



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# Definición de estándares mínimos de desempeño energético para tecnologías LED de sistemas de iluminación

**Luis Alejandro Cárdenas García**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Bogotá, Colombia  
2023



# Definición de estándares mínimos de desempeño energético para tecnologías LED de sistemas de iluminación

Luis Alejandro Cárdenas García

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Eléctrica**

Director:

MsE., Ing. Fernando Augusto Herrera León

Codirectora:

PhD., Ing. Paula Catalina Acuña Roncancio

Línea de Investigación:

Energía y electromagnetismo

Grupo de Investigación:

Laboratorio de Innovación en Alta Tensión y Energías Renovables - LIATER

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2023



## *Dedicatoria*

A mis padres, Edilma y Fernando, quienes me han brindado apoyo constante y fortaleza para construir mis sueños académicos. Su acompañamiento y sacrificio han sido la base de mi éxito y mi desarrollo profesional y personal.

A mi hermana, mi abuela y mi familia. La familia, como pilar esencial de nuestra sociedad, ha sido mi fuente de inspiración y motivación durante este emocionante viaje académico.

A mis amigos y compañeros del laboratorio, quienes, con su apoyo, contribuyeron a la construcción social y colectiva de conocimiento, haciendo de mi proceso académico un continuo debate y aprendizaje constante.

*“La energía es esencial para el desarrollo, y la energía sostenible es esencial para el desarrollo sostenible”.*



# Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia por brindarme las herramientas necesarias para desarrollar satisfactoriamente mi investigación y permitir mi desarrollo profesional, personal y social. Agradezco al Laboratorio de Innovación En Alta Tensión y Energías Renovables (LIATER) por brindarme el apoyo en este proceso académico.

Agradezco a mi director y asesor, Mgtr. Ing. Fernando Augusto Herrera León, y a mi codirectora, PhD. Ing. Paula Catalina Acuña Roncancio, por su continua asesoría, paciencia y guía académica y científica. Con su compromiso constante y sus valiosos consejos, hicieron posible alcanzar los objetivos y metas propuestos. Además, su inestimable acompañamiento impulsó mi desarrollo tanto profesional como personal.

Agradezco al Ministerio de Ciencia y Tecnología, al Grupo de Investigación en el Sector Energético Colombiano (GRISEC) y al LIATER por el apoyo en la financiación de las muestras probadas en laboratorio y en la divulgación de los resultados parciales en Luxamérica 2022.

Agradezco al Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales Fabio Chaparro (LABE) por permitirme usar sus equipos e instalaciones. Agradezco el apoyo de Juan Pablo Chico, Fredy Narvaez y David Nova por su apoyo en el desarrollo de las pruebas de laboratorio.



## Resumen

### Definición de estándares mínimos de desempeño energético para tecnologías LED de sistemas de iluminación.

En este estudio se desarrolla un modelo de etiquetado específico para fuentes de luz LED de interior en Colombia, considerando parámetros de desempeño energético, visual y circadiano. Se evalúa la aplicación de los Estándares Mínimos de Desempeño Energético (MEPS) a estas fuentes y se valoran modelos multicriterio para establecer el programa de etiquetado. Como resultado se evidencia la importancia de divulgar efecto visual y circadiano de la iluminación en el bienestar humano entre profesionales y diseñadores de iluminación en Colombia, destacando cómo las características lumínicas pueden influir en la salud y el rendimiento.

Asimismo, el estudio evalúa el impacto de establecer MEPS en Colombia. Al comparar un MEPS de 80 lm/W con un escenario base de 60 lm/W, se estima un ahorro acumulado significativo de 8140 GWh de energía y una reducción acumulada considerable de 3 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> en un período de 10 años. Estos resultados respaldan la implementación de políticas de eficiencia energética en el sector de iluminación de interiores en Colombia, mostrando cómo la adopción de medidas más ecológicas puede tener un impacto positivo en la conservación de recursos energéticos y en la reducción de la huella de carbono del país.

En conclusión, este estudio ofrece una contribución al ámbito de la iluminación de interiores en Colombia. El modelo de etiquetado propuesto y la evaluación de MEPS proporcionan herramientas para mejorar la eficiencia energética y promover prácticas más sostenibles en el uso de fuentes de luz LED. Además, la divulgación del efecto visual y circadiano de la iluminación resalta la importancia de considerar el impacto en el confort y la tarea visual. Con estos hallazgos, se sientan bases sólidas para fomentar el desarrollo responsable del sector de iluminación en el país, con miras a un futuro más eficiente, sostenible y amigable con el medio ambiente.

**Palabras clave:** Desempeño circadiano, Desempeño energético, Desempeño visual, Etiquetado, MEPS, Tecnología LED.

## Abstract

# Definition of minimum energy performance standards for LED lighting systems technologies.

The study formulates a specific labeling model for indoor LED light sources in Colombia, considering parameters related to energy performance, visual performance, and circadian performance. The application of Minimum Energy Performance Standards (MEPS) to these LED light sources is evaluated and Multi-criteria models are assessed to establish the labeling program. As a result, the importance of disseminating the visual and circadian effect of lighting on human well-being among professionals and lighting designers in Colombia was found, emphasizing how lighting characteristics can influence health and performance.

Furthermore, the study evaluates the impact of implementing MEPS in Colombia. When comparing a MEPS of 80 lm/W with a baseline scenario of 60 lm/W, significant energy savings of 8140 GWh and a considerable reduction of 3 million tons of CO<sub>2</sub> emissions over a 10-year period are estimated. These findings support the implementation of energy efficiency policies in the indoor lighting sector in Colombia, demonstrating how adopting environmentally-based measures can have a positive impact on energy resource conservation and the country's carbon footprint.

In conclusion, this study provides a valuable contribution to the field of indoor lighting in Colombia. The proposed labeling model and the evaluation of MEPS offer tools to enhance energy efficiency and promote more sustainable practices in the use of LED light sources. Moreover, the dissemination of the visual and circadian effect of lighting underscores the importance of considering its impact on visual performance. With these findings, solid foundations are laid for fostering responsible development in the lighting sector in the country, with a view towards a more efficient, sustainable, and environmentally friendly future.

**Keywords:** Circadian performance, Energy performance, Visual performance, Labeling, MEPS, LED technology.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract</b>	<b>x</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Estado del arte y desarrollo del marco teórico</b>	<b>3</b>
2.1 Contexto de la iluminación en Colombia . . . . .	3
2.1.1 Contexto técnico, legal y político . . . . .	3
2.1.2 Contexto económico . . . . .	7
2.1.3 Contexto tecnológico . . . . .	10
2.1.4 Contexto energético . . . . .	11
2.1.5 Contexto ambiental . . . . .	13
2.2 Políticas de MEPS y etiquetado en el mundo para LED . . . . .	13
2.2.1 MEPS y Etiquetado . . . . .	14
2.2.2 Etiquetado y estándares de LED en el mundo . . . . .	17
2.2.3 Parámetros y metodologías para la evaluación del desempeño energético del LED . . . . .	20
2.3 Parámetros y metodologías de evaluación . . . . .	21
2.3.1 Parámetros para evaluar el desempeño energético . . . . .	22
2.3.2 Parámetros para evaluar el desempeño visual . . . . .	22
2.3.3 Parámetros para evaluar el desempeño circadiano . . . . .	24
2.3.4 Relación desempeño energético y desempeño visual . . . . .	25
2.3.5 Metodologías para la evaluación multicriterio . . . . .	27
2.4 Tendencias tecnológicas y normatividad . . . . .	29
2.4.1 Tendencias en los productos LED . . . . .	29
2.4.2 Referentes normativos . . . . .	30
2.4.3 Ciclo de vida ambiental fuentes de luz LED . . . . .	30
2.5 Selección de los productos para pruebas piloto . . . . .	32

<b>3</b>	<b>Pruebas de laboratorio</b>	<b>33</b>
3.1	Metodología . . . . .	33
3.1.1	Selección de productos . . . . .	33
3.1.2	Medición de parámetros luminosos . . . . .	34
3.1.3	Medición de parámetros eléctricos . . . . .	38
3.1.4	Tratamiento del espectro . . . . .	39
3.2	Resultados . . . . .	40
3.2.1	Medición de fuentes en espectro fijo . . . . .	40
3.2.2	Medición de fuentes espectro variable . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Evaluación del etiquetado</b>	<b>53</b>
4.1	Descripción de los métodos . . . . .	53
4.1.1	Método MCHP ELECTRE-Tri-b . . . . .	53
4.1.2	Método AHP Sort . . . . .	56
4.2	Definición de rangos para la etiqueta . . . . .	57
4.3	Aplicación de los métodos . . . . .	60
4.3.1	Clasificación de parámetros . . . . .	60
4.3.2	Método MCHP ELECTRE-Tri-b . . . . .	64
4.3.3	Método AHP Sort . . . . .	68
4.4	Análisis comparativo de los métodos . . . . .	70
4.5	Propuesta de etiqueta para iluminación . . . . .	72
4.5.1	Fuentes espectro punto fijo . . . . .	75
4.5.2	Fuentes espectro variable . . . . .	77
4.5.3	Estructuración de la etiqueta . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Evaluación de los MEPS</b>	<b>82</b>
5.1	Análisis comparativo . . . . .	82
5.1.1	MEPS Unión Europea . . . . .	82
5.1.2	MEPS propuesta de actualización RETILAP . . . . .	84
5.2	Análisis de impacto . . . . .	87
5.2.1	Impacto país . . . . .	87
5.2.2	Impacto usuario final . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>97</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	97
6.2	Recomendaciones . . . . .	99
	<b>Bibliografía</b>	<b>100</b>

# Lista de Figuras

<b>2-1</b>	Total unidades de lámparas importadas por tecnología en Colombia 2015-2021. Elaboración propia con datos de [1]. . . . .	8
<b>2-2</b>	Total unidades de lámparas exportadas por tecnología en Colombia 2015-2021. Elaboración propia con datos de [1]. . . . .	9
<b>2-3</b>	Rangos de eficacia luminosa para bombillas y lámparas en el mercado colombiano. 171 referencias de bombillas, 194 referencias de luminarias. Elaboración propia con datos recopilados de los comercios colombianos en octubre de 2022.	12
<b>2-4</b>	Rangos del IRC para bombillas y lámparas en el mercado colombiano. 171 referencias de bombillas, 194 referencias de luminarias. Elaboración propia con datos recopilados de los comercios colombianos en octubre de 2022. . . .	12
<b>2-5</b>	Etiquetas comparativas de categoría. Tomado de [2] . . . . .	15
<b>2-6</b>	Etiquetas comparativas de escala continua. Tomado de [2] . . . . .	15
<b>2-7</b>	Etiquetas de garantía (Energy Star). . . . .	16
<b>2-8</b>	Espacio de color de la CIE 1931 representando: (a) los puntos para el cálculo de la pureza de color (b) los puntos de temperatura de color TCC. Tomado de [3]. . . . .	24
<b>2-9</b>	Ejemplo jerarquización método MCHP ELECTRE-Tri [4]. . . . .	29
<b>3-1</b>	Muestra de productos de iluminación LED del mercado colombiano probados en laboratorio. . . . .	34
<b>3-2</b>	Metodología de medición flujo luminoso. . . . .	35
<b>3-3</b>	Incertidumbre de los equipos utilizados para la medición del flujo luminoso en el goniofotómetro y la esfera integradora. . . . .	36
<b>3-4</b>	Metodología de medición para fuentes con atenuación de flujo luminoso. . . .	36
<b>3-5</b>	Metodología de medición para fuentes con temperatura de color variable. . .	37
<b>3-6</b>	Incertidumbre del equipo utilizado para la medición del flujo luminoso en el goniofotómetro y la esfera integradora. . . . .	38
<b>3-7</b>	Normalización de espectro medido en laboratorio. Ejemplo fuente código 4260.	40
<b>3-8</b>	Eficacia medida en laboratorio y eficacia total de la red eléctrica $\eta_{TM}$ . . . . .	41
<b>3-9</b>	Eficacia total de la red eléctrica $\eta_{TM}$ de acuerdo con la TCC de las fuentes para la muestra del mercado colombiano medida en laboratorio (7 referencias TCC cálida, 6 neutra y 12 fría). . . . .	42

<b>3-10</b>	Resultados de los parámetros de evaluación del desempeño de LED para las fuentes de TCC cálida de la muestra medida. El valor de FP mostrado es $FP \times 100$ y el de la MELR es $MELR \times 100$ . Muestra 7 referencias. . . . .	43
<b>3-11</b>	Resultados de los parámetros de evaluación del desempeño de LED para fuentes de TCC neutra de la muestra medida. El valor de FP mostrado es $FP \times 100$ y el de la MELR es $MELR \times 100$ . Muestra 6 referencias. . . . .	44
<b>3-12</b>	Resultados de los parámetros de evaluación del desempeño de LED para fuentes de TCC fría de la muestra medida. El valor de FP mostrado es $FP \times 100$ y el de la MELR es $MELR \times 100$ . Muestra 12 referencias. . . . .	44
<b>3-13</b>	Dispersión de datos medidos de la muestra seleccionada. (a) eficacia y TCC. (b) IRC y TCC. Muestra 25 referencias. . . . .	45
<b>3-14</b>	Dispersión de datos medidos de la muestra. (a) eficacia e IRC. (b) MELR e IRC. Muestra 25 referencias. . . . .	46
<b>3-15</b>	Dispersión de datos medidos de la muestra. (a) Rf e IRC. (b) Rg e IRC. . . . .	47
<b>3-16</b>	Espectro normalizado para diferentes puntos de atenuación de la fuente con código 4342. . . . .	48
<b>3-17</b>	Espectro normalizado para diferentes puntos de TCC. (a) fuente PCLED con código 4212. (b) fuente RGB con código 4259. . . . .	48
<b>3-18</b>	Variación de los parámetros de evaluación del desempeño del LED con la atenuación. (a) eficacia (b) FP (c) IRC (d) MELR. . . . .	49
<b>3-19</b>	Variación de los parámetros de evaluación del desempeño del LED con el cambio de la TCC. (a) eficacia (b) FP (c) IRC (d) MELR. Las referencias 9, 11 y 20 son de tecnología RGB. . . . .	51
<b>4-1</b>	Esquema de jerarquización para la aplicación de los métodos ELECTRE-tri-b y AHP Sort a la evaluación del desempeño de la tecnología LED. . . . .	54
<b>4-2</b>	Esquema de categorización para la aplicación del método ELECTRE-tri-b. . . . .	54
<b>4-3</b>	Esquema de categorización para la aplicación del método AHP Sort. . . . .	56
<b>4-4</b>	Esquema para la definición de rangos de desempeño energético de acuerdo con la distribución de eficacia total de la red eléctrica de 365 referencias del mercado colombiano. . . . .	58
<b>4-5</b>	Resultados encuesta realizada para establecer <i>ranking</i> de parámetros dentro del método ELECTRE-Tri-b. 4 se asigna al parámetro con mayor valor, 3 el siguiente, 2 el siguiente y 1 al de menor valor. . . . .	61
<b>4-6</b>	Resultados encuesta realizada para establecer la comparación entre pares de los parámetros dentro del método AHP Sort. <b>E</b> se refiere a desempeño energético, <b>El</b> eléctrico, <b>V</b> visual y <b>C</b> circadiano. . . . .	62
<b>4-7</b>	Comparación entre pares de los parámetros para el método AHP Sort de acuerdo con las respuestas obtenidas. . . . .	63

<b>4-8</b>	Desempeño global de las fuentes en función de la variación de $Z$ . El valor de 1 representa la categoría G, 2 la F, 3 la E, 4 la D, 5 la C, 6 la B y 7 la A. Las referencias presentadas son aquellas que mostraron variación de la clasificación al cambiar el valor de $Z$ . . . . .	66
<b>4-9</b>	Desempeño global de las fuentes para los escenarios de estudio del método AHP Sort. El valor de 1 representa la categoría G, 2 la F, 3 la E, 4 la D, 5 la C, 6 la B y 7 la A. Las referencias presentadas son aquellas que mostraron una mayor variación entre escenarios. . . . .	69
<b>4-10</b>	Clasificación global de la muestra de referencias estudiadas escenario 1, año 2024 y año 2029. Mayor prioridad al desempeño energético y visual. . . . .	75
<b>4-11</b>	Clasificación global de la muestra de referencias estudiadas escenario 2, año 2024 y año 2029. Mayor prioridad al desempeño visual y circadiano. . . . .	76
<b>4-12</b>	Clasificación global de la muestra de referencias estudiadas escenario 3, año 2024 y año 2029. Mayor prioridad al desempeño visual y energético. . . . .	77
<b>4-13</b>	Clasificación global de la muestra de referencias con temperatura de color variable estudiadas escenario 1 cuya clasificación global cambió con la TCC, año 2024 y año 2029. Las referencias presentadas son aquellas que reportan variación de la clasificación por variar la TCC. . . . .	77
<b>4-14</b>	Propuesta 1 de etiqueta de desempeño iluminación interior LED. . . . .	78
<b>4-15</b>	Propuesta 2 de etiqueta de desempeño iluminación interior LED. . . . .	79
<b>4-16</b>	Propuesta 3 de etiqueta de desempeño iluminación interior LED. . . . .	80
<b>5-1</b>	Evaluación del MEPS establecido en la Unión Europea con las referencias estudiadas y probadas en laboratorio. . . . .	83
<b>5-2</b>	Evaluación del MEPS establecido en la propuesta de actualización del RETI-LAP en Colombia con las referencias estudiadas y probadas en laboratorio. . . . .	85
<b>5-3</b>	Eficacia mínima del reglamento de la Unión Europea en función del flujo luminoso. Caso 1 es con $C$ 1,23, $\eta$ 120, $L$ 1,5, $F$ 0,85 y $R$ 1,01. Caso 2 es con $C$ 1,15, $\eta$ 120, $L$ 1,5, $F$ 0,85 y $R$ 0,96 . . . . .	86
<b>5-4</b>	Eficacia mínima del reglamento de la Unión Europea en función del flujo luminoso. Caso 1 es con $C$ 1,23, $\eta$ 120, $L$ 1,5, $F$ 0,85 y $R$ 1,01. Caso 2 es con $C$ 1,15, $\eta$ 120, $L$ 1,5, $F$ 0,85 y $R$ 0,96 . . . . .	87
<b>5-5</b>	Metodología para la evaluación de impacto país del MEPS. . . . .	88
<b>5-6</b>	Evaluación del MEPS establecido en la propuesta de actualización del RETI-LAP en Colombia con las referencias estudiadas y probadas en laboratorio. . . . .	88
<b>5-7</b>	Ahorro acumulado proyectado por el consumo de energía de los productos de iluminación LED comercializados en Colombia entre el año 2023 y 2033. . . . .	90
<b>5-8</b>	Emisiones de CO2 evitadas proyectado por el consumo de energía de los productos de iluminación LED comercializados en Colombia entre el año 2023 y 2033. . . . .	91

---

<b>5-9</b>	Metodología para la evaluación de impacto usuario final del MEPS. . . . .	92
<b>5-10</b>	Costo del kWh de energía eléctrica en la ciudad de Bogotá. . . . .	93
<b>5-11</b>	Costo de los productos de iluminación LED de interior consultados de acuerdo con su rango de eficacia. <70 lm/W 11 referencias, 70-80 lm/W 10 referencias, 80-90 lm/W 21 referencias, 90-100 lm/W 11 referencias, >100 lm/W 11 referencias. . . . .	94
<b>5-12</b>	Beneficio-costo para el usuario final por la implementación de MEPS con mayor eficacia luminosa. . . . .	95

# Lista de Tablas

<b>2-1</b>	Resoluciones modificación RETILAP [5–7]. . . . .	5
<b>2-2</b>	Resoluciones modificación RETIQ [8–10]. . . . .	6
<b>2-3</b>	Partidas arancelarias equipos de iluminación en Colombia. . . . .	9
<b>2-4</b>	Etiquetado de lámparas en el mundo a 2015 [2]. . . . .	14
<b>2-5</b>	Etiquetado de lámparas y luminarias en el mundo 2022 [11]. . . . .	17
<b>2-6</b>	MEPS de lámparas y luminarias en el mundo 2022 [11]. . . . .	18
<b>2-7</b>	MEPS de lámparas y luminarias LED en países seleccionados 2022 parte 1 [11].	18
<b>2-8</b>	MEPS de lámparas y luminarias LED en países seleccionados 2022 parte 2 [11].	19
<b>2-9</b>	Métodos MCDM desarrollados para la solución de problemas multicriterio [12].	27
<b>3-1</b>	Valores de IRC y TCC medidos en 2022 y 2023 con el espectroradiómetro ORB SP 200. . . . .	39
<b>3-2</b>	Factores FTM por tipo de fuente luminosa [13]. . . . .	41
<b>3-3</b>	Porcentaje de variación con respecto a la media para los valores medidos en laboratorio de las referencias de la muestra del mercado colombiano. . . . .	45
<b>3-4</b>	Coefficientes de correlación entre variables para la muestra de las fuentes me- didas en laboratorio. . . . .	47
<b>3-5</b>	Variación con respecto a la media de los parámetros de evaluación del desem- peño del LED con relación a la atenuación. . . . .	50
<b>3-6</b>	Variación con respecto a la media de los parámetros de evaluación del desem- peño del LED con relación a la variación de la TCC. Las referencias 9, 11 y 20 son de tecnología RGB. . . . .	50
<b>3-7</b>	Coefficientes de correlación entre variables para la muestra de las fuentes me- didas en laboratorio de TCC variable RGB 11 y 20. . . . .	52
<b>4-1</b>	Matriz de prioridad ejemplo 3 criterios. . . . .	57
<b>4-2</b>	Rangos propuestos de evaluación para parámetros de desempeño energético y eléctrico. . . . .	59
<b>4-3</b>	Rangos propuestos de evaluación para parámetros de desempeño visual y cir- cadiano. . . . .	60
<b>4-4</b>	Clasificación de los parámetros para el modelo ELECTRE-Tri-b de acuerdo con las respuestas obtenidas. 4 se asigna al parámetro con mayor valor, 3 el siguiente, 2 el siguiente y 1 al de menor valor. . . . .	62

<b>4-5</b>	Pesos de los parámetros de evaluación para el método ELECTRE-Tri-b escenario 1. . . . .	64
<b>4-6</b>	Pesos de los parámetros de evaluación para el método ELECTRE-Tri-b escenario 2. . . . .	65
<b>4-7</b>	Valores de $x_{min}$ y $x_{max}$ implementados en la normalización de los parámetros. . . . .	65
<b>4-8</b>	Rangos de evaluación normalizados. . . . .	66
<b>4-9</b>	Categorías de las referencias de fuentes LED seleccionadas para el escenario 1 y 2. Rangos base y rangos con valores normalizados. . . . .	67
<b>4-10</b>	Matrices de prioridad y pesos por criterio para los dos escenarios evaluados en el método AHP Sort. . . . .	68
<b>4-11</b>	Pesos para los escenarios evaluado de los métodos ELECTRE-Tri-b ( $z = 2$ ) y AHP Sort. . . . .	70
<b>4-12</b>	Categorización de referencias de los productos LED evaluados con el método ELECTRE-Tri-b y AHP Sort con los pesos del escenario 1 del método AHP Sort. Las referencias presentadas son aquellas que mostraron una diferencia en la clasificación global entre los dos métodos. . . . .	71
<b>4-13</b>	Eficacia total de la red eléctrica $\eta_{TM}$ y clasificación de las referencias seleccionadas. . . . .	72
<b>4-14</b>	Matriz de prioridad evaluación del desempeño fuentes de luz LED. . . . .	73
<b>4-15</b>	Rangos de evaluación desempeño energético y eléctrico. . . . .	74
<b>4-16</b>	Rangos de evaluación desempeño visual y circadiano. . . . .	75
<b>5-1</b>	Factores de corrección C por tipo de fuente luminosa [13]. . . . .	83
<b>5-2</b>	Eficacia mínima por tipo de producto LED en la propuesta de actualización del RETILAP [14]. . . . .	84
<b>5-3</b>	Comparación del cumplimiento de las referencias de muestra bajo estudio del MEPS de la Unión Europea y el de la propuesta de actualización de RETILAP. . . . .	85
<b>5-4</b>	Factor de emisión por proyectos MDL de eficiencia energética [15]. . . . .	90

:

# Lista de símbolos

## Símbolos

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\eta_{TM}$	Eficacia total de la red eléctrica	$lm/W$	<i>ec</i> : 3 – 1
$\phi$	Flujo luminoso	$lm$	<i>ec</i> : 2 – 3
$P_{onmax}$	Potencia de encendido máxima	$W$	<i>ec</i> : 5 – 1
LE	Eficacia luminosa	$lm/W$	<i>ec</i> : 2 – 5

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
AHP	Proceso de Jerarquía Analítica
CIE	International Commission on Illumination
ELECTRE	Eliminación y Elección Expresando la Realidad
FP	Factor de potencia
IES	Illuminating Engineering Society
IRC	Índice de Reproducción de Color
ITHD	Distorsión armónica de corriente
LED	Light Emitting Diode
MCDM	Métodos de toma de decisiones multicriterio
MCHP	Proceso de Jerarquía de Criterios Múltiples
MELR	Eficacia melanópica de radiación luminosa
MEPS	Minimum Energy Performance Standards
MinMinas	Ministerio de Minas y Energía

---

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
PAI	Plan de Acción Indicativo
PROURE	Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía
RETILAP	Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público
RETIQ	Reglamento Técnico de Etiquetado
Rf	Índice de fidelidad IES TM30
Rg	Índice de gamut IES TM30
SICAL	Subsistema Nacional de la Calidad
TCC	Temperatura de Color Correlacionada
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
URE	Uso Racional y Eficiente de la Energía

# 1 Introducción

La iluminación es uno de los principales usos energéticos en el sector residencial y terciario en Colombia. En el Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PAI-PROURE) 2022-2030 se identificó el cambio tecnológico por equipos de iluminación eficientes como una de las medidas y acciones para promover la eficiencia energética en el sector residencial y terciario [16]. En este documento se presenta el estudio y una propuesta de aplicación de una política de promoción del desempeño energético en equipos de iluminación LED de interior en Colombia.

Las políticas de estándares mínimos de desempeño energético (MEPS) y etiquetado son herramientas que permiten incentivar el uso eficiente de la energía en equipos de uso final [2]. En Colombia la política del Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) es definida en la ley 697 de 2001 [17], dentro de esta política en el país se han instaurado dos reglamentos técnicos relacionados con la iluminación. Uno de ellos es el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP) en el cual se establece el estándar mínimo de desempeño energético para productos de iluminación [18], el segundo es el Reglamento Técnico de Etiquetado (RETIQ) en el cual se establece el programa de etiquetado para equipos de uso final [19].

En la actualidad, el RETIQ carece de requisitos específicos para productos de iluminación LED. Esta falta de especificaciones, junto con la amplia gama de tecnologías disponibles en el mercado, dificulta que el consumidor final pueda tomar decisiones informadas al comprar un producto eficiente que satisfaga sus necesidades. Como resultado, suele basar su elección principalmente en el costo. Por esta razón, es necesario implementar un programa de MEPS y etiquetado para la iluminación LED utilizada en espacios interiores, con el fin de asegurar un uso razonable y eficiente de la energía en el país.

Colombia está en un proceso de actualización de estos reglamentos. Dentro de este proceso, la Universidad Nacional de Colombia, con el Grupo de Investigación en el Sector Energético Colombiano (GRISEC), desarrolló en el 2021 el proyecto de investigación *Estándares mínimos de desempeño energético, MEPS y de etiquetado para los equipos de uso final de energía con mayores consumos en el país. Línea temática 3 convocatoria energía sostenible y su aporte a la planeación minero energética - 2020 Minciencias* con el Ministerio de Ciencia y Tecnología y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) para elaborar la hoja

de ruta para la aplicación de un programa de etiquetado en Colombia a los equipos de uso final. Como resultado del proyecto de investigación, se identificó la necesidad de formular un modelo de etiquetado y evaluar la aplicación de MEPS en los productos de iluminación LED de interior en Colombia.

Por lo tanto, dentro de esta investigación se evalúa cuál debe ser el modelo de etiquetado y MEPS para tecnologías de iluminación interior LED que se deba implementar en Colombia. Para ello, se realiza la formulación de un modelo de etiquetado y MEPS para estos productos, considerando los parámetros de la evaluación del desempeño energético, visual y circadiano de las tecnologías, luego se evalúa el efecto de estos parámetros en el desempeño global de las tecnologías con el uso de modelos multicriterio y finalmente se establece el impacto de establecer MEPS en productos de iluminación en Colombia.

El estudio se realiza analizando el desempeño energético, visual y circadiano de una muestra de las fuentes de iluminación LED de interior disponibles en el mercado colombiano, lo anterior mediante el desarrollo de pruebas de laboratorio siguiendo los estándares ANSI/IES LM-79-19, ANSI/IES TM-30-30, ANSI/IES TM-38-21 y CIE S 026/E:2018. Con los resultados de las pruebas se valoran diferentes modelos de evaluación multicriterio para establecer los rangos del etiquetado propuesto. El estudio se enfoca en productos de tecnología LED con emisión de luz blanca, de temperatura de color correlacionada y nivel de flujo fijos y variables.

Los resultados del estudio, como la propuesta de modelo de etiquetado y el impacto evaluado de los MEPS, se obtienen para proporcionar al Ministerio de Minas y Energía herramientas en la actualización del programa de etiquetado y MEPS de los productos de iluminación interior en el país. No obstante, es necesario ampliar la muestra evaluada para establecer un contexto y una línea base más detallada del país. Esto se debe a las limitaciones económicas y temporales que se presentaron durante el desarrollo del estudio, por lo cual se recomienda estudiar una muestra más amplia.

Finalmente, el estudio destaca la importancia de valorar los productos de iluminación LED de interior considerando tanto su desempeño visual como circadiano, no limitándose únicamente al aspecto energético. Reconocer el papel e impacto de la iluminación en la tarea visual y circadiana del ser humano es crucial para garantizar un entorno óptimo y saludable. Asimismo, debido a que la iluminación y sus impactos en el rendimiento visual son aplicables en todo el mundo, el enfoque planteado para Colombia podría tener importancia a nivel global y ser adoptado por otros países que tienen programas de eficiencia energética, transformándose en una investigación con alcance internacional.

## **2 Estado del arte y desarrollo del marco teórico**

En este capítulo se presentan los conceptos básicos y el contexto necesario relacionado con el desempeño de las tecnologías de fuentes de luz LED y el contexto de la iluminación en Colombia. Inicialmente, se presenta el contexto técnico, económico, tecnológico, energético y ambiental de la tecnología LED en el país, luego se realiza una breve descripción de las políticas de MEPS y los programas de etiquetado desarrollados en el mundo para estos productos. Posteriormente, se abordan los parámetros implementados para la evaluación del desempeño energético, visual y circadiano del LED y se estudian metodologías de evaluación multicriterio. Luego, se estudian las tendencias tecnológicas y la normatividad aplicable a la tecnología LED. Finalmente, se presenta la muestra de productos a los cuales se les realizará las pruebas de evaluación de desempeño.

### **2.1. Contexto de la iluminación en Colombia**

La iluminación y la eficiencia energética son dos aspectos de gran relevancia dentro del contexto colombiano, contribuyendo a garantizar la seguridad energética del país. A continuación, se presentan los puntos más destacados en este contexto, abarcando aspectos técnicos, legales, políticos, económicos, tecnológicos, energéticos y ambientales.

#### **2.1.1. Contexto técnico, legal y político**

El marco legal en Colombia referente al uso eficiente de la energía se encuentra establecido en la ley 697 de 2001, emitida por el Congreso de la República. Esta ley establece el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un tema de interés nacional, con el objetivo de garantizar el suministro energético, fomentar la competitividad económica, proteger a los consumidores y promover el desarrollo sostenible en armonía con el medio ambiente [17]. Para llevar a cabo estos propósitos, se asigna al Ministerio de Minas y Energía (MinMinas) la responsabilidad de impulsar, coordinar y asegurar el desarrollo de los programas relacionados con el URE en el país.

Dentro de las responsabilidades asignadas a MinMinas por la Ley 697, se encuentra la creación del PROURE. El objetivo de este programa es establecer las iniciativas necesarias para

que la cadena energética del país cumpla con los niveles mínimos de eficiencia energética requeridos [17].

Adicionalmente, como parte de la estrategia del URE en Colombia, se han establecido dos reglamentos técnicos relacionados con sistemas de iluminación. El primero de ellos es el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP), emitido por el Ministerio de Minas y Energía (MinMinas) en 2009 [18]. El segundo es el Reglamento Técnico de Etiquetado (RETIQ), también emitido por MinMinas en 2015 [19]. Estos reglamentos tienen como objetivo regular y promover la eficiencia energética en los sistemas de iluminación, así como establecer los criterios de etiquetado para informar a los consumidores sobre el desempeño energético de los productos de iluminación.

En el año 2014, el Congreso de la República promulgó la ley 1715, la cual regula la integración de las energías renovables no convencionales en el Sistema Energético Nacional y promueve la gestión eficiente de la energía [20]. Esta ley establece diversas estrategias para el desarrollo y fomento de la optimización del uso energético, entre ellas, la aplicación de incentivos tributarios a proyectos que implementen equipos eficientes. La UPME es la entidad encargada de establecer los criterios y el proceso para acceder a estos incentivos [20].

Finalmente, el gobierno nacional reorganizó el Subsistema Nacional de la Calidad (SICAL) mediante el decreto 1595 de 2015. El SICAL tiene como objetivo determinar las instituciones responsables de la normalización, certificación, metrología, evaluación de la conformidad, regulación, vigilancia y control. Su propósito es apoyar e incentivar la productividad e innovación de las empresas y garantizar la confianza del consumidor en los productos y servicios ofrecidos en el país [21].

- Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía - PROURE

El PROURE es un lineamiento adoptado por MinMinas, en el cual se establece la política pública para promover el uso eficiente de los recursos energéticos en el país. Las metas de ahorro energético y las medidas y acciones para lograrlas se determinan en el Plan de Acción Indicativo (PAI) elaborado por la UPME [22].

El primer PAI del PROURE fue adoptado por MinMinas mediante la resolución 180919 de 2010, el cual estableció las metas de desempeño energético para los años 2010-2015 [5]. Luego, en el 2016 se adoptó el PAI-PROURE 2017-2022 con la resolución 41286 de 2016 [6]. Recientemente, la UPME publicó el PAI-PROURE 2022-2030, identificando el impacto de la eficiencia energética sobre la demanda y las emisiones para el periodo de estudio, con base en este análisis, se presentan las medidas necesarias

para obtener los beneficios establecidos [16].

Dentro de las medidas analizadas en el PAI-PROURE 2022-2030 para el sector residencial, se propone la renovación tecnológica de equipos de iluminación por luminarias LED obteniendo una reducción del 10 % en la demanda de energía y 29 % en las emisiones de CO<sub>2</sub> [16]. Por otro lado, con relación al sector terciario, se plantea la sustitución de luminarias incandescentes, halógenas y fluorescentes por luminarias LED como medida de mejora de la eficiencia energética, en consecuencia de esta medida se espera una reducción del 37 % de la demanda de energía y del 36 % en las emisiones de CO<sub>2</sub> [16].

- Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público - RETILAP

El RETILAP, emitido por el Ministerio de Minas y Energía mediante la resolución 181331 de 2009, establece los requisitos aplicables a los sistemas de iluminación y alumbrado público en Colombia con el fin de garantizar: la calidad lumínica requerida para la actividad visual, el uso eficiente de la energía en sistemas de iluminación, la protección al consumidor y el cuidado del medio ambiente [18].

