POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Mejoras en el desempeño en economía circular en el reciclaje de PET en Cuba / Improvements in circular economy performance in PET recycling in Cuba.

Original
Mejoras en el desempeño en economía circular en el reciclaje de PET en Cuba / Improvements in circular economy performance in PET recycling in Cuba / Gutiérrez Benítez, O., Mckenn Tavio, L., Jiménez Borges, R., Castro Rodriguez, D.J., Ángel Iturralde Carrera, L.. - In: UNIVERSIDAD Y SOCIEDAD. - ISSN 2218-3620. - ELETTRONICO. - 18:1(2026), pp. 1-13.

Availability:
This version is available at: 11583/3008709 since: 2026-03-12T15:59:19Z

Publisher:
Editorial Universo Sur

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

17 September 2026

Fecha de presentación: 31 de octubre, 2025
Fecha de aceptación: 21 de enero, 2026
Fecha de publicación: 18 de febrero, 2026

MEJORAS EN EL DESEMPEÑO EN ECONOMÍA CIRCULAR EN EL RECICLAJE DE PET EN CUBA

IMPROVEMENTS IN CIRCULAR ECONOMY PERFORMANCE IN PET RECYCLING IN CUBA

Omar Gutiérrez Benítez [1*]
E-mail: ogutierrez@ucf.edu.cu
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3644-6245
Lesyán Mckenn Tavio[2]
E-mail: lesyan@mpcfg.co.cu
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6149-6639
Reinier Jiménez Borges[1]
E-mail: rjborges@ucf.edu.cu
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3430-0322
David Javier Castro Rodríguez[3]
E-mail: david.castro@polito.it
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7609-3229
Luis Ángel Iturralde Carrera[4]
E-mail: liturralde28@alumnos.uaq.mx
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5595-9329
[1]Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.
[2]Empresa de Recuperación de Materias Primas de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.
[3]Politecnico di Torino (POLITO). Dipartimento Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT), Torino, Italy.
[4]Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Gutiérrez Benítez, O., Mckenn Tavio, L., Jiménez Borges, R., Castro Rodríguez, D: J., & Iturralde Carrera, L. A. (2026). Mejoras en el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba. *Universidad y Sociedad 18*(1). e5577.

RESUMEN:

La secuencia de operaciones para el reciclaje de Tereftalato de Polietileno (PET) en Cuba comprende la cadena de suministros y una planta de reciclaje mecánico, única de su tipo. El objetivo fue evaluar y mejorar el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET. Se utilizó una metodología robustecida con el enfoque a proceso, el uso de las herramientas Seis Sigma (6σ), la evaluación de la circularidad, la evaluación de impacto ambiental, y el estudio de prefactibilidad técnica, económica, ambiental y social del plan de acciones correctivas y de oportunidades de mejoras continua. Los resultados arrojaron no conformidades y anomalías que confirmaron deficiencias en el desempeño. A partir del análisis causal se propuso un plan de medidas, incluidas técnico-organizativas y soluciones ingenieras; que permitirán potenciar e incrementar la recogida selectiva y el reciclado a nivel nacional, recuperar la capacidad de diseño de la Planta de Reciclaje, y mejorar la calidad del producto. Los indicadores de rentabilidad y del análisis de sensibilidad fueron favorables. Se procede con la implementación de las medidas a corto plazo, relacionadas con aspectos técnicos organizativos, y buenas prácticas. Asimismo, con las medidas que requieran de inversiones, acorde al reglamento del proceso inversionista. Los resultados obtenidos corroboran la validez de la metodología empleada, y constituye una herramienta pertinente con las políticas públicas, y viable. Es generalizable en las estructuras organizativas del Grupo Empresarial del Reciclaje (GER); así como en el resto de las organizaciones empresariales del país, en particular en la industria de procesos.

Palabras clave: Economía circular, Reciclaje, Tereftalato de polietileno, Norma ISO 59020, Indicadores de circularidad, Factibilidad.

ABSTRACT:

The sequence of operations for recycling polyethylene terephthalate (PET) in Cuba includes the supply chain and a unique mechanical recycling plant. The objective was to evaluate and improve performance in terms of the Circular Economy in PET recycling. A methodology strengthened

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0.

by a process approach, the use of Six Sigma (6σ) tools, circularity assessment, environmental impact assessment, and a technical, economic, environmental, and social prefeasibility study of the corrective action plan and continuous improvement opportunities was used. The results revealed nonconformities that confirmed performance deficiencies. Based on the causal analysis, a plan of measures was proposed, including technical-organizational and engineering solutions, which will enhance and increase selective collection and recycling nationwide, restore the Recycling Plant's design capacity, and improve product quality. The profitability indicators and sensitivity analysis were favorable. Short-term measures related to technical-organizational aspects and best practices are being implemented. Likewise, with the measures that require investment, in accordance with the investment process regulations. The results obtained corroborate the validity of the methodology used, and constitute a viable and relevant tool for public policies. It can be generalized to the organizational structures of the Recycling Business Group (GER), as well as to the rest of the country's business organizations, particularly in the process industry.

Keywords: Circular economy, Recycling, Polyethylene terephthalate, ISO 59020 standard, Circularity indicators, Feasibility.

INTRODUCCIÓN

La implementación de las políticas públicas para la transición a la Economía Circular es una prioridad global (Agency [U.S. EPA], 2022; European Commission, 2020; United Nations [UN], 2015; U.S. Environmental Protection).

En el ámbito normativo la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) ha mostrado avances en la dirección de establecer una referencia común y estandarizar la aplicación de los principios de la Economía Circular mediante la serie de normas ISO 59000 sobre Economía Circular (Grunver Sostenibilidad, 2024; Heras-Saizarbitoria et al., 2024).

El Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030 de Cuba reconoce que la Economía Circular es transversal a varios de sus Ejes Estratégicos y Macroprogramas. En los Lineamientos de la Política Económica y Social hasta el 2026 se plantea fomentar la difusión de nuevos conceptos del desarrollo tecnológico como la Economía Circular, y desarrollar la industria del reciclaje. Asimismo, la Ley 150/2022 Del sistema de los recursos naturales y el medio ambiente tiene entre sus principios la producción y consumo sostenible, con una mayor eficiencia en el uso de los recursos y estilos de vida sostenibles, que favorezca el cambio paulatino y gradual hacia la Economía Circular.

