

Evaluación del ciclo de vida y transición tecnológica de lámparas LFC en economía circular

Life cycle assessment and technological transition of CFL lamps in a circular economy framework

Marbelis Moreno^{1,*}, Luis Vergara²

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” (UNEXPO). Lara, Venezuela.

Artículo de Investigación

***Autor de correspondencia:** mmoreno@unexpo.edu.ve

Recibido: 15/06/2025

Recibido en forma revisada: 13/07/2025

Aceptado: 29/07/2025

Resumen

Esta investigación documental aborda la escasa disponibilidad de información técnica sobre los procesos y Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de lámparas fluorescentes compactas (LFC), pese al incremento de su desecho ante constantes transiciones tecnológicas en iluminación. El ACV considera fases como extracción, fabricación, transporte, uso, reciclaje y disposición final, evaluando emisiones y consumo energético. Esta investigación se centra en las fases de uso y disposición final, aplicando enfoques de economía circular para estimar la huella de carbono como indicador clave. Se reporta un total de 90 kg de CO₂-e emitidos, distribuidos en 83% durante el uso, 11% en la fabricación y 6% en la disposición final, reflejando el impacto dominante del uso prolongado.

Además, se destaca que el proceso de desecho requiere atención especial por sus implicaciones ambientales en energía, salud humana y emisiones atmosféricas. Se recomienda implementar tecnologías de eficiencia energética en la producción y operación de las LFC como parte de estrategias sostenibles.

Palabras clave: Análisis Ciclo de Vida, Transición Tecnológica, Lámpara Fluorescente Compacta, Economía Circular.

Abstract

This documentary research addresses the scarce availability of technical information on the processes and Life Cycle Assessment (LCA) of compact fluorescent lamps (CFLs), despite the increase in their disposal in the face of constant technological transitions in lighting. LCA considers phases such as

Marbelis Moreno. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7290-5468>. Ing. Electricista. Especialista en Mantenimiento Industrial. Jefe de Ingeniería Eléctrica UNEXPO.

Luis Vergara. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9061-7116>. Postdoctorado Gerencia. Doctor en Gerencia. Doctor en Ciencias de la Ingeniería mención Productividad. Docente adscrito a la Dirección de Investigación y Postgrado de la UNEXPO.

extraction, manufacture, transport, use, recycling and final disposal, evaluating emissions and energy consumption. This research focuses on the phases of use and final disposal, applying circular economy approaches to estimate the carbon footprint as a key indicator. A total of 90 kg of CO₂-e emitted is reported, distributed in 83% during use, 11% in manufacturing and 6% in final disposal, reflecting the dominant impact of prolonged use. In addition, it is highlighted that the waste process requires special attention due to its environmental implications on energy, human health and atmospheric emissions. It is recommended to implement energy efficiency technologies in the production and operation of CFLs as part of sustainable strategies.

Keywords: Life Cycle Analysis, Technological Transition, Compact Fluorescent Lamp, Circular Economy.

1. Introducción

La evolución de la luz ha acompañado el desarrollo humano, desde la supervivencia básica hasta los sistemas tecnológicos actuales. Su presencia, natural o artificial, ha impulsado transformaciones culturales, sociales y económicas, reflejando la creatividad y resiliencia de las civilizaciones. Desde el fuego hasta la tecnología LED, cada transición ha traído avances significativos y

nuevos desafíos ambientales (Sectorial, 2023). La migración de lámparas incandescentes a LFC y luego a LED ha generado altos volúmenes de residuos y vulnerabilidades ambientales, debido al uso de materiales peligrosos y la falta de sistemas adecuados de recuperación. Ante ello, se plantea la aplicación de enfoques integrales como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y los principios de Economía Circular para rediseñar procesos de recuperación y reparación de LFC.

Este artículo articula dichos enfoques mediante el desarrollo de un protocolo técnico basado en un nomograma fractal multivariable, orientado a mejorar la seguridad, eficiencia y sustentabilidad en la gestión de estos residuos. La gestión responsable de tecnologías en transición exige comprender sus impactos técnicos y ambientales, así como sus implicaciones culturales y socioeconómicas, especialmente en contextos donde la reparación y reutilización expresan resiliencia comunitaria.