Posteriormente, MinMinas emitió resoluciones que han actualizado ciertos aspectos puntuales del RETILAP, las cuales se muestran en la tabla **2-1**:

**Tabla 2-1:** Resoluciones modificación RETILAP [5–7].

Resolución	Descripción
180540 de 2010	Establece requisitos de eficacia mínima para lámparas incandescentes, halógenas, fluorescentes, descarga de vapor de mercurio, halogenuros metálicos y sodio de alta presión.
40122 de 2016	Se modifica las definiciones aplicables a lámparas y luminarias que usan tecnología LED.
40031 de 2021	Se amplía la vigencia del Reglamento.

Actualmente, el Ministerio se encuentra en proceso de actualización de RETILAP. Con relación al desempeño de producto, la actualización de RETILAP contempla la formulación de los estándares mínimos de desempeño energético para tecnología LED

de acuerdo con el tipo de producto [14]. Estos valores establecidos por RETILAP serán complementados con la propuesta de etiquetado producto de este documento.

■ Reglamento Técnico de Etiquetado - RETIQ

El RETIQ fue adoptado por MinMinas mediante la resolución 41012 de 2015. Su objetivo es fomentar el URE mediante el establecimiento de etiquetas que informen sobre el desempeño energético de los equipos de uso final. Actualmente, el RETIQ contempla los siguientes equipos [19]:

- Acondicionadores de aire
- Refrigeradores
- Balastos para iluminación
- Motores
- Lavadoras
- Calentadores de agua
- Gasodomésticos para la cocción de alimentos

Como se observa, con relación a iluminación únicamente se contempla en el reglamento balastos para fuentes de iluminación fluorescentes. Por otro lado, con respecto a estos equipos el Ministerio ha emitido las resoluciones presentadas en la tabla **2-2**.

**Tabla 2-2:** Resoluciones modificación RETIQ [8–10].

Resolución	Descripción
40947 de 2016	Se suspende la aplicación de etiquetado para balastos electromagnéticos y electrónicos para iluminación.
40298 de 2018	Define las familias relacionadas y los requisitos específicos para balastos de iluminación fluorescente.
40993 de 2018	Define los parámetros a declarar en la etiqueta para balastos de iluminación fluorescente.

Sin embargo, en la versión vigente del RETIQ no se especifica requisitos de desempeño energético para balastos de iluminación.

### ■ Subsistema Nacional de la Calidad - SICAL

El SICAL es un conjunto de instituciones en Colombia que conforman la infraestructura de la calidad. El SICAL se rige por las disposiciones establecidas en el decreto 1595 de 2015 emitido por el gobierno nacional y se compone de las siguientes entidades [21]:

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC: Es el instituto encargado de la normalización de procedimientos y requisitos en el país, con el fin de promover la obtención de una economía óptima, mejorar la calidad y facilitar las relaciones entre el cliente y el proveedor a nivel empresarial, nacional e internacional.
- Instituto Nacional de Metrología - INM: Es la entidad encargada de garantizar el cumplimiento de estándares internacionales en medición y trazabilidad de pruebas de laboratorio.
- Organismo Nacional de Acreditación - ONAC: Es el instituto encargado de acreditar la competencia de los organismos de la evaluación de la conformidad, como por ejemplo los laboratorios.
- Evaluadores de la conformidad: Son laboratorios o centros de inspección certificados para evaluar el cumplimiento de los requisitos para productos, procedimientos, sistemas, personas u organismos.
- Superintendencia de Industria y Comercio - SIC: Se encarga de la vigilancia y control de los procesos comerciales en el país, con el objetivo de proteger los derechos del consumidor y garantizar la libre competencia.
- Reguladores: Son las entidades encargadas de establecer los lineamientos que se deben cumplir. En el ámbito energético es el Ministerio de Minas y Energía.

### 2.1.2. Contexto económico

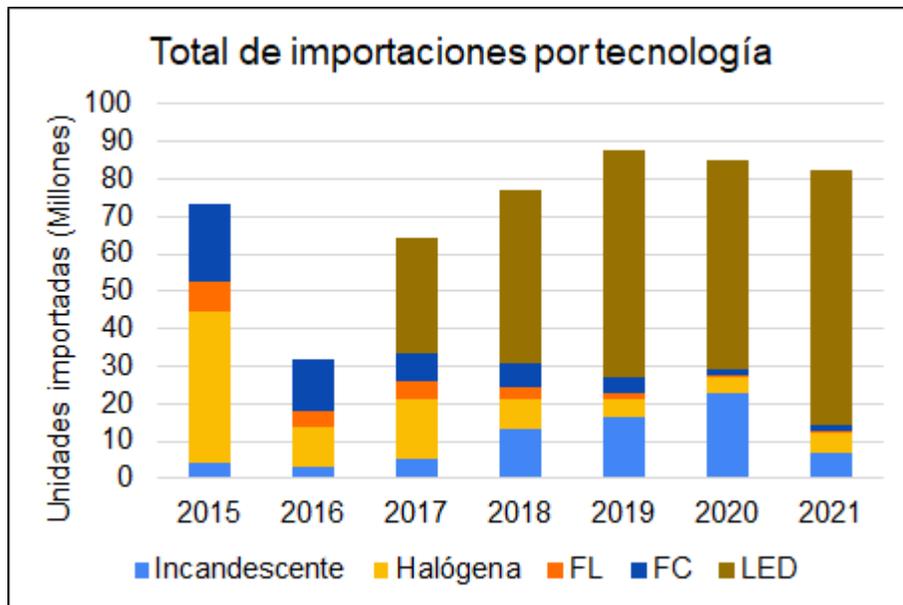
Para evaluar el panorama económico de la iluminación en Colombia, se analizan las tendencias de importación y exportación de lámparas en el país. Para esto, se examinan los datos proporcionados por la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN) en un periodo de tiempo que abarca desde 2015 hasta 2021. Los datos se obtienen de la plataforma SISDUAN de la base SICEX [1].

El análisis de las importaciones y exportaciones revela una tendencia creciente en la adopción de la tecnología LED en el mercado colombiano, alcanzando aproximadamente el 80% en 2021. Estas tendencias respaldan la necesidad de implementar un programa de etiquetado en Colombia, que permita a los usuarios finales tomar decisiones informadas basadas en el desempeño de estos equipos.

- Importaciones

La figura 2-1 muestra el total de unidades importadas de lámparas en Colombia, clasificadas por tecnología. Los resultados incluyen las tecnologías incandescentes, halógenas, fluorescentes, de descarga y LED. Es importante destacar que las importaciones de LED se consideran desde el año 2017, cuando se les asignó una subpartida específica. Además, en la figura se puede observar la magnitud del mercado de importaciones de estos productos, superando los 80 millones de unidades en los años 2019, 2020 y 2021.

Adicionalmente, en la figura 2-1, se aprecia que las importaciones de lámparas de incandescencia halógenas y las de descarga fluorescente muestran una tendencia decreciente, mientras que las lámparas incandescentes y las LED han experimentado un aumento en el total de importaciones. Es importante destacar cómo desde el año 2017 las lámparas LED han sido aquellas con mayor participación en las importaciones. El análisis se ha basado en las partidas arancelarias mencionadas en la tabla 2-3.



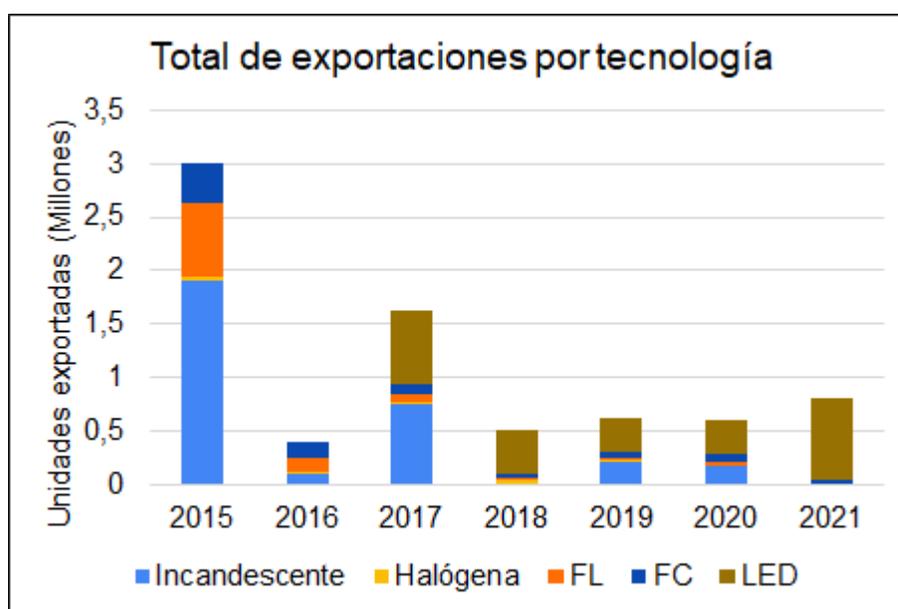
**Figura 2-1:** Total unidades de lámparas importadas por tecnología en Colombia 2015-2021. Elaboración propia con datos de [1].

**Tabla 2-3:** Partidas arancelarias equipos de iluminación en Colombia.

Partida	Equipo
853921	Lámparas y tubos eléctricos de incandescencia-halógenos.
853922	Las demás lámparas y tubos de incandescencia.
853931	Lámparas y tubos de descarga fluorescentes.
853939	Las demás lámparas y tubos de descarga.
853950	Lámparas y tubos de Diodos Emisores de Luz (LED)

- Exportaciones

Con relación a las exportaciones de lámparas los resultados obtenidos se presentan en la figura 2-2. A diferencia de lo observado en importaciones la tendencia de unidades exportadas de lámparas es decreciente, siendo para los años 2018, 2019, 2020 y 2021 menos de 1 millón de unidades. Adicionalmente, se evidencia que la mayor participación de exportaciones para los años 2019 y 2020 fue de lámparas incandescentes y LED y para el 2021 el mercado de fue dominado por la tecnología LED.



**Figura 2-2:** Total unidades de lámparas exportadas por tecnología en Colombia 2015-2021. Elaboración propia con datos de [1].

### 2.1.3. Contexto tecnológico

En esta sección se plantea identificar la variedad de tecnologías de iluminación LED para interiores disponibles en el mercado colombiano, para ello se consultó en los catálogos de distribuidores y en los principales almacenes de cadena del país. Como resultado se encontró principalmente dos tipos de tecnologías, bombillas y luminarias, entendiendo las bombillas como fuentes luminosas con *driver* integrado y luminarias fuentes con *driver* independiente.

#### ■ Bombillas

De las bombillas consultadas en el mercado colombiano se identifican principalmente 6 tipos, los cuales son:

- Bulbo: Son las más comunes para uso residencial, reemplazan las tradicionales bombillas incandescentes.
- Tubulares: Son bombillas que buscan reemplazar a los tubos fluorescentes.
- Alta potencia: Son similares a las bombillas tipo bulbo, pero de mayor potencia (superior a 20W). Son comúnmente utilizadas en el sector comercial o industrial.
- Direccionales: Son bombillas con un ángulo de apertura inferior a 120°, implementadas en interiores para iluminar un área específica del espacio.
- Decorativa: Son bombillas cuyo fin es diferente al de la tarea visual. Por ejemplo, las bombillas *vintage* de temperatura de color cálida que buscan ambientar el espacio como si fueran bombillas incandescentes.
- De espectro variable: Son bombillas que permiten variar el flujo luminoso o la temperatura de color. Adicionalmente, se pueden controlar desde un dispositivo móvil mediante una conexión por *bluetooth* o *wifi*.

#### ■ Luminarias

De las luminarias consultadas en el mercado colombiano se identifican principalmente 6 tipos, los cuales son:

- Lineal: Son luminarias que buscan reemplazar el uso de bombillas tipo tubo.
- Panel cuadrado o rectangular: Son las luminarias de mayor uso en espacios de interiores como oficinas o comercios. Son el reemplazo de las luminarias que utilizaban tubos fluorescentes.
- Panel circular: Son luminarias comúnmente implementadas en espacios comerciales. También son utilizadas en espacios residenciales.
- Bala: Son similares a los paneles circulares, pero son luminarias para empotrar en techo.
- Direccionales: Son comunes en espacios comerciales, buscan iluminar un espacio específico para resaltarlo.

- Decorativa: Son luminarias cuyo fin es acentuar espacios arquitectónicos.

Finalmente, los parámetros, tanto de bombillas como de luminarias, los cuales generalmente son presentados al usuario en la hoja de datos son los siguientes:

- Tipo de bombilla o luminaria
- Base (aplica para bombillas, por ejemplo, E27)
- Costo (\$)
- Potencia (W)
- Flujo luminoso (lm)
- Eficacia luminosa (lm/W)
- Temperatura de color correlacionada TCC (K)
- Vida útil (h)
- Ángulo de apertura
- Índice de reproducción de color IRC
- Factor de potencia
- Tipo de difusor (para luminarias)

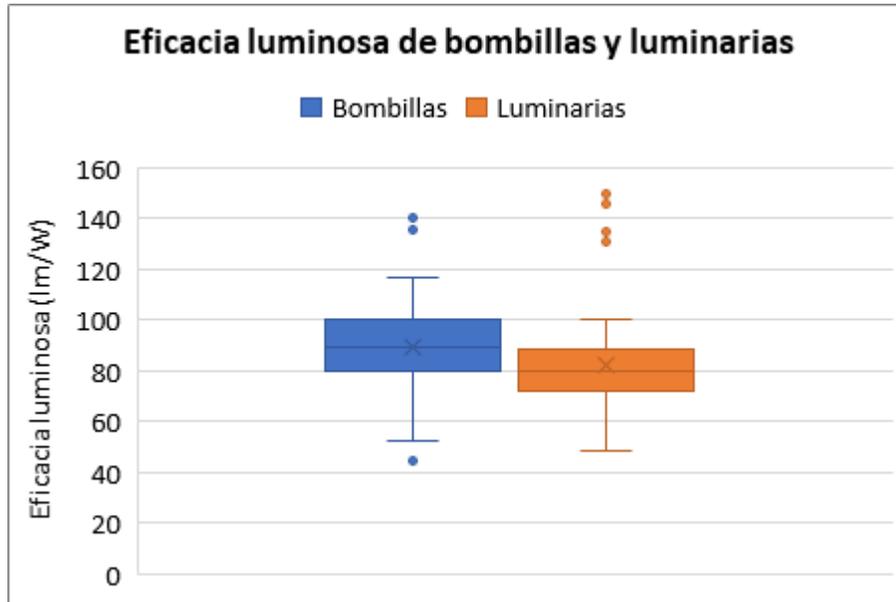
#### 2.1.4. Contexto energético

Luego de consultar 365 referencias de fuentes de luz LED disponibles en el mercado colombiano, 171 referencias de bombillas y 194 de luminarias, se obtuvo información relacionada con la eficacia luminosa reportada por los fabricantes. Los resultados de la consulta se presentan en la figura **2-3**, donde en azul se presentan los datos de bombillas y en naranja los de luminarias.

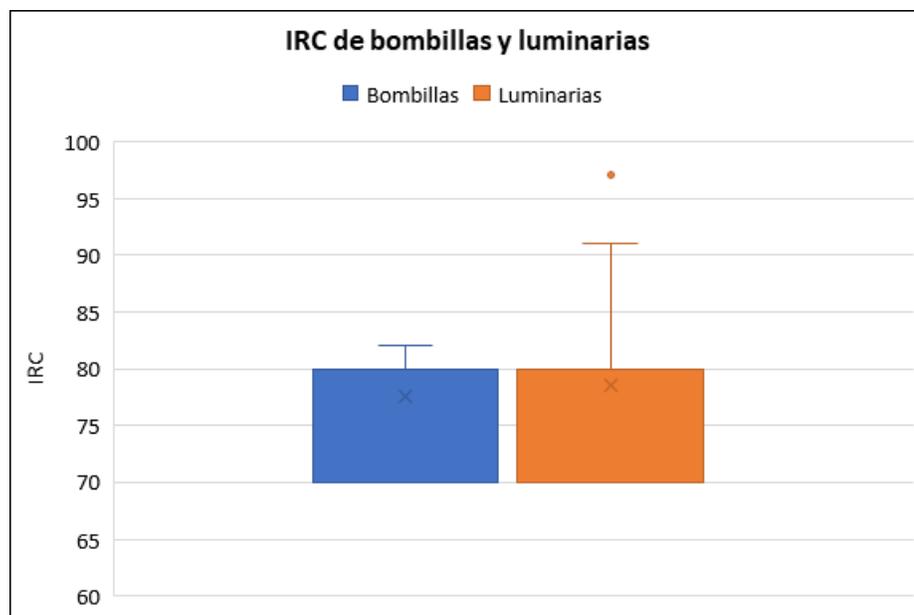
En la figura **2-3** se observa que el rango eficacia de las referencias de bombillas consultadas está entre 44 y 143 lm/W, siendo 89 lm/W el valor medio. Por otro lado, para las referencias de luminarias consultadas el rango de eficacia está entre 48 y 150 lm/W, con 80 lm/W como el valor medio.

Por otro lado, considerando la propuesta de la evaluación del desempeño visual dentro del desempeño energético, en la figura **2-4** se presenta el rango del IRC reportado en las fichas técnicas de los equipos comercializados en Colombia. De los datos obtenidos se evidencia que

el 75 % de las tecnologías en el país varían el IRC entre 70 y 80, sólo 21 referencias reportan valores superiores a 80 y ninguna un valor menor a 70.



**Figura 2-3:** Rangos de eficacia luminosa para bombillas y lámparas en el mercado colombiano. 171 referencias de bombillas, 194 referencias de luminarias. Elaboración propia con datos recopilados de los comercios colombianos en octubre de 2022.



**Figura 2-4:** Rangos del IRC para bombillas y lámparas en el mercado colombiano. 171 referencias de bombillas, 194 referencias de luminarias. Elaboración propia con datos recopilados de los comercios colombianos en octubre de 2022.

Los datos recopilados revelan una amplia variedad de productos en el mercado colombiano, lo que se traduce en una extensa gama de eficacia luminosa. Esta información pone de manifiesto la necesidad de definir una etiqueta informativa para el usuario final sobre el desempeño energético de las fuentes de luz en Colombia, considerando la amplia diversidad observada.

Además, esta información es crucial para establecer una línea de base en cuanto al desempeño energético de la tecnología LED actual en Colombia. Asimismo, servirá como un insumo para determinar los límites de los rangos en la etiqueta de productos de este documento.

### **2.1.5. Contexto ambiental**

La ley 1672 de 2013 establece los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en Colombia. Como resultado de esta ley, en 2017 el gobierno, liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, formuló la Política Nacional para la Gestión Integral de RAEE.

Esta política se fundamenta en cuatro ejes principales: la sensibilización y educación hacia la producción y el consumo responsable de aparatos eléctricos y electrónicos, el desarrollo y establecimiento de instrumentos para la recolección y gestión de RAEE, la transferencia tecnológica y el desarrollo de infraestructura ambientalmente segura para el aprovechamiento de los RAEE, y la conformación de esquemas de trabajo conjunto entre el sector privado y el desarrollo de alianzas público-privadas para promover la gestión integral de RAEE.

Dentro de la ley 1672 de 2013 se establecen 6 categorizaciones para los equipos de uso final: aparatos de intercambio de temperatura, pantallas y monitores, lámparas, grandes aparatos, pequeños aparatos, aparatos de informática y telecomunicaciones. Con relación a lámparas, la resolución 1511 de 2010 regula los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de bombillas de descarga fluorescente. Como resultado de esta política, han surgido iniciativas como Lumina que se encargan de la recolección y el manejo pos-consumo de lámparas de descarga [23].

## **2.2. Políticas de MEPS y etiquetado en el mundo para LED**

Las políticas de MEPS y etiquetado son instrumentos implementados para incentivar el uso eficiente de la energía en los equipos de uso final. En esta sección se presentan los conceptos básicos y los antecedentes de políticas referentes a iluminación LED en el mundo.

### 2.2.1. MEPS y Etiquetado

Los programas de estandarización y etiquetado de eficiencia energética tienen como propósito fomentar el uso racional de la energía, asegurar la seguridad energética en los países y reducir el impacto ambiental asociado. Para lograrlo, se establecen los MEPS que los dispositivos de consumo deben cumplir al entrar en los mercados nacionales, y se proporciona información esencial a los usuarios para que cuenten con herramientas que les permitan tomar decisiones informadas al adquirir productos eficientes [2]. Como resultado, a nivel global, han surgido dos estrategias fundamentales: las etiquetas y los estándares.

- Etiquetas

El etiquetado es una estrategia dirigida al usuario final con el objetivo de proporcionar la información necesaria para mejorar la toma de decisiones de compra de un producto específico. Por esta razón, la etiqueta de un equipo debe brindar información estratégica sobre su desempeño energético. Existen dos formas de introducir etiquetas en los mercados: mediante programas voluntarios u obligatorios. Los programas voluntarios suelen implementarse para evaluar la reacción de los actores involucrados, pero se recomienda que las etiquetas sean de carácter obligatorio [2].

Con relación a los productos de iluminación, se reportaron programas de etiquetado en el mundo para el año 2015, los cuales se describen en la tabla **2-4**.

**Tabla 2-4:** Etiquetado de lámparas en el mundo a 2015 [2].

Equipo	Programas obligatorios	Programas voluntarios	Total
Lámparas fluorescentes	35	40	75
Lámparas Incandescentes	11	5	16

Existen fundamentalmente dos tipos de etiquetas de desempeño energético que se han implementado en diferentes países, las cuales son [2, 24]:

- Etiquetas comparativas: Permiten a los usuarios comparar el desempeño energético de productos similares, además es posible categorizar al producto en una posición relativa de eficiencia energética. Este tipo de etiquetas se dividen en dos: etiquetas de categoría y etiquetas de escala continua.

Las etiquetas de categoría ubican al producto en una escala definida, desde la categoría más eficiente hasta la de menor eficiencia. Un ejemplo de estas son las etiquetas de Chile, China y Australia presentadas en la figura **2-5**.



Figura 2-5: Etiquetas comparativas de categoría. Tomado de [2]

En cuanto a las etiquetas de escala continua, generalmente se presenta información relacionada al consumo energético del producto en una escala continua. Esta escala está entre dos rangos definidos, dados por los niveles máximos y mínimos de eficiencia. Un ejemplo de estas etiquetas son las implementadas en Estados Unidos y Canadá y presentadas en la figura 2-6.

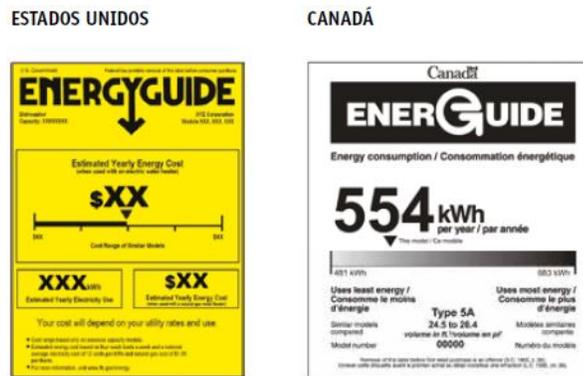


Figura 2-6: Etiquetas comparativas de escala continua. Tomado de [2]

Adicionalmente, este tipo de etiquetas comparativas puede presentar información relevante para el usuario final, como indicadores de consumo energético, desempeño energético o costo operativo asociado al uso del producto.

- **Etiquetas de garantía:** Se aplican a los productos cuando cumplen con ciertos criterios establecidos, por ejemplo cuando su desempeño energético sea superior a un límite inferior definido. Generalmente este tipo de etiquetas tienen un aspecto sencillo y no brindan mucha información al usuario final. Además, con el fin de lograr un verdadero impacto en el mercado, los procedimientos y condiciones para otorgar estas etiquetas debe ser de conocimiento público [2]. Un ejemplo de este

tipo de etiquetas es el sello Energy Star de los Estados Unidos, el cual se presenta en la figura 2-7.



**Figura 2-7:** Etiquetas de garantía (Energy Star).

■ Estándares de eficiencia energética

Los estándares de eficiencia energética son disposiciones normativas adoptadas por los países para establecer el nivel mínimo de rendimiento energético que los productos fabricados y vendidos en el país deben cumplir. Estas regulaciones prohíben la comercialización de equipos cuyo rendimiento energético sea inferior al establecido. El término "estándar" se refiere a un límite objetivo de eficiencia energética que es oficialmente establecido por el gobierno [24].

Principalmente se han propuesto 3 tipos de estándares de eficiencia energética, los cuales son los siguientes [2, 24]:

- Estándares prescriptivos: Se exige el uso de un dispositivo específico en un producto, con el fin de mejorar la eficiencia energética global.
- Estándares de mínimo desempeño energético (MEPS): Establecen un valor mínimo de eficiencia energética o un valor máximo de consumo, este valor se debe cumplir para todos los productos disponibles en el mercado. A diferencia de los estándares prescriptivos, se especifica el desempeño energético del equipo, pero no los detalles de la tecnología o el diseño del producto. Los MEPS incentivan a los fabricantes a mejorar sus procesos productivos.
- Estándares de clase promedio: Especifica la eficiencia energética promedio que un producto debe satisfacer, ponderado por las ventas. Es decir, se debe mantener un valor de eficiencia energética promedio para un lote de productos de cierto fabricante, por ejemplo, se puede tener un equipo con un desempeño energético bajo y otro con uno alto, siempre y cuando el promedio ponderado se mantenga en los límites establecidos. Un ejemplo de este tipo de estándar es el programa *Top Runner* de Japón.

En cuanto a programa de MEPS, para 2015 en el mundo habían 47 esquemas de MEPS para lámparas incandescentes y fluorescentes en el mundo [2].

### 2.2.2. Etiquetado y estándares de LED en el mundo

La política de normalización de Estándares Mínimos de Desempeño Energético (MEPS) y etiquetado para productos de iluminación, como lámparas y luminarias, ha sido ampliamente adoptada por 70 países a nivel mundial, además de la Unión Europea como un conjunto. Según el informe de [11] para el año 2022, se han implementado 185 esquemas de etiquetado, ya sea comparativa o de garantía, y 145 esquemas de MEPS para lámparas o luminarias de todas las tecnologías en todo el mundo.

Para obtener información más detallada y desglosada por región, se pueden consultar las tablas 2-5 y 2-6 proporcionadas en el informe mencionado. Estos datos demuestran el compromiso global hacia la eficiencia energética y el etiquetado en productos de iluminación, con el objetivo de impulsar el uso de tecnologías más eficientes y sostenibles.

**Tabla 2-5:** Etiquetado de lámparas y luminarias en el mundo 2022 [11].

Región	Etiquetas comparativas	Etiquetas de garantía	Total
África	11	0	11
América	30	30	60
Asia y el pacífico	40	54	94
Europa	6	1	7
Oriente medio	11	2	13
	Total		185

De los datos recolectados se observa que la región con el mayor número de esquemas implementados es Asia y el Pacífico, seguida por América, África, Oriente Medio y Europa. En Europa, el número es bajo debido a que la Unión Europea establece una política de MEPS y etiquetado única para sus países miembros. Únicamente Alemania, Rusia, Suiza y Ucrania tienen esquemas propios. Por otro lado, Estados Unidos fue el primer país en adoptar un esquema de MEPS y etiquetado para productos de iluminación en 1980, seguido por Brasil en 1993 [11].

Con relación a las políticas de etiquetado y MEPS de LED, se realizó la consulta en un grupo de países seleccionados con el fin de tener un espectro del mundo. Para ello, se seleccionaron países de: África, América, Asia y el pacífico, Europa y Oriente medio. La información recolectada se presenta en las tablas **2-7** y **2-8**.

**Tabla 2-6:** MEPS de lámparas y luminarias en el mundo 2022 [11].

Región	MEPS
África	22
América	32
Asia y el pacífico	76
Europa	3
Oriente medio	12
Total	145

**Tabla 2-7:** MEPS de lámparas y luminarias LED en países seleccionados 2022 parte 1 [11].

País	Regulación LED	Etiqueta	MEPS	Obligatorio
Egipto	7823/2020	Comparativa	Si	Si
Sudáfrica	En desarrollo	-	-	-
Brasil	Procel	Garantía	No	No
	Inmetro/MDIC Ordinance No. 167 of 29 March 2018	Comparativa	Si	Si
Chile	PE No 5/17/2	Comparativa	No	Si
	Resolución 10 exenta 2020	No	Si	Si
México	NOM-030-ENER-2016	No	Si	Si
	Sello FIDE 4171	Garantía	No	No
Perú	Decreto Supremo No. 009-2017-EM	Comparativa	No	Si

**Tabla 2-8:** MEPS de lámparas y luminarias LED en países seleccionados 2022 parte 2 [11].

<b>País</b>	<b>Regulación LED</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>MEPS</b>	<b>Obligatorio</b>
Estados Unidos	ENERGY STAR Program Requirements for Lamps (Light Bulbs) Version 2.1	Garantía	No	No
	ENERGY STAR Program Requirements for Luminaires Version 2.2	Garantía	No	No
Argentina	Resolución 795/2019	Comparativa	No	Si
Australia	No	-	-	-
China	LED products for indoor lighting: directional self ballasted LED lamp	Comparativa	Si	Si
	LED products for indoor lighting: Non-directional self ballasted LED lamp	Comparativa	Si	Si
	CQC31-465192-2014. CQC31-465317-2020.	Garantía	No	No
Korea	High-efficiency Appliances Certification Program	Garantía	No	No
Japón	Programa Top Runner	No	Si	Si
Israel	No	-	-	-
Iran	No	-	-	-
Unión Europea	Regulation (EU) 2019/2015 of 11 March 2019	Coomparativa	No	Si
	Regulation (EU) 2019/2020 of 1 October 2019	No	Si	Si
Alemania	Der Blaue Engel	Garantía	No	No

En general se observa que cuando un país incluye dentro de su regulación una propuesta de etiqueta comparativa la complementa con un esquema de MEPS. Por otro lado, las etiquetas de garantía también son implementadas para equipos de iluminación LED, destaca el caso de Estados Unidos con la etiqueta Energy Star o Brasil con Procel.

### 2.2.3. Parámetros y metodologías para la evaluación del desempeño energético del LED

De acuerdo con la información consultada de los países listados en las tablas 2-7 y 2-8, el parámetro utilizado para realizar la clasificación de etiquetas y establecer el estándar mínimo de desempeño energético es la eficacia luminosa, la cual es la relación entre el flujo luminoso emitido por una fuente de luz y la potencia eléctrica ( $lm/W$ ). Solamente en la Unión Europea se propone una formulación para determinar el estándar mínimo de desempeño energético involucrando un parámetro adicional, el cual es el índice de reproducción de color IRC [25]. La formulación propuesta por la regulación de la Unión Europea se presenta en la ecuación 2-1.

$$P_{onmax} = C \times (L + \phi_{use}/(F \times \eta)) \times R, \quad (2-1)$$

donde

- $P_{onmax}$  es la potencia de encendido máxima de la fuente.
- $\eta$  es la eficacia umbral y depende del tipo de fuente de luz. Esta no es la mínima eficacia requerida.
- $L$  es el factor de pérdidas de potencia (en W) y depende del tipo de fuente de luz.
- $C$  es un factor de corrección que depende de si la fuente de luz es direccional o no direccional y si tiene *driver* independiente.
- $F$  es el factor de eficacia, el cual es: 1 para fuentes no direccionales y 0,85 para fuentes direccionales.
- $R$  es el factor de IRC, el cual es: 0,65 para fuentes con IRC menor o igual a 25 y  $(IRC + 80)/160$  para fuentes con IRC mayor a 25.

Por otro lado, la Unión Europea establece una etiqueta comparativa obligatoria para fuentes de luz incluyendo las de tecnología LED y OLED [13]. La etiqueta define la clase energética de las fuentes en 7 categorías mediante la eficacia total de la red eléctrica ( $\eta_{TM}$ ), la cual, se calcula con la ecuación 2-2.

$$\eta_{TM} = \frac{\phi_{use}}{P_{on}} \times F_{TM}(lm/W), \quad (2-2)$$

donde  $\Phi_{use}$  es el flujo luminoso útil del producto en lm,  $P_{on}$  es la potencia de encendido y  $F_{TM}$  es el factor aplicable, el cual depende del tipo de fuente de luz y se presenta en la tabla 2 del anexo II de la regulación europea [13].

Adicionalmente, en la regulación de los países consultados también se establecen estándares para los siguientes parámetros. En el reglamento delegado de la Unión Europea se establecen los valores mínimos requeridos [25].

- Factor de potencia
- Vida nominal
- Variación del flujo
- flujo mantenido
- Temperatura de Color Correlacionada TCC
- Índice de reproducción de color IRC
- Factor de supervivencia
- Consistencia de color
- Flicker
- Efecto estroboscópico

Sin embargo, estos parámetros son considerados de manera independiente y no se integran en la evaluación general del desempeño energético. Por lo tanto, estos valores establecidos en el reglamento son de obligatorio cumplimiento para los comercializadores e importadores, pero es información no reportada en la etiqueta del usuario final.

## 2.3. Parámetros y metodologías de evaluación

La iluminación es un uso final de energía que tiene como finalidad apoyar las tareas visuales del ser humano, especialmente en trabajos de interiores. Existen parámetros establecidos para la evaluación del desempeño energético, visual y circadiano de productos de iluminación. En esta sección se presentan los parámetros propuestos por diversos autores para valorar la tecnología LED y metodologías para la evaluación multicriterio de estos parámetros.

### 2.3.1. Parámetros para evaluar el desempeño energético

La evaluación del desempeño energético de los productos de iluminación LED se realiza comúnmente utilizando unidades derivadas del régimen fotópico, como el flujo luminoso. Específicamente, para medir el desempeño del LED se utiliza la eficacia luminosa, la cual representa la relación entre el flujo luminoso y la potencia de salida de la fuente [3]. El flujo luminoso se define como el flujo radiante proveniente de una fuente que es detectado por el ojo humano. Para determinar el flujo luminoso, se emplea la ecuación 2-3.

$$\phi = 683 \frac{lm}{W_{op}} \int P_R(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2-3)$$

La eficacia luminosa de radiación LER (lm/W) se define como la relación entre el flujo luminoso ( $\phi$ ) y la potencia óptica de salida de la fuente ( $P_{out}$ ). La formulación se muestra en la ecuación 2-4, donde  $P(\lambda)$  es el flujo radiante espectral y  $V(\lambda)$  es la curva de sensibilidad fotópica del ojo.

$$LER = \frac{\phi}{P_{out}} = 683 \frac{lm}{W_{op}} \frac{\int P(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda} \quad (2-4)$$

La eficacia luminosa de radiación también puede ser representada con un valor entre 0 y 100 %, asumiendo que el valor máximo de LER (683 lm/W) obtenido por un LED emitiendo en una longitud de onda de 555 nm corresponde a una eficiencia del 100 %.

Finalmente, la eficacia luminosa (LE) se puede representar en término de la efectividad que una fuente de luz tiene para convertir la potencia eléctrica de la fuente ( $P_{elect}$ ) en fotones en el rango visible ( $\phi$ ). La formulación para calcular la eficacia luminosa se presenta en la ecuación 2-5.

$$LE = \frac{\phi}{P_{elect}} = 683 \frac{lm}{W_{op}} \frac{\int P(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P_{elect}} \quad (2-5)$$

### 2.3.2. Parámetros para evaluar el desempeño visual

La percepción visual de la luz en el ser humano está mediada por los conos y los bastones. Los bastones, que no son capaces de diferenciar colores, tienen su máxima sensibilidad en 498 nm. Por otro lado, existen tres tipos de conos con su máxima sensibilidad en 420 nm (azul), 534 nm (verde) y 564 nm (rojo), lo que les permite distinguir colores. Además, la visión está regulada por los bastones o los conos dependiendo del nivel de luminancia. Estos mecanismos visuales permiten al ser humano percibir e interpretar la luz y los colores en su entorno.

