

Análisis comparativo de modelos de economía circular con aplicación a la industria del aluminio en Mozambique

Comparative analysis of circular economy models with application to the aluminum industry in Mozambique

Katia Fernanda de Simões Mendes katiamentes2025@gmail.com ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0009-0009-6800-2575>

Alfredo Patrício Januário edsonpatricio20@gmail.com ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0009-0000-1285-2671>

Esneider Rodríguez Suarez erodriguezsuarez2013@gmail.com ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0000-0001-8615-3259>

⁽¹⁾Wutivi-UniTiva University, Boane, Maputo, Mozambique

Resumen: La industria del aluminio en Mozambique produce cantidades significativas de residuos industriales. Estudios recientes demuestran que hasta el 87,96 % de estos residuos está compuesto por aluminio recuperable y otros metales valiosos. Sin embargo, la ausencia de principios de economía circular da lugar a una subutilización de estos recursos, lo que supone importantes retos medioambientales y económicos. Este trabajo presenta un análisis comparativo de tres modelos internacionales de Economía circular -los de la Fundación Ellen MacArthur, China y Alemania- y evalúa su aplicabilidad al sector del aluminio en Mozambique. A partir de datos cualitativos procedentes de entrevistas institucionales y fuentes secundarias, el análisis identifica las principales lagunas en materia de políticas, tecnología e incentivos económicos. Los resultados demuestran que un enfoque híbrido, que combine marcos normativos con soluciones orientadas al mercado, podría ofrecer una vía viable para Mozambique. El estudio concluye con recomendaciones para una implementación por fases, comenzando con reformas legales e iniciativas de recuperación a pequeña escala, que conduzcan a un sistema nacional integral de economía circular.

Palabras clave: residuos no degradables, tratamiento de residuos, tratamiento de metal

Abstract: The aluminum industry in Mozambique generates substantial industrial waste, with recent studies revealing that up to 87.96% of this waste consists of recoverable aluminum and other valuable metals. However, the absence of circular economy practices results in the underutilization of these resources, posing significant environmental and economic challenges. This study presents a comparative analysis of three international circular economy models -those of the Ellen MacArthur Foundation, China, and Germany- evaluating their applicability to the aluminum sector in Mozambique. Using qualitative data from institutional interviews and secondary sources, the analysis identifies key gaps in policy, technology, and economic incentives. The findings suggest that a hybrid approach, combining regulatory frameworks with market-driven solutions, could offer a viable pathway for Mozambique. The study concludes with recommendations for phased implementation, starting with legal reforms and small-scale recovery initiatives, leading to a comprehensive national circular economy system.

Keywords: non degradable waste, waste treatment, metal treatment

Introducción

La industria del aluminio desempeña un papel fundamental en las economías modernas debido a su ligereza, resistencia a la corrosión y alta reciclabilidad (Moustafa *et al.*, 2023; Ferreira da Rosa *et al.*, 2024; Holzschuh *et al.*, 2024; Espindola-Díaz, 2025). En Mozambique, las actividades industriales relacionadas con la producción de aluminio, en particular el procesamiento y la fundición de bauxita, generan cantidades significativas de residuos industriales. De forma alarmante, análisis recientes muestran que estos residuos contienen hasta un 87,96 % de aluminio, junto con otros elementos metálicos valiosos. A pesar de ello, estos subproductos se subutilizan, lo que plantea desafíos ambientales y económicos.

El concepto de economía circular (EC) se ha popularizado en los últimos años como modelo que vincula el medio ambiente y la economía. El término "economía circular" fue utilizado por primera vez por Pearce y Turner en 1990, pero el concepto en sí fue descrito mucho antes, en 1966, por Kenneth Boulding en el ensayo "The Economics of an Approaching Spacecraft Earth" (Heshmati, 2015). Desde entonces, se han desarrollado numerosas definiciones de EC y se han escrito numerosos artículos (Jaki y Siuta-Tokarska, 2019; Figge, Thorpe y Gutberlet, 2023; Vogiantzi y Tserpes, 2023; Alivojvodic y Kokalj, 2024; Yoatian, Han y Shankar, 2025).

Principios y beneficios del modelo de economía circular

Durante mucho tiempo, la economía tradicional ha sido lineal, donde se han utilizado materias primas para fabricar productos y, posteriormente, se desechaban todos los residuos. Este era un proceso lineal, optimizado para un alto volumen y bajos costos de producción en condiciones de amplia disponibilidad de recursos y materiales a bajo costo.