2. Metodología

La investigación emplea un enfoque mixto, integrando métodos cualitativos y cuantitativos para analizar la transición tecnológica y recuperación de lámparas fluorescentes compactas (LFC) desde la

perspectiva de la economía circular. Se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre Análisis de Ciclo de Vida, obsolescencia programada y sostenibilidad en sistemas de iluminación. Además, se aplicaron entrevistas semiestructuradas a expertos en gestión ambiental, eficiencia energética y reparabilidad, complementadas con la experiencia técnica del autor en áreas como seguridad ocupacional y sustentabilidad energética. El estudio se enmarca en la transcomplejidad, permitiendo un abordaje holístico que integra variables técnicas, ambientales, económicas y culturales. La triangulación de fuentes garantizó la validez y fiabilidad del proceso investigativo.

3. Fundamentos teóricos

ACV del Proceso de fabricación de Lámparas LFC

El análisis del ciclo de vida (ACV) de una lámpara fluorescente compacta (LFC) comienza en su fabricación, integrando tubo con vapor de mercurio y argón, balasto electrónico, cebador, tarjeta de circuito impreso y casquillo E27 (ACV, 2023). Este diseño compacto permite instalación directa en luminarias residenciales o comerciales, garantizando eficiencia lumínica, larga vida útil y compatibilidad con sistemas convencionales.

La metodología “de la cuna a la tumba” permite evaluar impactos ambientales, energéticos y logísticos en cada etapa del producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (Baumann y Tillman, 2004). Se consideran emisiones, consumo energético, transporte y desempeño en uso, permitiendo comparar tecnologías equivalentes. La modelización del ciclo de vida estima las cargas ecológicas asociadas a materiales y procesos, destacando el consumo energético como principal vector de impacto (Enríquez, 2012)

Las LFC (40W) consumen hasta un 70 % menos energía que lámparas incandescentes de 150W, reduciendo significativamente la huella de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a la generación eléctrica (Osram, 2024). Esta eficiencia energética no solo optimiza el desempeño técnico, sino que también posiciona a las LFC como alternativas estratégicas en políticas de transición energética y mitigación climática.

No obstante, la huella de carbono no puede ser el único parámetro de evaluación. Para obtener una visión integral del impacto ambiental, deben considerarse indicadores complementarios como potencial de acidificación, eutrofización y ecotoxicidad, conforme a los criterios establecidos por The

Circular Campus (2023) y Sangwan *et al.* (2014).

Diversos estudios recientes han profundizado en el impacto ambiental de las lámparas fluorescentes compactas, destacando que la fase de uso sigue siendo la más crítica en términos de consumo energético y emisiones de CO₂. Por ejemplo, el análisis de LEDVANCE (2024) revela que, aunque la fabricación de una LFC implica materiales como vidrio, plásticos y componentes electrónicos, el mayor impacto ambiental proviene del uso prolongado, especialmente en regiones con matrices

eléctricas dependientes del carbón. Asimismo, investigaciones de Elijosiutė *et al.* (2012) concluyen que, en comparación con lámparas incandescentes, las LFC presentan ventajas significativas en eficiencia energética y menor impacto en categorías como eutrofización, acidificación y toxicidad humana.

Estos hallazgos refuerzan la pertinencia del ACV como herramienta para orientar decisiones tecnológicas y regulatorias en el marco de la economía circular. Al respecto se presenta la Tabla 1.

Tabla 1. Indicadores Ambientales relevantes.

Indicador	Descripción Técnica	Aplicación al Contexto de LFC
Huella de Carbono (PCG)	Emisiones de gases de efecto invernadero durante todo el ciclo de vida (kg CO ₂ eq.).	Clave por el consumo energético en fabricación, uso y disposición final.
Toxicidad Humana (PTH)	Riesgo de sustancias peligrosas para la salud humana (CTU).	El mercurio en las LFC representa un riesgo crítico, especialmente en la etapa de desecho.
Agotamiento de Recursos Abióticos (PARA)	Uso de materiales no renovables como minerales y metales (kg Sb eq. o MJ).	Involucra materiales críticos en componentes electrónicos y vidrio.
Generación de Residuos	Cantidad y tipo de residuos generados en cada etapa del ciclo de vida.	Requiere gestión especializada por el contenido tóxico de lámparas no tratadas.