Para luminancias mayores a  $3 \text{ cd } m^{-2}$ , la visión es mediada por los conos y se conoce como visión fotópica; por otro lado, para luminancias menores a  $0,003 \text{ cd } m^{-2}$  la visión es medida por los bastones y se conoce como visión escotópica; finalmente, para luminancias entre  $0,003$  y  $3 \text{ cd } m^{-2}$  intervienen tanto los conos como los bastones y se conoce como visión mesópica [26, 27].

El desempeño visual de la luz en espacios de interior se puede determinar con los niveles de iluminancia, la uniformidad, el índice de deslumbramiento, el índice de reproducción de color y la temperatura de color correlacionada [28]. Sin embargo, estos tres primeros parámetros dependen en conjunto del diseño de iluminación y la fuente de luz. Por otro lado, el IRC y la TCC son dependientes de la bombilla o luminaria, por lo cual los parámetros para evaluar el desempeño visual del producto LED se concentrarán en los parámetros de color.

- Pureza de color: El primer parámetro a evaluar es la pureza de color o saturación de una fuente de luz, el cual es la relación del punto de igual energía ( $d_1$ ) y la distancia entre la longitud de onda dominante al punto de igual energía ( $d_1+d_2$ ) de diagrama cromático de la CIE 1931. La pureza de color puede ser calculada por medio de la ecuación 2-6, cuyos puntos se presentan en la figura 2-8 [3].

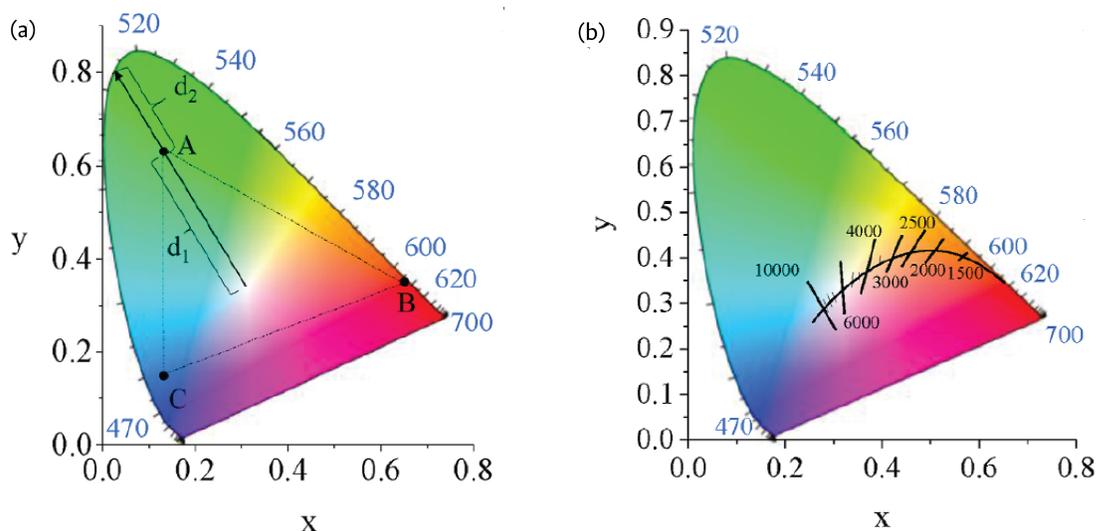
$$colorpurity = \frac{\sqrt{(x - 0,33)^2 + (y - 0,33)^2}}{\sqrt{(x_d - 0,33)^2 + (y_d - 0,33)^2}}, \quad (2-6)$$

donde  $(x,y)$  son las coordenadas cromáticas de la fuente de luz y  $(x_d, y_d)$  son las coordenadas cromáticas de la longitud de onda dominante.

- Temperatura de Color Correlacionada (TCC): La temperatura de color correlacionada es un parámetro que permite comparar la tonalidad de diferentes fuentes de luz. La TCC de una fuente de luz artificial influye en las actividades visuales del ser humano, por lo cual se han determinado recomendaciones de cual TCC utilizar para iluminar ciertos espacios [3]. Para encontrar la temperatura de color de una fuente de luz se puede emplear las coordenadas cromáticas CIE 1931, mediante la ecuación 2-7 cuya representación gráfica se presenta en la figura 2-8 [3].

$$TCC = 499n^3 + 3524n^2 + 6823,3n + 5520,33, \quad (2-7)$$

donde  $n = (x - 0,332)/(0,1858 - y)$



**Figura 2-8:** Espacio de color de la CIE 1931 representando: (a) los puntos para el cálculo de la pureza de color (b) los puntos de temperatura de color TCC. Tomado de [3].

El anterior método para el cálculo de la TCC es un método simplificado, el cual puede representar un error de cálculo. Por lo cual, se implementa el método de cálculo especificado en la IES TM 30 [29], la cual contempla una herramienta de cálculo para obtener la TCC con el espectro medido de la fuente.

- **Rendimiento de color:** Se refiere a la capacidad de una fuente de luz para reproducir la apariencia natural de un objeto. El índice de reproducción de color (IRC) es el parámetro más utilizado para medir este rendimiento, tomando como referencia el espectro emitido por una fuente incandescente. Sin embargo, el IRC ha mostrado dificultades para evaluar el rendimiento de color, especialmente en relación con la saturación. Para solventar estos inconvenientes, la *Illuminating Engineering Society* (IES) ha formulado dos métricas adicionales: el índice de fidelidad de color ( $R_f$ ) y la gama de reproducción de color ( $R_g$ ) [3].

### 2.3.3. Parámetros para evaluar el desempeño circadiano

Desde el descubrimiento de las células ganglionares intrínsecamente fotosensibles y el impacto de la luz en la regulación del fotoreceptor de la melanopsina, el cual controla el ciclo circadiano de los seres humanos, cada día toma mayor importancia evaluar el desempeño circadiano de la luz [3]. Para ello, se han formulado tres métricas principales que permiten valorar el impacto de la luz artificial en la regulación del ciclo circadiano.

La primera métrica definida, y de la cual las otras dos son derivadas, es la eficacia circadiana de radiación melanópica (CER), la cual mide el desempeño de una fuente de luz para activar el fotorreceptor de la melanopsina. Este parámetro es calculado con la ecuación 2-8, donde  $C(\lambda)$  es la curva de eficacia circadiana, la cual se fundamenta en la curva de sensibilidad melanópica del ojo,  $S(\lambda)$  es el flujo espectral radiado por la fuente de luz y  $K_{c0}$  es el máximo CER igual a  $683 \text{ blm} \cdot \text{W}^{-1}$ . Las unidades del CER son los biolumenes (blm) o los lúmenes circadianos (cirlum) [3].

$$CER = K_{c0} \frac{\int_{380nm}^{780nm} C(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda)d\lambda S} \quad (2-8)$$

Con la eficacia circadiana de radiación es posible definir el factor de acción circadiano, el cual relaciona la acción biológica de la luz por unidad luminosa de respuesta visual. Es decir, el factor de acción circadiano relaciona la eficacia circadiana de radiación con la eficacia luminosa de radiación, tal como se presenta en la ecuación 2-9.

$$CAF = \frac{CER}{LER} \quad (2-9)$$

Por otro lado, en la ecuación 2-10 se presenta el calculo de la eficacia circadiana luminosa, la cual permite evaluar la cantidad de luz no visual emitida por una fuente de luz. Específicamente, esta métrica resulta del producto de la eficacia luminosa y el factor de acción circadiano.

$$CLE = LE \cdot CAF \quad (2-10)$$

Por otro lado, la CIE define la Eficacia Melanópica de Radiación Luminosa MELR, la cual se calcula como se muestra en la ecuación 2-11 [30].

$$MELR = \frac{\int(\lambda)S_{\alpha}(\lambda)d\lambda}{Km \int(\lambda)V(\lambda)d\lambda}, \quad (2-11)$$

donde  $(\lambda)S_{\alpha}$  es el espectro de acción melanópica,  $Km$  es  $683 \text{ lm}\dot{\text{W}}^{-1}$ ,  $V(\lambda)$  es la curva fotópica del ojo y  $\lambda$  es la distribución espectral de la fuente.

#### 2.3.4. Relación desempeño energético y desempeño visual

La iluminación es un factor importante en el desarrollo de las tareas visuales del ser humano. Se ha estudiado el efecto de diferentes fuentes de luz en el desempeño visual durante la lectura [31]. En el estudio, realizado en 2018, se comparan fuentes de luz fluorescente, de

tungsteno y LED de temperatura de color alrededor de los 3000 K y con un mismo flujo luminoso. El estudio reporta una relación significativa entre la iluminación y el desempeño visual. Adicionalmente, el estudio reporta una preferencia de la población bajo estudio por la tecnología fluorescente sobre la tecnología LED, lo cual indica que a pesar de ser de mayor desempeño energético las fuentes de luz LED, los usuarios preferían leer con una fuente de iluminación fluorescente.

Por otro lado, se han encontrado resultados que establecen el impacto de la iluminación en el desempeño de las tareas visuales en interiores [32]. Los autores reportan el efecto de la iluminancia, el contraste y la temperatura de color correlacionada en el desempeño de las tareas visuales del ser humano, siendo esta última variable la única que depende completamente del producto y no del diseño de iluminación. Las tareas visuales evaluadas fueron el rendimiento cognitivo y percepción, agudeza visual y reacción, memoria, razonamiento y productividad laboral.

El desempeño energético de fuentes de iluminación es ampliamente determinado con la eficacia luminosa del producto [3]. Por otro lado, la temperatura de color y el índice de reproducción de color son parámetros que permiten evaluar el desempeño visual de las fuentes de luz [28]. Con respecto a la relación entre estos tres parámetros, se ha encontrado que la eficacia luminosa máxima teórica disminuye al incrementar el índice de reproducción de color y disminuye al incrementar la temperatura de color sobre los 2500 K [33].

Con respecto a la relación entre el desempeño energético y visual con el desempeño circadiano de las fuentes de luz, varios estudios han informado resultados que permiten identificar correlaciones. Uno de ellos reporta la relación entre la eficacia luminosa LER y el factor de acción circadiana CAF, demostrando que al aumentar el CAF, la LER de la fuente disminuye [34]. Por otro lado, se ha encontrado una relación entre la temperatura de color correlacionada TCC y el CAF, mostrando que al aumentar la TCC de una fuente de luz, el CAF incrementa [34–36]. Además, se ha mostrado que al incrementar la TCC, el CAF aumenta pero la LER de la fuente disminuye [36, 37].

Además, se reporta una relación inversa entre la eficacia luminosa de las fuentes y métricas circadianas como la irradiancia melanópica, el estímulo circadiano y el radio melanópico a fotópico [38]. Además, se ha reportado una baja correlación entre la irradiancia melanópica y los índices de rendimiento de color  $R_f$  y  $R_g$  [38].

Estos hallazgos indican la importancia de considerar tanto el desempeño energético como el visual y circadiano al seleccionar y diseñar fuentes de luz para diferentes aplicaciones y entornos. Los resultados sugieren que el desempeño energético y el desempeño visual de las fuentes de luz no siempre se correlacionan directamente con su desempeño circadiano, lo que

destaca la necesidad de abordar de manera integral la eficiencia energética y los aspectos visuales y biológicos al diseñar sistemas de iluminación adecuados para mejorar el bienestar y la salud de las personas.

Teniendo en cuenta lo señalado por los estudios consultados se evidencia la importancia de considerar el desempeño energético, visual y circadiano en la evaluación global de las tecnologías LED de interior. Lo anterior, debido al impacto de la iluminación en la tarea visual, el confort y el ciclo circadiano del ser humano.

### 2.3.5. Metodologías para la evaluación multicriterio

Los métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM por sus siglas en inglés) son una de las soluciones más conocidas para resolver problemas que involucren diferentes perspectivas y requieran un análisis multicriterio para seleccionar la alternativa más apropiada [39]. De acuerdo con el tipo de problema, los métodos MCDM se clasifican en 4 categorías principales: de selección, clasificación, categorización y descripción [12]. En la tabla **2-9** se presentan los métodos MCDM desarrollados para resolver problemas multicriterio y el tipo de problemas al cual son aplicados.

**Tabla 2-9:** Métodos MCDM desarrollados para la solución de problemas multicriterio [12].

Problemas de selección	Problemas de clasificación	Problemas de categorización	Problemas de descripción
AHP	AHP	AHP Sort	
ANP	ANP		
MAUT/UTA	MAUT/UTA	UTADIS	
MACBETH	MACBETH		
PROMETHEE	PROMETHEE	Flow Sort	GAIA, FS-Gaia
ELECTRE I	ELECTRE III	ELECTRE-Tri	
TOPSIS	TOPSIS		
Goal Programming			
DEA	DEA		

Estos métodos MCDM con lógica difusa han sido ampliamente aplicados a problemas relacionados a la toma de decisiones en políticas energéticas. Por ejemplo, se han aplicado a la

selección del sitio de plantas de energía, evaluación de recursos energéticos y alternativas tecnológicas, inversión en energía y determinación de la política energética en la demanda [40].

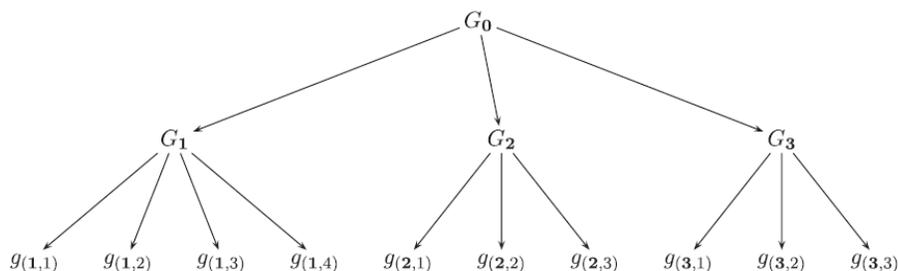
Los métodos que más se han implementado en este tipo de problemas son AHP (Proceso de Jerarquía Analítica), ANP (Proceso de Red Analítico), TOPSIS (Técnica del Orden de Preferencia por Semejanza a la Solución Ideal), ELECTRE (Eliminación y Elección Expresando la Realidad) y PROMETHEE (Clasificación de Preferencias Método de Organización para la Evaluación del Enriquecimiento) [40]. Específicamente, con relación a políticas de promoción de eficiencia energética, se reporta la aplicación del método ELECTRE-Tri para la categorización de iniciativas de eficiencia energética [41].

Por otro lado, El método TOPSIS se ha aplicado en la evaluación del desempeño de productos de iluminación LED integrando criterios de eficiencia energética, calidad de la energía y calidad de la iluminación [42, 43]. El primer estudio evalúa la eficiencia energética con la eficacia luminosa; la calidad de la energía con el flujo luminoso mantenido, el factor de potencia y la distorsión armónica de corriente; y la calidad de iluminación es evaluada con el IRC, el ángulo de apertura y la intensidad lumínica pico [42].

El segundo estudio no aplica los indicadores de flujo luminoso mantenido, ángulo de apertura e intensidad lumínica pico en la evaluación [43]. En ambos estudios, la evaluación final de los productos se realiza mediante una clasificación del mejor equipo evaluado al peor. La aplicación de los estudios previos se realiza desde una perspectiva del regulador, considerando el escenario base para la propuesta de una nueva etiqueta en Brasil.

Adicionalmente, se propone la creación de una etiqueta de categorización dónde los productos de iluminación LED sean categorizados considerando los criterios de eficiencia energética, calidad de energía y calidad de iluminación por separado y en conjunto [43]. Se propone visualizar en la etiqueta el rendimiento global obtenido por la fuente de luz y el rendimiento para cada uno de los criterios, mediante una categorización discreta de la A a la E, siendo A el de mejor desempeño y E el de menor desempeño. Para lograr esto, se requiere la aplicación de un método MCDM de categorización en la evaluación de estas tecnologías.

Con relación a la categorización, diversos autores proponen la construcción de metodologías basadas en el método ELECTRE-Tri para la categorización de alternativas mediante la evaluación de diversos criterios [4, 44]. Específicamente, se propone la construcción de un modelo MCHP (Proceso de Jerarquía de Criterios Múltiples) aplicado a los métodos ELECTRE-Tri para la categorización de alternativas estructuradas jerárquicamente. Este método, permite la categorización de las alternativas de acuerdo con los criterios establecidos de forma independiente o conjunta, como se observa en la figura 2-9, donde, la alternativa puede ser evaluada en general con el criterio  $G_0$ , o independientemente con los criterios  $G_1$ ,  $G_2$  o  $G_3$  [4].



**Figura 2-9:** Ejemplo jerarquización método MCHP ELECTRE-Tri [4].

El método de evaluación aplicado al etiquetado en iluminación será presentado a mayor detalle en el capítulo 4.

## 2.4. Tendencias tecnológicas y normatividad

La tecnología LED ha avanzado fuertemente en los últimos años. Hoy en día existen principalmente dos tipos de arquitecturas de tecnología LED, los PC-LED y los RGB, a continuación, se presentan las tendencias de la tecnología LED, los referentes normativos para la evaluación del desempeño y una revisión relacionada con el ciclo de vida ambiental de estos productos.

### 2.4.1. Tendencias en los productos LED

Actualmente, la iluminación con tecnología de estado sólido se fundamenta en tres tipos de productos: los diodos emisores de luz (LEDs), los diodos emisores de luz orgánicos (oLEDs) y los diodos emisores de luz de polímero (pLEDs) [45–47], siendo los LEDs los de mayor penetración en el mercado. Con respecto a los LEDs existen principalmente dos tipos de arquitecturas: PC-LED y cm-LED o RGB [3].

La arquitectura PC-LED se compone de un diodo que genera luz azul y un fósforo amarillo, los cuales en combinación generan la luz blanca, este tipo de LEDs tienen una alta eficacia luminosa pero la reproducción de color se ve comprometida por la ausencia de componentes rojos en el espectro. Por otro lado, la tecnología RGB se compone de un diodo que genera en rojo, verde y azul, estos LEDs reportan un mejor rendimiento de color, pero actualmente su eficacia se ve limitada por el desempeño energético del LED verde [3]. Recientemente, también se están implementando PC-LEDs con un diodo emisor de luz ultravioleta UV cubierto por fósforos, esta tecnología reporta mejor rendimiento de color que el diodo azul pero una menor eficacia [3].

La importancia de la tecnología LED radica en su alta penetración para uso de iluminación y por consiguiente su impacto en la matriz de consumo energético. Estudios reportan que para

el 2018 el 36,9% del mercado de la iluminación era LED y estima un 87,4% de penetración para el 2030 [33]. Con respecto a la tendencia de la eficacia en la tecnología de los LEDs, se reporta un estimado de que la arquitectura PC-LED alcanzaría un límite comercial de 255 lm/W para 2025, mientras que la arquitectura cm-LED podría alcanzar valores comerciales de 330 lm/W en 2050 [48].

### 2.4.2. Referentes normativos

Con el objetivo de validar los indicadores propuestos para la evaluación del desempeño energético, visual y circadiano de los LEDs, organizaciones de carácter internacional han propuesto metodologías estandarizadas para la realizar pruebas de laboratorio y caracterizar los productos LED.

Con respecto a la medición de los parámetros de desempeño energético y visual, la IES publicó en el 2019 el estándar ANSI/IES LM-79-19, el cual define los métodos para la medición de parámetros eléctricos y fotométricos de productos de iluminación de estado sólido [49]. Adicionalmente, en el año 2021, considerando la penetración de las tecnologías de espectro variable, la IES publicó el estándar ANSI/IES TM-38-21, el cual define las medidas fotométricas y eléctricas de productos de iluminación de estado sólido *Tunable-White* [50].

Por otro lado, con relación a los indicadores de color, la IES publicó en el 2020 el estándar TM-30-20. Este estándar reporta el método IES para la evaluación del rendimiento de color de una fuente de luz. El estándar introduce dos nuevas métricas para la evaluación del rendimiento de color, las cuales son el índice de fidelidad Rf y la gama de reproducción de color Rg [29]. Estas dos nuevas métricas propuestas por la IES serán evaluadas en el modelo propuesto durante este trabajo.

Finalmente, con relación a los indicadores de evaluación del desempeño circadiano de las fuentes de luz, la Comisión Internacional de Iluminación CIE publicó en el 2018 el estándar CIE S 026/E:2018, el cual define el sistema de metrología para la evaluación de la radiación óptica para respuestas a la luz influenciadas por ipRGC, es decir, el efecto de la luz sobre los ciclos circadianos del ser humano. El principal parámetro definido por la CIE es la eficacia melanópica de radiación luminosa (MELR) [30].

### 2.4.3. Ciclo de vida ambiental fuentes de luz LED

El impacto ambiental del uso de la tecnología LED para la iluminación de espacios de interiores puede ser implementado como un criterio en el análisis del desempeño energético de estos productos. Para ello, se hace necesario establecer el ciclo de vida de los LEDs, las principales causas de falla y el manejo de post-consumo de los productos.

Con relación al ciclo de vida, se propone un ciclo compuesto por 6 etapas: materiales, fabricación, transporte, uso, mantenimiento y fin de la vida útil o post-consumo. Además, se ha evaluado el impacto ambiental de nuevos productos de tecnología LED en comparación con productos existentes, encontrando que los nuevos productos tienen un impacto ambiental un 60 % menor que los existentes. Adicionalmente, se han identificado las etapas de mayor impacto ambiental, en orden descendente, como el uso, la fabricación, el post-consumo y el transporte [51].

Por otro lado, otros autores proponen la evaluación del ciclo de vida de los LEDs en 5 etapas: materiales, fabricación, transporte, uso y post-consumo [52]. Los autores hacen la evaluación de como los productos LED han cambiado durante 5 años y como ese cambio tecnológico se ve reflejado en el impacto ambiental. Lo anterior, considerando 13 criterios de análisis, dentro de los cuales se encuentran el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono, desechos radioactivos, entre otros. Los autores encontraron que las nuevos productos se desempeñan mejor ambientalmente comparados con los antiguos.

Una de las principales ventajas de la tecnología LED es la prolongada vida útil de los productos (fabricantes reportan entre 10 000 y 100 000 horas). Sin embargo, se ha propuesto la necesidad de desarrollar modelos más robustos para la evaluación de la vida útil considerando los causales de falla más comunes en estos productos [53]. Los autores encontraron que el 40 % de las fallas de productos LED son ocasionadas por fallas electrónicas en el *driver*, el 20 % por fallas en el chip LED y el 16 % por ingreso de humedad.

Finalmente, considerando la penetración de la tecnología LED en el mercado de la iluminación y el contenido de metales valiosos y peligrosos como cobre, aluminio, hierro, zinc, plomo, arsénico y antimonio en estos productos [54], se requiere establecer un adecuado plan de post-consumo. Por lo cual, se propone un modelo para estimar la generación de desechos LED y su contenido de metales en Canadá, se ha encontrado que el aluminio es el principal metal presente en las lámparas LED con una concentración superior al 22 %, seguida por el hierro, el cobre y el zinc [54]. Por otro lado, los autores estimaron el beneficio económico de reciclar los metales valiosos de los desechos LED en 41,9 millones de dolares para 2021 y un potencial de ahorro energético de los materiales reciclados en comparación con los materiales vírgenes del 95 % para el aluminio, 88 % para los plásticos y 75 % para el cobre.

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar el ciclo de vida completo de los productos de iluminación LED para evaluar su sostenibilidad y reducir su huella ambiental, y destacan la relevancia de enfocarse en estrategias de mejora en las etapas que presentan mayor impacto para lograr una mayor eficiencia y responsabilidad ambiental en el sector.

## 2.5. Selección de los productos para pruebas piloto

Con el objetivo de evaluar los productos de iluminación LED de interior disponibles en el mercado colombiano, se propone llevar a cabo pruebas de laboratorio en un grupo de bombillas y luminarias que abarquen las diversas tecnologías mencionadas en la sección 2.1.3, y que tengan como principal aplicación el sector residencial y comercial.

Para cubrir los productos del mercado colombiano de la muestra, se seleccionan las bombillas y luminarias de entre los productos disponibles en el mercado. De esta manera, se busca obtener una visión integral del desempeño energético y visual de las tecnologías LED de iluminación interior en Colombia, proporcionando información para el desarrollo de la etiqueta de energía y promoviendo la toma de decisiones informadas por parte de los usuarios finales.

Considerando lo anterior, se realizará la evaluación de los parámetros eléctricos, lumínicos, de color y circadianos a 25 referencias de bombillas y luminarias del mercado colombiano, seleccionadas de las marcas disponibles en los centros de consumo. Además, se adquirirán por cada referencia 3 equipos con el fin de evitar una valoración errónea por problemas técnicos que pueda tener alguna fuente de luz.

## 3 Pruebas de laboratorio

Con el objetivo de evaluar los parámetros de desempeño energético, visual y circadiano de las tecnologías LED de interior en Colombia, se realiza un conjunto de pruebas de laboratorio a una muestra de productos comercializados en el país. Los productos son seleccionados con el objetivo de establecer un grupo del mercado colombiano enfocado en el usuario final. A continuación, se presenta la metodología implementada en la realización de las pruebas y los resultados obtenidos.

### 3.1. Metodología

La metodología implementada para la realización de las pruebas de laboratorio consta de varias etapas. En primer lugar, se lleva a cabo la selección de los equipos de la muestra. Luego, se describe el procedimiento para medir los parámetros luminosos de los productos, seguido del método utilizado para medir los parámetros eléctricos. Finalmente, se presenta el proceso de medición del espectro de las fuentes de luz y el tratamiento de estos datos para calcular tanto los parámetros visuales como los circadianos. Estas etapas son fundamentales para obtener resultados precisos y confiables en las pruebas de laboratorio, garantizando así una evaluación completa y exhaustiva del desempeño energético, visual y circadiano de las tecnologías LED de iluminación interior en el mercado colombiano.

#### 3.1.1. Selección de productos

De acuerdo con lo descrito en la sección 2.5 se seleccionaron 25 referencias de productos de iluminación LED de interior, de las cuales 10 son de espectro variable y 15 son de espectro fijo. Las 25 referencias seleccionadas se distribuyen entre bombillas, luminarias, fuentes direccionales y fuentes omnidireccionales como se muestra en la figura **3-1**. De cada una de las referencias se adquieren por lo menos tres productos, con el fin de evaluar una muestra por referencia y evitar valoraciones erróneas individuales. Los productos adquiridos son descritos en el anexo A.



**Figura 3-1:** Muestra de productos de iluminación LED del mercado colombiano probados en laboratorio.

Para cada uno de los productos descritos se realizan pruebas de laboratorio con el objetivo de evaluar variables eléctricas, lumínicas, de color y circadianas. Las pruebas se realizan en el Laboratorio de Ensayos Eléctricos LABE de la Universidad Nacional de Colombia, el cual está acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025:2017 para la realización de pruebas de fotometría, flujo luminoso y características eléctricas a luminarias y bombillas LED con la norma ANSI/IES LM 79:2019.

Las variables medidas directamente en laboratorio son las siguientes:

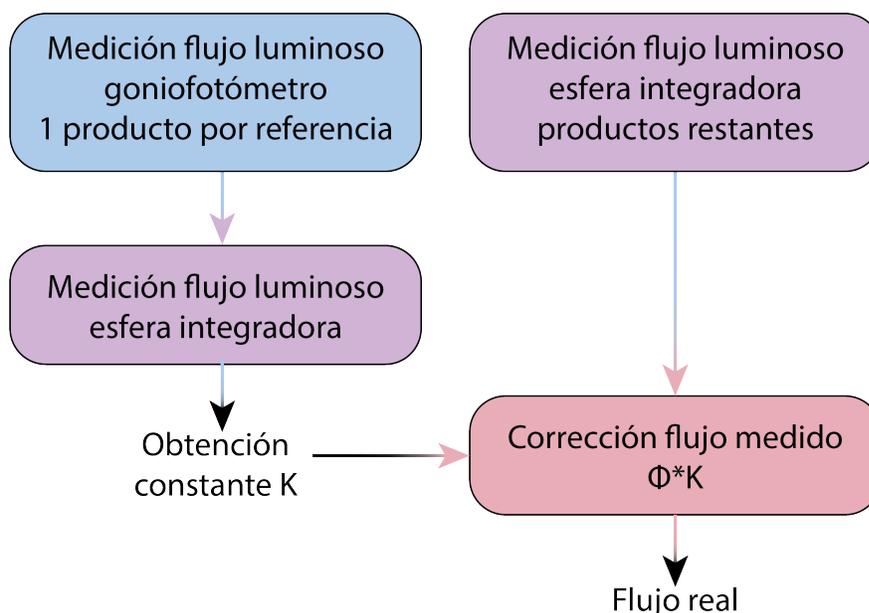
- Parámetros luminosos: Flujo luminoso y fotometría.
- Parámetros eléctricos: Tensión, corriente, potencia, factor de potencia y distorsión armónica de tensión y corriente.
- Espectro.

A continuación, se presenta la descripción de los métodos seguidos y equipos utilizados para la medición de los parámetros descritos anteriormente.

### 3.1.2. Medición de parámetros luminosos

La medición del flujo luminoso de las fuentes de luz LED bajo estudio se realiza con dos instrumentos, el goniofotómetro y la esfera integradora, siguiendo el estándar ANSI/IES LM 79:2019 para fuentes de espectro fijo y el estándar ANSI/IES TM 38:2021 para fuentes de espectro variable. Adicionalmente, con el goniofotómetro es posible obtener la matriz de intensidades o fotometría de las fuentes.

Aunque el goniofotómetro es el instrumento patrón para realizar las pruebas de flujo luminoso en el laboratorio LABE, el tiempo requerido para la medición de cada producto es de alrededor 1 hora y 30 minutos. Es por ello que se realizan las pruebas para cada referencia de estudio combinando las mediciones del goniofotómetro y la esfera integradora como se muestra en la figura 3-2.



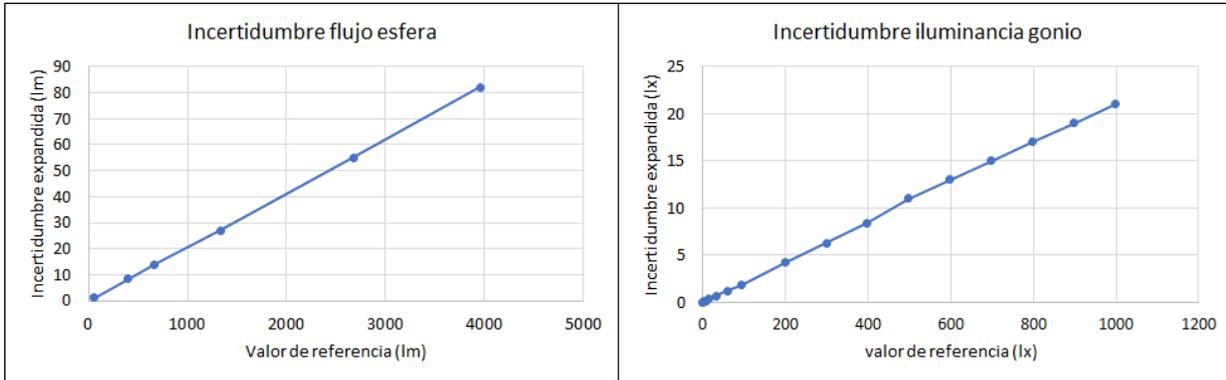
**Figura 3-2:** Metodología de medición flujo luminoso.

Cabe aclarar que la esfera integradora disponible en el laboratorio LABE es una esfera de medición  $4\pi$ , es decir, para fuentes omnidireccionales. Por ello, las mediciones de las referencias direccionales se realizan todas en el goniofotómetro.

A continuación, se describen los equipos implementados en el proceso de medición de los parámetros luminosos.

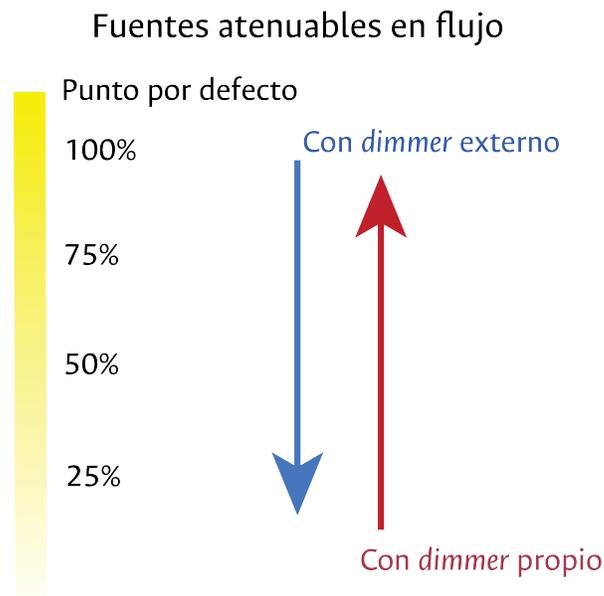
- **Goniofotómetro:** El cálculo del flujo luminoso se realiza mediante la medición de la iluminancia de las fuentes de luz. El instrumento utilizado es un luxómetro LMT GO-DS-2000 con certificado de calibración LABE05XX9636 V1. La incertidumbre del equipo se presenta en el certificado de calibración del anexo B.
- **Esfera integradora:** El flujo luminoso es determinado en la esfera integradora con la medición de la iluminancia de las fuentes de luz. El instrumento utilizado es el fotómetro LMT U1000 con certificado de calibración LABE05CC8932. La incertidumbre de la medida se presenta en el certificado de calibración del anexo B.

En la figura 3-3 se muestra la incertidumbre expandida de los equipos utilizados para la medición del flujo luminoso en el goniofotómetro y en la esfera integradora.



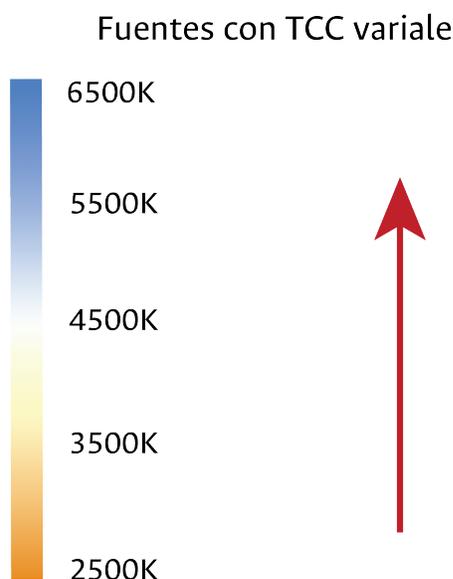
**Figura 3-3:** Incertidumbre de los equipos utilizados para la medición del flujo luminoso en el goniofotómetro y la esfera integradora.

Con relación a las fuentes LED de espectro variable, la medición del flujo se realizó en la esfera integradora siguiendo las recomendaciones del estándar ANSI/IES TM 38:2021 en cuanto a los puntos de medición. Las fuentes de espectro variable consideradas en el estudio se dividen en dos grupos principales, fuentes atenuables en flujo luminoso y fuentes con temperatura de color TCC variable. El procedimiento seguido en las mediciones es el presentado en la figura 3-4 para las fuentes con flujo luminoso atenuable y 3-5 para las fuentes con temperatura de color variable.



