vol. 49, p. 429-436, 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.042.
- [6] W.R. Ryckaert, C. Lootens, J. Geldof, P. Hanselaer, "Criteria for energy efficient lighting in buildings", *Energy and Buildings*, Vol. 42, p.341-347, 2010. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.09.012.
- [7] S. Petcharat, S. Chungpaibulpatana, P. Rakkwamsuk, "Assessment of potential energy saving using cluster analysis: A case study of lighting systems in buildings", *Energy and Buildings*, Vol. 52, p. 145-152, 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.06.006.
- [8] N. Mao, M. Song, S. Deng, "Application of TOPSIS method in evaluating the effects of supply vane angle of a task/ambient air conditioning system on energy utilization on thermal comfort", *Applied Energy*, Vol.180, p.536-545, 2016. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.011.
- [9] N. Mao, D. Pan, M. Chan, S.Deng, "Performance evaluation of an air conditioning system with different heights of supply outlet applied to a sleeping environment", *Energy and Buildings*, Vol. 77, p. 281-291, 2014. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.065.
- [10] J.M. Sanchez-Lozano, M.S. Garcia-Cascales, M.T. Lamata, "Comparative TOPSIS-ELECTRE TRI methods for optimal sites for photovoltaic solar farms. Case Study in Spain", *Journal of Clean Production*, Vol. 127, p.387-398, 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.005.
- [11] P. Alcan, A. Balin, H. Basligil, "Fuzzy multicriteria selection among cogeneration systems: A real case application", *Energy and Buildings*, Vol. 67, p.624-634, 2013. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.048.
- [12] N. Zheludev, "The life and times of the LED – a 100-year history", *Nature Photonics*, Vol. 1, p.189-192, 2007. doi: 10.1038/nphoton.2007.34.
- [13] R. Serradura, "O LED na Arquitetura", *Revista Arquitetonline*, Vol. 3, p. 64-67, 2010.
- [14] M.L. Silva, *LED – A luz dos novos projetos*, Ed. Ciência Moderna, 2012.
- [15] Inmetro, *Portaria 389/2014, Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED com Driver Integrado*. Available from: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002154.pdf>.
- [16] Inmetro, *Portaria 144/2015, Requisitos de Avaliação da Conformidade Lâmpadas LED com Driver Integrado*. Available from: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002235.pdf>.
- [17] L.A.H. Nogueira, R.B. Cardoso, C.Z.B. Cavalcanti, P.A. Leonelli, "Evaluation of the impacts of the Energy Efficiency Law in Brazil", *Energy for Sustainable Development*, Vol. 24, p.58-69, 2015. doi: 10.1016/j.esd.2014.12.002.
- [18] A.C.P. Lopes, D. Oliveira Filho, L. Altoe, J.C. Carlo, B.B. Lima, "Energy efficiency labeling program for buildings in Brazil compared to the United States' and Portugal's", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 66, p. 207-219, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.07.033.
- [19] IES, *IES LM-79-08 – Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products*, 2008.
- [20] M.Z.Fortes, A.M.E.Pereira, A.P.Fragoso, G.M.Tavares, "Avaliação de LFC's nos limites de Tensão do PRODIST", *Engevista*, Vol. 16, p.283-291, 2014.
- [21] M.Z.Fortes, J.E.V.Fassarella, A.P.Fragoso, G.M.Tavares, "O Uso do Laboratório de Luminotécnica para Estudos de Qualidade de Energia", *Revista de Ensino de Engenharia*, Vol.32, p.26-31, 2013.
- [22] M.Z.Fortes, A.P.Fragoso, A.M.E.Pereira, G.M.Tavares, "Análise sobre a Qualidade de LFC's disponíveis no Mercado Brasileiro", *SODEBRAS*, vol.8, p.63-66, 2013.
- [23] M.Z. Fortes, G.M.Tavares, A.M.E. Pereira, A.P. Fragoso, "Qualidade de Energia em Lâmpadas LED – Comparação em suas tensões usuais 127 e 220 V", In: XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.3607.7284.
- [24] M.Z.Fortes, G.M.Tavares, A.P.Fragoso, A.M.E. Pereira, A.C.S. Paula, "Analysis of CFL's power quality in the Brazilian market", In: 2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications – PEPQA, 2015. doi: 10.1109/PEPQA.2015.7168212.
- [25] C.L. Hwang, K. Yoon. *Multiple Attribute Decision Making – Methods and Applications. A State of Art Survey*, Springer Berlin Heidelberg, 1981.
- [26] J. Lu, G. Zhang, D. Ruan, F. Wu, *Multi-Objective Group Decision Making: Methods, Software and Applications with Fuzzy Set Techniques*, Series in Electrical and Computer Engineering, Vol.6, World Scientific, 2007. (CD-ROM).
- [27] M. Zeleny, J.L. Cochrane, *Multi criteria decision making*, McGraw-Hill, 1982.
- [28] J.C. Pomerol, S. Barba-Romero, *Multicriterion decision in management principles and practice*, vol.25, 1st edition, New York: Springer Science+Business Media, 2012.



Adriano Pinheiros Fragoso é formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2008 e Mestre em Metrologia e Qualidade pelo Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO) em 2015. Possui experiência na Luminotécnica e Qualidade de energia. Atualmente é gerente técnico do

Laboratório de Luminotécnica (Lablux) na Universidade Federal Fluminense.



Gloria Maria Alves Ney recebeu o título de Mestre em Construção e Montagem Industrial pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2016. Atualmente desenvolve estudos nas áreas de: comissionamento, planejamento, sustentabilidade e grafos.



Gilson Brito Alves Lima é Engenheiro Civil e de Segurança do Trabalho com doutorado em Engenharia de Produção (COPPE-UFRJ). Atualmente é Professor Associado da Universidade Federal Fluminense. Tem experiência profissional em Consultoria Técnica na Indústria de Energia. Seu foco de pesquisa acadêmica tem ênfase nas áreas de Gerência de

Riscos, Manutenção, Segurança, Meio Ambiente e Sustentabilidade Organizacional.



Antonio Marcos Estrela Pereira é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2011, Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET) pela Universidade Federal Fluminense. Possui experiência em Luminotécnica e Qualidade de energia. Atualmente metrologista responsável pelo laboratório

de eficiência do Laboratório de Luminotécnica (Lablux) na Universidade Federal Fluminense.



Luiz Octávio Gavião é graduado em Ciências Navais na Escola Naval, aperfeiçoamento na Escola de Oficiais da Marinha Argentina e Mestrado em Estudos Militares na Universidade do Corpo de Fuzileiros Navais dos EUA. Fez mestrado e doutorado em Engenharia de Produção na Universidade Federal Fluminense.. Sua pesquisa é na área de

Sistemas de Apoio à Decisão, com modelos multicritério probabilísticos aplicados em gerência de risco, sustentabilidade, energias renováveis e ciência do esporte.



Márcio Zamboti Fortes (M'2010; SM'2017) recebeu o título de Mestre em Engenharia da Energia pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2000 e de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP) em 2007. Sua experiência profissional inclui atividades de gestão, projetos, manutenção, implantação e

comissionamento. Atualmente é professor da Universidade Federal Fluminense (UFF) e desenvolve estudos nas áreas de: conservação e qualidade de energia, manutenção industrial, máquinas elétricas e acionamentos.