4. Resultados y discusión

El presente estudio realizó un análisis comparativo entre tecnologías de iluminación, centrado en lámparas incandescentes (LI) y lámparas fluorescentes

compactas (LFC), seleccionando modelos residenciales con características lumínicas similares (800–1270 lúmenes, 2700 K, CRI ≥ 80, rosca E27). Se evaluaron aspectos técnicos, materiales, electrónica interna y

procesos industriales, incluyendo ensamblaje, sellado y regulación luminosa, así como el cumplimiento de normas de seguridad y eficiencia (UNEP, 2010).

Esta comparación permitió identificar diferencias sustanciales en cuanto a consumo energético, vida útil y composición de materiales, especialmente en lo relativo al contenido de mercurio y la complejidad del balasto electrónico Esbrí *et al.* (2021). Además, se evidenció que las LFC requieren procesos de reciclaje más especializados debido a la presencia de componentes peligrosos, lo que condiciona su gestión al final de vida.

La variabilidad en la eficiencia de conversión lumínica también influye en el

rendimiento ambiental global, dependiendo del contexto de uso y la infraestructura eléctrica disponible.

Estudios recientes destacan que la transición hacia tecnologías más eficientes debe contemplar no solo el ahorro energético, sino también la reducción de residuos tóxicos y la mejora en la reciclabilidad de componentes (*International Energy Agency* [IEA], 2023).

Estas consideraciones permiten contextualizar la selección de tecnologías en función de sus implicaciones ambientales, sociales y económicas, fortaleciendo el enfoque Transcomplejo del presente estudio. Las características técnicas y demás detalles se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Fuentes de luz seleccionadas para el estudio.

Característica	Incandescente (Philips CLASSICA)	LFC (Philips Tornado Spiral)
Potencia nominal	100 W	20 W
Tensión nominal	220–240 V	220–240 V
Eficacia luminosa	11 lm/W	50 lm/W
Flujo luminoso	1100 lm	1000 lm
Vida útil estimada	1000 h	10000 h
Temperatura de color	2700 K	2700 K
Tiempo de encendido	0,0 s	1,5 s
Índice de reproducción cromática (Ra)	100	82
Dimensiones (Ø x L)	55 mm × 94 mm	61 mm × 127 mm
Ampolla exterior	A55	—
Contenido de mercurio	0,0 mg	1,5–2,0 mg
Libre de mercurio	Sí	No
Casquillo	E27	E27

Tabla 2 (continuación)

Característica	Incandescente (Philips CLASSICA)	LFC (Philips Tornado Spiral)
Etiqueta energética (EEI)	E	A
Observación	Retirada desde 01/09/2010 (UE)	—

En la fase de manufactura, se estimó el consumo energético por unidad funcional (MJ/10 millones de lúmenes-hora). Los resultados muestran que la fabricación de una lámpara LFC requiere 152 MJ, mientras que una lámpara incandescente consume 48 MJ. Esta diferencia se atribuye principalmente al uso de materiales más complejos y al mayor peso de las LFC (UNEP, 2010).

Esta carga material adicional incide directamente en los costos logísticos y en la huella ecológica del transporte. Asimismo, condiciona los procesos de recuperación y valorización, especialmente en sistemas con infraestructura limitada. Los resultados se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Energía consumida en fase de manufactura por las fuentes de luz.

Fase de manufactura	
Tipo de Lámpara	Energía consumida en fase de manufactura (MJ/10 millones de lúmenes-hora)
LI	48
LFC	152

Durante la fase de uso, se calculó la energía empleada por cada tipo de lámpara en función de su potencia, flujo luminoso y vida útil. Las bombillas incandescentes, con

menor eficiencia energética, presentan un consumo significativamente superior al de las LFC tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Energía empleada en la fase de uso.