**Figura 3-4:** Metodología de medición para fuentes con atenuación de flujo luminoso.

En referencia a los equipos atenuables en flujo luminoso se tienen principalmente dos grupos. El primero cuyo funcionamiento se da con un *dimmer* externo a la fuente de luz y el segundo los productos que tienen el *dimmer* incorporado y se controlan desde una aplicación móvil. Para los productos con el sistema de control externo la medición se realiza primero en el punto de operación por defecto, es decir, sin *dimmer* y luego se realiza la medición en orden descendente iniciando con la señal de control en el 100 % y terminando con 0 %. Por otro lado, los productos con sistema de control incorporado, la medición se realiza de forma ascendente iniciando en el punto de 0 % y finalizando en 100 %.



**Figura 3-5:** Metodología de medición para fuentes con temperatura de color variable.

Por otro lado, los productos de temperatura de color variable se pueden agrupar en 3 tipos. Las fuentes de luz con chips LED blanco frío y blanco cálido y con puntos de operación discretos, es decir, que la temperatura de color varía al apagar y encender el interruptor, por ejemplo. El segundo tipo son las fuentes de luz LED con chips blanco frío y blanco cálido cuya variación del espectro es continua. Finalmente, el tercer tipo son fuentes de luz LED RGB, en las cuales, la variación de la temperatura de color es continua. Para las fuentes con variación de la TCC continua la medición se hizo en 5 puntos de forma ascendente.

Para los equipos que permitían variar la temperatura de color y además atenuar el flujo luminoso, la evaluación se realiza únicamente considerando la variación de la temperatura de color, teniendo en cuenta el impacto en la eficacia luminosa de radicación melanópica y con el fin de variar solamente un parámetro.

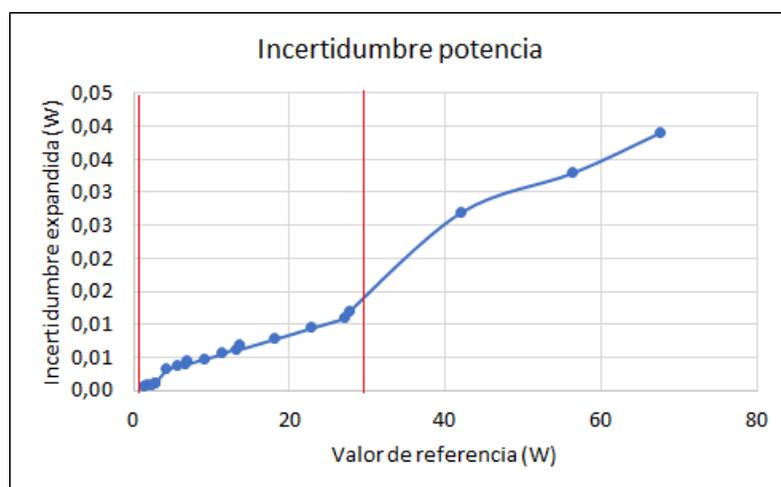
El procedimiento seguido para todas las fuentes de espectro variable es el siguiente:

1. Se estabiliza la fuente en el primer punto de medición durante 30 minutos.
2. Se mide el primer punto de medición.
3. Se cambia al segundo punto de medición y se estabiliza la fuente durante 15 minutos.
4. Se mide el segundo punto de operación.
5. El procedimiento se repite para los puntos 3, 4 y 5 con un tiempo de estabilización de 15 minutos.

### 3.1.3. Medición de parámetros eléctricos

La medición de los parámetros eléctricos de las fuentes de luz LED bajo estudio se realiza de manera simultánea a la medición del flujo luminoso y siguiendo el estándar ANSI/IES LM 79:2019. La medición se realiza con el analizador de potencia YOKOGAWA WT1800 tanto para las fuentes medidas en el goniómetro como aquellas medidas en la esfera integradora. El instrumento cuenta con el certificado de calibración LABE05CC7624V1 de enero del 2023 y la incertidumbre se presenta en el certificado de calibración del anexo B.

En la figura 3-6 se presenta la incertidumbre expandida para el equipo de medición de las variables eléctricas de las fuentes de luz bajo estudio. En la figura se enmarca en rojo el rango de medición para los productos evaluados en laboratorio, los cuales van desde 3 W hasta 30 W.



**Figura 3-6:** Incertidumbre del equipo utilizado para la medición del flujo luminoso en el goniómetro y la esfera integradora.

### 3.1.4. Tratamiento del espectro

La medición del espectro de las fuentes de luz LED se realiza con el espectroradiómetro ORB SP 200 con un rango de medición desde los 350 nm hasta los 1000 nm, el cual cuenta con certificado de calibración CNM-CC-520-033/2018 de marzo de 2018, en el cual se presenta la incertidumbre del equipo y puede ser consultado en el anexo B.

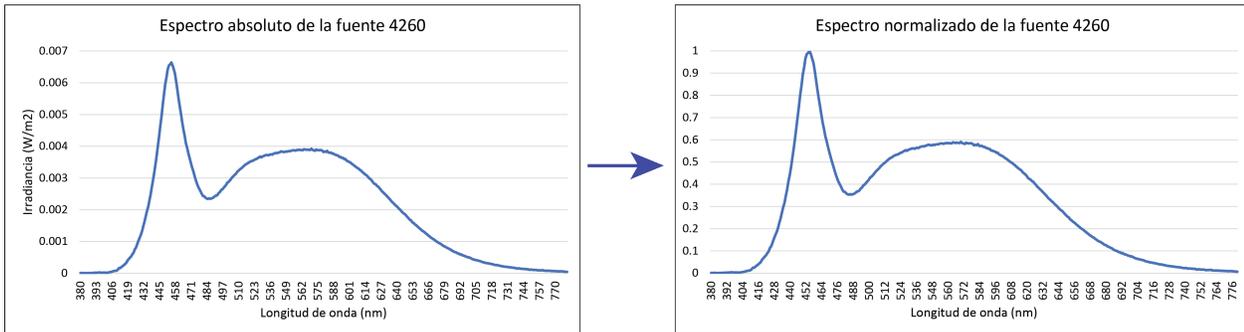
Considerando la fecha de calibración del equipo, en el laboratorio LABE cuentan con una bombilla LED de aseguramiento para las mediciones de parámetros visuales de la cual se conoce los valores de IRC y TCC medidos en mayo de 2022. Estos datos son comparados con los medidos en junio de 2023 y se reportan en la tabla **3-1**. De los resultados no se evidencia una variación fuerte en las mediciones.

**Tabla 3-1:** Valores de IRC y TCC medidos en 2022 y 2023 con el espectroradiómetro ORB SP 200.

Fecha	TCC	IRC
Mayo 2022	2907	82,4
Junio 2023	2913	82,4

La medición del espectro se realiza siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 3.1.2 para el flujo luminoso. El espectro se obtiene mediante la medición directa a la fuente de luz.

El cálculo de los parámetros de color se realiza aplicando el procedimiento establecido en el estándar ANSI/IES TM-30:2020. Específicamente, se implementa la herramienta de cálculo *IES TM-30-18 Advanced Calculation Tool v2.01*, desarrollada por la *Illuminating Engineering Society* [29], para calcular el IRC, R<sub>f</sub> y R<sub>g</sub>. El procedimiento de la herramienta de cálculo de la IES requiere como entrada la distribución espectral relativa y normalizada de la fuente luminosa entre los 380 nm y 780 nm, los datos medidos tienen una resolución de 1 nm. Para ello, el espectro obtenido en laboratorio es normalizado considerando el mayor valor de irradiancia como 1, como se muestra en la figura **3-7**.



**Figura 3-7:** Normalización de espectro medido en laboratorio. Ejemplo fuente código 4260.

Con relación al cálculo de la eficacia melanópica de radiación luminosa, se implementa el método establecido en el estándar CIE S 026/E:2018 mediante la herramienta de excel *CIE S 026 alpha-opic Toolbox* desarrollada por la *International Commission on Illumination*. La herramienta de cálculo requiere la distribución espectral entre 380 nm y 780 nm como entrada, específicamente en la metodología seguida en este documento la distribución espectral obtenida en pruebas de laboratorio es la irradiancia de la fuente, esta distribución es la implementada en el cálculo. La resolución del espectro recomendada es de entre 5 y 1 nm.

## 3.2. Resultados

Luego de seguir la metodología descrita anteriormente, se obtienen los valores de eficacia, factor de potencia (FP), distorsión armónica de corriente (ITHD), temperatura de color correlacionada (TCC), índice de reproducción de color (IRC), índice de fidelidad (Rf), índice de gamut (Rg) y eficacia melanópica de radiación luminosa (MELR). Los resultados obtenidos para cada fuente de luz pueden ser consultados en el anexo C.

Considerando que se tienen entre 3 y 4 productos por referencia, se obtuvo el promedio para los valores descritos previamente. Los resultados promedio son los que se presentarán en las siguientes secciones, por lo cual se muestra los resultados obtenidos para cada referencia. Los resultados por referencia pueden ser consultados en el anexo D.

### 3.2.1. Medición de fuentes en espectro fijo

Con respecto a la variedad de tecnologías de las fuentes LED medidas en laboratorio, se sigue la metodología establecida por el reglamento delegado de la comisión 2019/2015 de la Unión Europea [13], en el cual se clasifican todas las tecnologías de iluminación dentro de una misma etiqueta con la eficacia total de la red eléctrica  $\eta_{TM}$ , la cual se calcula como se especifica en la ecuación 3-1.

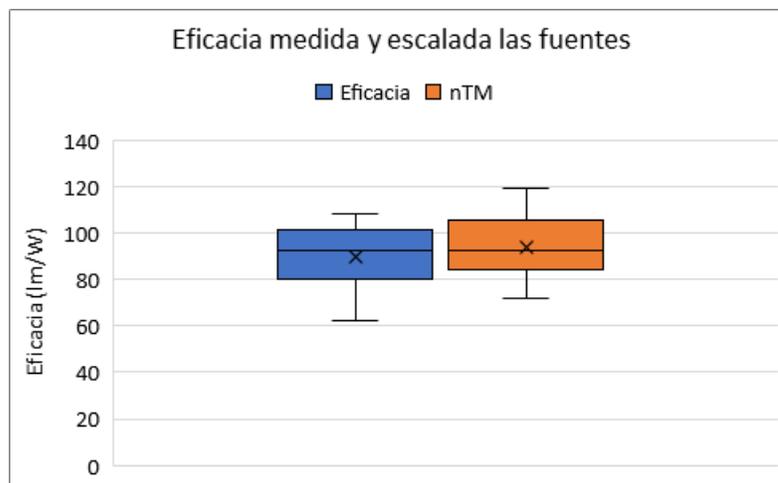
$$\eta_{TM} = \frac{\phi_{use}}{P_{on}} \times F_{TM}, \quad (3-1)$$

donde  $\phi_{use}$  es el flujo luminoso de la fuente,  $P_{on}$  es la potencia de encendido y  $F_{TM}$  es un factor aplicable de acuerdo con la tabla **3-2**.

**Tabla 3-2:** Factores FTM por tipo de fuente luminosa [13].

Tipo de fuente luminosa	Factor FTM
Fuentes no direccionales (NDLS) que funcionan con la red eléctrica (MLS)	1,000
Fuente no direccionales (NDLS) que no funcionan con la red eléctrica (NMLS)	0,926
Fuentes direccionales (DLS) que funcionan con la red eléctrica (MLS)	1,176
Fuentes direccionales (DLS) que no funcionan con la red eléctrica (NMLS)	1,089

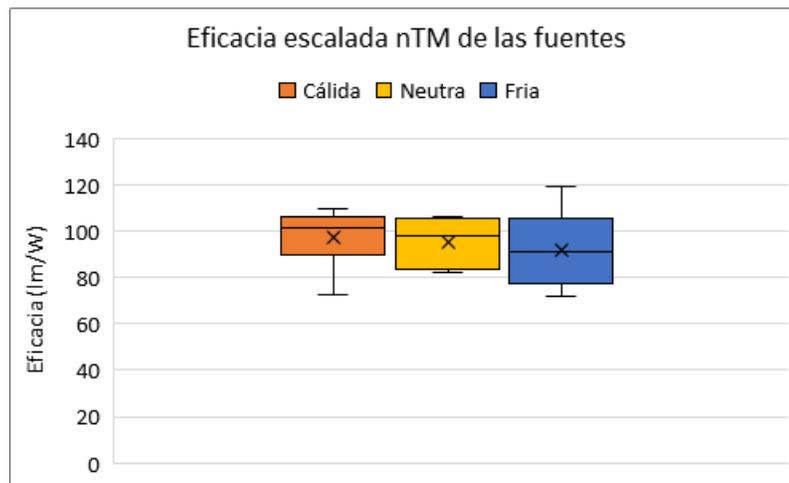
Las fuentes no direccionales (NDLS) son aquellas con ángulo de apertura mayor a  $120^\circ$ , las fuentes que funcionan con la red eléctrica (MLS) son aquellas con *driver* incorporado, las bombillas y las fuentes que no funcionan con la red eléctrica (NMLS), es decir son aquellas con *driver* independiente.



**Figura 3-8:** Eficacia medida en laboratorio y eficacia total de la red eléctrica  $\eta_{TM}$ .

En la figura 3-8 se presenta la distribución del valor de eficacia luminosa medida en laboratorio y la  $\eta_{TM}$  escalada con la metodología de la Unión Europea. Se evidencia que el rango de  $\eta_{TM}$  es superior al rango de la eficacia medida, esto se debe al factor  $F_{TM}$  y no al producto, por lo cual los dos valores de eficacia no son comparables, sin embargo, la metodología seguida por la Unión Europea permite incorporar todos los productos en un solo reglamento. Por lo anterior, se adopta la metodología de la Unión Europea para el análisis de este documento. En adelante, los valores de eficacia reportados corresponden a la eficacia total de la red eléctrica  $\eta_{TM}$ .

Por otro lado, en la figura 3-9 se muestran los rangos de eficacia de acuerdo con la TCC de las fuentes. Se evidencia que de la muestra seleccionada para el mercado colombiano, el valor medio de eficacia es superior a los 90 lm/W para las tres TCC, el valor medio inferior es para TCC fría con 92 lm/W y el más alto es para TCC cálida con 97 lm/W. Sin embargo, el valor de eficacia más alto para la muestra medida en laboratorio es para TCC fría con 120 lm/W. De la muestra medida 7 referencias son de TCC cálida, 6 neutra y 12 fría.



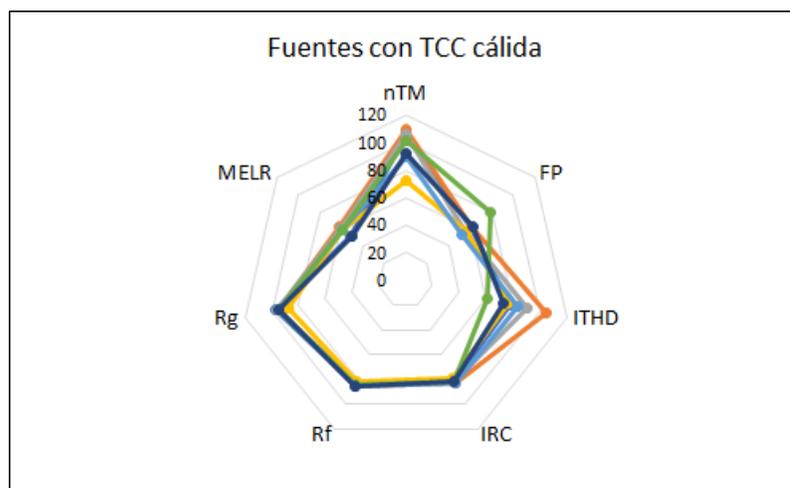
**Figura 3-9:** Eficacia total de la red eléctrica  $\eta_{TM}$  de acuerdo con la TCC de las fuentes para la muestra del mercado colombiano medida en laboratorio (7 referencias TCC cálida, 6 neutra y 12 fría).

Ahora, se presentan los resultados globales de las fuentes medidas con relación a los parámetros de eficacia ( $\eta_{TM}$ ), factor de potencia (FP), distorsión armónica de corriente (ITHD), índice de reproducción de color (IRC), índice de fidelidad (Rf), índice de gamut (Rg) y eficacia melanópica de radiación luminosa (MELR). En la figura 3-10 se muestran los datos de las 7 referencias de TCC cálida, para este tipo de fuentes se evidencia una alta variación con respecto a la media entre los valores de eficacia, FP e ITHD como se muestra en la tabla 3-3. Adicionalmente, se observa una baja variación entre los valores de IRC, Rf y Rg. La variación se calcula como se muestra en la ecuación 3-2.

$$var = \frac{S}{\bar{x}}, \quad (3-2)$$

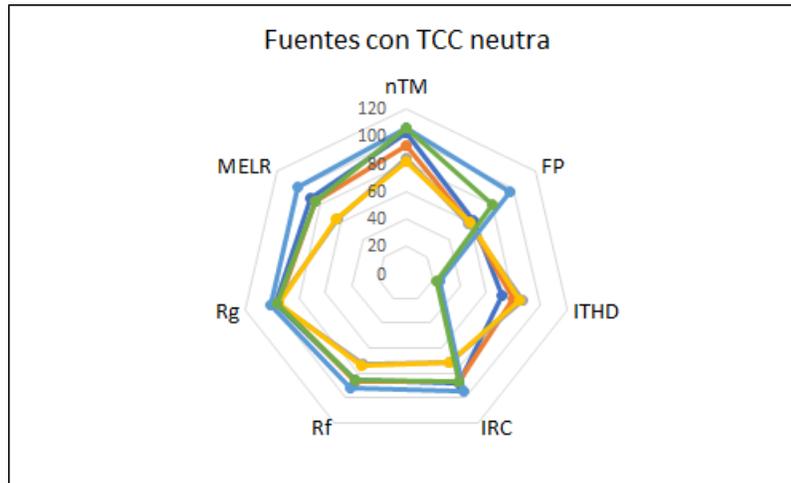
donde  $S$  es la desviación estándar de los datos y  $\bar{x}$  es el promedio de los datos.

Debido a que los valores de la mayoría de los parámetros varían entre 0 y 100, el valor de FP mostrado es  $FP \times 100$  y el valor de la MELR es  $MELR \times 100$ . El escalamiento de los valores aplica para las figuras 3-11 y 3-12.

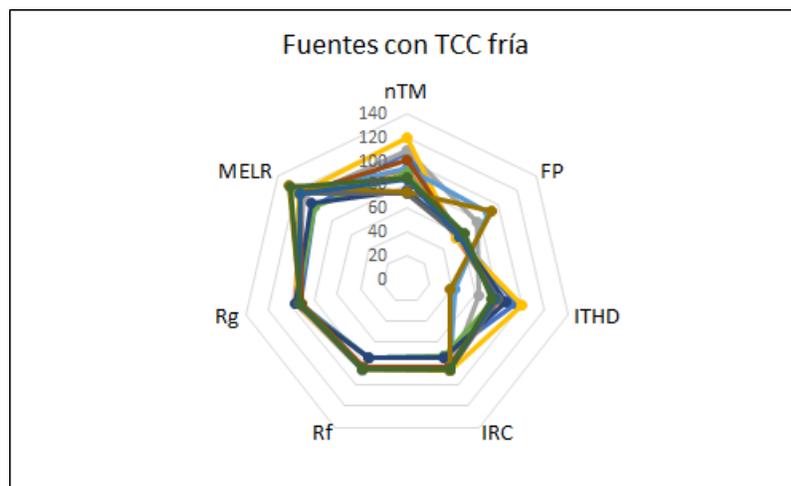


**Figura 3-10:** Resultados de los parámetros de evaluación del desempeño de LED para las fuentes de TCC cálida de la muestra medida. El valor de FP mostrado es  $FP \times 100$  y el de la MELR es  $MELR \times 100$ . Muestra 7 referencias.

Con relación a las fuentes de iluminación de temperatura de color neutra, cuyos resultados se presentan en la figura 3-11, se evidencia una alta variación entre los valores de eficacia, FP, ITHD, IRC y MELR como se muestra en la tabla 3-3. Solamente los valores de Rf y Rg muestran una variación inferior al 10%. Finalmente, los resultados de las fuentes de TCC fría se presentan en la figura 3-12, en la cual se observa una alta variación en los valores de eficacia, FP e ITHD de acuerdo con los datos reportados en la tabla 3-3.



**Figura 3-11:** Resultados de los parámetros de evaluación del desempeño de LED para fuentes de TCC neutra de la muestra medida. El valor de FP mostrado es  $FP \times 100$  y el de la MELR es  $MELR \times 100$ . Muestra 6 referencias.



**Figura 3-12:** Resultados de los parámetros de evaluación del desempeño de LED para fuentes de TCC fría de la muestra medida. El valor de FP mostrado es  $FP \times 100$  y el de la MELR es  $MELR \times 100$ . Muestra 12 referencias.

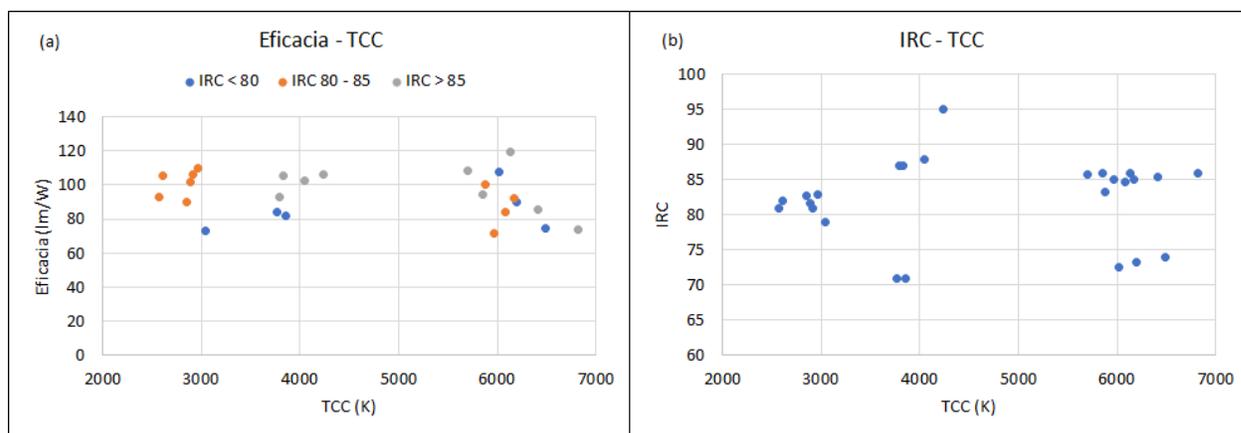
De los resultados globales, es decir de las 25 referencias medidas, se evidencia una alta variación entre los valores de eficacia, FP, ITHD y MELR de 14 %, 20 %, 29 % y 29 % respectivamente. Esto permite establecer la necesidad de proporcionar herramientas que permitan a los usuarios finales diferenciar los productos a la hora de adquirirlos y seleccionarlos de acuerdo con su desempeño. Adicionalmente, aunque los parámetros de desempeño visual no reporten una amplia variación global, se evidencia una variación del 12 % y 9 % en los valores de Rf y Rg, por lo cual, también es importante considerarlo.

Con la información analizada se concluye la necesidad de reportar en la etiqueta el desempeño visual y circadiano de las fuentes, además del desempeño energético y eléctrico.

**Tabla 3-3:** Porcentaje de variación con respecto a la media para los valores medidos en laboratorio de las referencias de la muestra del mercado colombiano.

	$\eta_{TM}$	FP	ITHD	IRC	Rf	Rg	MELR
Cálida	13 %	14 %	17 %	2 %	1 %	3 %	8 %
Neutra	11 %	23 %	48 %	12 %	9 %	2 %	18 %
Fría	16 %	21 %	25 %	7 %	6 %	2 %	8 %
Global	14 %	20 %	29 %	7 %	6 %	3 %	29 %

Finalmente, se busca establecer la correlación entre variables de desempeño de la muestra del mercado colombiano de fuentes medidas. La primera correlación estudiada es entre la temperatura de color correlacionada y la eficacia luminosa, en la figura 3-13 (a) se muestran los resultados obtenidos para la muestra de productos colombianos evaluada. En la figura se presentan los datos agrupados de acuerdo con el índice de reproducción de color de la fuente. El coeficiente de correlación entre estas dos variables es de -0,23, lo cual indica que no existe una correlación fuerte entre los dos parámetros y una leve tendencia a disminuir la eficacia de la fuente cuando se incrementa la TCC, aclarando que estos resultados se reportan para la muestra del mercado colombiano evaluada en laboratorio.

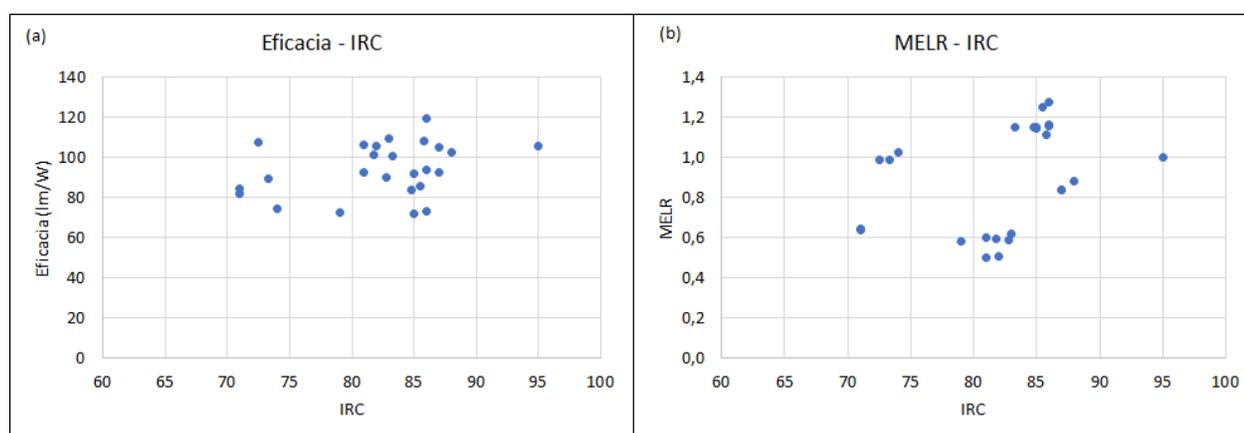


**Figura 3-13:** Dispersión de datos medidos de la muestra seleccionada. (a) eficacia y TCC. (b) IRC y TCC. Muestra 25 referencias.

Por otro lado, en la figura **3-13** (b) se presenta la dispersión de datos del IRC con relación a la TCC. Para este par de parámetros el coeficiente de correlación es de 0,04, lo cual indica que no existe una correlación entre las variables para la muestra estudiada.

A continuación, en la figura **3-14** (a) se presenta la dispersión de datos de la eficacia con relación al IRC. Para este conjunto de datos se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,31, lo cual indica una baja correlación entre estos dos parámetros y una leve tendencia a tener una mayor eficacia al incrementar el IRC, aclarando que este resultado se da para las fuentes de la muestra del mercado colombiano evaluadas.

Ahora, en la figura **3-14** (b) se presenta la dispersión de la MELR con relación al IRC de la cual se obtiene un coeficiente de correlación de 0,35. De los resultados obtenidos se observa una baja relación entre los dos parámetros y una leve tendencia a incrementar la MELR cuando se incrementa el IRC de las fuentes de la muestra del mercado colombiano obtenidas.

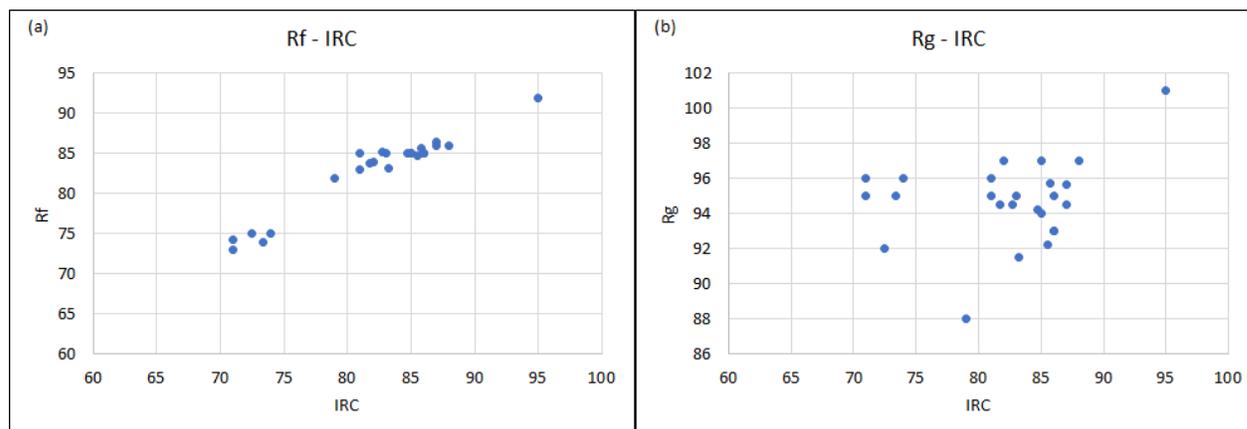


**Figura 3-14:** Dispersión de datos medidos de la muestra. (a) eficacia e IRC. (b) MELR e IRC. Muestra 25 referencias.

En la figura **3-15** (a) se muestra la dispersión de datos del Rf con relación al IRC. El coeficiente de correlación entre estas dos variables es de 0,97, lo cual indica una alta correlación entre las variables y una tendencia clara a incrementar el Rf cuando se incrementa el IRC de la fuente. Los valores de Rf y Rg son calculados siguiendo el memorando técnico ANSI/IES TM-30-20 con base en el espectro medido en laboratorio.

Por otro lado, en la figura **3-15** (b) se presentan los datos de dispersión del Rg con relación al IRC. Los resultados reportan un coeficiente de correlación de 0,28, lo cual indica una baja correlación entre variables y una leve tendencia a incrementar el Rg al incrementar el IRC. Los resultados obtenidos en la correlación entre las variables para la evaluación del desempeño visual de las fuentes muestran una relación fuerte entre el IRC y el Rf pero baja

entre el IRC y el Rg. Esta información sugiere la no necesidad de la estimación del IRC y Rf en simultaneo.



**Figura 3-15:** Dispersión de datos medidos de la muestra. (a) Rf e IRC. (b) Rg e IRC.

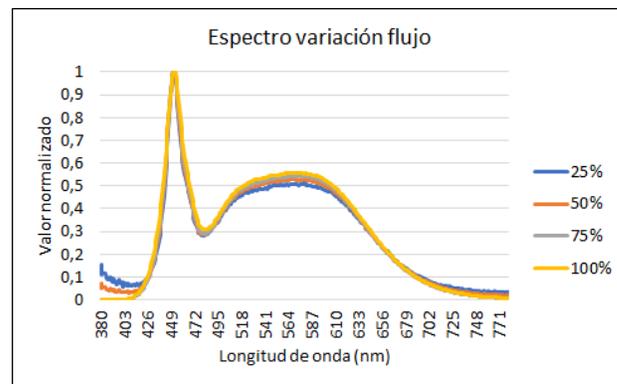
Finalmente, en la tabla 3-4 se presentan los coeficientes de correlación entre las variables de desempeño energético, visual y circadiano analizadas. Los resultados muestran la necesidad de evaluar los parámetros de forma independiente debido a que no existe una correlación fuerte entre ellos, a excepción de la TCC con la MELR y el IRC con el Rf.

**Tabla 3-4:** Coeficientes de correlación entre variables para la muestra de las fuentes medidas en laboratorio.

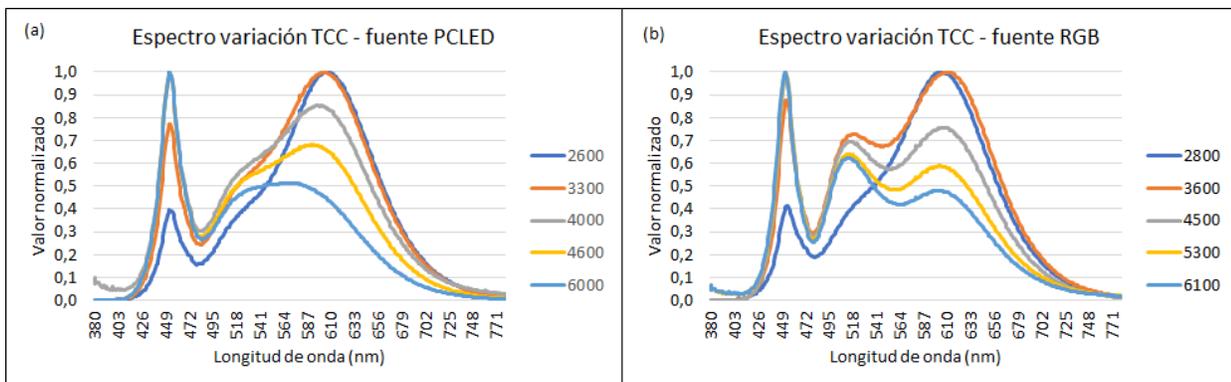
Parámetros	Coefficiente de correlación
TCC-Eficacia	-0,23
TCC-IRC	0,04
TCC-MELR	0,95
MELR-Eficacia	-0,1
IRC-Eficacia	0,31
IRC-MELR	0,35
IRC-Rf	0,97
IRC-Rg	0,28

### 3.2.2. Medición de fuentes espectro variable

Se caracterizaron principalmente dos tipos de fuentes de iluminación con espectro variable: las atenuables en flujo luminoso y las de TCC variable. En la figura 3-16 se presenta el espectro normalizado para los diferentes puntos de atenuación de flujo luminoso de la fuente con código 4342, para este producto se muestra una leve variación del espectro normalizado, obteniendo por ejemplo en la longitud de onda de 560 nm una variación del 4 % con respecto a la media. Cabe recordar que la incertidumbre expandida del equipo de medición para esta longitud de onda es de 3,1 %.



**Figura 3-16:** Espectro normalizado para diferentes puntos de atenuación de la fuente con código 4342.



**Figura 3-17:** Espectro normalizado para diferentes puntos de TCC. (a) fuente PCLED con código 4212. (b) fuente RGB con código 4259.

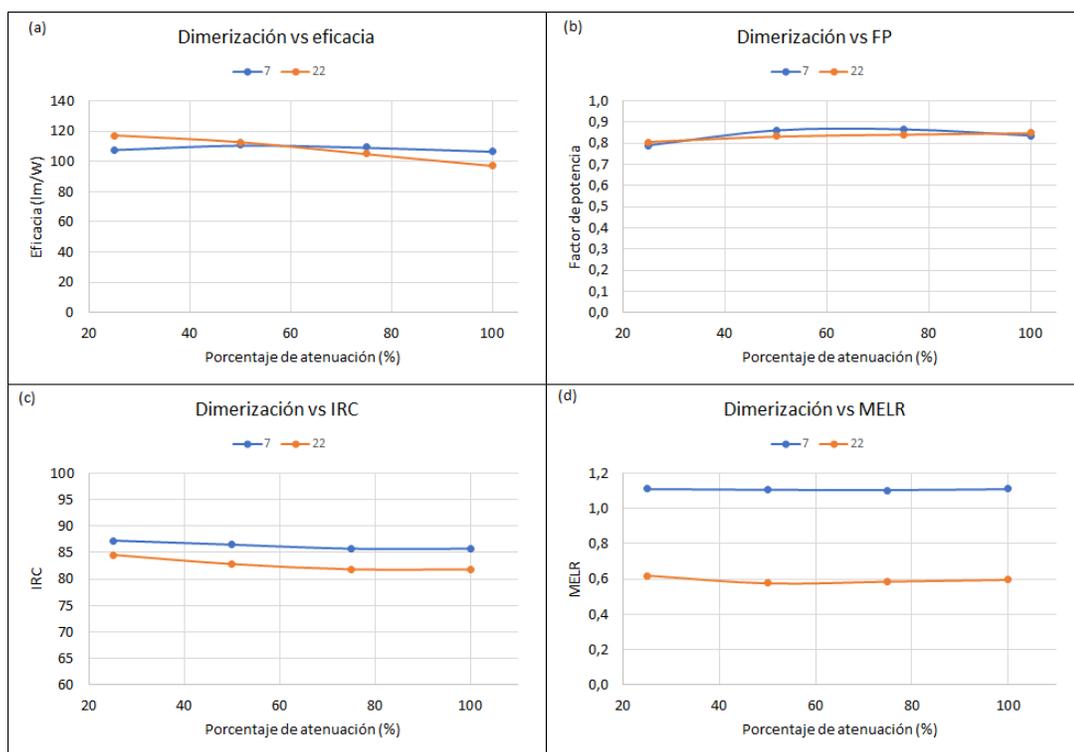
En la figura 3-17 (a) se presenta el espectro normalizado para diferentes TCC de la fuente con código 4212, la cual es de tecnología PCLED, para esta fuente se presenta una variación con respecto a la media del 13 % para la longitud de onda de 560 nm. Por otro lado, la figura 3-17 (b) muestra el espectro normalizado para diferentes TCC de la fuente con código 4259, la cual es de tecnología RGB, para esta fuente se presenta una variación con respecto a la

media del 20 % por la longitud de onda de 560 nm.