La producción, consumo y disposición final de plásticos, incluido el Tereftalato de Polietileno por sus siglas en inglés, a lo largo de los últimos 50 años ha aumentado exponencialmente; reportándose más de 368 millones de toneladas en 2019, y se estima que se duplicará durante los próximos 20 años (World Wide Fund for Nature [WWF], 2021, 2023). El potencial de reciclado de residuos de plástico sigue estando muy desaprovechado, pues la reutilización y el reciclado del plástico una vez finalizada su vida útil siguen siendo muy bajos. Se prevé que el 95 % del valor de los envases de plástico se pierde para la economía, tras un muy corto ciclo de primer uso.

Los plásticos a lo largo de su ciclo de vida generan efectos negativos en la sociedad, el medio ambiente y la economía que imponen externalidades y costos adicionales inducidos; los cuales no son contabilizados en el precio de mercado, entre ellos: costo de las emisiones de GEI; costos sanitarios; costos de gestión de residuos; y costos de residuos mal gestionados, incluidos el costo de los servicios ecosistémicos de la contaminación por plásticos en los ecosistemas terrestres y marinos (WWF, 2021; WWF, 2023).

El manejo de los residuos plásticos, incluido el Tereftalato de Polietileno por sus siglas en inglés PET, constituye uno de los problemas ambientales globales acuciantes (Thathsarani & Sandaruwan, 2024); lo que requiere de implementar estrategias de manejo efectivas. Se destacan a nivel internacional la Estrategia Europea para el Plástico en una Economía Circular (European Commission, 2018), y la Estrategia Nacional para Prevenir la Contaminación Plástica de los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency [U.S. EPA], 2024).

La Resolución 96/2023 del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) de Cuba establece el reglamento para el trabajo en consumo y producción y la reducción paulatina de los plásticos de un solo uso; y se comienzan a implementar las Normas Cubanas NC Guía 1316:2019 Guía para reducir el impacto ambiental de los envases, embalajes y sus residuos (Oficina Nacional de Normalización [ONN], 2019a), y la NC ISO 15270:2019 Plásticos - Guía para la recuperación y reciclaje de residuos plásticos (Oficina Nacional de Normalización [ONN], 2019b).

Uno de los recursos priorizados en el reciclaje en Cuba es el PET. La secuencia de operaciones para su reciclaje comprende la cadena de suministros y una planta de reciclaje mecánico, única de su tipo, ubicada en la Empresa

de Recuperación de Materias Primas (ERMP) Cienfuegos; que permite obtener un producto en forma de escamas de alta calidad.

La implementación y evaluación del desempeño en Economía Circular en el manejo y reciclaje de este recurso es una necesidad para prevenir y minimizar la contaminación ambiental, y disponer de un producto exportable de alto valor agregado. En este contexto, el objetivo de la investigación es evaluar y mejorar el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba.

La investigación se contextualiza y justifica a partir de la situación problémica, y de las políticas públicas para transición a la Economía Circular.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 1 se muestra el diagrama de heurístico de la metodología propuesta y detallada por Gutiérrez et al. (2025) para evaluar el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba.

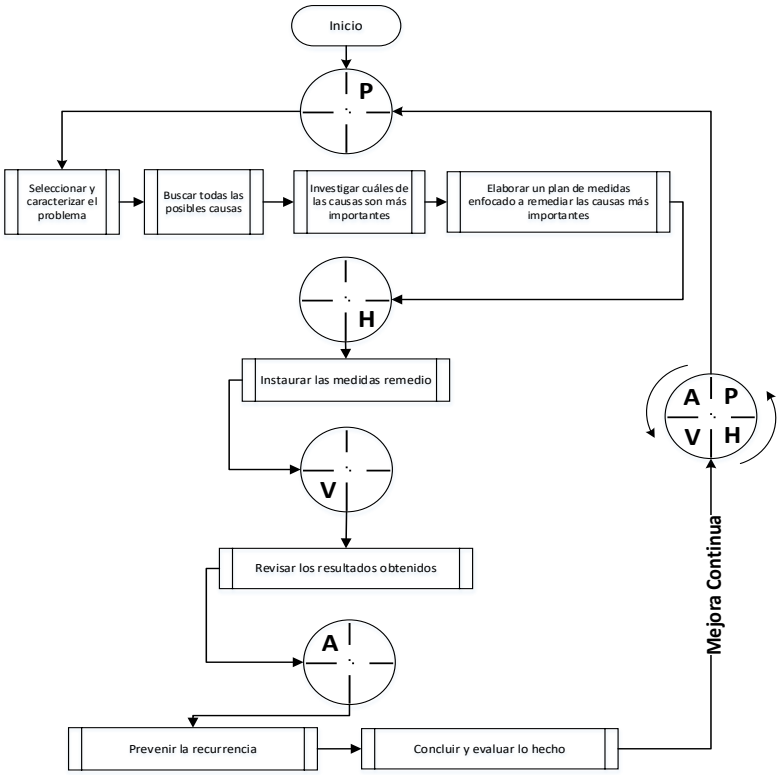

Fig. 1: Diagrama heurístico de la metodología aplicada

Fuente: Gutiérrez et al. (2025) a partir de propuesta de Gutiérrez y De La Vara (2013)

Tiene como eje central los ocho pasos en la solución de un problema propuesto por Gutiérrez & De la Vara (2013), y basados en el Ciclo de la Calidad (Ciclo PHVA: P-Planificar, H-Hacer, V-Verificar y A-Actuar) (International Organization for Standardization [ISO], 2015a). Se incorporaron elementos de metodologías existentes para la aplicación de la Producción Más Limpia (PML) (Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial [CEGESTI], 2010) y la Economía Circular (Grunver Sostenibilidad, 2023); y fue robustecido con aportes metodológicos como el enfoque a proceso (Beltrán et al., 2016; ISO, 2015a), el uso de las herramientas básicas de la estrategia de mejora continua Seis Sigma (6σ) (Gutiérrez & De la Vara, 2013), la evaluación de la circularidad según el estándar ISO 59020 y sus herramientas de apoyo (Grunver Sostenibilidad, 2023; World Business Council for Sustainable Development [WBCSD], 2023; International Organization for Standardization [ISO], 2024), la evaluación de impacto ambiental (International

Vol 18 | No.1 | enero-febrero | 2026
Publicación continua
e5577

Organization for Standardization [ISO], 2015b; ONN, 2019a), y el estudio de prefactibilidad técnica, económica, ambiental y social de un plan de acciones correctivas y de oportunidades de mejoras continua; teniendo en cuenta escenarios en el que se consideran las externalidades ambientales y los costos externos evitados (World Wide Fund for Nature [WWF], 2021). Las herramientas generales y específicas multidisciplinarias para los estudios ingenieros son utilizadas bajo el principio de las convergencias metodológicas.