Recientemente, ha habido un cambio hacia una economía circular, donde los materiales se reutilizan, y si se necesitan nuevos materiales, deben obtenerse de manera sostenible para no dañar el medio ambiente (Guerrero *et al.*, 2024; Barra Novoa, 2025). Por lo tanto, el objetivo de una economía circular es garantizar un bajo impacto ambiental minimizando el uso de residuos y recursos mediante la reutilización, la refabricación, el reciclaje, la reducción de residuos, etc. (Stahel, 2016; Czikkely *et al.*, 2019).

Se puede afirmar entonces que el concepto de economía circular es crucialmente diferente de un concepto lineal tradicional. En general, una economía circular fomenta la reutilización y extiende la vida útil a través de la reparación. Según la Comisión Europea, "en una economía circular, el valor de los productos y materiales se mantiene durante el mayor tiempo posible. Se minimizan los residuos y el uso de recursos. "Refabrica, actualiza, moderniza y convierte los productos viejos en recursos como nuevos reciclando los materiales" (Stahel, 2016).

Este estudio realiza un análisis comparativo de los modelos de economía circular (EC) y evalúa su aplicabilidad y eficacia para abordar los desafíos asociados con los residuos de aluminio en Mozambique. A través de esto, se proponen intervenciones estratégicas que se alinean con el desarrollo industrial sostenible y la gestión ambiental.

Materiales y métodos

Esta investigación empleó un diseño cualitativo y comparativo, combinando la metodología de estudio de caso con la revisión bibliográfica y entrevistas a expertos. El sector del aluminio de Mozambique se analizó en comparación con los modelos internacionales de EC aplicados en países como Alemania, China y Canadá.

Recopilación de datos

- Datos primarios: recopilados a través de entrevistas semiestructuradas con profesionales de Mozal (Mozambique Aluminium), el Ministerio de Medio Ambiente e investigadores académicos.
- Datos secundarios: obtenidos de informes gubernamentales, artículos académicos y documentación técnica sobre estrategias de EC y tecnologías de reciclaje de residuos de aluminio.

Marco analítico

Se seleccionaron tres modelos de economía circular para comparación:

- El modelo de la Fundación Ellen MacArthur (Reino Unido) (2015)
- Ley de Promoción de la Economía Circular de China (2009)
- Ley de Gestión de Residuos y Ciclo Cerrado de Sustancias de Alemania

Los criterios de evaluación incluyeron:

- a) Eficiencia en la recuperación de recursos
- b) Apoyo de políticas
- c) Adaptación tecnológica
- d) Viabilidad económica
- e) Mitigación del impacto ambiental

Resultados y discusión

Perfil de residuos de aluminio en Mozambique

Los residuos generados por la fundición de aluminio presentan un alto contenido de aluminio (87,96 %), pero se eliminan sin extracción ni reutilización. La falta de aplicación de políticas, infraestructura tecnológica e incentivos financieros limita las prácticas de EC. La Tabla 1 muestra una comparación de diferentes modelos de economía circular a nivel mundial.

Tabla 1. Comparación de modelos de economía circular

Criterio	Modelo Ellen MacArthur	Modelo CE de China	Modelo de Alemania	Mozambique
Eficiencia de recursos	Alta	Moderada	Alta	Baja

Marco de política	Fuerte, impulsado por las empresas	Centralizado de arriba hacia abajo	Regulatorio y basado en incentivos	Aplicación débil
Uso de tecnología	Reciclaje avanzado	Tecnología emergent	Tecnología madura	Limitada
Retorno economic	Alto	Moderado	Alto	Insignificante
Impacto ambiental	Fuerte reducción	Controlado	Altos estándares	Mal gestionado

Cuadro de composición de residuos

La figura 1 muestra el porcentaje de residuos industriales de aluminio en Mozambique en comparación con otros metales.

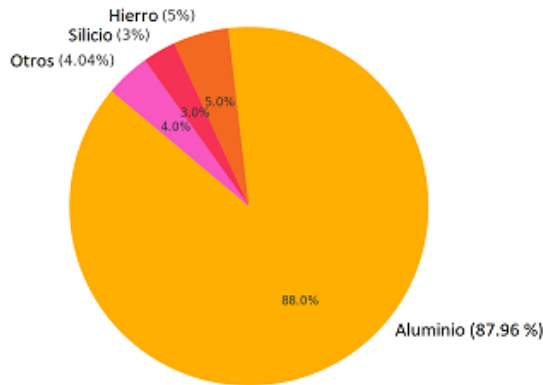


Figure 1. Composition of aluminum idustril waste in Mozambique.