Los resultados parciales obtenidos sobre la evaluación de las fuentes de espectro variable fueron presentados en el XVI Congreso Iberoamericano de Iluminación LUXAMÉRICA 2022 [55].

Ahora, se presenta la variación de los parámetros de evaluación del desempeño del LED al atenuar el flujo luminoso de la fuente, específicamente se estudia el comportamiento de dos de las referencias medidas en laboratorio, las cuales son la número 7 y 22. En la figura 3-18 se observa la variación de la eficacia (a), FP (b), IRC (c) y MELR (d) al cambiar el porcentaje de atenuación del flujo luminoso de las fuentes.

En las gráficas no se evidencia una variación significativa de los parámetros por la atenuación, la variación con respecto a la media más alta se presenta en la eficacia de la referencia 22, la cual es del 8,1 % como se observa en la tabla 3-5. Esto permite establecer que no hay un impacto considerable en los parámetros de evaluación del desempeño de la tecnología LED de interior con la atenuación, para las dos referencias estudiadas.



**Figura 3-18:** Variación de los parámetros de evaluación del desempeño del LED con la atenuación. (a) eficacia (b) FP (c) IRC (d) MELR.

**Tabla 3-5:** Variación con respecto a la media de los parámetros de evaluación del desempeño del LED con relación a la atenuación.

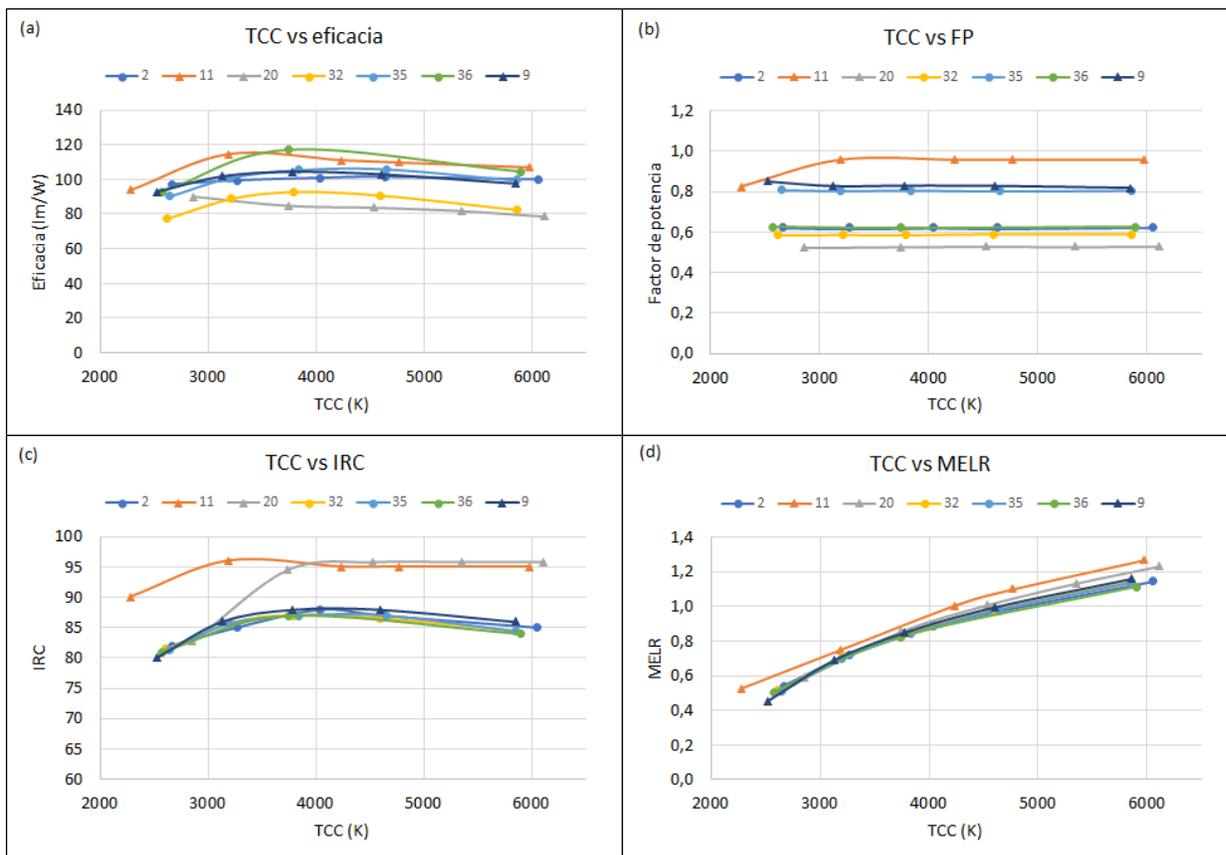
Referencia	Eficacia	FP	IRC	MELR
7	1,7 %	4,1 %	0,8 %	0,4 %
22	8,1 %	2,4 %	1,6 %	2,9 %

Con relación a la variación de la TCC de las fuentes, en la figura **3-19** se muestra la variación de la eficacia (a), FP (b), IRC (c) y MELR (d) al cambiar la TCC de las referencias 2, 9, 11, 20, 32, 35 y 36, de estas referencias las número 9, 11 y 20 son de tecnología RGB. De los resultados obtenidos no se evidencia un cambio significativo de los parámetros de FP e IRC al cambiar la TCC de la fuente, la variación con respecto a la media más alta es de 6,6 % para el FP y de 6,1 % para el IRC como se muestra en la tabla **3-6**.

Por otro lado, se evidencia una variación significativa de la eficacia para algunas referencias (del 11,7 % para la referencia 36, 7,5 % para la referencia 11 y 7,3 % de la referencia 32). Con relación a la MELR, se evidencia una variación superior al 20 % debido fundamentalmente a la relación entre la TCC y la MELR. Los resultados obtenidos para las referencias de la muestra medida muestran la necesidad de considerar el impacto del cambio de la temperatura de color en el desempeño de la tecnología LED, principalmente con relación al desempeño energético de las fuentes.

**Tabla 3-6:** Variación con respecto a la media de los parámetros de evaluación del desempeño del LED con relación a la variación de la TCC. Las referencias 9, 11 y 20 son de tecnología RGB.

Referencia	Eficacia	FP	IRC	MELR
2	1,7 %	0,1 %	2,7 %	27,3 %
9	4,8 %	1,5 %	3,8 %	33 %
11	7,5 %	6,6 %	2,5 %	31,5 %
20	5 %	0,4 %	6,1 %	26,3 %
32	7,3 %	0,2 %	2,6 %	28,9 %
35	6,3 %	0,3 %	2,8 %	29,3 %
36	11,7 %	0,4 %	3,6 %	37,3 %



**Figura 3-19:** Variación de los parámetros de evaluación del desempeño del LED con el cambio de la TCC. (a) eficacia (b) FP (c) IRC (d) MELR. Las referencias 9, 11 y 20 son de tecnología RGB.

Finalmente, los resultados de la figura 3-19 (a) y (c) muestran que las fuentes RGB (referencias 11 y 20) tienen una menor eficacia y un mayor IRC al incrementar la TCC. Aunque esta información sugiere entonces una correlación entre la eficacia y el IRC en las fuentes RGB, en la tabla 3-7 se presentan los coeficientes de correlación de la eficacia, el IRC y la TCC para estas dos referencias considerando los diferentes puntos de operación de cada una.

Los resultados muestran una correlación moderada entre la TCC y el IRC, pero no se puede concluir una correlación directa entre la TCC y la eficacia y tampoco entre el IRC y la eficacia, debido a la obtención de resultados contrarios para las dos referencias.

**Tabla 3-7:** Coeficientes de correlación entre variables para la muestra de las fuentes medidas en laboratorio de TCC variable RGB 11 y 20.

<b>Parámetros</b>	<b>Coefficiente de correlación</b>
TCC-Eficacia ref 11	0,43
TCC-Eficacia ref 20	-0,97
TCC-IRC ref 11	0,60
TCC-IRC ref 20	0,77
IRC-Eficacia ref 11	0,98
IRC-Eficacia ref 20	-0,86

En conclusión, con los resultados obtenidos de la muestra del mercado colombiano evaluada en laboratorio, se identificó la amplia fluctuación en los valores de la valoración del desempeño energético, visual y circadiano. Lo anterior, pone en evidencia el requerimiento de brindarle al usuario final herramientas para la toma de decisiones considerando los tres criterios por medio de la etiqueta.

Adicionalmente, se identificó una baja correlación entre los parámetros de desempeño estudiados, esto muestra la necesidad de evaluar de forma independiente los parámetros de desempeño energético, visual y circadiano. Sin embargo, es imprescindible proponer metodologías que permitan ponderar el desempeño global de las fuentes LED de interior considerando los criterios anteriores.

Por otro lado, en referencia a las fuentes de espectro variable, se observó en los resultados de la muestra evaluada un mayor efecto sobre los parámetros de evaluación del desempeño de la fuente por la variación de la temperatura de color correlacionada. Por lo cual, para el desarrollo de la propuesta del etiquetado se considerará principalmente este tipo de tecnologías con respecto a las de flujo luminoso variable.

Considerando lo anterior, se propone que el programa de etiquetado para fuentes de iluminación LED de interior considere integralmente los parámetros de evaluación del desempeño energético, visual y circadiano. Adicionalmente, se sugiere la propuesta de analizar el efecto de la variación de la TCC en la categorización de las fuentes con espectro variable.

En el siguiente capítulo se presenta el desarrollo de la propuesta de etiquetado para productos de iluminación LED de interior, considerando los criterios de desempeño energético, visual y circadiano de los productos.

## 4 Evaluación del etiquetado

Luego de analizar los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio se identificó la necesidad de realizar una evaluación multicriterio para determinar el desempeño global de la tecnología LED, considerando el criterio energético, visual y circadiano. Lo anterior en vista de la variación de los parámetros de evaluación.

Adicionalmente, teniendo en cuenta la dificultad para un usuario final de seleccionar un producto de iluminación LED contemplando tantos parámetros, se llega a la conclusión del requisito de proponer una etiqueta que de forma sencilla le brinde la información completa y necesaria para la elección.

Por ello, en este capítulo se evalúa una propuesta de etiquetado que contemple el criterio energético, visual y circadiano mediante la evaluación multicriterio de estos parámetros. Por lo tanto, en primer lugar se muestran los métodos seleccionados para la evaluación, luego se evalúan estos métodos con los resultados obtenidos en laboratorio, posteriormente se realiza un análisis comparativo y se selecciona el método más adecuado, finalmente se presenta la propuesta de etiquetado.

Además, se propone complementar el programa de etiquetado con la definición de los estándares mínimos de desempeño energético para estos productos. Por lo cual, en el capítulo 5 se realiza la evaluación de los MEPS en Colombia.

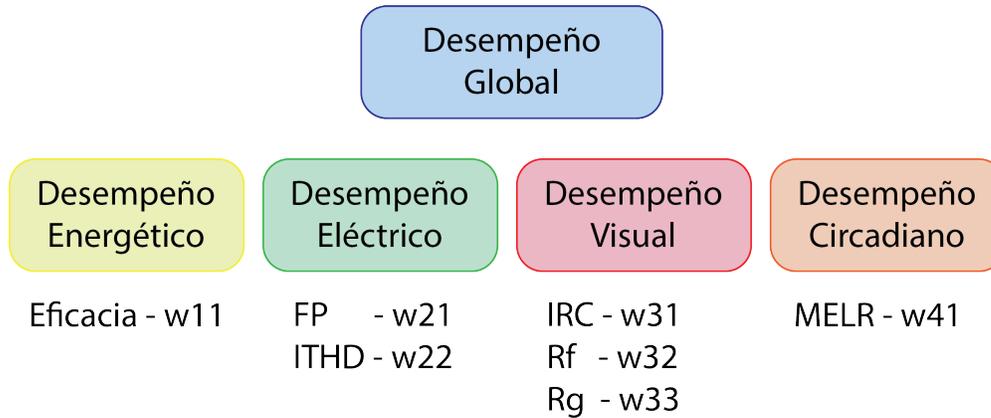
### 4.1. Descripción de los métodos

Considerando los métodos de evaluación multicriterio enfocados en problemas de categorización expuestos en la tabla 2-9, se seleccionaron los métodos MCHP ELECTRE-Tri-b y AHP Sort para evaluar el desempeño de las fuentes LED de iluminación interior. Los métodos, las consideraciones y la metodología seguida se presenta en los siguientes numerales.

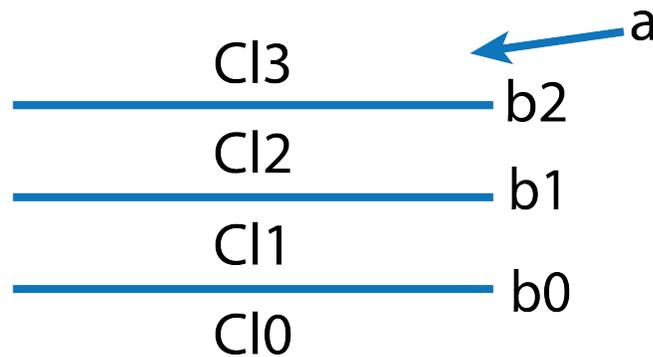
#### 4.1.1. Método MCHP ELECTRE-Tri-b

El método considera un conjunto de criterios estructurados de forma jerárquica y distribuidos en diferentes niveles, los criterios son representados por la letra  $G_X$ , cada criterio puede estar compuesto por un número de subcriterios  $G_{XY}$  y a cada subcriterio se le asigna un peso  $w_t$ .

Este esquema jerárquico aplicado a la evaluación de los productos de iluminación LED es presentado en la figura 4-1. Adicionalmente, dentro del método se requiere definir un número de categorías  $C_l$  a las cuales se les asigna la alternativa estudiada  $a$ , cada categoría tiene asignado un límite inferior  $b_l$  como se muestra en la figura 4-2.



**Figura 4-1:** Esquema de jerarquización para la aplicación de los métodos ELECTRE-tri-b y AHP Sort a la evaluación del desempeño de la tecnología LED.



**Figura 4-2:** Esquema de categorización para la aplicación del método ELECTRE-tri-b.

Se dice que la alternativa  $a$  pertenece a la categoría  $C_l$  si la alternativa  $a$  sobrepasa a  $b_{l-1}$ . Para ello, se debe cumplir lo establecido en la ecuación 4-1.

$$aS_r^I b \iff C_r(a, b) \geq \lambda_r, \quad (4-1)$$

donde  $aS_r^I b$  significa que la alternativa  $a$  sobrepasa al límite inferior  $b$ ,  $C_r$  es el índice de concordancia parcial calculado con la ecuación 4-2 y  $\lambda_r$  es el nivel de corte, el cual está entre  $[w/2 - w]$ , generalmente el  $\lambda_r$  es  $0,7 \times w$ .

$$C_r(a, b) = \sum w_t \phi_t(a, b), \quad (4-2)$$

donde  $w_t$  es el peso de cada subcriterio dentro del criterio  $G_{XY}$  y  $\phi_t$  es el índice de concordancia elemental calculado como se muestra en la ecuación 4-3.

$$\phi_t(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_t(b) - g_t(a) \leq q_t, \\ \frac{p_t - [g_t(b) - g_t(a)]}{p_t - q_t} & \text{si } q_t < g_t(b) - g_t(a) < p_t, \\ 0 & \text{si } g_t(b) - g_t(a) \geq p_t, \end{cases} \quad (4-3)$$

donde  $g_t(b)$  es el límite  $b_l$  evaluado para el subcriterio  $G_{XY}$ ;  $g_t(a)$  es la alternativa  $a$  evaluada en el subcriterio  $G_{XY}$ ;  $q_t$  es el umbral de indiferencia, el cual es la máxima diferencia entre las evaluaciones de todas las alternativas  $a$  y  $b$  en el subcriterio  $g_t$  y  $p_t$  es el umbral de preferencia, el cual es la diferencia más pequeña entre las evaluaciones de  $a$  y  $b$  en  $g_t$ . Adicionalmente, se tiene como condición que  $0 \leq q_t \leq p_t$ .

Finalmente, los pesos son calculados con el método Simos-Roy-Figueira (SRF), el cual requiere asignar a cada criterio un *ranking*  $L_X$  de acuerdo a la importancia del mismo. El cálculo del peso se muestra en la ecuación 4-4.

$$w_j^p = 1 + \frac{(z - 1) \left[ l(j) - 1 + \sum_{s=1}^{l(j)-1} e_s \right]}{v - 1 + \sum_{s=1}^{v-1} e_s}, \quad (4-4)$$

donde  $z$  define la relación entre los pesos del último criterio y el primero en el *ranking*,  $l(j)$  denota el rango de importancia de cada criterio,  $e_s$  representa un radio de importancia entre dos criterios (a mayor radio mayor diferencia de importancia entre los dos criterios) y  $v$  es el número total de criterios analizados.

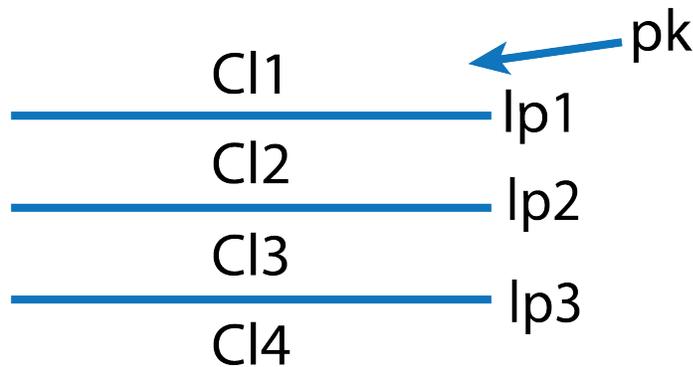
Para la evaluación del método se requiere normalizar los pesos de tal forma que la suma de los pesos de todos los subcriterios sea 1. Para ello, se implementa la ecuación 4-5.

$$w_j = \frac{w_j^p}{\sum w_j^p} \quad (4-5)$$

Más detalles del método y del procedimiento descrito anteriormente pueden ser consultados en [4, 44].

### 4.1.2. Método AHP Sort

Al igual que en el método MCHP ELECTRE-Tri-b los criterios son estructurados de forma jerárquica como se muestra en la figura 4-1. La gran diferencia radica en la metodología para asignar una categoría a las alternativas estudiadas. En el método AHP Sort se establece el índice de prioridad global  $p_k$ , si este índice es superior al límite  $lp_n$  se dice que la alternativa pertenece a la categoría  $C_{ln}$  como se muestra en la figura 4-3. El índice de prioridad global se calcula como se muestra en la ecuación 4-6.



**Figura 4-3:** Esquema de categorización para la aplicación del método AHP Sort.

$$p_k = \sum_{j=1}^m p_{kj} \times w_j, \quad (4-6)$$

donde  $p_{kj}$  es el resultado obtenido por cada criterio,  $w_j$  es el peso del criterio y  $m$  es el número de criterios analizados. Los pesos son calculados con la ecuación 4-7.

$$A \times p = \lambda \times p, \quad (4-7)$$

donde  $A$  es la matriz de prioridad,  $p$  es el vector de pesos y  $\lambda$  es el valor propio máximo de la matriz  $A$ . La matriz  $A$  se construye con la evaluación entre pares de los criterios  $G_{XY}$ , un ejemplo de la matriz se presenta en la tabla 4-1. En la construcción de la matriz 1 significa que el criterio  $x$  es igual, 3 moderado, 5 fuerte, 7 muy fuerte y 9 extremo más importante al criterio  $y$ . Por ejemplo, en la matriz de la tabla 4-1 el criterio  $Gx1$  es moderadamente más importante con respecto al criterio  $Gx2$  y el criterio  $Gx3$  es extremadamente más importante con respecto al criterio  $Gx1$ .

**Tabla 4-1:** Matriz de prioridad ejemplo 3 criterios.

Criterios	Gx1	Gx2	Gx3
Gx1	1	3	1/9
Gx2	1/3	1	7
Gx3	9	1/7	1

Ahora supongamos que analizamos una alternativa  $a_k$  y queremos categorizarla con el método estudiado, para ello se siguen los condicionales presentados en la ecuación 4-8.

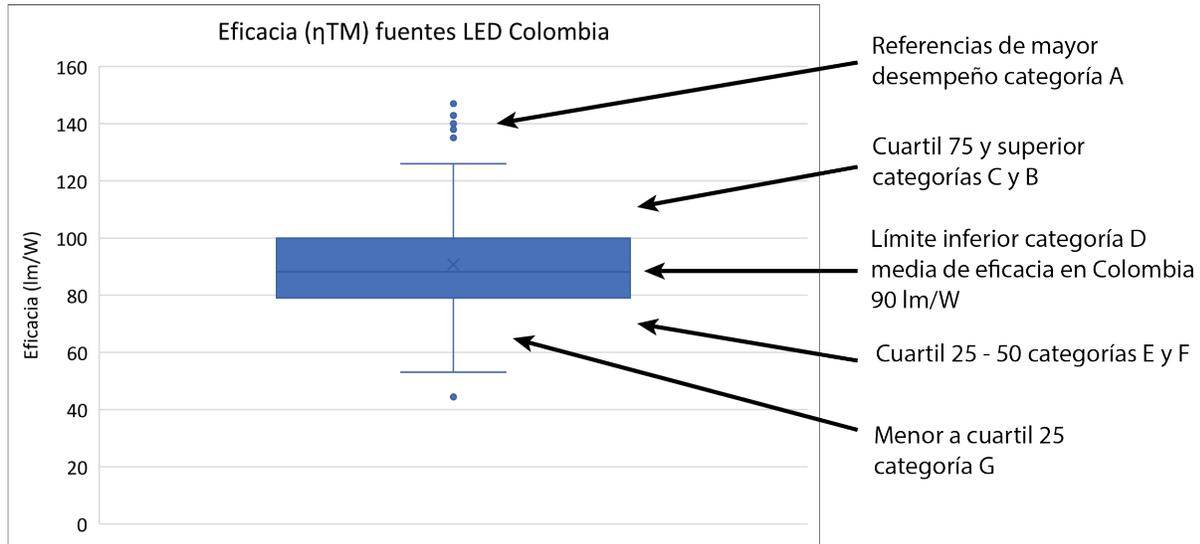
$$\begin{aligned}
 p_k &\geq l_{p1} \rightarrow a_k \in C_1 \\
 l_{p2k} &< l_{p1} \rightarrow a_k \in C_2 \\
 p_k &< l_{pn-1} \rightarrow a_k \in C_n
 \end{aligned} \tag{4-8}$$

Más detalles del método y del procedimiento descrito anteriormente pueden ser consultados en [12, 56, 57].

## 4.2. Definición de rangos para la etiqueta

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los productos estudiados se establecen los rangos de las categorías para cada uno de los parámetros determinados en el capítulo anterior e implementados en la valoración del desempeño energético, eléctrico, visual y circadiano de las fuentes LED. A continuación, se presentan las consideraciones establecidas para definir los rangos.

- Desempeño energético: el parámetro implementado es la eficacia total de la red eléctrica  $\eta_{TM}$ , calculada de acuerdo con la metodología de la Unión Europea. Aunque en un principio se propuso implementar los mismos rangos de la etiqueta europea, se encontró que al evaluar una muestra de 365 referencias del mercado colombiano el 93% de las referencias estarían en categorías F y G y el 7% restante en categorías D y E [58]. Este escenario no permite entonces a los usuarios finales evaluar el desempeño de las fuentes al estar la mayor parte del mercado en dos categorías. Por esta razón, se propone establecer los rangos de desempeño energético siguiendo las consideraciones de la figura 4-4.



**Figura 4-4:** Esquema para la definición de rangos de desempeño energético de acuerdo con la distribución de eficacia total de la red eléctrica de 365 referencias del mercado colombiano.

Del estudio realizado en [58] se encontró que la  $\eta_{TM}$  media del mercado colombiano fue de  $88 \text{ lm/W}$ , el cuartil 25 de  $79 \text{ lm/W}$  y el cuartil 75 de  $100 \text{ lm/W}$ . Los rangos establecidos se muestran en la tabla 4-2.

- Desempeño eléctrico: es evaluado con el FP y la ITHD, el FP es un parámetro que varía entre 0 y 1 siendo 1 el mejor desempeño, por lo cual, los rangos son establecidos considerando esta variabilidad. Con relación a la evaluación de la ITHD, se sabe que entre mayor sea el valor de este parámetro es menor el desempeño de la fuente. Con el objetivo de seguir el modelo, donde entre mayor sea el parámetro mejor sea el desempeño, se propone valorar este parámetro como se muestra en la ecuación 4-9.

$$ITHD_c = 100 - ITHD \quad (4-9)$$

Los rangos para evaluar el desempeño eléctrico se muestran en la tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Rangos propuestos de evaluación para parámetros de desempeño energético y eléctrico.

Categoría	$\eta_{TM}$ (lm/W)	FP	$ITHD_c$
A	>120	>0,9	>90
B	110-120	0,75-0,9	75-90
C	100-110	0,6-0,75	60-75
D	90-100	0,45-0,6	45-60
E	80-90	0,3-0,45	30-45
F	70-80	0,15-0,3	15-30
G	<70	0-0,15	0-15

- Desempeño visual: se evalúa con el IRC, el Rf y el Rg. El IRC y Rf son parámetros que varían entre 0 y 100, siendo 100 el mejor desempeño. De las pruebas realizadas a la muestra del mercado colombiano no se reportaron valores inferiores de 70 para el IRC y Rf, por lo cual los rangos se establecen entre 70 y 100.

Por otro lado, con respecto al Rg la IES TM-30 [29] reporta que este parámetro varía de acuerdo con el valor de Rf, entre más disminuya el Rf de la fuente más incrementa el rango de variación del Rg, siendo 100 el óptimo. Específicamente para un Rf de 70 se tiene un rango de variación comercial del Rg entre 80 y 120. Considerando la necesidad de tener un parámetro que al incrementar su valor incremente el desempeño de la fuente, se propone la evaluación de acuerdo con la ecuación 4-10.

$$Rg_c = 20 - |100 - Rg| \quad (4-10)$$

Adicionalmente, considerando la baja variación entre los rangos de IRC, Rf y Rg, para este tipo de parámetros se propone solamente implementar 3 escalas, de acuerdo con lo presentado en la tabla 4-3.

- Desempeño circadiano: evaluado con la MELR, en [37] se reporta que este parámetro varía entre 0,2 y 1,7 de acuerdo a la TCC de la fuente. Considerando que un valor más alto de MELR afecta en mayor medida el ciclo circadiano, se propone una valoración donde al incrementar el MELR disminuya el desempeño de la fuente. Por lo tanto, el parámetro considerado para la evaluación se presenta en la ecuación 4-11.

$$MELR_c = 1,7 - MELR \quad (4-11)$$

Al igual que en los parámetros visuales, se consideran tres categorías como se presenta en la tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Rangos propuestos de evaluación para parámetros de desempeño visual y circadiano.

Categoría	IRC	Rf	$Rg_c$	$MELR_c$
I	>85	>85	>15	>1
II	70-85	70-85	5-15	0,6-1
III	<70	<70	<5	<0,6

### 4.3. Aplicación de los métodos

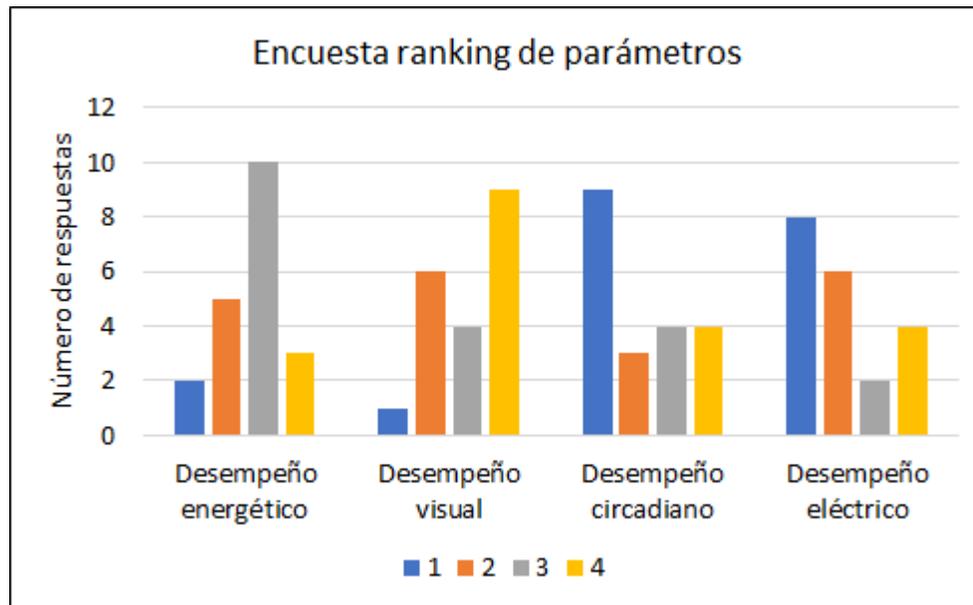
Luego de presentar los métodos y definir los rangos de evaluación, se procede a aplicar estos métodos con los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio. Para ello, en primer lugar se presenta la clasificación de parámetros y cálculo de los pesos y entonces se muestra los resultados obtenidos con la aplicación de cada método.

#### 4.3.1. Clasificación de parámetros

El primer paso para aplicar los métodos descritos anteriormente es la definición de los pesos de acuerdo con las ecuaciones 4-4 y 4-5 para el método ELECTRE-Tri-b y la ecuación 4-7 para el método AHP Sort.

La definición de los pesos requiere establecer el *ranking* de los parámetros evaluados en el método ELECTRE-Tri-b y una priorización entre pares en el método AHP Sort. El *ranking* y la priorización entre pares deben ser establecidos de acuerdo con los criterios del desarrollador del programa de etiquetado, en el caso colombiano el Ministerio de Minas y Energía.

Para el desarrollo del proyecto se realizó una encuesta a diseñadores de iluminación, certificadores, comercializadores, profesores y profesionales de laboratorios de ensayos en Colombia para establecer el *ranking* de los parámetros y la priorización entre pares. En total se obtuvieron 27 respuestas, de las cuales 13 fueron de diseñadores de iluminación, 6 de inspectores o certificadores, 4 de profesionales de laboratorio de ensayos, 3 de comercializadores de productos de iluminación y 1 de un profesor de iluminación.



**Figura 4-5:** Resultados encuesta realizada para establecer *ranking* de parámetros dentro del método ELECTRE-Tri-b. 4 se asigna al parámetro con mayor valor, 3 el siguiente, 2 el siguiente y 1 al de menor valor.

En la figura 4-5 se presentan los resultados obtenidos para la pregunta sobre clasificación de parámetros, la cual es la siguiente: “*Por favor asigne un valor de clasificación para los siguientes parámetros de acuerdo con su experiencia. Siendo 4 el parámetro que considere más importante en la evaluación del producto y 1 el parámetro de menor relevancia. Por favor asigne solamente un parámetro a cada valor, por ejemplo parámetro 1 valor 2, parámetro 2 valor 3, parámetro 3 valor 4, parámetro 4 valor 1. No es posible tener un mismo valor para dos o más parámetros.*”

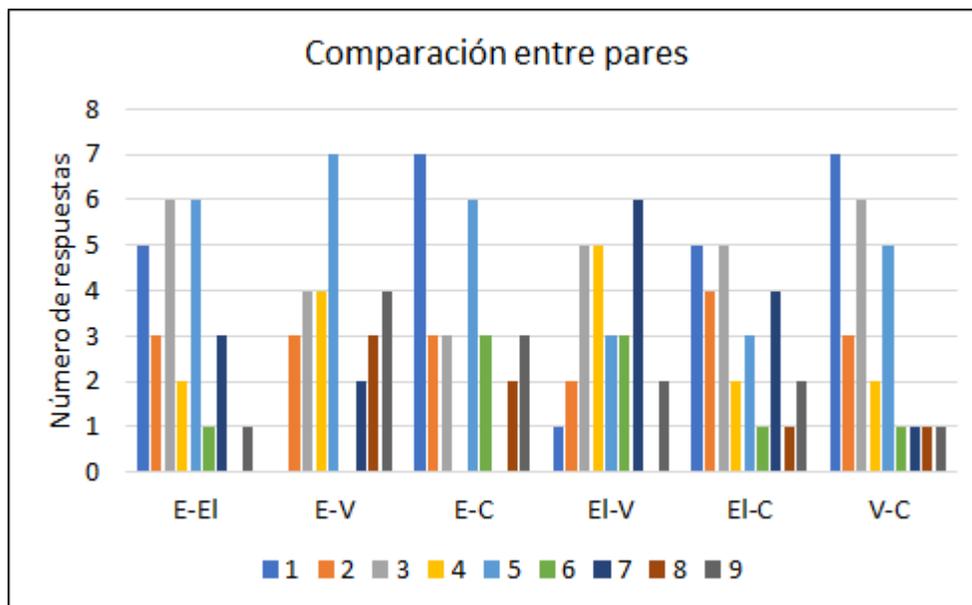
En la Figura 4-5 se presentan los resultados de 20 de los 27 encuestados, porque se evidenciaron respuestas incorrectas (asignaban un mismo valor a más de un parámetro). De las encuestas se obtuvo un promedio de 2,7 para el desempeño energético, 3,05 para el desempeño visual, 2,15 para el desempeño circadiano y 2,1 para el desempeño eléctrico. Por otro lado, se evidencia que el desempeño visual fue el parámetro con mayor número de respuestas para la clasificación 4, el desempeño energético en clasificación 3, el desempeño eléctrico en clasificación 2 y el desempeño circadiano en clasificación 1. Es importante destacar que de la encuesta realizada se observa una tendencia a asignarle mayor importancia por parte de los profesionales en iluminación al desempeño visual sobre el desempeño energético.

Por otro lado, se propone la evaluación de dos escenarios, el primero considerando el desempeño energético como el de mayor importancia y el segundo contemplando al desempeño visual como el más relevante. En la Tabla 4-4 se muestra la clasificación de los parámetros

para la evaluación de dos escenarios.

**Tabla 4-4:** Clasificación de los parámetros para el modelo ELECTRE-Tri-b de acuerdo con las respuestas obtenidas. 4 se asigna al parámetro con mayor valor, 3 el siguiente, 2 el siguiente y 1 al de menor valor.