RESULTADOS-DISCUSIÓN

Paso 1: Seleccionar y caracterizar un problema (Etapa Planear).

Caracterización del reciclaje de PET:

La secuencia de operaciones para el reciclaje de PET en Cuba comprende la cadena de suministros y una planta de reciclaje mecánico, única de su tipo, ubicada en la Empresa de Recuperación de Materias Primas (ERMP) Cienfuegos; que permite obtener un producto en forma de escamas de alta calidad. Comprende (Figura 2):

- Cadena de Suministros (Acopio, clasificación, logística y transporte):

Estos procesos se realizan de forma manual en centros de clasificación, que incluyen las UEB de Recuperación Municipales, y demás suministradores internos y externos a nivel nacional. Las principales fuentes son materiales pre-consumo y materiales post-consumo.

Se ejecutan conforme al Procedimiento P04-01 Gestión de Recuperación de Desechos Reciclables en las UEB de Recuperación Municipales (Empresa de Recuperación de Materias Primas Cienfuegos [ERMP], 2023).

El PET recuperado, se clasifica por colores y envasa en pacas o sacos para ser transportado hacia la Planta de Reciclaje mediante transferencia entre almacenes. Se utilizan transporte automotor y triciclos eléctricos.

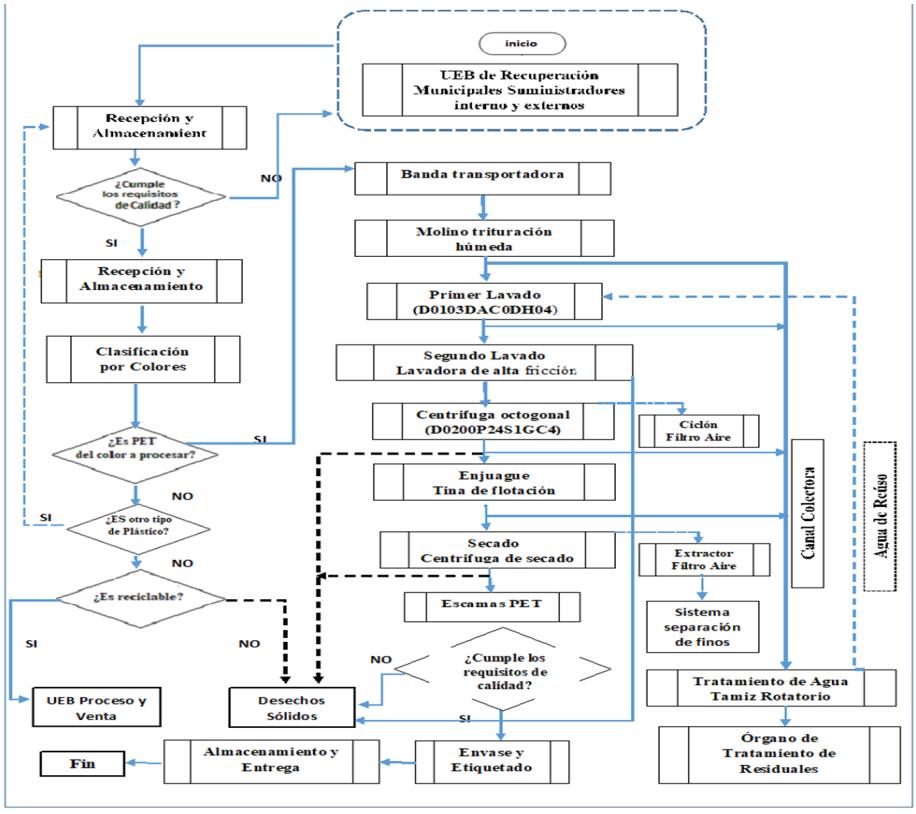

Fig. 2: Diagrama de procesos de reciclaje de PET

Fuente: ERMP Cienfuegos, 2023

Vol 18 | No.1 | enero-febrero | 2026
Publicación continua
e5577

- Proceso de la Planta de Reciclaje de PET:

Se dispone de una línea de procesamiento de reciclado mecánico con tecnología Pagani, que permite obtener un producto PET en forma de escamas y de alta calidad, competitivo en el mercado internacional.

El proceso tecnológico está conformado por una secuencia de etapas y operaciones unitarias de trituración, lavados y separación (Pagani, 2012): Recepción y almacenamiento de materia prima; Clasificación; Molienda; Primer Lavado; Segundo Lavado; Enjuague; Secado; Envase y Etiquetado; y Almacenamiento de producto terminado. Se ejecuta conforme al Procedimiento P06-01 Procedimiento Ejecución de la Producción. UEB Planta de Plástico (ERMP, 2023).

Estudio del proceso de reciclaje de PET:

En la Tabla 1 se sintetiza el Diagrama SIPOC, visualizándose los proveedores, las entradas, el proceso, las salidas, y los clientes.

Tabla 1: Síntesis del Diagrama SIPOC.