Fuente de luz	Watts	Lúmenes	Tiempo de vida	Energía usada en fase de uso (MJ/ 10 millones lumen-hrs)
LI	100	1100	1000	16052
LFC	20	1000	10000	3528

Respecto a la fase de desecho, se identificó un incremento en la presencia de mercurio en las LFC, con valores entre 1,5 y 2,0 mg por unidad (UNEP, 2010). Si se desecharan 10 millones de lámparas

anualmente sin tratamiento adecuado, podrían liberarse hasta 50 kg de mercurio al ambiente (AMBILAMP, 2019). En la Figura 1 se ilustra esta situación.

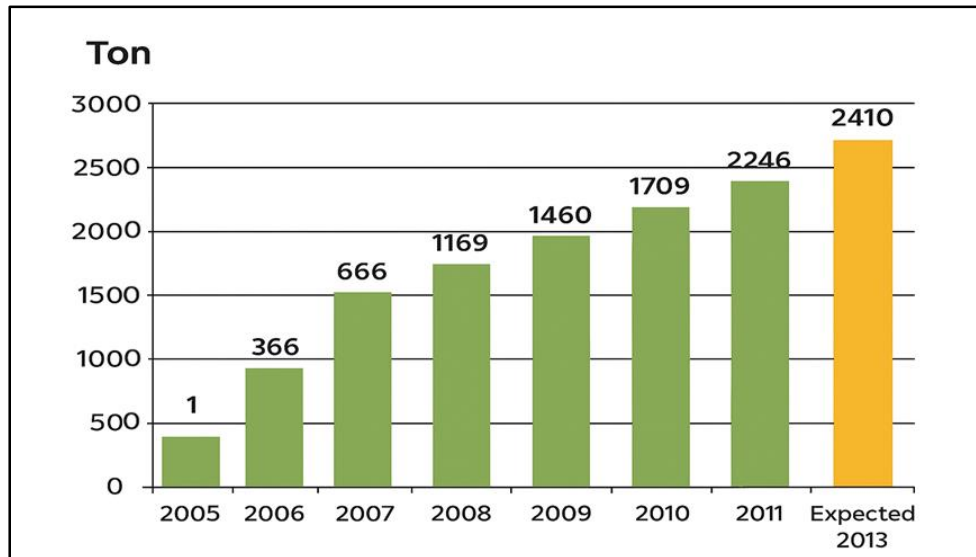


Figura 1. Toneladas de lámparas recogidas y tratadas por AMBILAMP

Fuente: AMBILAMP (2019).

La estimación de la huella de carbono permite visualizar la distribución de emisiones: el 83% proviene del uso, el 11% de la fabricación y el 6% de la disposición final (UNEP, 2010). El cálculo aproximado

para una LFC indica 75 kg CO₂e por uso, 10 kg CO₂e por fabricación y 5 kg CO₂e por disposición final, totalizando 90 kg CO₂e. En la Tabla 5, se presentan los factores de emisión y Huella de Carbono.

Tabla 5. Presentación Factores de Emisión y Huella de Carbono por LFC

Detalle	Uso	Factor de emisión	HC (kg CO ₂ e)
Emisiones por uso	15 W 10.000 h (v.u.)	0,5 kg CO ₂ /kWh	75 kg CO ₂ e
Emisiones por fabricación	0	ND	10 kg CO ₂ e
Emisiones por disposición final	0	ND	5 kg CO ₂ e
Huella de Carbono			90 kg CO ₂ e

Estos resultados evidencian que la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al ciclo de vida de las lámparas proviene de su fase de uso. Esto subraya la importancia de promover tecnologías con mayor eficiencia energética y de considerar la matriz eléctrica utilizada en cada región (AMBILAMP, 2019). La diferencia en consumo energético entre lámparas incandescentes y LFC justifica las políticas de sustitución tecnológica implementadas en diversos países, orientadas a reducir el uso de dispositivos ineficientes (UNEP, 2010).

La manufactura incide en la huella de carbono, especialmente en LFC por sus

materiales y procesos industriales. Su disposición final es crítica por el mercurio, cuyo manejo deficiente genera impactos ambientales, como evidencian datos de España (AMBILAMP, 2019).