Figura 1. Composición de los residuos industriales de aluminio en Mozambique.

Brechas y oportunidades para Mozambique

- Adopción de soluciones tecnológicas para el procesamiento de residuos, como la recuperación hidrometalúrgica.
- Creación de marcos legales e incentivos para el reciclaje de aluminio.
- Integración de las PYME locales y el sector informal en las cadenas de recuperación de recursos.
- Asociaciones público-privadas (APP) para facilitar la inversión en tecnologías de EC.

Generalmente, el proceso de reciclaje implica diferentes pasos. El proceso generalmente comienza con un pretratamiento (desmantelamiento, reducción de tamaño y separación física), mediante el cual los metales no ferrosos se separan de los demás componentes (Rai *et al.*, 2021). El desmantelamiento, la reducción de tamaño y la separación física son enfoques consolidados y pueden modificarse en función de los pasos sucesivos a realizar (Gautam *et al.*, 2022).

Sin embargo, la formación de polvo fino, así como el alto consumo de energía en la etapa de trituración, se encuentran entre los obstáculos de este proceso (Kumari y Samadde, 2022). A pesar de que el pretratamiento se utiliza ampliamente a escala industrial, algunos autores han propuesto la posibilidad de tratar la placa de circuito impreso tal como se obtiene después del desmantelamiento (Chen *et al.*, 2021). Este enfoque puede reducir los costos del pretratamiento, pero puede afectar negativamente la eficiencia de la disolución, debido a los fenómenos de difusión que ocurren en el sistema durante los pasos sucesivos.

Tras el pretratamiento, las técnicas habituales para la recuperación eficaz de metales son las vías pirometalúrgicas, hidrometalúrgicas y biohidrometalúrgicas. El enfoque pirometalúrgico puede considerarse la técnica más consolidada para la recuperación de metales, cuya principal ventaja reside en la posibilidad de minimizar el pretratamiento mecánico de los residuos sólidos. La separación de los metales deseados de los residuos de los aparatos eléctrico (RAEE) se realiza mediante el uso de altas temperaturas. En concreto, los residuos se someten a incineración, sinterización y fusión a altas temperaturas, siendo los hornos de fundición o los procesos de plasma los más utilizados (Krishnan *et al.*, 2021).

Entre las desventajas, destacan el alto requerimiento energético y los costos, la baja selectividad y la emisión de gases peligrosos, lo que resalta la necesidad de desarrollar diferentes soluciones (Sethurajan *et al.*, 2019).

La hidrometalurgia es la segunda técnica más reportada para la recuperación de metales, e incluye diferentes etapas como la lixiviación, la purificación y la recuperación. El proceso se lleva a cabo en solución acuosa, con ventajas como menores costos e impacto ambiental en comparación con los procesos pirometalúrgicos, así como un buen control de impurezas. La etapa de lixiviación se realiza típicamente en presencia de ácidos fuertes (H_2SO_4 , HNO_3 , HCl).

A pesar de las mejores características de la pirometalurgia, estos procesos presentan baja selectividad para los metales valiosos (metales preciosos) y generan grandes cantidades de aguas residuales y emisiones de cloro gaseoso (Islam *et al.*, 2021).

Recientemente, ha aumentado el interés en las vías biohidrometalúrgicas como una posible alternativa para la disolución de metales de los residuos electrónicos, debido a su

rentabilidad y respeto al medio ambiente (Magoda *et al.*, 2021). Con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, este mecanismo permite la recuperación selectiva de algunos metales de los RAEE mediante el uso de bacterias capaces de secretar ácidos, ligandos y lixiviantes para su solubilización. Sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en fase piloto, y varios investigadores se dedican actualmente a (I) la posibilidad de utilizar bacterias con alta resistencia a diferentes entornos y (II) la optimización de los factores que afectan la eficiencia de la lixiviación (Desmarais *et al.*, 2020).