Fuentes de Entradas	Entradas	Proceso/Actividades	Salidas	Receptores de Salidas
Proveedores Externos: Empresas y Unidades Presupuestadas. Formas No Estatales de Gestión (MIPYME y TCP).	Materia prima recuperada (envases de PET, proformas PET). Maquinarias, Equipos, Piezas, Dispositivos y Herramientas. Equipos y Útiles de Laboratorio. Herramientas, Equipos, y Accesorios de Seguridad Industrial y Ambiental. Equipos de Protección Personal (EPP). Elementos y Dispositivos para el Sistema de Prevención y Protección Contra Incendios. Aceites, Lubricantes, Solventes, Pinturas. Otros Materiales e Insumos. Energía eléctrica. Agua tecnológica. Combustible diésel.	DIAGRAMA DE PROCESO (Figura 2)	PET en escamas, limpio y seco, clasificado por colores. Polietileno de tapas. Residuos de tapas y etiquetas. Residuos finos de la centrífuga. Fino recuperado. Residuos separados en tamiz rotatorio. Aguas residuales con microplásticos. Aire con material particulado. Sacos de polipropileno y big bag rotos. Otros desechos como cartón, madera, metales, etc.	Empresa Exportadora e Importadora de Materiales Reciclables (DESEQUIP). ERMP Cienfuegos. GER. Formas No Estatales de Gestión (MIPYME y TCP). Bahía de Cienfuegos. Vertedero Municipal.
Proveedores Internos: UEB Municipales de Recuperación ERMP Cienfuegos. Grupo Empresarial del Reciclaje (GER) y Empresas subordinadas.	Materia prima recuperada (Pacas, Big bag y sacos de PET). Trasporte. Logística. Manual Integrado del Sistema de Gestión de la ERMP Cienfuegos (ERMP Cienfuegos, 2023). Procedimientos e Instrucciones. Fuerza de Trabajo. Capital de Trabajo.		Registros de Procedimientos e Instrucciones.	UEB Planta de Plástico. ERMP Cienfuegos. GER.

El proceso de reciclaje está sujeto a requerimientos de prevención contra incendio y riesgos (Ley N° 1268/1974 Protección contra incendios; Ley N° 13/1977 Protección e higiene del trabajo; Decreto-Ley N° 170/1997 Del sistema de medidas de defensa civil; Directiva N° 1/2022 del Presidente del Consejo de Defensa Nacional; y las legislaciones y normas técnicas complementarias). Asimismo, a requerimientos ambientales y de Economía Circular (Ley N° 150/2022 Del sistema de los recursos naturales y medio ambiente, y su legislación y normas técnicas complementaria.

Balance de flujo de materiales y de energía eléctrica:

La Planta de Reciclaje de PET tiene una capacidad de diseño de 0.5 t/h y un 85 % de explotación (0.425 t/h efectivas), concebida para operar 3 turnos de trabajo por día y 300 días de operación por año; lo que permite procesar 2550 t/año (Pagani, 2012). Bajo estas condiciones se logra el 97.41 % de recuperación de PET (PET en escamas, más tapas y etiquetas), valor adecuado para este tipo de tecnología de reciclado mecánico según el fabricante. Con un adecuado funcionamiento del sistema de tratamiento y reuso del agua residual se logra reusar el 80 % de la misma, y minimizar el consumo de agua tecnológica. En consumo total estimado de agua es de 5 m^3/h. Los equipos que más consumen son el molino (3 m^3/h) y la lavadora de fricción (1.2 m^3/h). El flujo de agua tecnológica es del orden de 1 m^3/h.

Tiene servicio de energía eléctrica de alta tensión (33 kV). Dispone de un transformador eléctrico propio de 33 kV/440 V, con una capacidad de 400 kVA. El factor de potencia eléctrica de diseño del sistema eléctrico es de 0.90. El consumo de energía eléctrica de la tecnología es alto, del orden de 254.03 kWh (Índice de consumo de 597.72 kWh/t); siendo los equipos de mayor consumo por su orden la lavadora de fricción, el molino, la centrifuga de secado, y la centrifuga ortogonal, totalizando el 86.5 % del total. La lavadora de fricción es el equipo de mayor consumo, representando el 48.9 % del total. No hay aprovechamiento de fuentes renovables de energía.

En la tabla 2 se muestra los resultados del balance de materiales para las condiciones de operación actuales (1 turno de trabajo por día, 300 días de operación por año, y capacidad anual de 829 t/año); a partir de las entradas y salidas identificadas en el SIPOC (Tabla 2).

Tabla 2: Balance de materiales para condiciones de operación actuales.

Entradas			Salidas		
Corriente	Cantidad horaria	Cantidad anual	Corriente	Cantidad horaria	Cantidad anual
Envases de PET	0.425 t/h (425 kg/h)	829 t/año	PET Escamas Envasado en Big Bag Baja Calidad	0.383 t/h (383 kg/h)	745.9 t/año
Agua tecnológica	5 m3/h (5000 kg/h)	9750 m3/año	Tapas y etiquetas	0.031 t/h (31 kg/h)	60.5 t/año
Big Bag	0.85 u/h (1.7 kg/h)	1658 u/año	Residuos finos separados en centrífuga ortogonal	0.008 t/h (8 kg/h)	14.9 t/año
Hidróxido de Sodio al 48 %	0.25 l/h (0.38 kg/h)	741 kg/año	Fino recuperado en el sistema de depuración de aire	0.002 t/h (2 kg/h)	4.1 t/año
Energía Eléctrica	187.74 kWh/h	366.1 MWh/año	Finos separados en el tamiz rotatorio del sistema de tratamiento y reuso de aguas residuales	0.001 t/h (1 kg/h)	2.5 t/año
Diésel de la cadena de suministro*	8.30 l/h (7.06 kg/h)	16185 l/año	Aguas Residuales	5 m3/h (5000 kg/h)	9750 m3/año
Diésel de la venta	8.4 l/h (7.06 kg/h)	16380 l/año			

* Gasto total de Diésel en la cadena suministro, incluye el de los suministradores externos y el propio de la ERMP Cienfuegos. Este último representa el 15% del total.

El balance de materiales para las condiciones de operación actuales mantiene el % de recuperación de PET de diseño. Sin embargo, el aprovechamiento de la capacidad instalada es de 32,5 %, debido fundamentalmente a mal estado y carencias de las cuchillas del molino; y problemas operacionales y de mantenimiento. Además, la planta acusa de roturas de equipamiento crítico fuera de servicio (centrifuga ortogonal y centrifuga de secado) debido a las carencias de piezas de repuestos; lo que origina una baja calidad del PET procesado, y por consiguiente menor precio de venta e ingresos respectivos.