Clasificación	Desempeño energético	Desempeño eléctrico	Desempeño visual	Desempeño circadiano
Escenario 1	4	2	3	1
Escenario 2	3	2	4	1



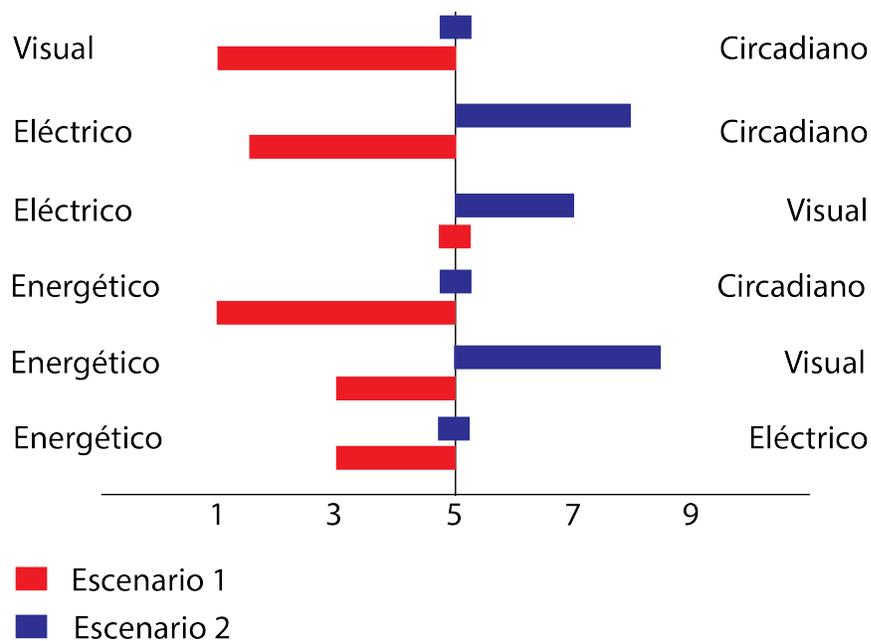
**Figura 4-6:** Resultados encuesta realizada para establecer la comparación entre pares de los parámetros dentro del método AHP Sort. **E** se refiere a desempeño energético, **EI** eléctrico, **V** visual y **C** circadiano.

En la figura 4-6 se muestran los resultados de la encuesta con relación a la comparación entre pares de los parámetros evaluados dentro del método AHP Sort. En la figura **E** se refiere a desempeño energético, **EI** eléctrico, **V** visual y **C** circadiano. La pregunta dentro de la encuesta fue: "Por favor asigne un valor de preferencia entre pares para los siguientes parámetros de acuerdo con su experiencia, por favor asigne solamente un valor a cada pareja de parámetros, siendo:

- 1 alta preferencia del parámetro (a) con respecto al parámetro (b).
- 3 preferencia moderada del parámetro (a) con respecto al parámetro (b).
- 5 indiferencia de preferencia entre los dos parámetros (los dos igual de importantes).
- 7 preferencia moderada del parámetro (b) con respecto al parámetro (a).
- 9 alta preferencia del parámetro (b) con respecto al parámetro (a).

*Utilice los valores intermedios si considera que el nivel de preferencia entre pares se encuentra entre dos valores.”*

De los resultados obtenidos no se evidencia una tendencia clara con respecto a la comparación entre pares, el número de respuestas más alto por una opción fue de 7 asignando un valor de 5 a la comparación entre desempeño energético y visual; un valor de 1 a la comparación entre desempeño energético y circadiano y visual y circadiano. Analizando los resultados obtenidos se propone la evaluación de dos escenarios, el primero dando mayor prioridad al desempeño energético y el segundo con mayor prioridad al desempeño visual. Los escenarios se presentan en la figura 4-7.



**Figura 4-7:** Comparación entre pares de los parámetros para el método AHP Sort de acuerdo con las respuestas obtenidas.

Con los resultados de la encuesta se identificó una preferencia de los encuestados por el desempeño visual y energético de la tecnología LED. Es importante resaltar la prioridad

asignada al desempeño visual en la encuesta realizada para el método ELECTRE-Tri-b. Sin embargo, se observa una baja prioridad sobre el desempeño circadiano, por lo cual, se concluye la necesidad de divulgar la importancia de este criterio entre los profesionales de iluminación y el usuario final.

Por lo anterior, la inclusión del desempeño circadiano dentro de la etiqueta requiere además establecer una estrategia de socialización entre los profesionales de iluminación y el usuario final.

### 4.3.2. Método MCHP ELECTRE-Tri-b

De acuerdo con la clasificación obtenida de los resultados de las encuestas se calculan los pesos de cada parámetro. El método de ELECTRE-Tri-b requiere además definir el radio "Z" entre los parámetros clasificados en 4 y 1. En la tabla 4-5 se presentan los pesos para los parámetros para el escenario 1 de acuerdo con el valor de Z, el cual varía entre 2 y 10, por otro lado, en la tabla 4-6 se presentan los pesos para el escenario 2.

En las tablas se presentan los pesos de los parámetros generales, sin embargo el desempeño eléctrico es valorado con 2 indicadores y el visual con 3. Para calcular el peso de cada indicador dentro del desempeño eléctrico el peso calculado se divide entre dos y para el desempeño visual el peso se divide entre 3.

**Tabla 4-5:** Pesos de los parámetros de evaluación para el método ELECTRE-Tri-b escenario 1.

Z	Desempeño energético	Desempeño eléctrico	Desempeño visual	Desempeño circadiano
2	0,29	0,24	0,26	0,21
4	0,35	0,22	0,28	0,15
6	0,38	0,21	0,29	0,12
8	0,40	0,20	0,30	0,10
10	0,41	0,20	0,30	0,09

**Tabla 4-6:** Pesos de los parámetros de evaluación para el método ELECTRE-Tri-b escenario 2.

<b>Z</b>	<b>Desempeño energético</b>	<b>Desempeño eléctrico</b>	<b>Desempeño visual</b>	<b>Desempeño circadiano</b>
2	0,26	0,24	0,29	0,21
4	0,28	0,22	0,35	0,15
6	0,29	0,21	0,38	0,12
8	0,30	0,20	0,40	0,10
10	0,30	0,20	0,41	0,09

Como ejercicio adicional se realiza la evaluación de las 25 referencias estudiadas con los datos de los parámetros normalizados en valores entre 0 y 100 siguiendo la ecuación 4-12. Para la ecuación  $y_{min}$  es 0,  $y_{max}$  es 100 y los valores de  $x_{min}$  y  $x_{max}$  se muestran en la tabla 4-7 de acuerdo con el parámetro evaluado.

$$x_n = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}(y_{max} - y_{min}) + y_{min} \quad (4-12)$$

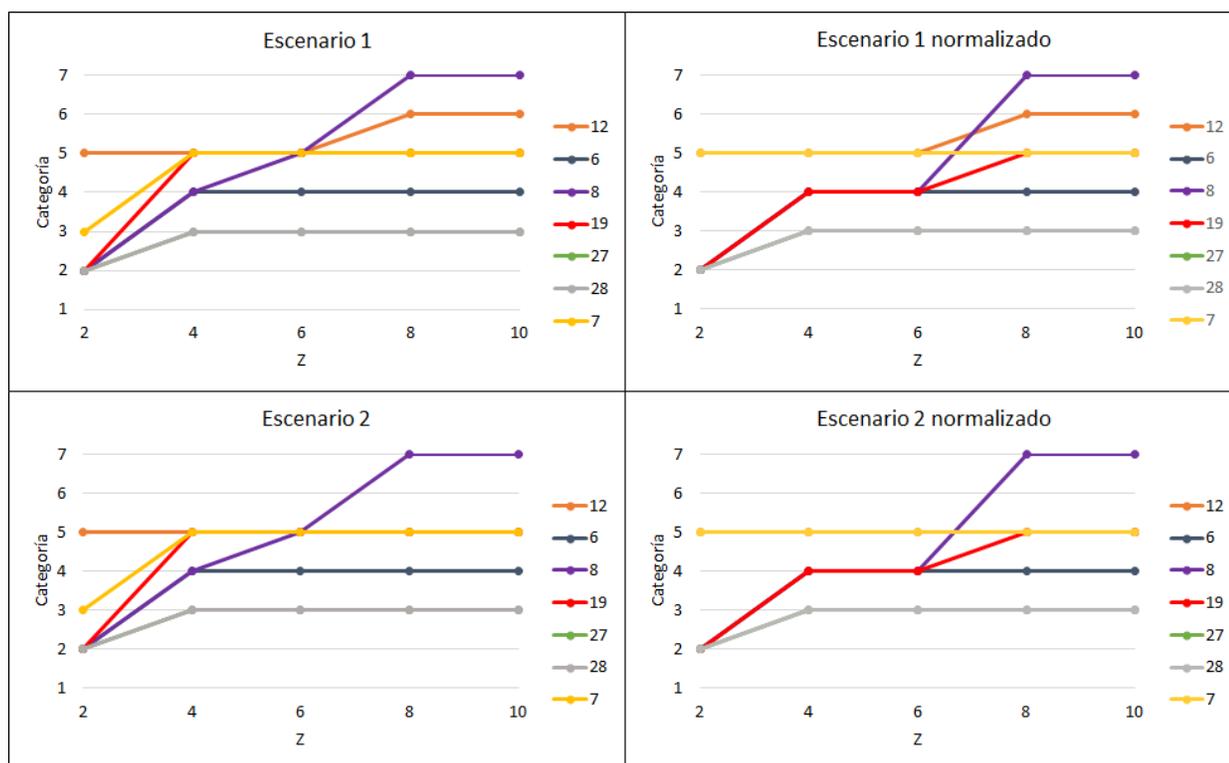
**Tabla 4-7:** Valores de  $x_{min}$  y  $x_{max}$  implementados en la normalización de los parámetros.

<b>Parámetro</b>	<b>Eficacia</b>	<b>FP</b>	<b>ITHD</b>	<b>CRI</b>	<b>Rf</b>	<b>Rg</b>	<b>MELR</b>
$x_{min}$	60	0	0	60	60	0	0,2
$x_{max}$	130	1	100	100	100	20	1,7

Los límites establecidos para la categorización mostrados en las tablas 4-2 y 4-3 también son normalizados siguiendo la metodología anterior. Los rangos con los valores normalizados se presentan en la tabla 4-8.

Tabla 4-8: Rangos de evaluación normalizados.

Categoría	Eficacia	FP	ITHD	IRC	Rf	Rg	MELR	Categoría
A	>85,7	>90	>90	>62,5	>62,5	>75	>53,3	I
B	71,4-85,7	75-90	75-90					
C	57,1-71,4	60-75	60-75					
D	42,9-57,1	45-60	45-60	25-62,5	25-62,5	25-75	26,7-53,3	II
E	28,6-42,9	30-45	30-45					
F	14,3-28,6	15-30	15-30					
G	<14,3	<15	<15	<25	<25	<25	<26,7	III



**Figura 4-8:** Desempeño global de las fuentes en función de la variación de Z. El valor de 1 representa la categoría G, 2 la F, 3 la E, 4 la D, 5 la C, 6 la B y 7 la A. Las referencias presentadas son aquellas que mostraron variación de la clasificación al cambiar el valor de Z.

Luego de definir los pesos para los dos escenarios estudiados se obtienen los resultados de

categorización al aplicar el modelo ELECTRE-Tri-b con los datos obtenidos y los datos normalizados, los resultados para las 25 referencias evaluadas se presentan en el anexo E.

El primer análisis realizado corresponde a la evaluación del desempeño global de las fuentes de luz LED con la variación del parámetro  $z$  de la ecuación 4-4, es decir, al variar los pesos mostrados en las tablas 4-5 y 4-6. De los resultados presentados en el anexo E se evidenció que 7 referencias variaban la categoría de desempeño global al cambiar el valor de  $z$  entre 2 y 10. En la figura 4-8 se muestra la variación del desempeño global para estas fuentes, el valor de 1 representa la categoría G, 2 la F, 3 la E, 4 la D, 5 la C, 6 la B y 7 la A. En general, se observa una tendencia a incrementar la categoría de desempeño global al incrementar el valor de  $z$ .

La variación del desempeño global se debe fundamentalmente al incremento de los pesos del desempeño energético y el desempeño visual cuando se incrementa el valor de  $z$ . Por ejemplo, la referencia 8 pasa de ser categorizado F con  $z = 2$  a ser categorizado A con  $z = 10$  en el escenario 1. Lo anterior, debido a que con  $z = 2$  el peso de desempeño energético es 0,29 y con  $z = 10$  es de 0,41, esta referencia de fuente tiene un desempeño energético de A, pero eléctrico G y circadiano III como se observa en la tabla 4-9. Esta información permite identificar que el modelo se ve afectado por el valor de  $z$  principalmente porque al incrementar este valor se le da un peso muy grande al parámetro clasificado en 1 y 2.

**Tabla 4-9:** Categorías de las referencias de fuentes LED seleccionadas para el escenario 1 y 2. Rangos base y rangos con valores normalizados.

Referencia	Base				Normalizado			
	E	EI	V	C	E	EI	V	C
12	B	G	II	I	B	G	II	I
6	D	F	I	III	D	F	I	III
8	A	G	I	III	A	G	I	III
19	C	F	II	III	C	F	II	III
27	E	F	I	III	E	F	II	III
28	E	F	II	III	E	F	II	III
7	C	E	I	III	C	E	I	II

Por otro lado, no se evidencia un impacto fuerte en la clasificación obtenida con los resultados reales y los resultados normalizados. En el escenario 1 se observa variación en la

categorización del desempeño global de la fuente de referencia número 7 entre los resultados obtenidos con datos reales y normalizados para un valor de  $z = 2$ , en la referencia 19 para  $z = 4, 6$  y en la referencia 8 para  $z = 6$ . Con relación al escenario 2 solo se identifica variación de la referencia 12 con  $z = 8, 10$ .

Finalmente, no se observa una variación entre el desempeño global obtenido en el escenario 1 y 2 en ninguna referencia para valores de  $z = 2, 4, 6$  solamente varía la referencia 12 con valores de  $z = 8, 10$ . Esta información permite concluir que el modelo ELECTRE-Tri-b aplicado a la categorización de la muestra de referencias medidas en laboratorio no se ve fuertemente afectado por la variación de la clasificación de parámetros estudiada, es decir los pesos, y tampoco por la normalización de los resultados de laboratorio.

### 4.3.3. Método AHP Sort

En primer lugar, se elaboran las matrices de prioridad de los dos escenarios evaluados de acuerdo con los resultados obtenidos en la encuesta. Esta matriz se ajusta a los valores requeridos en el modelo como se especifica en la tabla 4-1. Luego de construir las matrices, se calculan los pesos para cada criterio, las matrices y los pesos se presentan en la tabla 4-10. Al igual que lo realizado con el método anterior, el desempeño eléctrico se evalúa con dos parámetros y el visual con tres, por lo cual se divide el peso para cada criterio en 2 y 3 respectivamente.

**Tabla 4-10:** Matrices de prioridad y pesos por criterio para los dos escenarios evaluados en el método AHP Sort.

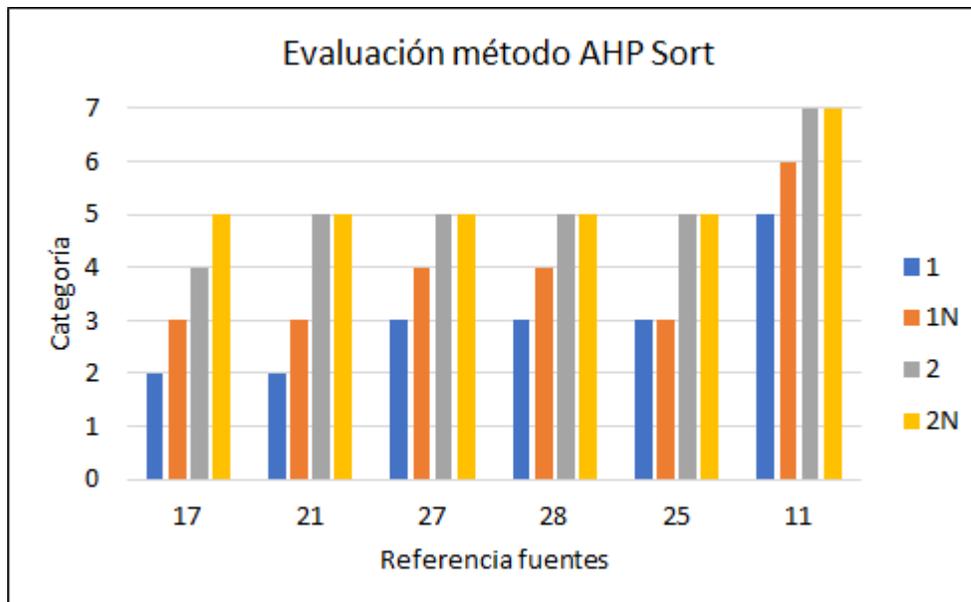
Criterio	Escenario 1					Escenario 2				
	E	El	V	C	W	E	El	V	C	W
E	1	5	5	9	0,60	1	1	1/7	1	0,14
El	1/5	1	1	7	0,17	1	1	1/5	1/5	0,08
V	1/5	1	1	9	0,19	7	5	1	1	0,46
C	1/9	1/7	1/9	1	0,04	1	5	1	1	0,31

Por otro lado, se sigue el mismo procedimiento descrito en la sección anterior para realizar la evaluación del método con los datos normalizados entre 0 y 100. Para ello, se implementa la ecuación 4-12 y se utilizan los valores reportados en las tablas 4-7 y 4-8.

Luego de definir los pesos para cada escenario se ejecuta el modelo siguiendo la ecuación 4-8, los resultados obtenidos se presentan en el anexo F. En la evaluación de este método se evidencia una variación significativa entre la categorización de desempeño global obtenida en los dos escenarios y con los valores normalizados.

Con relación al impacto de los dos escenarios evaluados, se observa que 17 de las 25 referencias se clasificaron en categorías diferentes comparando los resultados del escenario 1 y el escenario 2. En la figura 4-9 se muestra la variación de categoría de las referencias con mayor impacto, en la figura el valor de 1 representa la categoría G, 2 F, 3 E, 4 D, 5 C, 6 B y 7 A.

Se evidencia que en general las fuentes de luz son mejor categorizadas en el escenario 2 con relación a la categorización del escenario 1, por ejemplo, la fuente de referencia 17 se categoriza F en el escenario 1 y D en el escenario 2. Por otro lado, en general en el escenario 1 con los datos normalizados las referencias se categorizan superior con relación a los datos base. Esta variación se debe principalmente al impacto de los pesos en la evaluación global del desempeño, por ejemplo en el escenario 1 el criterio de desempeño energético tiene un peso del 60 % y en el escenario 2 el desempeño visual tiene un peso del 46 %.



**Figura 4-9:** Desempeño global de las fuentes para los escenarios de estudio del método AHP Sort. El valor de 1 representa la categoría G, 2 la F, 3 la E, 4 la D, 5 la C, 6 la B y 7 la A. Las referencias presentadas son aquellas que mostraron una mayor variación entre escenarios.

Adicionalmente, en los resultados presentados en el anexo F se observa una variación significativa en la categorización del desempeño eléctrico entre el caso con los datos base y

con datos normalizados para los dos escenarios evaluados. Específicamente se evidencia una variación en la clasificación en 23 de las 25 referencias de la muestra estudiada. La variación en la categorización del desempeño eléctrico entre la evaluación con valores base y valores normalizados es la principal causa de la variación del desempeño global entre los valores base y normalizados.

#### 4.4. Análisis comparativo de los métodos

La comparación de los métodos se realiza considerando tres factores, el efecto de la clasificación y prioridad de los criterios de evaluación del desempeño en la definición de los pesos, la exactitud en la categorización de las fuentes en cada uno de los criterios evaluados y el impacto de los escenarios estudiados en el desempeño global de las fuentes.

Con relación al primer factor, en la tabla 4-11 se presentan los pesos calculados para los escenarios evaluados de los métodos ELECTRE-Tri-b y AHP Sort considerando los resultados de la encuesta realizada a profesionales de iluminación en Colombia. En la tabla se observa que para la evaluación de los dos escenarios en el método ELECTRE-Tri-b el cambio de la clasificación de los criterios no representa un impacto fuerte en los pesos calculados, el impacto en los pesos depende en mayor medida de la variación del parámetro  $z$  como se observa en las tablas 4-5 y 4-6. Por otra parte, en la evaluación del método AHP Sort sí se evidencia un impacto considerable en el cálculo de los pesos al variar la matriz de prioridad.

**Tabla 4-11:** Pesos para los escenarios evaluado de los métodos ELECTRE-Tri-b ( $z = 2$ ) y AHP Sort.

Criterio	ELECTRE 1	ELECTRE 2	AHP 1	AHP 2
Desempeño energético	0,29	0,26	0,60	0,14
Desempeño eléctrico	0,24	0,24	0,17	0,08
Desempeño visual	0,26	0,29	0,19	0,46
Desempeño circadiano	0,21	0,21	0,04	0,31

De los resultados anteriores se concluye que la metodología para calcular los pesos dentro del método AHP Sort es más sensible a la variación de la matriz de prioridad en comparación con la metodología seguida en el método ELECTRE-Tri-b. Sin embargo, es importante aclarar que en cada método se implementa una metodología diferente para calcular los pesos.

Con relación al segundo factor se hizo la evaluación de los dos modelos considerando los pesos del escenario 1 estudiado en el método AHP Sort, los cuales se presentan en la tabla 4-10. Los resultados de categorización se muestran en el anexo E para el método ELECTRE-Tri-b y el anexo F para el método AHP Sort. De los resultados obtenidos se identifica una diferencia en la categorización de desempeño global en 5 referencias, las cuales se presentan en la tabla 4-12.

**Tabla 4-12:** Categorización de referencias de los productos LED evaluados con el método ELECTRE-Tri-b y AHP Sort con los pesos del escenario 1 del método AHP Sort. Las referencias presentadas son aquellas que mostraron una diferencia en la clasificación global entre los dos métodos.

Referencia	AHP Sort					ELECTRE-Tri-b				
	Global	E	El	V	C	Global	E	El	V	C
12	C	C	G	II	I	B	B	G	II	I
8	C	B	G	I	III	A	A	G	I	III
14	E	E	F	II	II	D	D	F	II	II
19	D	C	F	II	III	C	C	F	II	III
25	E	F	C	II	III	F	F	C	II	III

De los datos reportados se observa que la variación del desempeño global se debe a una diferencia de categorización en el criterio energético. En la tabla 4-13 se presenta el valor de eficacia luminosa de las fuentes y la categoría de este criterio de acuerdo con los rangos establecidos en la tabla 4-2. En la tabla se observa que los resultados obtenidos mediante el método AHP Sort corresponden con la clasificación de la fuente por su eficacia, en cambio en el método ELECTRE-Tri-b la clasificación del desempeño energético es superior con respecto a la categoría real.

**Tabla 4-13:** Eficacia total de la red eléctrica  $\eta_{TM}$  y clasificación de las referencias seleccionadas.

Referencia	$\eta_{TM}$ lm/W	Categoría
12	109,8	C
8	119,7	B
14	89,9	E
19	100,6	C
25	73,6	F

Considerando los resultados, se concluye que el método ELECTRE-Tri-b presenta errores en la categorización de los criterios cuando el valor es cercano al límite establecido para determinar las categorías. En cambio, el método AHP Sort es exacto con los resultados.

Ahora, con relación al tercer factor, de los resultados expuestos en la sección anterior se identificó un mayor impacto en la categorización del desempeño global de las fuentes en la evaluación del método AHP Sort, especialmente relacionado con la diferencia entre los resultados con los datos base y normalizados.

Finalmente, considerando el análisis comparativo realizado se selecciona el método AHP Sort para la evaluación de las fuentes de iluminación LED de interior, considerando principalmente la exactitud en la categorización de los criterios. Adicionalmente, se selecciona la metodología para calcular los pesos descrita dentro de la evaluación del método AHP Sort, debido al efecto de la priorización de los criterios dentro del cálculo de los pesos.

## 4.5. Propuesta de etiqueta para iluminación

Luego de realizar la valoración de los métodos expuestos anteriormente, se evalúa el etiquetado de productos de iluminación LED de interior. Para ello, en primer lugar se propone una nueva matriz de prioridad con tres escenarios, los cuales se exponen en la tabla 4-14, considerando los pesos obtenidos en los dos escenarios evaluados en la sección 4.5.3.

El primer escenario considera al desempeño energético como el parámetro de mayor importancia y el desempeño visual el segundo; en el segundo escenario, se considera al desempeño visual como el de mayor importancia y el desempeño circadiano como el segundo; el tercer escenario considera al parámetro visual como el de mayor importancia y el desempeño energético como el segundo.

**Tabla 4-14:** Matriz de prioridad evaluación del desempeño fuentes de luz LED.

<b>Criterio</b>	<b>Desempeño energético</b>	<b>Desempeño eléctrico</b>	<b>Desempeño visual</b>	<b>Desempeño circadiano</b>	<b>Peso</b>
<b>Desempeño energético</b>	1	7	1	9	0,47
<b>Desempeño eléctrico</b>	1/7	1	1/5	3	0,10
<b>Desempeño visual</b>	1	5	1	5	0,38
<b>Desempeño circadiano</b>	1/9	1/6	1/5	1	0,05
<b>Desempeño energético</b>	1	7	1/5	1/3	0,16
<b>Desempeño eléctrico</b>	1/7	1	1/7	1/7	0,04
<b>Desempeño visual</b>	5	7	1	3	0,53
<b>Desempeño circadiano</b>	3	7	1/3	1	0,27
<b>Desempeño energético</b>	1	5	1/3	3	0,31
<b>Desempeño eléctrico</b>	1/5	1	1/5	1/5	0,06
<b>Desempeño visual</b>	3	5	1	1	0,39
<b>Desempeño circadiano</b>	1/3	5	1	1	0,24

El objetivo de realizar la evaluación del etiquetado en los tres escenarios planteados es determinar el efecto en la clasificación de los productos por asignar una mayor importancia a

los criterios de desempeño visual y circadiano, considerando el impacto de estos en la tarea visual y el confort del ser humano.

Por otro lado, se evalúan dos casos, el primero considerando los rangos de eficacia luminosa calculada en la sección 4.2 y el segundo considerando la eficacia propuesta por la Unión Europea y adoptada por la Comisión Panamericana de Normas Técnicas COPANT 1737:2021 [59].

La propuesta dentro del programa de etiquetado es aplicar los rangos en dos periodos de tiempo, el primero con entrada en vigencia en el año 2024 y el segundo con entrada en vigencia 5 años después, es decir en el año 2029. Adicionalmente, considerando la importancia del desempeño visual dentro de la valoración global de los productos, se propone también escalar los rangos del IRC y el Rf para 2029.

La propuesta surge como mecanismo para garantizar que la etiqueta se mantenga vigente en el tiempo y promover la comercialización de productos de mayor desempeño energético y buen desempeño visual en el futuro. La propuesta de rangos para el etiquetado se presenta en las tablas 4-15 y 4-16. Adicionalmente, se evaluarán las tecnologías con los datos reales obtenidos en las pruebas de laboratorio.

**Tabla 4-15:** Rangos de evaluación desempeño energético y eléctrico.

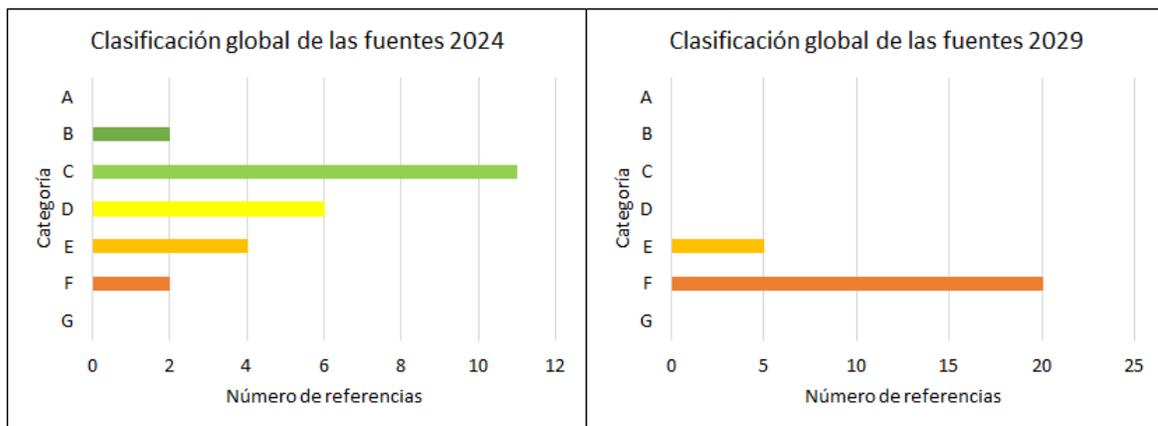
Categoría	Eficacia		FP	ITHD
	2024	2029		
A	>120	>210	>0,9	>90
B	110-120	185-210	0,75-0,9	75-90
C	100-110	160-185	0,6-0,75	60-75
D	90-100	135-160	0,45-0,6	45-60
E	80-90	110-135	0,3-0,45	30-45
F	70-80	85-110	0,15-0,3	15-30
G	<70	<85	<0,15	<15

**Tabla 4-16:** Rangos de evaluación desempeño visual y circadiano.

Categoría	IRC		Rf		Rg	MELR
	2024	2029	2024	2029		
I	>85	>90	>85	>90	>15	>1
II	70-85	80-90	70-85	80-90	5-15	0,6-1
III	<70	<80	<70	<80	<5	<0,6

### 4.5.1. Fuentes espectro punto fijo

Se ejecuta el método con los pesos calculados con los datos de las fuentes medidas, los resultados de la categorización se presentan en el anexo G. En la figura 4-10 se presenta la distribución de las referencias de la muestra evaluada por cada categoría en el escenario 1 (con mayor importancia al desempeño energético y visual). Para la clasificación propuesta en el año 2024 se observa que el 44 % de las referencias son clasificadas en categoría C, siendo la categoría de mayor representatividad. Las categorías con menor representatividad de la muestra son la B y la F con 8 % cada una.



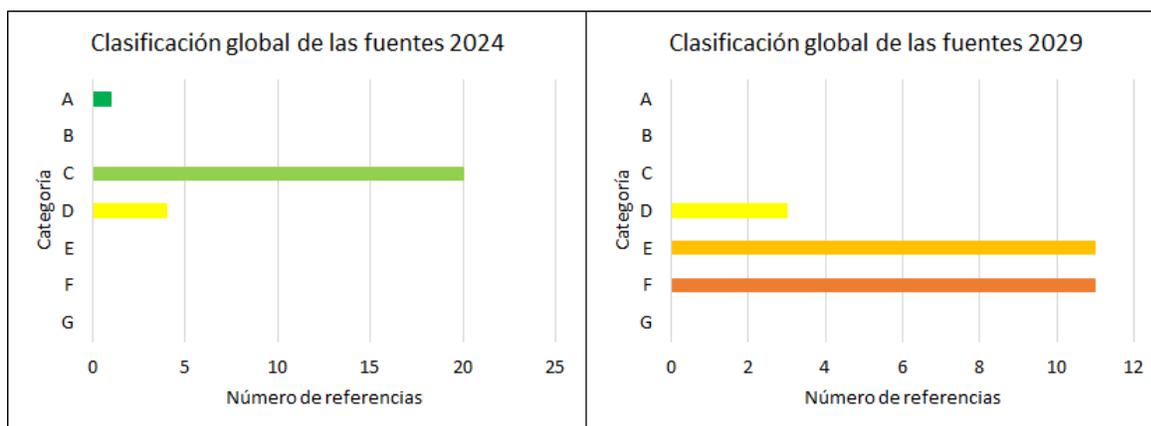
**Figura 4-10:** Clasificación global de la muestra de referencias estudiadas escenario 1, año 2024 y año 2029. Mayor prioridad al desempeño energético y visual.

Por otro lado, con respecto a la clasificación con los rangos propuestos para 2029 se obtiene que las referencias se ubican en dos categorías E (20 %) y F (80 %). Esta clasificación con los valores actuales del mercado colombiano no daría las suficientes herramientas a los usuarios finales para seleccionar los productos, considerando que tener solo dos categorías no permite diferenciar adecuadamente los equipos.

Adicionalmente, en los resultados presentados en el anexo G para la clasificación propuesta al año 2029 se identifica que aunque algunas referencias son categorizadas G por el desempeño energético, estas se categorizan F en el desempeño global debido a su desempeño en los criterios eléctrico, visual y circadiano.

Por otro lado, en la figura 4-11 se muestra la distribución de referencias de la muestra evaluada por cada categoría en el escenario 2 (con mayor importancia al desempeño visual y circadiano). Para el caso del año 2024 el 80 % de las fuentes serían categorizadas en C, el 16 % en D y el 4 % en A. Con la evaluación del escenario 2 para el año 2024 se observa que las referencias solo se categorizarían en 3 clases, siendo el mayor porcentaje categorizado C, lo cual no permitiría al usuario final diferenciar las tecnologías por su desempeño global.

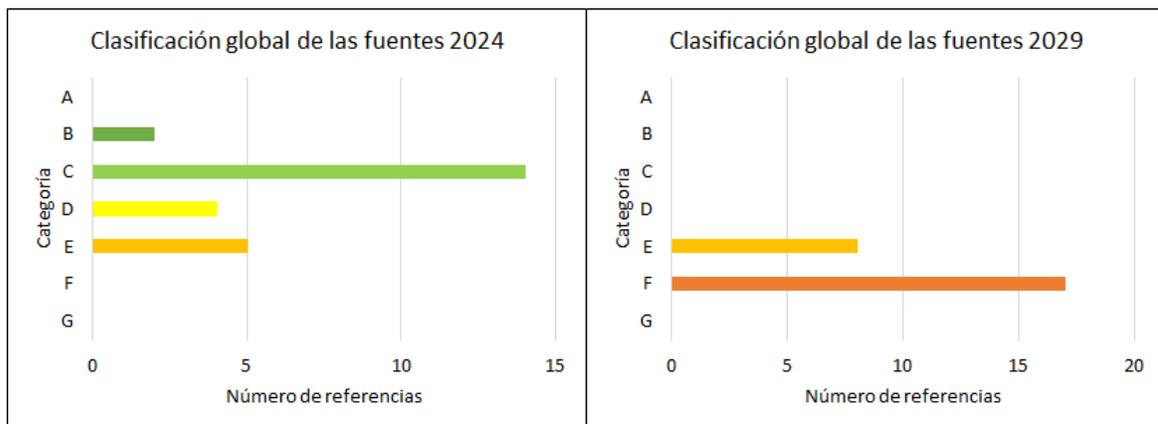
Para el caso del año 2029, el 44 % serían categorizadas en E y F respectivamente y el 12 % restante en D, en este caso ninguna de las categorías tiene un porcentaje de participación mayor al 50 %.



**Figura 4-11:** Clasificación global de la muestra de referencias estudiadas escenario 2, año 2024 y año 2029. Mayor prioridad al desempeño visual y circadiano.

Finalmente, en la figura 4-12 se muestran los resultados obtenidos de la evaluación del escenario 3 (con mayor importancia al desempeño visual y energético). En este escenario para el 2024 el 56 % de las referencias son categorizadas C, el 16 % D, el 20 % E y el 8 % B. Por otro lado, para el 2029 la distribución sería de 68 % en categoría F y el 32 % restante en categoría E.