La intensificación de procesos en la recuperación de metales ha cobrado gran importancia debido a la posibilidad de aumentar la rentabilidad. Gracias a la intensificación de procesos, las plantas de proceso son más pequeñas, se reduce el impacto ambiental y el consumo energético, y se superan desventajas de las tecnologías existentes. Algunos autores han propuesto la combinación de extracción y desorción (una sola etapa) en el proceso de membrana de emulsión líquida como una intensificación de procesos para la extracción de Ru, evitando así la etapa de desorción comúnmente adoptada en estos procesos (Kankekar *et al.*, 2010).

Comparación de los modelos de economía circular

El modelo de Ellen MacArthur enfatiza el pensamiento sistémico, donde las empresas rediseñan sus operaciones para eliminar por completo el desperdicio. Este enfoque es altamente aplicable a economías industriales avanzadas con capacidad de innovación y acceso al capital. Mozambique actualmente carece de la infraestructura para adoptar plenamente este modelo, pero puede implementar sus principios gradualmente mediante programas piloto y alianzas.

El modelo de China se caracteriza por una implementación vertical, respaldada por la legislación nacional y una estricta supervisión. Este enfoque puede ser relevante para Mozambique considerando su estructura de gobernanza centralizada. Sin embargo, los desafíos incluyen la inercia burocrática y la limitada capacidad institucional para implementar políticas.

El modelo de Alemania integra tanto mandatos regulatorios como incentivos basados en el mercado, lo que genera un alto nivel de cumplimiento normativo e innovación. Este enfoque híbrido es quizás el más adaptable para Mozambique a largo plazo, ya que combina la intervención gubernamental con iniciativas impulsadas por la industria. No

obstante, su adopción exitosa dependerá del desarrollo de capacidades, la adaptación local de tecnologías y el desarrollo de mecanismos de monitoreo.

El contexto de Mozambique refleja un sistema fragmentado y poco regulado, con una mínima integración de los principios de la EC. Es necesaria una estrategia gradual que combine la reforma de políticas, la inversión en infraestructura y la participación de las partes interesadas. Según los modelos globales, Mozambique debería priorizar:

-Corto plazo: Establecer marcos regulatorios y campañas de concientización.

-Mediano plazo: Implementar iniciativas piloto de EC localizadas en colaboración con el sector privado.

-Largo plazo: Escalar los modelos exitosos y construir sistemas nacionales de EC en toda la cadena de valor.

Conclusiones

La industria del aluminio de Mozambique posee un importante potencial sin explotar para la integración de la economía circular, principalmente debido al alto contenido de aluminio en sus residuos industriales. Un análisis comparativo revela que el éxito de la implementación de la EC depende de una combinación de políticas sólidas, preparación tecnológica e incentivos económicos.

Para lograr un desarrollo industrial sostenible, Mozambique debe:

- Desarrollar legislación y políticas nacionales de EC.
- Invertir en tecnología para la recuperación de metales.
- Fomentar la colaboración entre el gobierno, la industria y el mundo académico.

La adopción de las mejores prácticas internacionales adaptadas a las realidades locales permitirá a Mozambique pasar de un modelo lineal a uno circular, maximizando así los beneficios ambientales y económicos.

Referencias bibliográficas

Alivojvodic, V., & Kokalj, F. (2024). Drivers and barriers for the adoption of circular economy principles towards efficient resource utilization. *Sustainability*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/su16031317>

- Barra Nova, R. (2025). Economía circular y su aplicación en el sector empresarial: un enfoque teórico para la sostenibilidad económica local. *Territorios y Regionalismos*, (8), 65-98. <https://revistas.udec.cl/index.php/rtr/article/view/21825>
- Chen, Y., Xu, M., Wen, J., Wan, Y., Zhao, Q., Cao, X., Ding, Y., Wang, Z.L., Hexing, L., & Bian, Z. (2021). Selective recovery of precious metals through photocatalysis. *Nature Sustainability*, 4(7), 618–626. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00697-4>.
- Czikkely, M., Hoang, N.H., & Fogarassy, C. (2019). Circular transformation of current business solutions in wastewater management. *Polish Journal of Management Studies*, 20(2), 196-209. <https://doi.org/10.17512/pjms.2019.20.2.17>
- Desmarais, M., Pirade, F., Zhang, J., & Rene, E.R. (2020). Biohydrometallurgical processes for the recovery of precious and base metals from waste electrical and electronic equipments: current trends and perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 11. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2020.100526>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. <https://ellenmacarthurfoundation.org>
- Espindola-Díaz, J.E. (2025). Innovación aeroespacial y la sostenibilidad. *Revista Sistemas*, 174, 10-23. <https://doi.org/10.29236/sistemas.n174a2>
- Ferreira da Rosa, S.C., Kipper, L.M., Ribas, J.A., Emmel, A.L. & Viña, F. (2024). Alumínio-uma análise do seu context histórico, da reciclabilidade à transmissão energética. *Caderno Pedagógico*, 21(4). <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n4-038>
- Figge, F., Thorpe, A.S & Gutberlet, M. (2023). Definition of the circular economy. *Circularity matters. Ecological Economic*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107823>
- Gautam. P., Behera, C.K., Sinha, I., Gicheva, G., & Singh, K.K. (2022). High added-value materials recovery using electronic scrap-transforming waste to valuable products. *Journal of Cleaner Production*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129836>.