Por otra parte, el sistema de tratamiento y reuso del agua residual actualmente está desmantelado por mal estado técnico, utilizándose actualmente el 100 % del agua tecnológica (5 m^3/h). Esto originó un incremento en el caudal y la carga contaminante (plásticos y microplásticos) del agua residual afluente de la planta dispuesta a la Bahía de Cienfuegos.

Los flujos de residuos mantienen igual composición y manejo que para las condiciones de diseño; en menor cantidad en correspondencia con la capacidad de producción.

Asimismo, el consumo de energía eléctrica de la tecnología sigue siendo alto, ahora del orden de 187.74 kWh (Índice de consumo de 441.74 kWh/t), menor que para las condiciones de diseño debido al equipamiento crítico fuera de servicio. Los equipos de mayor consumo por su orden son la lavadora de fricción y el molino, totalizando el 92.7 % del total. La lavadora de fricción es el equipo de mayor consumo, representando el 66.2 % del total. El bajo aprovechamiento de la capacidad instalada y a la paralización de equipos tecnológicos está afectando el factor de potencia eléctrica, siendo el promedio actual es 0.76, razón por la que está siendo penalizada por la Empresa Eléctrica.

El índice de consumo de combustible de la trasportación en la cadena de suministro de la materia prima es del orden de 0.0166 kg de diésel/kg de materia prima; y el índice de consumo de combustible de la trasportación del producto terminado es del orden de 0.0186 kg de diésel/kg de producto terminado.

Diagnóstico tecnológico del proceso de reciclaje de PET:

- Bajo aprovechamiento de las potencialidades de recuperación de plástico. Asimismo, las acciones de capacitación y comunicación social al respecto.
- Variabilidad de la calidad de la materia prima debido a la insuficiente clasificación en la fuente de origen y en las UEB Municipales de Recuperación.
- Carencia de equipamientos para la compactación del plástico, originando problemas en el manejo de la materia prima por su baja densidad, mayores capacidades de almacenaje y transporte requeridas, y mayores gastos económicos asociados a insumos de envases y transporte.
- Parque de transporte automotor con un grado de obsolescencia elevado, originando un alto consumo de combustibles, lubricantes, piezas de repuestos, e insumos (baterías y gomas). Asimismo, impactos ambientales asociados.
- La tecnología de reciclaje mecánico con 13 años de explotación, y estado técnico malo.
- Equipamiento tecnológico crítico, atendiendo a la complejidad de operación y mantenimiento; y al estado técnico.
- Afectaciones en el ambiente para la operación del proceso y ergonómicas.

Diagnóstico ambiental del proceso de reciclaje de PET:

Las deficiencias más significativas de los sistemas de tratamiento de residuos son las siguientes:

- El sistema tratamiento y reuso de aguas residuales fue desmantelado por mal estado técnico, por lo que el 100 % del agua residual es enviada directamente al órgano de tratamiento existente. Asimismo, es necesario utilizar el 100 % del agua tecnológica.
- Deficiencias en el diseño de ingeniería y/o construcción de la cámara separadora del sistema de agua residuales, que afectan su correcto funcionamiento.
    - Aguas residuales con alto contenido de microplásticos y materia orgánica. Incumplimientos de parámetros de la norma de vertimiento.
- No existen medidores de caudales de agua tecnológica y aguas residuales. Insuficientes estimaciones de los caudales, concentraciones y carga contaminante generada y dispuesta.
- La etapa de separación de fino (ciclones de alta eficiencia, filtro y manga filtrante) esta inactiva por paralización de equipos críticos.
- Falta de monitoreo sistemático de calidad las aguas residuales dispuestas y de la calidad del aire por laboratorios acreditados.

Diagnóstico de la situación de la aplicación de la Economía Circular en el reciclaje de PET:

- Barreras en la aplicación de la Economía Circular en el reciclaje de PET: Insuficiente sensibilización ambiental de los actores sociales; insuficiente legislación, y apoyo normativo; estrategia empresarial para la transición hacia la Economía Circular insipiente; insuficientes competencias para llevar a cabo la transición hacia el modelo circular; insuficientes recursos financieros, materiales y tecnológicos para implementar iniciativas circulares; falta de incentivos y proyectos demostrativos de la Economía Circular; insuficiente medición y registro sobre los flujos y metabolismo de materiales; tecnología de reciclaje mecánico en mal estado técnico; insuficiente encadenamiento para implementar proyectos y negocios circulares; capital humano no capacitado.

Indicadores de circularidad en el reciclaje de PET:

En la Tabla 3 se muestran la medición y evaluación de los indicadores de circularidad, según los cuatro grupos o módulos de análisis; a partir de las entradas y salidas identificadas en el SIPOC, y de los flujos de materiales, agua y energía.

Vol 18 | No.1 | enero-febrero | 2026
Publicación continua
e5577

Tabla 3: Resultados de la evaluación de los indicadores de circularidad.

Indicadores de Cerrar el Ciclo		Indicadores de Optimizar el Ciclo	
% Circularidad material (% Entrada Circular).	97.89 %	% de material crítico.	97.89 %
% Circularidad material (% Salida Circular).	95.43 %	% tipo de recuperación.	Alto
% Circularidad del agua (% entrada de agua circular).	50 %	Vida útil.	No aplica
% Circularidad del agua (% salida de agua circular).	0 %	Circulación de agua en el lugar para las condiciones de diseño.	5
% de energía renovable.	0 %	Circulación de agua en el lugar para las condiciones actuales.	1
Indicadores de Valor del Ciclo		Indicadores de Impacto del Ciclo	
Productividad material circular para las condiciones de diseño.	37.93 M CUP/t	Impacto de GEI (Flujo de entrada- Reciclaje).	0 %
Productividad material circular para las condiciones actuales.	37.93.M CUP/t	Impacto de GEI. (Flujo de salida-Reciclaje).	2.59 %
Ingreso del CTI para las condiciones de diseño (% Circularidad material promedio de 96.66 %).	95.50 MM CUP	Impacto en la naturaleza.	0.05
Ingreso del CTI para las condiciones actuales (% Circularidad material promedio de 96.66 %).	31.04 MM CUP		

A continuación, se presenta el análisis de los resultados, por grupos o módulos de indicadores, teniendo en cuenta los criterios análisis de WBCSD (2023):

- **Indicadores de Cerrar el Ciclo:** El % circularidad material de entrada y salida es alto en ambos casos, siendo la circularidad material promedio de 96.66 %; valores característicos para los procesos de reciclaje que utilizan productos secundarios como materias primas, y que suministran un producto que continúa la cadena de valor en un segundo ciclo. El comportamiento es similar en las condiciones de diseño y actuales.