Los resultados muestran un impacto fuerte en la clasificación con relación al escenario y año de evaluación. El escenario 1 para el año 2024, el escenario 2 para el año 2029 y el escenario 1 para el 2024 reportan resultados que permiten comparar las referencias evaluadas. Igualmente, los resultados permiten concluir la importancia de incluir el desempeño visual y circadiano en la evaluación del desempeño global de la tecnología LED de interior.

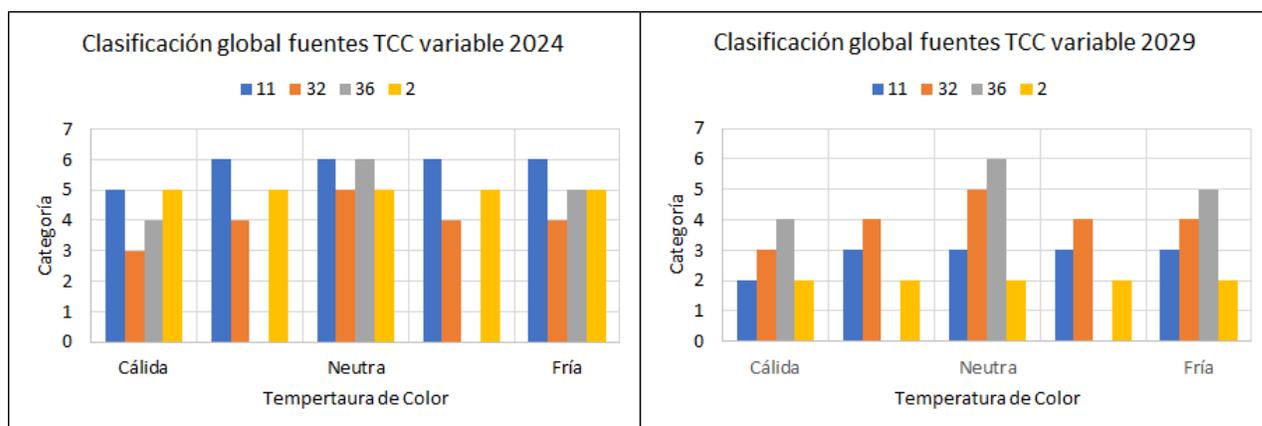


**Figura 4-12:** Clasificación global de la muestra de referencias estudiadas escenario 3, año 2024 y año 2029. Mayor prioridad al desempeño visual y energético.

Con base en los resultados obtenidos, se propone evaluar el desempeño global en la etiqueta, además incluir información sobre el desempeño energético, visual y circadiano en la misma. Lo anterior, garantizando que sea de fácil lectura para el usuario final. La propuesta de etiquetado se presenta en la sección 4.5.3.

#### 4.5.2. Fuentes espectro variable

Ahora, se muestra la variación de la clasificación global de las fuentes con espectro variable. Específicamente, en la figura 4-13 se muestran las referencias de las fuentes con TCC variable en las cuales se observa un cambio en la clasificación del desempeño global en el escenario 1 de evaluación.



**Figura 4-13:** Clasificación global de la muestra de referencias con temperatura de color variable estudiadas escenario 1 cuya clasificación global cambió con la TCC, año 2024 y año 2029. Las referencias presentadas son aquellas que reportan variación de la clasificación por variar la TCC.

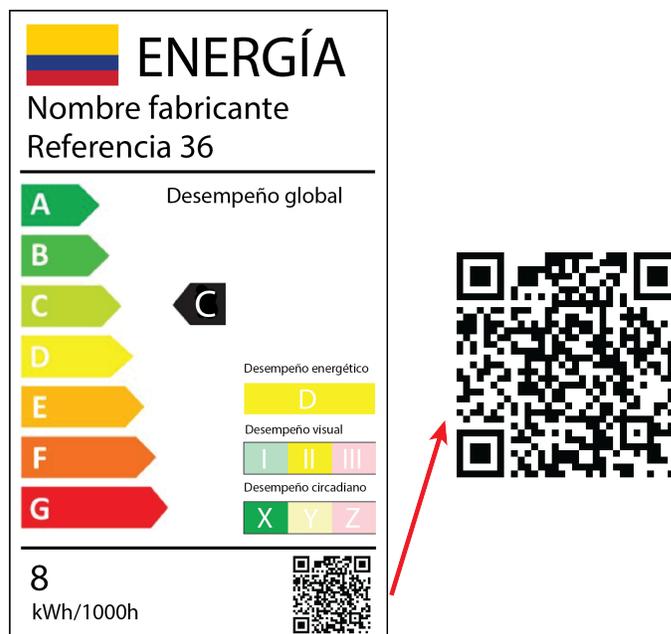
Para este tipo de fuentes únicamente se evalúa el cambio para un escenario porque el objetivo es identificar el impacto de la variación del espectro en la clasificación global de las fuentes. En la figura se evidencia una variación significativa para las fuentes estudiadas, especialmente en la clasificación para el año 2029.

Por otro lado, considerando que el objetivo es que la etiqueta contenga la menor información posible para no saturar al usuario, se propone que para las fuentes de espectro variable únicamente se evalúe en un punto de operación.

Considerando que en general las fuentes PC-LED de espectro variable reporta valores mayores de eficacia luminosa en el punto de operación de TCC fría (funcionando únicamente uno de los dos LED dentro de estos productos) y que las tecnologías RGB tienen un mejor IRC en el punto de operación de TCC fría, se propone considerar el punto de operación del 100 % del flujo luminoso y la TCC fría para la evaluación de los productos dentro del etiquetado.

### 4.5.3. Estructuración de le etiqueta

Con base en los resultados obtenidos en la sección anterior, se propone implementar el etiquetado evaluado en el escenario 3 considerando la importancia que se le da al desempeño visual, energético y circadiano. Además, se obtuvo una buena distribución de los productos para 2024 y se espera que con la propuesta de actualización a 2029 se comercialicen mejores productos.

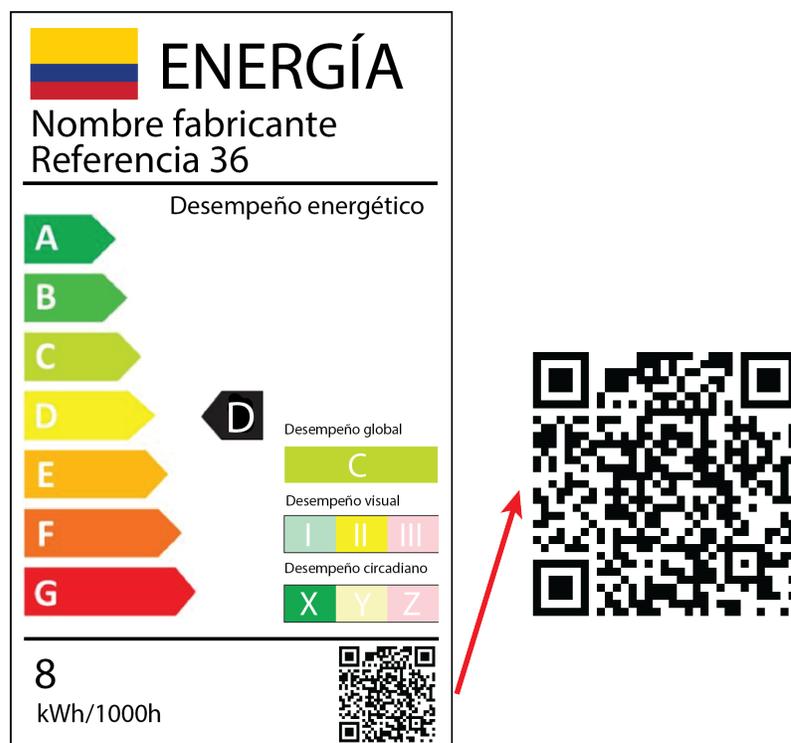


**Figura 4-14:** Propuesta 1 de etiqueta de desempeño iluminación interior LED.

El formato de la etiqueta propuesta se fundamenta en la etiqueta establecida por la Unión Europea [13] y adoptada por el COPANT [59]. Específicamente se estructuran 3 alternativas de etiqueta, considerando los aspectos presentados a continuación:

La primera propuesta se presenta en la figura 4-14. Para esta etiqueta se propone presentar la evaluación del desempeño global del producto como valor principal, adicionalmente, se propone mostrar el desempeño energético, visual y circadiano del producto. El desempeño energético se presenta con el color y letra de la categoría. El desempeño visual se presenta con el color y número romano, siendo I y el color verde el de mayor desempeño y III y el color rojo el de menor . El desempeño circadiano se representa con las letras X, Y y Z, siendo X verde el de mayor desempeño y Z rojo el de menor.

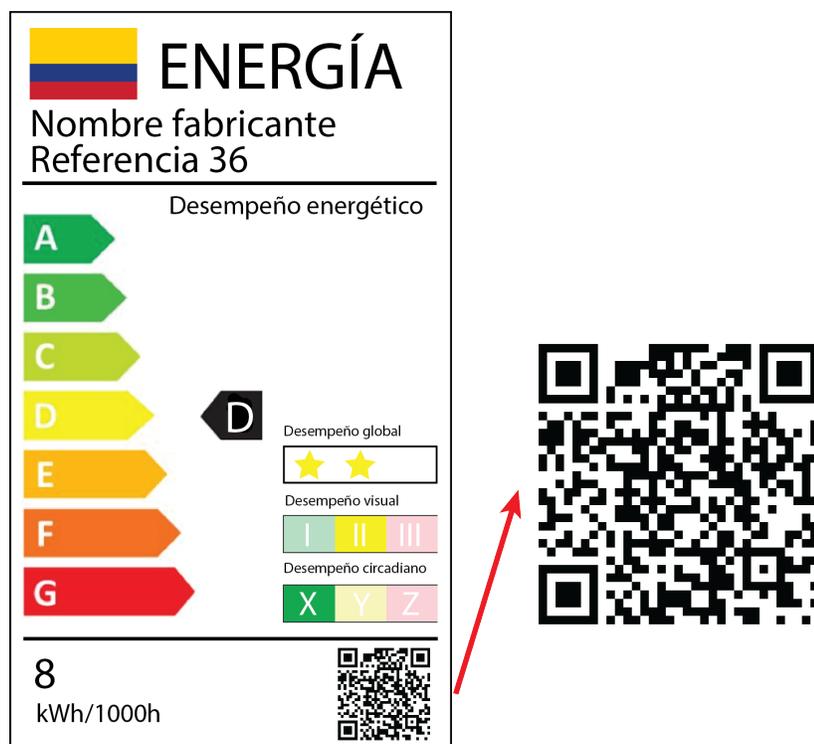
Adicionalmente, en la parte superior de la etiqueta se presenta el nombre del fabricante y la referencia para identificar el producto. Por otro lado, en la sección inferior de la etiqueta se muestra el consumo de energía por cada 1000 horas de uso y un código QR, el cual traslada a un sitio web con la información completa del producto y los valores de los parámetros de evaluación.



**Figura 4-15:** Propuesta 2 de etiqueta de desempeño iluminación interior LED.

La segunda propuesta se muestra en la figura 4-15. La principal diferencia radica en la presentación del desempeño global y energético de la fuente. Para esta propuesta el desempeño

energético se muestra como valor principal y el desempeño global como valor adicional. Esta propuesta surge con el objetivo de proponer una alternativa para que la etiqueta de los productos de iluminación tengan el mismo esquema de las demás etiquetas de desempeño energético en Colombia.



**Figura 4-16:** Propuesta 3 de etiqueta de desempeño iluminación interior LED.

La tercera propuesta de etiquetado es la presentada en la figura 4-16. Para esta etiqueta se propone presentar de forma principal el desempeño energético y adicionalmente el desempeño visual y circadiano. Por otro lado, el desempeño global se presenta con estrellas, donde:

- Tres estrellas: simboliza que el producto se categoriza en A o B con respecto al desempeño global.
- Dos estrellas: simboliza que el producto se categoriza en C, D o E con respecto al desempeño global.
- Una estrella: simboliza que el producto se categoriza en F o G con respecto al desempeño global.

Para las tres propuestas se muestra el consumo de energía por 1000 h de uso y el código QR para ampliar la información.

Luego de la presentación de las tres alternativas de etiqueta, se concluye que la alternativa 3 es la adecuada para implementar en Colombia. Esto, considerando que al presentar el desempeño energético como parámetro principal mantiene el esquema del formato de etiquetado de los otros equipos. Se selecciona esta alternativa con respecto a la 2 considerando el efecto visual que podría generar mostrar la categorización global y energética con el mismo esquema de letras y colores, por lo que se puede generar confusión en el usuario final.

La categorización del desempeño global mediante estrellas es una alternativa que muestra de forma sencilla la valoración integral del desempeño energético, visual y circadiano de los productos LED.

# 5 Evaluación de los MEPS

Como propuesta para complementar el esquema de etiquetado mencionado previamente, se plantea la estructuración de MEPS para los productos de iluminación interior LED en Colombia. La propuesta de MEPS de la presente investigación sirve como referencia para el proceso de actualización del RETILAP.

## 5.1. Análisis comparativo

El análisis comparativo se realiza considerando dos escenarios, el primero con la aplicación de la política de MEPS establecida por la Unión Europea y el segundo considerando las disposiciones de eficacia mínima de producto definidas en el documento de consulta pública del proceso de actualización de RETILAP.

### 5.1.1. MEPS Unión Europea

En primer lugar, se evalúan las referencias estudiadas mediante el estándar mínimo de desempeño energético establecido en 2021 por la Unión Europea en el reglamento delegado de la comisión europea - (EU) 2019/2020 [25]. El estándar es definido mediante la potencia máxima de encendido  $P_{onmax}$ , la cual se calcula como se muestra en la ecuación 5-1.

$$P_{onmax} = C \times (L + \phi_{use}/(F \times \eta)) \times R, \quad (5-1)$$

donde  $C$  es un factor de corrección el cual depende de la fuente de luz, en la tabla 5-1 se presenta los valores de  $C$  de acuerdo con el tipo de fuente.

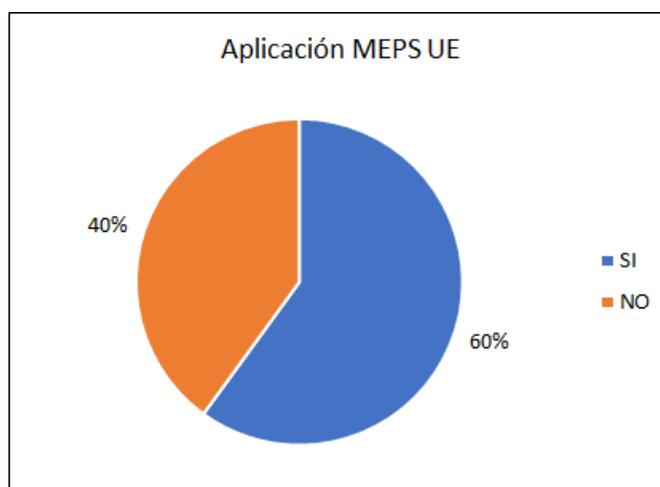
**Tabla 5-1:** Factores de corrección  $C$  por tipo de fuente luminosa [13].

Tipo de fuente luminosa	Factor $C$ básico
Fuentes no direccionales (NDLS) que no funcionan con la red eléctrica (NMLS)	1,00
Fuente no direccionales (NDLS) que funcionan con la red eléctrica (MLS)	1,08
Fuentes direccionales (DLS) que no funcionan con la red eléctrica (NMLS)	1,15
Fuentes direccionales (DLS) que funcionan con la red eléctrica (MLS)	1,23

Adicionalmente, para fuentes de cambio de temperatura de color se les agrega 0,1 al valor de  $C$  de la anterior tabla.

$L$  es un factor de pérdida y  $\eta$  es el umbral de eficacia, para tecnología LED  $L$  es de 1,5 y  $\eta$  120.  $F$  es un factor de eficacia el cual es 1 para fuentes no direccionales y 0,85 para fuentes direccionales.

Finalmente,  $R$  es el factor por el desempeño visual con relación al IRC, el cual es 0,65 si el IRC de la fuente es menor o igual a 25 y  $(IRC + 80)/160$  para fuentes con IRC mayor a 25.

**Figura 5-1:** Evaluación del MEPS establecido en la Unión Europea con las referencias estudiadas y probadas en laboratorio.

Luego de calcular la potencia máxima de encendido de acuerdo con lo descrito anteriormente, se compara el valor obtenido con el valor de la potencia de la fuente. En la figura 5-1 se presenta la distribución de las 25 referencias probadas en laboratorio que cumplen y no cumplen el MEPS establecido en la Unión Europea. De las referencias estudiadas el 60 % cumplen y el 40 % no. Adicionalmente, luego de evaluar 365 referencias del mercado colombiano se encontró que el 53 % de estas referencias cumple con el reglamento de la Unión Europea y el 47 % restante no [58]. Esto evidencia una similitud en la distribución del porcentaje con la muestra evaluada en laboratorio.

### 5.1.2. MEPS propuesta de actualización RETILAP

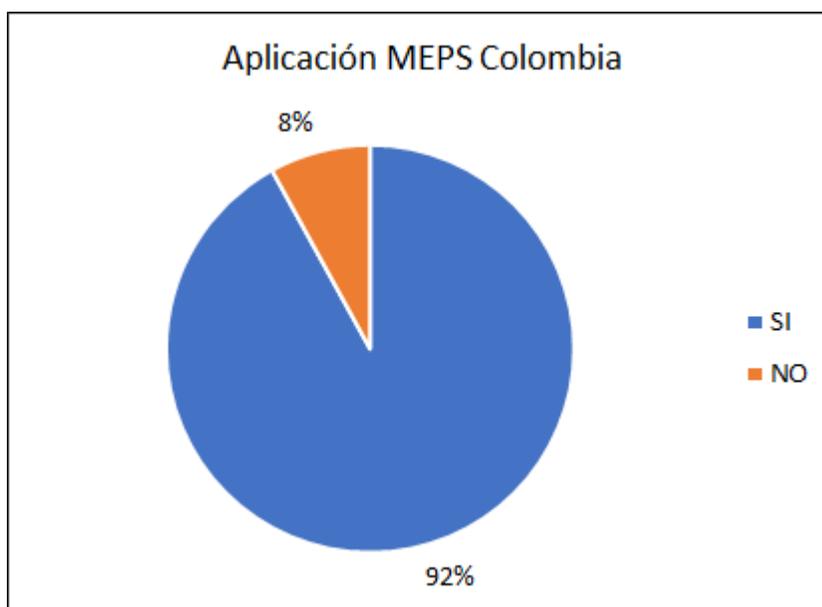
Ahora, se realizará la evaluación de las referencias siguiendo la propuesta de eficacia luminosa mínima definida en el documento de consulta pública de la propuesta de actualización de RETILAP. En la tabla 5-2 se presentan los valores mínimos de eficacia establecidos en el reglamento. De los valores establecidos se evidencia una dependencia fuerte del tipo de fuente de luz.

**Tabla 5-2:** Eficacia mínima por tipo de producto LED en la propuesta de actualización del RETILAP [14].

Tipo de fuente	Eficacia mínima
Bombillas de estado sólido	70
Tubos LED	85
Cintas LED	60
Luminarias tipo downlight	65
Luminarias tipo tracklight	65
Paneles LED $P \geq 30$ W	80
Paneles LED $P < 30$ W	65
Luminarias herméticas	80
Luminarias High Bay	100
Luminarias lineales	75
Luminarias de incrustar para interior	70

El valor de eficacia luminosa calculado en el laboratorio se compara con los valores mínimos establecidos en la tabla 5-2. En la figura 5-2 se muestra el resultado de la evaluación de

las referencias estudiadas, donde se evidencia que el 92% de las referencias cumplen con el MEPS propuesto y el 8% de estas no cumple.



**Figura 5-2:** Evaluación del MEPS establecido en la propuesta de actualización del RETILAP en Colombia con las referencias estudiadas y probadas en laboratorio.

Adicionalmente, en la tabla 5-3 se muestra un comparativo del cumplimiento de las referencias de la muestra bajo estudio del MEPS establecido en la Unión Europea y en la propuesta de actualización del RETILAP en Colombia.

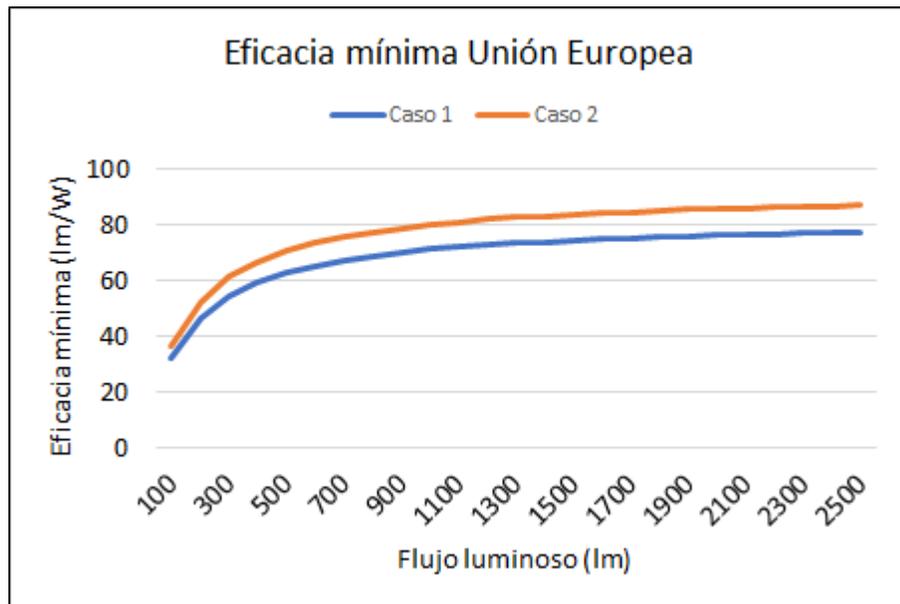
**Tabla 5-3:** Comparación del cumplimiento de las referencias de muestra bajo estudio del MEPS de la Unión Europea y el de la propuesta de actualización de RETILAP.

Ref	UE	RETILAP	Ref	UE	RETILAP	Ref	UE	RETILAP
10	SI	SI	8	SI	SI	9	SI	SI
12	SI	SI	14	NO	NO	25	SI	NO
13	SI	SI	18	NO	SI	3	NO	SI
17	NO	SI	19	NO	SI	4	NO	SI
20	SI	SI	21	NO	SI	2	SI	SI
22	SI	SI	27	NO	SI	32	SI	SI
36	SI	SI	28	NO	SI	11	SI	SI
5	SI	SI	7	SI	SI	35	SI	SI
6	NO	SI						

De los resultados obtenidos se evidencia que 9 referencias cumplen el MEPS de la propuesta de RETILAP y no el de la Unión Europea, por otro lado, 1 referencia cumple con el MEPS de la Unión Europea y no con el de la propuesta de RETILAP. Finalmente, solamente 1 referencia no cumple con el MEPS tanto de la Unión Europea como el de la propuesta de RETILAP.

La diferencia entre la evaluación de los dos reglamentos se debe principalmente a que en la Unión Europea el MEPS no es lineal, este depende del nivel de flujo luminoso. En la figura 5-3 se muestra cómo cambia el valor de eficacia mínima de la Unión Europea con respecto al flujo luminoso. La eficacia mínima se calcula como  $\phi/P_{onmax}$ . El caso 1 es con  $C$  1,23,  $\eta$  120,  $L$  1,5,  $F$  0,85 y  $R$  1,01. El caso 2 es con  $C$  1,15,  $\eta$  120,  $L$  1,5,  $F$  0,85 y  $R$  0,96.

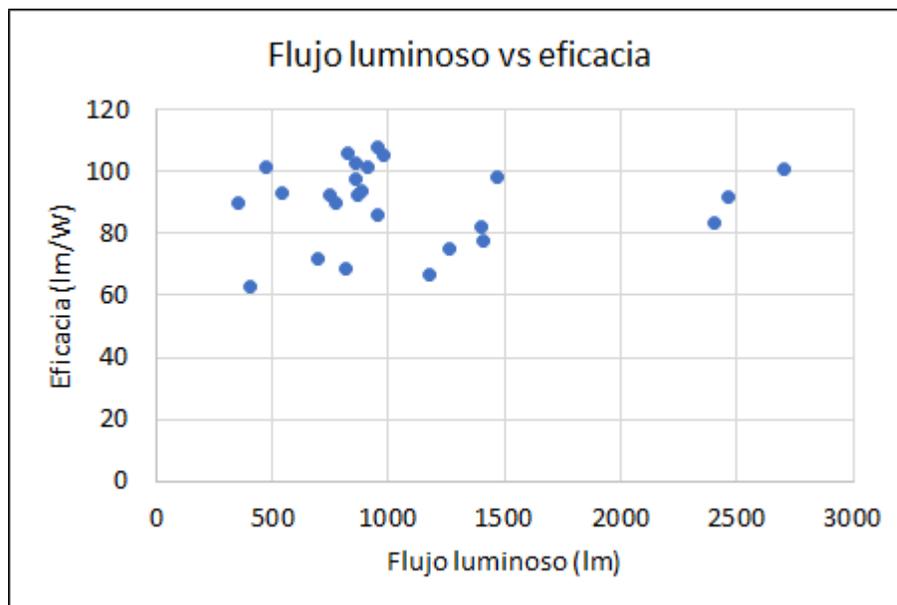
Por otro lado, los resultados obtenidos muestran un requisito mayor del programa de MEPS de la Unión Europea que el de la propuesta de actualización del RETILAP en Colombia.



**Figura 5-3:** Eficacia mínima del reglamento de la Unión Europea en función del flujo luminoso. Caso 1 es con  $C$  1,23,  $\eta$  120,  $L$  1,5,  $F$  0,85 y  $R$  1,01. Caso 2 es con  $C$  1,15,  $\eta$  120,  $L$  1,5,  $F$  0,85 y  $R$  0,96

Considerando la información observada en la figura 5-3 sugiere una relación entre el flujo luminoso y la eficacia. En la figura 5-4 se muestra la eficacia luminosa en comparación del flujo de la muestra evaluada en laboratorio. En la gráfica no se evidencia una relación entre estos dos parámetros, por lo cual se concluye que la decisión adoptada por la Unión Europea se da con el objetivo de promover mayor desempeño energético para las fuentes con mayor

emisión de flujo luminoso, considerando que estas son las de mayor consumo energético.



**Figura 5-4:** Eficacia mínima del reglamento de la Unión Europea en función del flujo luminoso. Caso 1 es con  $C$  1,23,  $\eta$  120,  $L$  1,5,  $F$  0,85 y  $R$  1,01. Caso 2 es con  $C$  1,15,  $\eta$  120,  $L$  1,5,  $F$  0,85 y  $R$  0,96

## 5.2. Análisis de impacto

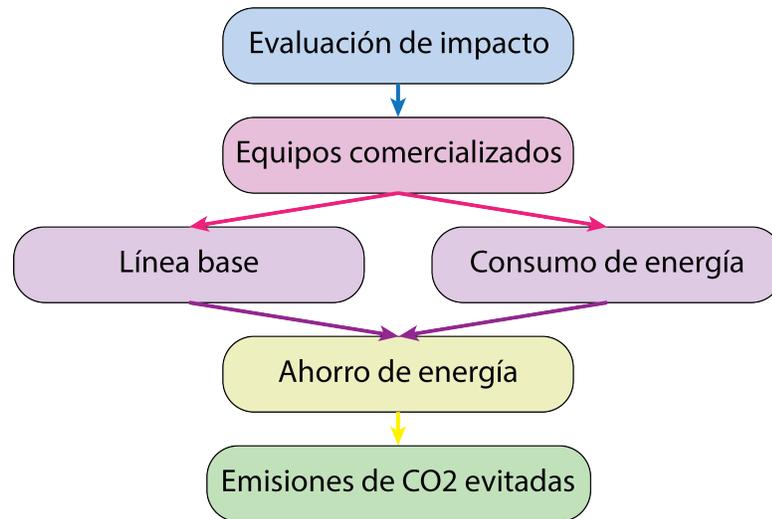
Dentro del análisis de impacto de definir un valor de estándar mínimo de desempeño energético para las tecnologías de iluminación LED en Colombia se propone evaluar el impacto país y para el usuario final. Con relación al país se valora el ahorro de energía y las toneladas equivalentes de carbono no emitidas, para estimar el impacto al usuario final se realiza un análisis costo-beneficio.

### 5.2.1. Impacto país

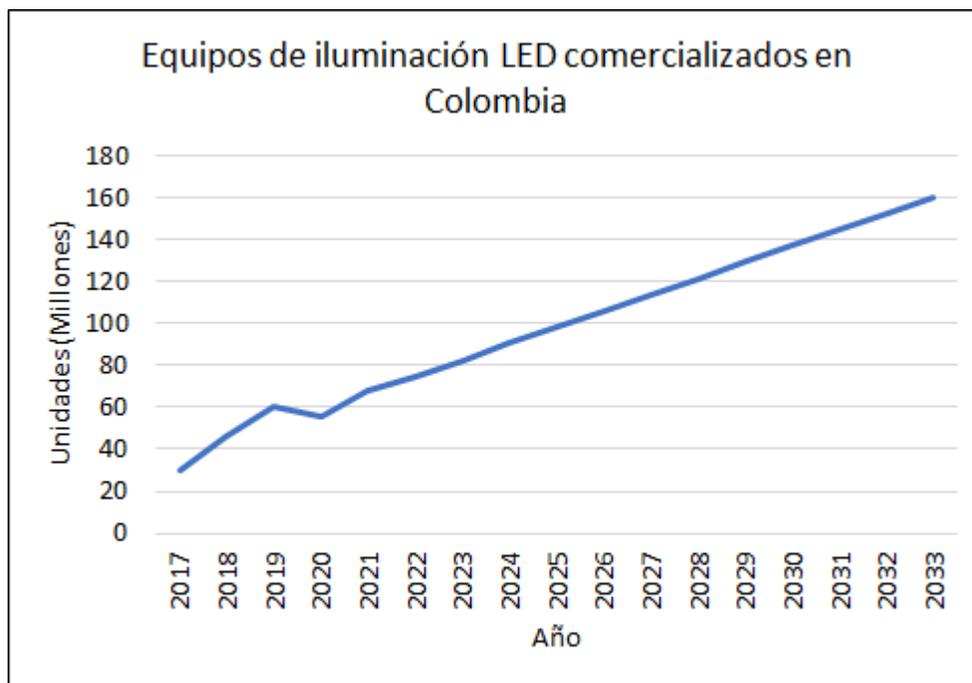
La metodología seguida para establecer el impacto país se divide en 4 fases, las cuales se presentan en la figura 5-5.

En la fase 1 se determina el número de productos de iluminación LED que circulan año a año en el mercado colombiano entre el 2017 y el 2021, para ello se implementa la ecuación 5-2 con los datos recopilados en la sección 2.1.2. Luego se realiza la proyección de número de equipos hasta el 2033.

$$\text{equipos} = \text{importaciones} - \text{exportaciones} \quad (5-2)$$



**Figura 5-5:** Metodología para la evaluación de impacto país del MEPS.



**Figura 5-6:** Evaluación del MEPS establecido en la propuesta de actualización del RETI-LAP en Colombia con las referencias estudiadas y probadas en laboratorio.

El flujo de equipos se presenta en la figura **5-6**, los valores presentados del año 2017 al 2021 son valores calculados mediante la ecuación 5-2 y con datos reales de importaciones y exportaciones. Los valores entre el año 2022 y 2033 son datos proyectados mediante un algoritmo de suavizado exponencial triple ETS de Excel.

Posteriormente, se establece la línea base de consumo de energía por iluminación tomando como referencia el año 2023. Para ello, se calcula el consumo con la ecuación 5-3.

$$\text{Consumo} = p \times \text{equipos} \times h \quad (5-3)$$

donde  $p$  es la potencia del equipo y  $h$  el número de horas promedio de uso. El número promedio de horas de uso se obtiene del Balance de Energía Útil realizado por la UPME en 2019, el cual es de 4 horas diarias en promedio para iluminación en el sector residencial y terciario [60].

Con relación a la potencia del equipo, esta se obtiene a partir de la eficacia luminosa mínima establecida, considerando un flujo luminoso de referencia de 1000 lm y siguiendo la ecuación 5-4.

$$p = \frac{\phi}{MEPS} \quad (5-4)$$

donde  $\phi$  es el flujo luminoso de referencia y MEPS es la eficacia luminosa mínima establecida.

La tercera y última fase corresponde al cálculo del ahorro de energía en kWh y las toneladas de carbono no emitidas por la implementación de un valor de eficacia luminosa mayor como MEPS. Para ello se evaluarán los siguientes escenarios:

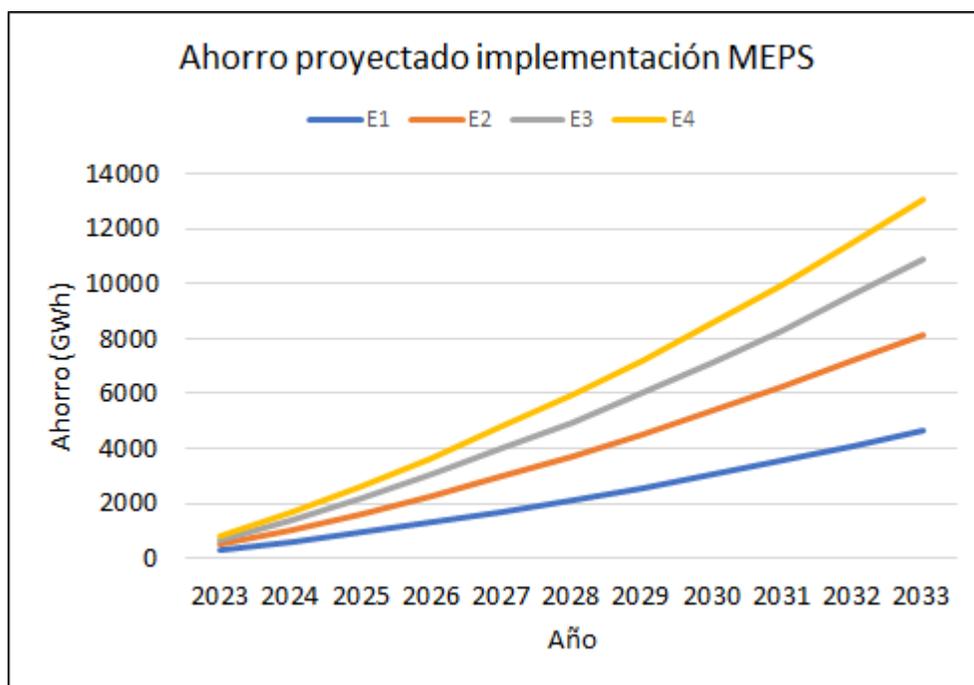
- El escenario base evaluado será considerando una eficacia promedio del mercado de 60 lm/W. Se selecciona este valor base considerando que es el valor mínimo propuesto para la actualización de RETILAP y presentado en la tabla **5-2**.
- Escenario 1 considerando el MEPS como una eficacia mínima de 70 lm/W.
- Escenario 2 considerando el MEPS como una eficacia mínima de 80 lm/W.
- Escenario 3 considerando el MEPS como una eficacia mínima de 90 lm/W.
- Escenario 4 considerando el MEPS como una eficacia mínima de 100 lm/W.

El ahorro de energía se calculará como la diferencia entre el consumo de energía base y el consumo de energía de cada uno de los escenarios. El consumo de energía se calcula siguiendo

la ecuación 5-3. Por otro lado, las toneladas de carbono no emitidas por el ahorro de consumo energético se calcula considerando el factor de emisión de gases de efecto invernadero del Sistema Interconectado Nacional por Mecanismo de Desarrollo Limpio MDL para proyectos de eficiencia energética. En la tabla 5-4 se presenta el factor de emisiones en el periodo de años entre el 2017 y 2021 [15]. Para el calculo de las emisiones de CO2 equivalentes se implementará el promedio de los valores presentados en la tabla 5-4, el cual es de 0,395.