- Guerrero, S., Peña, C.J., Calero, V.M. & Guerrero, A.E. (2024). La economía circular como estrategia para reducir la dependencia de recursos renovables. *Código científico*, 5(E4), 215-234. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE4/491>
- Heshmati, A. (2015). A Review of the Circular Economy and its Implementation. *IZA Discussion Paper* No. 9611. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2713032
- Islam, A., Swaraz, A.M., Teo, S.H., Taufiq-Yap, Y.H., Vo, D.V.N., Ibrahim, M.L., Abdulkreem-Alsultan, G., Rashid, U., & Awual, M.R. (2021). Advances in physiochemical and biotechnological approaches for sustainable metal recovery from e-waste: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.>
- Jaki, A. & Siuta-Tokarska, B. (2019). New imperative of corporate value creation in face of the challenges of sustainable development. *Entrepreneurial Business and Economics Review*, 7(2), 63-81. <https://doi.org/10.15678/EBER.2019.070204>
- Kankekar, P.S., Wagh, S.J., & Mahajani, V.V. (2010). Process intensification in extraction by liquid emulsion membrane (LEM) process: a case study; enrichment of ruthenium from lean aqueous solution. *Chemical Engineering and Processing. Process Intensification*, 49(4), 441-448. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.02.005>.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Krishnan, S., Zulkapli, N.S., Kamyab H., Taib, S.M., Din, M.F., Majid, Z.A. Chaiprapat, S., Kenzo, I., Ichikawa, Y., Nasrullah, M., Chelliapan, S., & Othman, N. (2021). Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview. *Environmental Technology & Innovation*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101525>
- Kumari, R., & Samadder, S.R. (2022). A critical review of the pre-processing and metals recovery methods from e-wastes. *Journal of Environmental Management*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115887>

- Magoda, K, L. Mekuto. (2022). Biohydrometallurgical recovery of metals from waste electronic equipment: current status and proposed process. *Recycling*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/RECYCLING7050067.7.67>
- Mahlmann, L. (2024). Development of Recycled Aluminum Alloy for the Manufacture of an Electrical Current-Conducting Tape. *Advanced Energy Conversion Materials*, 5(1), 98-116. <https://doi.org/10.37256>
- Moustafa, E., Abdel, S.S., Taha, M. & Sabre, A.H. (2023). Influence of graphene and silver addition on aluminum's thermal conductivity and mechanical properties produced by the powder metallurgy technique. *Metals*, 13(5), 836. <https://doi.org/10.3390/met13050836>
- Rai, V., Liu, D., Xia, D., Jayaraman, Y., & Galbrie, J.C. (2021). Electrochemical approaches for the recovery of metals from electronic waste: a critical review. *Recycling*, 6. <https://doi.org/10.3390/recycling6030053>
- Sethurajan, M., Van Hullebusch, E.D., Fontana, D., Akcil, A., Deveci, H., Batinic, B., Leal, J.P., Gasche, T.A., Ali, M., Kuchta, K., Neto, I.F., Soares, H.M., & Chmielarz, A. (2019). Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(3), 212-275. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1540760>
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531, 435-438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- Vogiantzi, C. & Tserpes, K. (2023). On the definition, assessment, and enhancement of circular economy across various industrial sectors: A literature review and recent findings. *Sustainability*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/su152316532>
- Yoatian, D., Han, Z., & Shankar, R. (2025). Integrates analysis of circular economy policy innovations in developing countries through experts' perspectives. *Journal of Environmental Management*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.202.124601>