Además de los flujos de materiales, consideramos que la circularidad del agua dulce es un elemento importante en la Economía Circular. El propósito de la circularidad del agua es bajar la demanda de agua dulce y asegurar la disponibilidad del recurso agua para todos los usuarios y el medio ambiente. Por lo tanto, la circularidad del agua se determina a través del porcentaje de entrada de agua circular y el porcentaje de salida de agua circular lo que, a su vez, depende de las condiciones hídricas locales.

El % Circularidad del agua (% entrada de agua circular) determina la circularidad total de toda la entrada de agua. Según el árbol de decisiones establecido para esto efectos se estimó que tiene un valor del 50 %. El comportamiento es similar en las condiciones de diseño y actuales.

El % Circularidad del agua (% salida de agua circular) determina la circularidad total de toda la salida de agua. Debido a la ubicación de las cuencas hidrográficas de la fuente de abasto de agua (Embalse Damují) y de la Planta de Reciclaje, así como el cuerpo receptor de las descargas de residuales (Bahía de Cienfuegos); no resulta posible cumplir con los principios básicos para la circularidad del agua de la salida, y por tanto tiene un valor de 0. El comportamiento es similar en las condiciones de diseño y actuales.

Actualmente no hay reuso de aguas residuales por las causas explicadas anteriormente; por lo que es utilizar el 100 % del agua tecnológica.

El % de energía renovable es nulo, lo que demanda de una transición a energía renovable en la planta, existiendo oportunidades de aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica mediante paneles solares con inyección a la red.

- **Indicadores de Optimizar el Ciclo:** El material crítico es del 97.89 %, valor alto, estando asociado a la materia prima fundamental del proceso de reciclaje de PET. El comportamiento es similar en las condiciones de diseño y actuales.

El % tipo de recuperación es alto, característico para los procesos de reciclaje que utilizan productos secundarios como materias primas, y que suministran un producto que continúa la cadena de valor en un segundo ciclo. El comportamiento es similar en las condiciones de diseño y actuales.

El porcentaje de tipo de recuperación se enfoca en la manera en la que la empresa recupera salida y la vuelve a hacer circular en la cadena de valor. Los resultados proporcionan un desglose de la salida recuperada en porciones reutilizadas o reparadas, reacondicionadas, remanufacturadas, recicladas o biodegradadas.

El indicador de circulación de agua en el lugar está orientado hacia adentro, y se enfoca en la circulación interna a través de la reutilización. Este indicador expresa la cantidad de veces que la empresa usa agua antes de dejar las instalaciones como salida. Los resultados arrojan que el valor para las condiciones de diseño es 5 veces el de las condiciones actuales. Lo anterior está asociado que las condiciones de diseño previeron el tratamiento del agua residual y el reuso del 80 %, con la consiguiente reducción de la necesidad de agua externa. Asimismo, que en las condiciones actuales no existe reuso, por las causas explicadas en el diagnóstico ambiental.

- **Indicadores de Valor del Ciclo:** El % circularidad material promedio es de 96.66 %, valor alto; característico para los procesos de reciclaje que utilizan productos secundarios como materias primas, y que suministran un producto que continua la cadena de valor en un segundo ciclo. El comportamiento es similar en las condiciones de diseño y actuales.

Para esta condición la productividad material circular fue de 37.93 miles de CUP/t, similar para las condiciones de diseño y actual. Mientras más alta sea la productividad de material circular, la empresa estará desacoplando de mejor manera el rendimiento financiero del consumo lineal de recursos, ya que expresa el valor que genera por unidad de entrada lineal. Un aumento en este indicador demuestra un desacoplamiento exitoso entre el crecimiento financiero y la dependencia de recursos (lineales).

El ingreso del CTI visualiza el rendimiento de una empresa para cerrar el ciclo en cuanto a los recursos que usa y cómo eso afecta el rendimiento financiero. Permite atribuir más de sus ingresos como circulares a través de la innovación de nuevos productos más circulares, la mejora de la circularidad de productos existentes, y el impulso de las ventas de los productos más circulares. Mientras mayor sea el porcentaje de circularidad material, menos depende de un modelo económico lineal.

La diferencia de los ingresos del CTI para las condiciones de diseño y actual se debe a la capacidad de producción e ingresos correspondientes en cada caso; afectada en las condiciones actuales debido al bajo aprovechamiento de la capacidad instalada por diferentes causas, explicada en el diagnóstico tecnológico.

- **Indicadores de Impacto del Ciclo:** El impacto de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) ofrece una indicación del nivel del ahorro de emisiones de GEI que pueden obtener mediante la aplicación de estrategias circulares. Las estrategias circulares incluyen el uso de materiales secundarios o renovables como entrada y permitir la recuperación «mayor valor agregado», como la reutilización o reciclado del flujo de salida (productos y materiales).

El impacto de GEI (Flujo de entrada-Reciclaje) arrojó un valor de 0 %, ya que este indicador está asociado al % de ahorro de emisiones de GEI de los métodos de recogida, clasificación y recuperación (reciclado) de la materia prima, si cantidad reciclada pasara del % actual al 100 %, sin utilizar materia prima virgen. El comportamiento es similar en las condiciones de diseño y actuales.

Proporciona orientación para determinar la diferencia en la huella de carbono material de la cantidad actual de materiales reciclados utilizados, en comparación con una situación en la que el flujo de entrada está compuesto al 100% por materiales reciclados. Como en este proceso el 100 % de la materia prima es reciclada y no se utilizan materiales vírgenes no existen posibilidades de ahorro por este concepto.