En América Latina, la falta de infraestructura agrava el problema, predominando prácticas informales (UNEP, 2010). Se elaboró una matriz comparativa entre LFC, LED y tecnologías emergentes, considerando potencia nominal, CRI, mercurio y vida útil (AMBILAMP, 2019; UNEP, 2010). LED y emergentes destacan por su eficiencia y menor toxicidad. Esta información se muestra en la Tabla 6

Tabla 6. Matriz comparativa de tecnologías de iluminación.

Tecnología	Vatios (W)	CRI Aproximado	Mercurio (mg)	Vida Útil (Horas)	Observaciones Técnicas
LFC	5–25	75–86	1,4–5,0	6.000–15.000	CRI medio, toxicidad relativa, eficiencia moderada
LED	3–20	80–95	0	15.000–50.000	Alta eficiencia, sin materiales tóxicos
Tecnologías nuevas	≤10	90–98	0	30.000–100.000+	Alto rendimiento potencial, no estandarizadas

El análisis se complementó con un Nomograma Fractal Multivariable que identifica una zona de convergencia tecnológica entre LFC y LED, donde ambas

comparten prestaciones equivalentes en potencia, CRI y vida útil (Moreno, 2025). Esta zona se puede visualizar en la Figura 2.

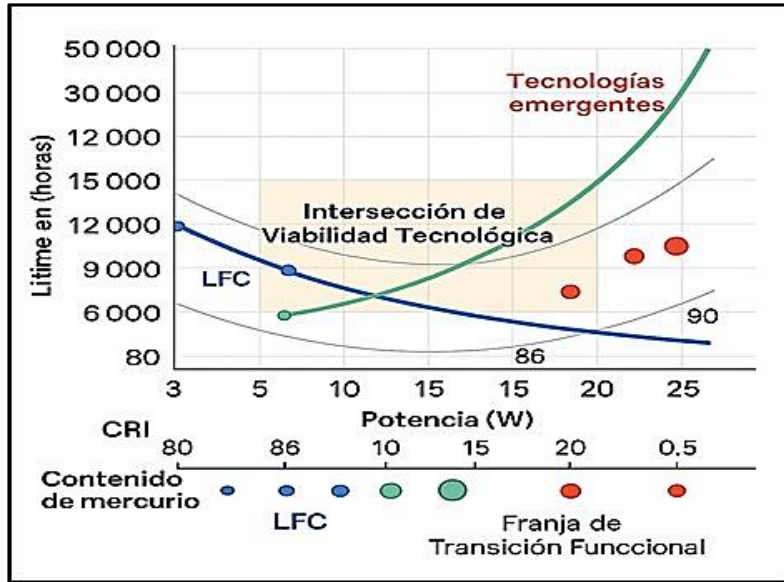


Figura 2. Nomograma Fractal Multivariable con Zona de Convergencia Tecnológica

Desde una perspectiva gerencial, la cuantificación de la huella de carbono se consolida como instrumento estratégico para la formulación de políticas públicas. El reciclaje de LFC, en el marco de la economía circular, contribuye a la mitigación de emisiones y a la valorización de materiales recuperables (UNEP, 2010); U.S. Environmental Protection Agency (EPA, 2025). La integración de herramientas como el Nomograma Fractal permite trascender el

reemplazo operativo e impulsar una transformación sistémica alineada con los principios de sostenibilidad, gerencia fractal y transcomplejidad (Moreno, 2025). La migración de LFC a LED y tecnologías emergentes ofrece beneficios concretos, ya que esta transición reduce significativamente el consumo energético y elimina el uso de mercurio, mejorando el perfil ambiental del sistema de iluminación. Ver Tabla 7.