**Tabla 5-4:** Factor de emisión por proyectos MDL de eficiencia energética [15].

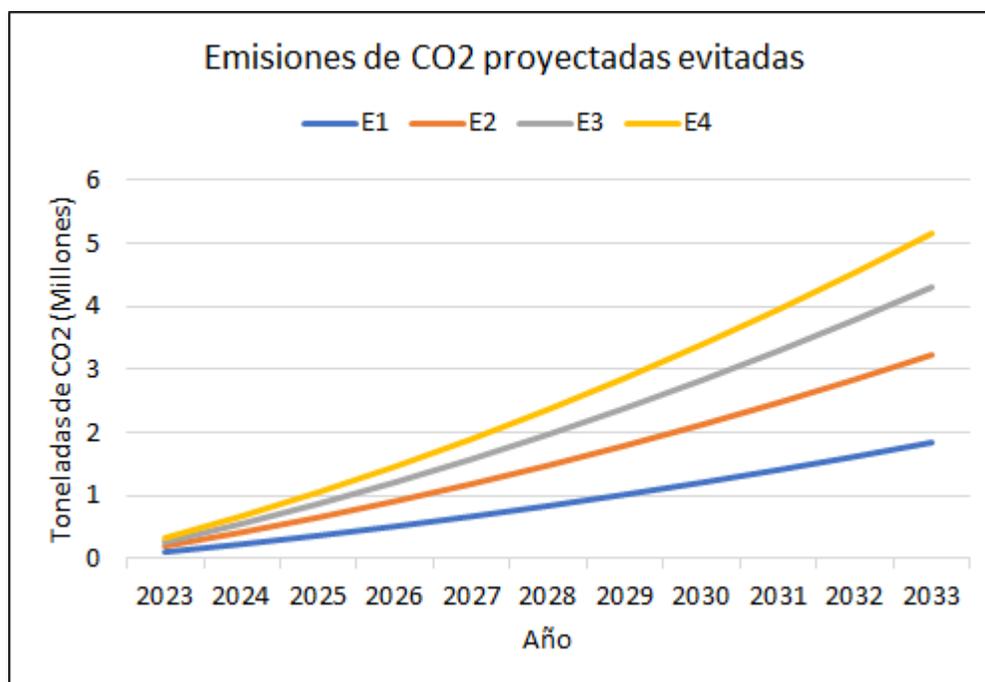
Año	Factor de emisiones TonCO2/MWh
2017	0,38
2018	0,381
2019	0,385
2020	0,527
2021	0,303



**Figura 5-7:** Ahorro acumulado proyectado por el consumo de energía de los productos de iluminación LED comercializados en Colombia entre el año 2023 y 2033.

Luego de aplicar la metodología presentada anteriormente se obtiene el ahorro de energía proyectado a 2033 por la comercialización de tecnología LED luego de establecer el valor de MEPS propuesto en los 4 escenarios de evaluación. En la figura 5-7 se presenta el ahorro acumulado de energía proyectado para los años 2023-2033 de las tecnologías de iluminación LED comercializadas durante esos años, es decir los equipos proyectados en la figura 5-6. De los resultados obtenidos, se proyecta un ahorro acumulado durante los 10 años de 8140 GWh si se aplica un MEPS de 80lm/W y 10 800 GWh si el MEPS aplicado es de 90 lm/W.

Por otro lado, en la figura 5-8 se presenta las emisiones de CO2 evitadas acumuladas durante los años 2023-2033. Las emisiones evitadas durante los 10 años es de 3 millones de toneladas de CO2 si se aplica un MEPS de 80lm/W y 4 millones de toneladas de CO2 si se aplica un MEPS de 90 lm/W.



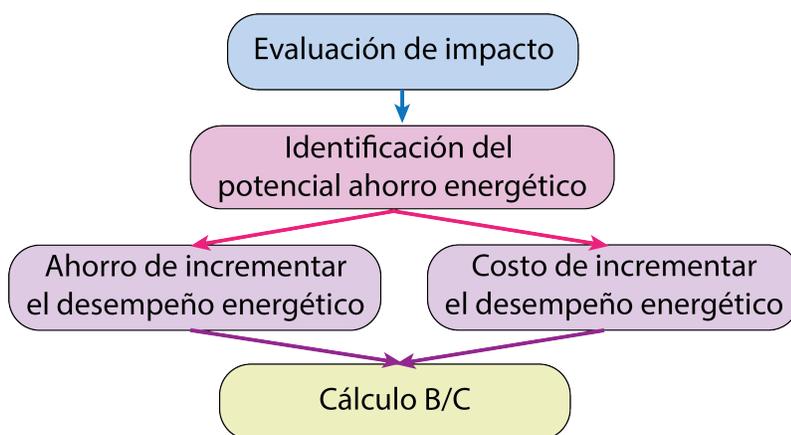
**Figura 5-8:** Emisiones de CO2 evitadas proyectado por el consumo de energía de los productos de iluminación LED comercializados en Colombia entre el año 2023 y 2033.

Los resultados obtenidos permiten identificar el impacto energético y ambiental de la implementación de un MEPS en el contexto colombiano. El ahorro energético contribuye con la seguridad energética del país y le permite al Ministerio de Minas y Energía establecer la política energética del país con relación a nuevos proyectos de generación. Por otro lado, las emisiones de carbono evitadas permiten valorar el efecto de las medidas de política energética tomadas con relación al cumplimiento de los acuerdos de Colombia referentes a

emisiones de gases de efecto invernadero y las disposiciones expuestas en el Plan Nacional de Desarrollo.

### 5.2.2. Impacto usuario final

Con relación a la evaluación del impacto en el usuario final, se propone seguir la metodología ilustrada en la figura 5-9. La metodología fue evaluada dentro del proyecto de investigación *Estándares mínimos de desempeño energético, MEPS y de etiquetado para los equipos de uso final de energía con mayores consumos en el país. Línea temática 3 convocatoria energía sostenible y su aporte a la planeación minero energética - 2020 Minciencias* con referencia en el *Collaborative Labeling and Appliance Standards Program (CLASP)* y la *United States Environmental Protection Agency (EPA)* [24,61].



**Figura 5-9:** Metodología para la evaluación de impacto usuario final del MEPS.

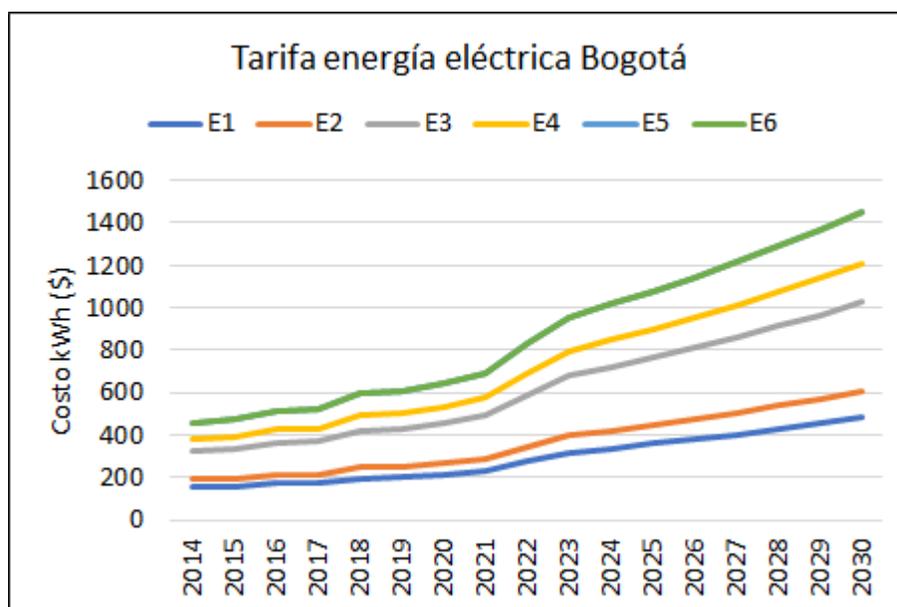
En primer lugar se identifica el potencial de ahorro energético, para lo cual se evalúa el ahorro energético resultado de valorar los escenarios 1 (70 lm/W), 2 (80 lm/W), 3 (90 lm/W) y 4 (100 lm/W) presentados previamente con respecto al escenario base del MEPS de 60 lm/W.

El potencial de ahorro energético se calcula comparando el consumo de energía de cada uno de los escenarios planteados con el escenario base, el consumo se estima siguiendo la ecuación 5-3, para este escenario se evalúa el impacto de comprar un equipo.

Posteriormente, se identifica el ahorro por incrementar el desempeño energético. Para ello, se calcula el ahorro durante la vida útil del equipo en facturación por el consumo de energía de iluminación. Teniendo en cuenta que el impacto evaluado se enfoca en el usuario final, el ahorro en facturación se calcula considerando el costo de la energía para usuarios residenciales. A modo de ejemplo, se analiza el ahorro para un usuario en la ciudad de Bogotá.

En la figura 5-10 se muestra el costo del kWh para el sector residencial por estrato en Bogotá. Los datos entre el año 2014 y 2023 se obtuvieron de la página web de Enel Colombia [62], además con estos datos se calculo el porcentaje de incremento de la tarifa, el cual fue de 6,1 % anual, para el cálculo del porcentaje de incremento no se consideraron los años 2022 y 2023 debido a que reportan incrementos muy altos comparados con los anteriores.

Los datos entre los años 2024 y 2030 se obtuvieron al proyectar el costo del kWh con el porcentaje de incremento calculado. Se consideró un periodo de 7 años teniendo presente la vida útil reportada por fabricantes del LED de 10 000 horas y un uso promedio de esta tecnología en el sector residencial de 4 horas diarias, de acuerdo con el BEU [60].



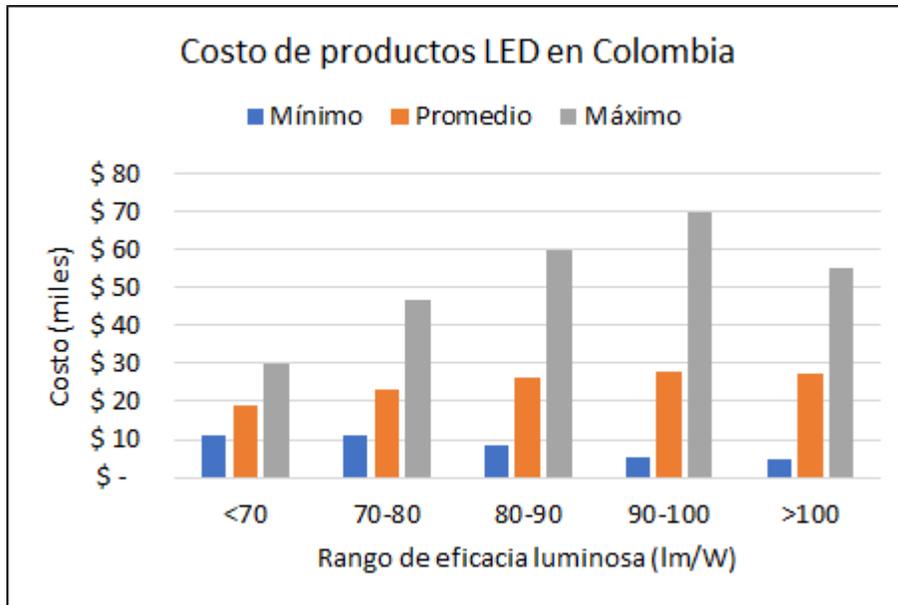
**Figura 5-10:** Costo del kWh de energía eléctrica en la ciudad de Bogotá.

El costo de incrementar el desempeño energético por el MEPS se evalúa considerando el costo incremental por obtener una tecnología de mayor desempeño energético. Para ello, se consultó el costo de 64 referencias de iluminación LED interior en almacenes colombianos. En la figura 5-11 se muestra el costo mínimo, promedio y máximo de los productos consultados de acuerdo con el rango de eficacia luminosa. Los rangos de eficacia se seleccionaron teniendo en cuenta los escenarios de evaluación.

En la figura los valores reportados para una eficacia menores a 70 lm/W corresponden al escenario base, entre 70 y 80 lm/W al escenario 1, entre 80 y 90 lm/W el escenario 2, entre 90 y 100 lm/W el escenario 3 y mayor a 100 lm/W el escenario 4.

En la figura se observa una tendencia a que el costo máximo y promedio del producto

incrementalmente al aumentar el rango de eficacia, y una tendencia a disminuir el costo mínimo al aumentar el rango de eficacia. Para el estudio se analizará el costo incremental de aumento de la eficacia luminosa con el valor promedio, el cual presenta una variación máxima con respecto al escenario base de \$ 8800 COP.



**Figura 5-11:** Costo de los productos de iluminación LED de interior consultados de acuerdo con su rango de eficacia. <70 lm/W 11 referencias, 70-80 lm/W 10 referencias, 80-90 lm/W 21 referencias, 90-100 lm/W 11 referencias, >100 lm/W 11 referencias.

Con los datos base para calcular el ahorro de energía y el costo incremental por aumentar el MEPS, se encuentra el beneficio costo enfocado al usuario final implementando la ecuación 5-5.

$$B/C = \frac{VPN \sum Ahorro}{VPN \sum Costo} \quad (5-5)$$

Para calcular el valor presente neto (VPN) del ahorro y del costo, se evalúa el flujo de caja del ahorro de energía y el costo incremental por la compra del producto de iluminación LED entre el 2024 y 2030, considerando una tasa de retorno del 12,6%. La tasa de retorno se selecciona contemplando las tasas de interés de los CDT reportadas por diversos bancos para 2023 [63].

El ahorro año a año se calcula como se muestra en la ecuación 5-6 y el costo incremental se calcula como se presenta en la ecuación 5-7.

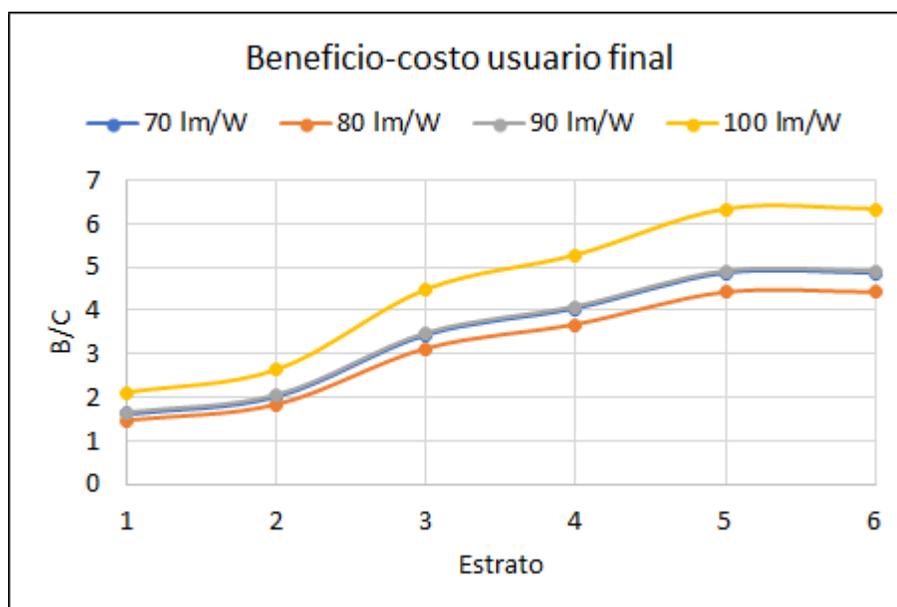
$$A_j = (C_{e,j}[kWh] - C_{b,j}[kWh]) \times E_j[\$/kWh], \quad (5-6)$$

donde  $A$  es el ahorro esperado en el año  $j$ ,  $C$  es el consumo del año  $j$  para el escenario  $e$  evaluado o el caso base  $b$  y  $E$  es el costo de la energía para el año  $j$ .

$$Co = Co_e - Co_b, \quad (5-7)$$

donde  $Co$  es el costo incremental,  $Co_e$  es el costo del escenario evaluado y  $Co_b$  es el costo del escenario base.

Con la metodología expuesta anteriormente se calcula el beneficio-costado del usuario final por adquirir tecnologías de mayor eficacia luminosa luego de la implementación de los MEPS. Cabe recordar que el escenario base analizado es para un valor de 60 lm/W, el escenario 1 es de 70 lm/W, el 2 de 80 lm/W, el 3 de 90 lm/W y el 4 de 100 lm/W. En la figura 5-12 se presenta el beneficio-costado (B/C) para los usuarios finales de acuerdo con el estrato socio económico.



**Figura 5-12:** Beneficio-costado para el usuario final por la implementación de MEPS con mayor eficacia luminosa.

De los resultados obtenidos, se observa que al implementar un MEPS de 70lm/W o 90 lm/W el usuario final obtiene un B/C similar. Además se observa que para el MEPS de 70 lm/W se identifica un B/C superior al implementar un MEPS de 80 lm/W, por lo cual se concluye que

un usuario final no tendría incentivos económicos por la compra de un equipo con eficacia luminosa de 80 lm/W sobre uno de 70 lm/W. Adicionalmente, se identifica un incremento considerable del B/C por la implementación del MEPS de 100 lm/W con respecto a los otros valores.

Por otro lado, se observa un mayor B/C para los usuarios de estratos 3, 4, 5 y 6 comparado con los de estratos 1 y 2. Lo anterior se debe a los subsidios aplicados al consumo de energía eléctrica para estos estratos en Colombia. Esta información permite concluir que desde el aspecto económico los subsidios generan un efecto negativo sobre la adquisición de productos de iluminación LED eficaces.

Con relación a la propuesta de adopción de un valor de MEPS, luego de analizar la muestra de 365 referencias del mercado colombiano presentadas en la figura **2-3**, se encuentra que el 75 % de los productos de iluminación LED reportan valores de eficacia superior a 80 lm/W. Por lo cual, se propone adoptar este valor como estándar mínimo para todas las tecnologías LED de interior en Colombia, lo cual representa ventajas en ahorro de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas de acuerdo con el análisis de impacto realizado.

Adicionalmente, se recomienda evaluar una estrategia para incentivar la compra de equipos con mayor eficacia en el usuario final, principalmente enfocada en usuarios de estratos 1 y 2 y en productos con eficacia de 80 lm/W, considerando que su B/C es inferior a los productos de 70 lm/W.

Finalmente se recomienda al Ministerio de Minas y Energía evaluar la adopción del MEPS establecido en la Unión Europea, considerando la integración del desempeño visual con el IRC y la especificación del MEPS con relación al flujo luminoso o potencia de la fuente.

# 6 Conclusiones y recomendaciones

## 6.1. Conclusiones

Con el desarrollo de la tesis se realizó una propuesta de programa de MEPS y etiquetado en el sector de iluminación interior en Colombia. El método de evaluación multicriterio de etiquetado formulado se presenta como una herramienta para promover el uso racional y eficiente de la energía, considerando tanto el desempeño visual como el circadiano en las tecnologías LED. Además, el MEPS propuesto responde a la situación actual del mercado colombiano y representa ventajas energéticas y ambientales para el país.

El alcance de esta investigación se centró en la tecnología LED con emisión de luz blanca y en dos tipos específicos de productos: tecnología LED con temperatura de color y nivel de flujo fijos, y tecnología LED con temperatura de color y nivel de flujo variables. La etiqueta y MEPS formulado se realiza para este tipo de fuentes con la recopilación y análisis de parámetros energéticos, visuales y circadianos, priorizando el desempeño visual cómo lo manifiestan los expertos nacionales en el campo de la iluminación.

La evaluación del etiquetado mediante el método de análisis multicriterio AHP Sort es adecuado para la aplicación en tecnologías de iluminación interior LED en Colombia, debido a la posibilidad de integrar la evaluación del desempeño energético, visual y circadiano de estos productos y a la versatilidad del método para la definición de los pesos de acuerdo con la priorización establecida.

Teniendo en cuenta la distribución actual de las tecnologías en el mercado colombiano, se propone la definición de los rangos del etiquetado con dos proyecciones temporales. Una propuesta adaptada desde el año 2024 considerando el mercado actual de las tecnologías y una propuesta a implementar 5 años después, en el 2029, contemplando los rangos actuales del reglamento de la Unión Europea, con el fin de incrementar el desempeño energético y visual de los productos en Colombia.

Por otro lado, se evidencia un rezago tecnológico de los productos LED comercializados en Colombia, lo anterior al contemplar que el 93 % de los productos disponibles en el país serían categorizados en F y G al aplicar la etiqueta vigente de la Unión Europea en Colombia y el 47 % de estos no cumplirían con el MEPS establecido en Europa.

Con relación a la definición del estándar mínimo de desempeño energético, teniendo en cuenta que más del 75 % de las referencias de iluminación LED de interior consultadas en el mercado colombiano reportan un valor de eficacia luminosa superior a 80 lm/W, se recomienda al Ministerio de Minas y Energía adoptar el MEPS para Colombia de 80 lm/W.

Por otro lado, se estima que al tener un escenario base de MEPS de 60 lm/W, incrementar este valor a 80 lm/W podría generar un ahorro acumulado en 10 años de 8140 GWh, además, se evitará la emisión de 3 millones de toneladas equivalentes de carbono.

Con respecto a las fuentes de espectro variable, en la etiqueta se recomienda reportar en la etiqueta un mismo punto de operación, el cual proponemos sea el 100 % del flujo luminoso y en la temperatura de color fría. Por otro lado, el MEPS establecido debe cumplirse para todos los puntos de temperatura de color de operación de las fuentes y al 100 % de emisión del flujo luminoso.

Después de una revisión literaria, únicamente se encontró una propuesta en la Unión Europea que integra el desempeño visual y el desempeño energético en la definición del MEPS [25] y una propuesta académica de integración de parámetros energéticos y visuales en el programa de etiquetado en Brasil [42, 43]. Lo anterior a pesar de que en el mundo existen 145 programas de MEPS y 185 programas de etiquetado para productos de iluminación [11].

La eficacia luminosa, el índice de reproducción de color (IRC), el índice de fidelidad (Rf), el índice de gamut (Rg), la eficacia melanópica de radiación luminosa (MELR), el factor de potencia (FP) y la distorsión armónica de corriente (ITHD) son los parámetros clave para la evaluación del desempeño energético, visual y circadiano de las tecnologías LED de iluminación interior. Estos parámetros proporcionaron un marco sólido para la medición y comparación de las diferentes tecnologías, lo que es esencial para el desarrollo de políticas de etiquetado y MEPS efectivas.

Los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas enfatizan la necesidad de considerar aspectos energéticos, visuales y circadianos en la formulación del programa de etiquetado y MEPS. La variabilidad en los parámetros de evaluación fue superior al 10 % para la mayor parte de los parámetros e incluso superior al 25 % para la ITHD y la MELR.

Por otro lado, en la muestra evaluada no se identificó una correlación fuerte entre los parámetros de evaluación del desempeño de la tecnología LED. Específicamente, se encontraron coeficientes de correlación inferiores a 0,4, únicamente se observó coeficientes de correlación superiores a 0,9 en la evaluación entre la temperatura de color y la MELR y el IRC y la MELR.

Se identificó una alta versatilidad en los productos de iluminación LED comerciales actuales en Colombia, los cuales permiten generar escenas de iluminación sin alterar significativamente los parámetros de desempeño energético y visual. Esto se logra variando el espectro de la fuente para generar cambios en la temperatura de color y atenuación en el flujo luminoso.

## 6.2. Recomendaciones

En esta investigación se realizó el análisis del desempeño energético, visual y circadiano de una muestra de productos de iluminación LED de interior del mercado colombiano, tanto de espectro fijo como de espectro variable. Sin embargo, se recomienda ampliar la muestra de evaluación para elaborar con mayor detalle el escenario base del país. La ampliación de la muestra permitirá obtener resultados más detallados de los productos comercializados en el país.

Por otro lado, con los resultados de la tesis el Ministerio de Minas y Energía puede complementar el Análisis de Impacto Normativo para identificar el impacto económico, ambiental, técnico y social de adoptar la propuesta de etiquetado y MEPS. Lo anterior, considerando el costo de las pruebas de laboratorio para evaluar todos los parámetros propuestos y, especialmente, identificar el incremento del costo marginal de los productos de espectro variable por la necesidad de medir al menos cinco puntos por equipo.

Se recomienda al Ministerio de Minas y Energía adoptar la metodología establecida por la Unión Europea en la definición de los MEPS, considerando la integración del desempeño visual dentro de la evaluación del desempeño energético y el efecto del flujo luminoso en la definición del MEPS.

Finalmente, se sugiere realizar una estrategia de divulgación sobre la importancia del desempeño visual y circadiano de los productos de iluminación LED entre los profesionales de iluminación y en general con los usuarios finales junto a la adopción de la propuesta de etiquetado de esta investigación. Lo anterior, considerando el impacto de la iluminación en el desarrollo de las tareas visuales y en el bienestar y confort de los seres humanos.

# Bibliografía

- [1] SICEX, “Sisduan,” 6 2022. [Online]. Available: <https://sicex.com/sisduan-plataforma-online-investigacion-mercados/>
- [2] A. V. de Carvalho, L. R. Sánchez, P. Méndez, S. Flamand, M. Couture-Roy, P. Langlois, and V. Dufresne, “Guía e: Programas de normalización y etiquetado de eficiencia energética,” *Guía E: Programas de normalización y etiquetado de eficiencia energética*, 2015.
- [3] A. G. Bispo-Jr, L. F. Saraiva, S. A. Lima, A. M. Pires, and M. R. Davolos, “Recent prospects on phosphor-converted leds for lighting, displays, phototherapy, and indoor farming,” *Journal of Luminescence*, vol. 237, p. 118167, 2021.
- [4] S. Corrente, S. Greco, and R. Słowiński, “Multiple criteria hierarchy process for electre tri methods,” *European Journal of Operational Research*, vol. 252, pp. 191–203, 7 2016.
- [5] M. de Minas y Energía, “Resolución 180919 de 2010,” 2010.
- [6] —, “Resolución 41286 de 2016,” p. 7, 2016.
- [7] —, “Resolución 40031 de 2021,” 2021.
- [8] —, “Resolución 40947 de 2016,” 2016.
- [9] —, “Resolución 40298 de 2018,” 2018.
- [10] —, “Resolución 40993 de 2018,” 2018.
- [11] CLASP, “Policy search,” 11 2022. [Online]. Available: <https://cpre-clasp.ngo/policies>
- [12] A. Ishizaka and P. Nemery, *Multi-Criteria Decision Analysis Methods and Software*, 1st ed., 2013.
- [13] E. Commission, “Commission delegated regulation (eu) 2019/2015,” 2019. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R2015from=en>
- [14] M. de Minas y Energía, “Documento borrador retilap,” 7 2023. [Online]. Available: <https://www.acdluminotecnia.com/documento-borrador-retilap/>

- [15] U. de Planeación Minero Energética, “Cálculo del factor de emisión de co2 del sin,” 6 2023. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/calculo-factor-de-emision-de-Co2-del-SIN.aspx>
- [16] M. de Minas y Energía and U. de Planeación Minero Energética, “Plan de acción indicativo prouere,” 2022.
- [17] C. de la República de Colombia, “Ley 697 de 2001,” *Diario Oficial*, vol. CXXXVII, pp. 5–8, 2001.
- [18] M. de Minas y Energía, “Resolución 181331 de 2009,” p. 246, 2009.
- [19] —, “Resolución 41010 de 2015,” p. 5, 2015.
- [20] C. de la República de Colombia, “Ley 1715 de 2014,” *Diario Oficial*, p. 104, 2014.
- [21] G. de Colombia, “Decreto número 1595 de 2015,” pp. 1–19, 2015.
- [22] M. de Minas y Energía and U. de Planeación Minero Energética, “Plan de acción indicativo - prouere 2022-2030,” vol. 1, pp. 1–115, 2021.
- [23] Lumina, “Lumina.com.co,” 4 2023. [Online]. Available: <https://lumina.com.co>
- [24] S. Wiel and J. E. McMahon, “Energy-efficiency labels and standards: A guidebook for appliances, equipment, and lighting,” 2005. [Online]. Available: <https://www.clasp.ngo/research/all/s-l-guidebook-english-version/>
- [25] E. Commission, “Commission delegated regulation (eu) 2019/2020,” 2019. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R2020from=ES>
- [26] T. Erdem and H. V. Demir, *Color Science and Photometry for Lighting with LEDs and Semiconductor Nanocrystals*. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019.
- [27] D. Cao, *Color Vision and Night Vision*, fifth edit ed. Elsevier Inc., 2012, vol. 1.
- [28] A. Peña and F. Salata, “Indoor lighting customization based on effective reflectance coefficients: A methodology to optimize visual performance and decrease consumption in educative workplaces,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, pp. 1–13, 2021.
- [29] I. E. S. IES, “Ansi/ies tm-30-20,” 2020.
- [30] I. C. on Illumination CIE, “Cie s 026/e:2018,” 2018.
- [31] M. S. Ram and R. Bhardwaj, “Effect of different illumination sources on reading and visual performance,” *Journal of Ophthalmic and Vision Research*, vol. 13, pp. 44–49, 1 2018.

- [32] I. Konstantzos, S. A. Sadeghi, M. Kim, J. Xiong, and A. Tzempelikos, “The effect of lighting environment on task performance in buildings – a review,” 11 2020.
- [33] G. Zissis, P. Bertoldi, and T. Serrenho, *Update on the Status of LED-Lighting world market since 2018, EUR 30500 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-27244-1, doi:10.2760/759859, JRC122760*, 2018.
- [34] Z. Guo, K. Liu, L. Zheng, T. M. Shih, Y. Lu, T. Wu, Y. Lin, Y. Zhang, J. Zheng, J. Chen, L. Chen, and Z. Chen, “Investigation on three-hump phosphor-coated white light-emitting diodes for healthy lighting by genetic algorithm,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, 2 2019.
- [35] Y. J. Saw, V. Kalavally, and C. P. Tan, “The spectral optimization of a commercializable multi-channel led panel with circadian impact,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 136 498–136 511, 2020.
- [36] Z. He, C. Zhang, H. Chen, Y. Dong, and S. T. Wu, “Perovskite downconverters for efficient, excellent color-rendering, and circadian solid-state lighting,” *Nanomaterials*, vol. 9, 2 2019.
- [37] J. Cerpentier and Y. Meuret, “Fundamental spectral boundaries of circadian tunability,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, 8 2021.
- [38] D. Durmus, “Multi-objective optimization trade-offs for color rendition, energy efficiency, and circadian metrics.” SPIE-Intl Soc Optical Eng, 3 2021, p. 52.
- [39] E. Thryantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, 1st ed., P. Pardalos and D. Hearn, Eds., 2000, vol. 44.
- [40] İhsan Kaya, M. Çolak, and F. Terzi, “A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making,” pp. 207–228, 4 2019.
- [41] L. P. Neves, A. G. Martins, C. H. Antunes, and L. C. Dias, “A multi-criteria decision approach to sorting actions for promoting energy efficiency,” *Energy Policy*, vol. 36, pp. 2351–2363, 7 2008.
- [42] A. Fragoso, G. Lima, L. Gavião, M. Fortes, G. Ney, and P. Antonio, “Evaluation of the energy performance in led lamps with integrated driver through multicriteria analysis,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, pp. 642–647, 2019.
- [43] L. B. Oliveira, J. F. Araujo, M. Z. Fortes, N. C. Bergiante, V. H. Ferreira, L. O. Gavião, and G. B. Lima, “Improvement light-emitting diode certification using multi-criteria decision-making method methods,” *Lighting Research and Technology*, pp. 1–16, 2021.

- [44] M. Doumpos, Y. Marinakis, M. Marinaki, and C. Zopounidis, “An evolutionary approach to construction of outranking models for multicriteria classification: The case of the electre tri method,” *European Journal of Operational Research*, vol. 199, pp. 496–505, 12 2009.
- [45] T. Pulli, T. Dönsberg, T. Poikonen, F. Manoocheri, P. Kärhä, and E. Ikonen, “Advantages of white led lamps and new detector technology in photometry,” *Light: Science and Applications*, vol. 4, 9 2015.
- [46] Z. Xia and Q. Liu, “Progress in discovery and structural design of color conversion phosphors for leds,” pp. 59–117, 12 2016.
- [47] Q. Zhou, L. Dolgov, A. M. Srivastava, L. Zhou, Z. Wang, J. Shi, M. D. Dramićanin, M. G. Brik, and M. Wu, “Mn<sup>2+</sup> and mn<sup>4+</sup> red phosphors: synthesis, luminescence and applications in wleds. a review,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 6, pp. 2652–2671, 2018.
- [48] P. M. Pattison, M. Hansen, and J. Y. Tsao, “Led lighting efficacy: Status and directions,” *Comptes Rendus Physique*, vol. 19, pp. 134–145, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013>
- [49] I. E. S. IES, “Ansi/ies lm-79-19,” 2019.
- [50] —, “Ansi/ies tm-38-21,” 2021.
- [51] J. L. Casamayor, D. Su, and Z. Ren, “Comparative life cycle assessment of led lighting products,” *Lighting Research and Technology*, vol. 50, pp. 801–826, 2018.
- [52] H. E. Dillon, C. Ross, and R. Dzombak, “Environmental and energy improvements of led lamps over time: A comparative life cycle assessment,” *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, vol. 16, pp. 229–237, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15502724.2018.1541748>
- [53] T. Vos, P. den Breeijen, and W. D. van Driel, “Quality and reliability in solid-state lighting: Qua vadis?” pp. 1–13, 2018.
- [54] A. Kumar, V. K. Kuppusamy, M. Holuszko, S. Song, and A. Loschiavo, “Led lamps waste in canada: Generation and characterization,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 146, pp. 329–336, 2019.
- [55] L. A. Cardenas, F. Herrera, and P. Acuña, “Evaluación de parámetros eléctricos, espectrales, lumínicos y melanópicos de fuentes de iluminación atenuables y con espectro variable,” 11 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/368894726>

- [56] A. Ishizaka, M. Tasiou, and L. Martínez, “Analytic hierarchy process-fuzzy sorting: An analytic hierarchy process-based method for fuzzy classification in sorting problems,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 71, pp. 928–947, 6 2020.
- [57] F. Li, K. K. Phoon, X. Du, and M. Zhang, “Improved ahp method and its application in risk identification,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 139, pp. 312–320, 3 2013.
- [58] L. A. Cárdenas, F. Herrera, O. Prias, and F. Amortegui, “Aplicación de la política de meps y etiquetado de la unión europea en productos de iluminación interior del mercado colombiano,” 11 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/368894735>
- [59] C. P. de Normas Técnicas, “Norma copant 1737:2021 eficiencia energética-para fuentes de iluminación de led-especificaciones y etiquetado,” 2021.
- [60] U. de Planeación Minero Energética, “Primer balance de energía Útil para colombia y cuantificación de las perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética resumen ejecutivo beu sector residencial y terciario,” pp. 17–19, 2019.
- [61] E. N. A. P. for Energy, “Understanding cost-effectiveness of energy efficiency programs : Best practices , technical methods , and emerging,” *Energy*, 2008.
- [62] E. Colombia, “Tarifas de energía,” 7 2023. [Online]. Available: <https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-distribucion.html>
- [63] Rankia, “Mejores cdt para 2023,” 7 2023. [Online]. Available: <https://www.rankia.co/blog/mejores-cdts/1866633-mejores-cdt>