No obstante, hay emisiones de GEI (Flujo de entrada-Reciclaje) determinadas por el índice de consumo de combustible de la trasportación de la materia prima en la cadena de suministro, del orden de 0.0166 kg de diésel/kg de materia prima, equivalente a 0.0498 kg CO_2/kg materia prima. En este indicador incide la no compactación del plástico y la baja capacidad de carga del medio de transporte especialidad para esta función.

El impacto de GEI (Flujo de salida-Reciclaje) arrojó sería posible un 2,59 % de ahorro de emisiones de GEI para un escenario en el que el 100 % de PET reciclado y valorizados frente a la incineración o el vertido; porque se pone a disposición para su uso por otro usuario en un ciclo siguiente. Este indicador para este tipo de proceso está limitado por el alto % de recuperación del orden del 97.41 %. El comportamiento es similar en las condiciones de diseño y actuales.

No obstante, hay emisiones de GEI (Flujo de salida-Reciclaje) determinadas por el índice de consumo de combustible de la trasportación del producto terminado, del orden de 0.0186 kg de diésel/kg de producto terminado, equivalente a 0.0558 kg CO_2/kg producto terminado.

El impacto en la naturaleza se cuantificó en un valor de 0.05, bajo según la escala utilizada. En este caso dado a que se trata de un proceso de reciclado, que implica un cambio significativamente menor en la extensión de tierra utilizada, y el PET es un insumo en el proceso de reciclado. La presión sobre la naturaleza a través del uso del suelo es baja, solo hay pequeños impactos en el uso de la tierra para los insumos y procesos necesarios para estas entradas circulares (Acopio y clasificación). La extensión de terreno ocupada es insignificante; el cambio en la condición de la biodiversidad en el terreno es muy grande; y la importancia «valor» de la biodiversidad es muy alta.

No fueron encontrados antecedentes documentados de estudios sobre indicadores de circularidad en el reciclaje de plásticos.

Evaluación de impacto ambiental en el reciclaje de PET:

En las operaciones de la cadena de suministros (Acopio, clasificación, logística y transporte de materias primas y productos terminados) se identificaron 27 impactos potenciales negativos totales, de ellos: Despreciables 6, Moderados 16, Severos 6 y Críticos 5. Los impactos potenciales severos y críticos están asociados principalmente a los aspectos ambientales son: Reciclaje de plásticos y Situaciones de emergencia e incidentes (Accidente de transporte, accidente laboral, incendio y explosión).

En la operación y mantenimiento de la Planta de Reciclaje se identificaron 27 impactos potenciales negativos, de ellos: Despreciables 4, Moderados 16, Severos 12 y Críticos 10. Los impactos potenciales severos y críticos están asociados principalmente a los aspectos ambientales: Reciclaje de plásticos, Vertidos de aguas residuales con plásticos y micro plásticos, Generación de ruidos y vibraciones, y Situaciones de emergencia e incidentes (Accidente de transporte, accidente laboral, incendio y explosión).

Paso 2: Buscar todas las posibles causas (Etapa Planear).

A partir de los resultados de los estudios técnicos cualitativos y cuantitativos realizados en el **Paso 1**, se identificaron no conformidades y anomalías, que corroboraron el deficiente desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba.

Mediante la aplicación de las herramientas básicas de la estrategia Seis Sigma (Gutiérrez & De la Vara, 2013), recomendadas por Gutiérrez et al. (2025) para esta investigación (Lluvia de Ideas y Diagrama de Ishikawa), fue relacionado el problema con los factores o causas que lo generan; identificándose las causas raíces probables o potenciales de las deficiencias en el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba. Las mismas están asociadas y fueron agrupadas por los seis elementos (las 6 M) que determinan de manera global todo proceso, en el que cada uno aporta algo de la variabilidad e incide en la calidad de la salida del proceso: Maquinaria-Tecnología, Métodos de trabajo, Mano de obra, Materiales, Mediciones y Medio Ambiente.

Paso 3: Investigar cuáles de las causas son más importantes (Etapa Planear).

La matriz de Análisis de Modo y Efecto de las Fallas (AMEF) del proceso de reciclaje de PET fue jerarquizada en orden descendente del Número de Probabilidad de Riesgo (NPR). Los resultados permitieron identificar, caracterizar, jerarquizar, y asignar prioridad a las fallas potenciales del proceso en el desempeño de la Economía Circular y las causas raíces que lo originan.

Paso 4: Elaborar un plan de medidas enfocado a remediar las causas más importantes (Etapa Planear).

El plan de medidas correctivas y de oportunidades de mejoras continua del desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba contiene un total de 43 medidas, incluidas medidas técnico-organizativas y soluciones ingenieras; que permitirán potenciar e incrementar la recogida selectiva y el reciclado de PET a nivel nacional, recuperar la capacidad de diseño de la Planta de Reciclaje, y mejorar la calidad del plástico reciclado.

Entre las soluciones ingenieras propuestas se destaca que la Planta de Reciclaje debe ser sometida a una reparación capital, debido a los años de explotación y a su mal estado técnico. Incluye inversiones para la reposición de los equipos críticos; y para el sistema de tratamiento y reuso de aguas residuales. Asimismo, para el uso de fuentes renovables de energía (paneles solares y calentadores de agua solares), entre otras.

Estudio de prefactibilidad técnica, económica, ambiental y social:

Pertinencia:

El plan de medidas correctivas y de oportunidades de mejoras continua es pertinente ambiental y socialmente con las políticas, legislación y normas técnicas sobre la Economía Circular a nivel internacional y nacional; en

Vol 18 | No.1 | enero-febrero | 2026
Publicación continua
e5577

particular con la implementación del PNDES 2030, y la Política y Estrategia de Cuba para la transición hacia una Economía Circular.