Tabla 7. Implicaciones en la Huella de Carbono

Parámetro	LFC	LED	Impacto en Huella de Carbono
Potencia Nominal (W)	5–25 W	3–20 W	Emisiones indirectas
Mercurio	1,4–5,0 mg	0,0 mg	Contaminación tóxica
Vida Útil (Horas)	6.000–15.000	15.000–50.000	Residuos y reemplazos
Eficiencia Energética	Moderada	Alta	Consumo energético

5. Conclusiones y recomendaciones

La evaluación integral del ciclo de vida de las lámparas fluorescentes compactas (LFC) evidencia que su fase de uso representa el mayor impacto ambiental, concentrando el 83% de las emisiones de CO₂-e. Sin embargo, la presencia de mercurio y otros materiales tóxicos en la etapa de disposición final plantea riesgos críticos que no pueden ser ignorados. Esta dualidad de alta eficiencia energética pero elevada toxicidad residual exige una reconfiguración urgente de los modelos de producción, operación y reciclaje.

Se recomienda implementar protocolos de ecoeficiencia en la fabricación, promover esquemas de reciclaje bajo principios de economía circular, y adoptar herramientas multivariantes para la planificación institucional. Esta investigación aporta una base metodológica para rediseñar la gestión de tecnologías en transición, integrando sostenibilidad, seguridad ecológica y resiliencia operativa en un marco de gerencia fractal.

Referencias

AMBILAMP. (2019). AMBILAMP recoge 8.843 tm de residuos para su reciclaje en 2019, un 72,5% más que en 2018. <https://ambilamp.es/prensa/ambilamp-recoge-8-843-tm-de-residuos-para->

[su-reciclaje-en-2019-un-725-mas-que-en-2018](#)

Baumann, H., y Tillman, A. (2004). The hitch hiker's guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application. Studentlitteratur. <https://www.nhbs.com/the-hitch-hikers-guide-to-lca-book>

Elijosiutė, E., Balciukevičiūtė, J., y Denafas, G. (2012). Life Cycle Assessment of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps: Comparative Analysis. *Environmental Research, Engineering and Management*, 61(3). <https://erem.ktu.lt/index.php/erem/article/view/2425>

Enríquez, A. (2012). Estudio del impacto ambiental de fuentes de luz durante su producción, tiempo de vida y desecho [Trabajo de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2117/94730>

Esbrí, J. M., Rivera, S., Tejero, J., & León Higuera, P. (2021). Feasibility study of fluorescent lamp waste recycling by thermal desorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 61860–61868. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16800-3>

- Hoyos, M. (2023). Comparación del ciclo de vida entre lámparas LED y fluorescentes: Caso de estudio, Aula Edificio Segarra *ETSAB* Trabajo final de máster, ETSAB - Universidad Politécnica de Cataluña. <https://upcommons.upc.edu/entities/publication/6050cb14-6d1e-493a-b256-ea9a04d83e3d>
- International Energy Agency. (2023). Lighting the way: Sustainable transitions in residential illumination. IEA. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/lighting>
- LEDVANCE. (2024). Life cycle analysis of a LEDVANCE compact fluorescent lamp. <https://www.ledvance.com/en-int/company/sustainability/product-sustainability/lca-pep/lca-of-a-compact-fluorescent-lamp>
- Osram Group (2024). Product Lifecycle OSRAM Group. <https://www.osram.com/cb/products/product-lifecycle.jsp>
- Sangwan, K., Mallick, A., y Sellappan, R. (2014). Life cycle assessment of compact fluorescent lamp. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(6), 1687–1696.
- <https://core.ac.uk/download/pdf/82207343.pdf>
- Sectorial (2023). El viaje de la luz: Historia y evolución de la Iluminación Humana. Sectorial.co. Artículo en Línea. <https://sectorial.co/articulos-especiales/el-viaje-de-la-luz/>
- TheCircularCampus. (2023). *Análisis de ciclo de vida de un producto*. <https://www.Ecoembesthecircularcampus.com/cuales-son-las-fases-del-analisis-de-ciclo-de-vida-de-un-producto/>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2025). Recycling and disposal of CFLs and other bulbs that contain mercury. <https://www.epa.gov/mercury/recycling-and-disposal-cfls-and-other-bulbs-contain-mercury>
- UNEP. (2010). Regional Report on the transition to energy efficient lighting in Latin America and the Caribbean. <https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2016/09/Regional-Report-LA-C-Final-Eng.pdf>