En correspondencia con las dimensiones de la sostenibilidad (económica, ambiental, social y cultural) los impactos y beneficios más significativos esperados de su implementación son:

- Económicos: Mejoras en la rentabilidad y la calidad de proceso de reciclaje de PET; incremento del valor agregado en toda la cadena de valor; incremento de los ingresos en divisas por negocios en fronteras y exportaciones; accesos a mecanismos económicos financieros dirigidos a incentivar y fomentar prácticas de Economía Circular.
- Ambientales: Minimización de residuos y emisiones; reducción de los impactos ambientales potenciales y de los costos asociados; aprovechamiento de fuentes renovables de energía; cumplimiento de legislación y normas técnicas ambientales.
- Sociales y culturales: Generación y permanencia de empleos; perspectivas de género; mejoras en el ambiente de trabajo y ergonómicas para los trabajadores; incremento de ingresos salariales de los trabajadores; directivos, especialistas, técnicos, trabajadores, estudiantes, y población en general con mejores competencias para la transición hacia la Economía Circular; efectos en el desarrollo local, impulso a la economía colaborativa, compartida o de intercambio, encadenamientos sostenibles; fomento de negocios circulares; fomento de proyectos sociales colaborativos; alianzas, concertación y participación activa y consciente de los diferentes actores del sector estatal y no estatal, academia y sociedad civil en torno a la promoción, implementación y desarrollo de la Economía Circular; desarrollo de estrategias y campañas de comunicación y sensibilización; fortalecimiento del proyecto Reciclo mi Barrio y mayor rresponsabilidad social de la ERMP Cienfuegos y el GER en mejoramiento social, económico y ambiental.

Estudios recientes sobre la dimensión social en los modelos de transición a la Economía Circular (Lofrida et. al., 2024; Al Haj Eid et al. 2025) reconocen que probablemente fracasarán si no se comprenden las variables culturales y sociales en la transición social hacia la economía circular y cómo la dimensión social puede integrarse con la economía circular para contribuir a la sostenibilidad.

Análisis de Rentabilidad:

En la Tabla 4 se presentan los resultados de los indicadores de rentabilidad, para los escenarios previstos.

Tabla 4: Indicadores de rentabilidad

Indicadores	Escenario A Sin considerar las externalidades	Escenario B Considerando las externalidades
VAN (MM CUP)	126.278	1966.892
TIR (%)	36.89	479.16
RVAN ($/$)	2.02	31.45
PRA (años)	4.33	0.24

Los resultados del Escenario A, muestran un Valor Actualizado Neto (VAN), o sea el valor actualizado del flujo de ingresos netos generados durante la vida útil del proyecto, superior a cero; lo que garantiza una tasa de rendimiento del capital superior al costo de oportunidad del capital. La Tasa Interna de Retorno (TIR), una métrica que da una medida relativa de la rentabilidad de la inversión, fue superior a la tasa de actualización utilizada del 15%; lo que garantiza el rendimiento mínimo de la inversión propuesta. O sea que la inversión da una rentabilidad mayor que la rentabilidad mínima requerida (el costo de oportunidad). La Tasa de Rendimiento Actualizado (RVAN), o sea la relación entre el Valor Actual Neto (VAN) y el Costo Actualizado de la Inversión, es también mayor que cero; lo que indica resultados favorables de las utilidades actualizadas por cada peso de la inversión. El Periodo de Recuperación Actualizado del Capital (PRA), criterio que mide el número de años que se necesitan para recuperar el Capital Invertido, es de 4.43 años; resultado favorable para las inversiones industriales. Los resultados del VAN y del RVAN evaluados para tasas de actualización de entre 5 % y 25 % se mantuvieron favorables.

Análisis de Sensibilidad:

Los resultados del análisis de sensibilidad para el escenario crítico evaluado (Aumento costo de producción en +20 %, y una disminución del precio de venta en -20 %) arrojaron que los indicadores de rentabilidad VAN, TIR, RVAN y PRA mantienen valores satisfactorios, no alejados del escenario base; indicativos de que la inversión es poco sensible, y que el riesgo e incertidumbre del proyecto es mínimo. Asimismo, los resultados del VAN y del RVAN evaluados para tasas de actualización de entre 5 % y 20 % se mantuvieron favorables.

Los resultados del Escenario B, tanto en el análisis de rentabilidad como en el análisis de sensibilidad, son más satisfactorio que el escenario anterior. Lo anterior determinado por los altos costos evitados por las externalidades evaluadas, en correspondencia con el estudio realizado por WWF (2021).

Pasos 5, 6, 7 y 8: Ejecutar las medidas remedio (Etapa Hacer), Revisar los resultados (Etapa Verificar), Prevenir la recurrencia y Concluir y evaluar lo hecho (Etapa Actuar).

Los **Pasos 5, 6, 7 y 8** (Ejecutar las medidas remedio, Revisar los resultados obtenidos, Prevenir la recurrencia, y Concluir y evaluar lo hecho) forman parte del ciclo de mejora continua; y le corresponde implementar a los directivos de la ERMP Cienfuegos y del GER, con el acompañamiento de los autores.

CONCLUSIONES

No fueron encontrados antecedentes documentados de estudios sobre indicadores de circularidad en el reciclaje de plásticos.

Los resultados de los estudios técnicos cualitativos y cuantitativos arrojaron no conformidades y anomalías, que corroboraron el deficiente desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba; y sus causas raíces. Se propuso un plan de medidas correctivas y de oportunidades de mejoras de 43 medidas, incluidas técnico-organizativas y soluciones ingenieras; que permitirán potenciar e incrementar la recogida selectiva y el reciclado de PET a nivel nacional, recuperar la capacidad de diseño de la Planta de Reciclaje, y mejorar la calidad del plástico reciclado.

La factibilidad técnica, económica, ambiental y social fue validada. Los indicadores de rentabilidad y sensibilidad fueron favorables, y significativamente superiores en el escenario que consideró las externalidades debido a los costos externos evitados (costo de gestión de residuos y costo del servicio ecosistémico de la contaminación por plásticos en los ecosistemas marinos).

La implementación del plan de medidas contribuirá a mejorar el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba; y es pertinente con las políticas públicas para transición a la Economía Circular.

La Empresa de Recuperación de Materias Primas (ERMP) Cienfuegos y el Grupo Empresarial del Reciclaje (GER) proceden con la implementación de las medidas a corto plazo, relacionadas con aspectos técnicos organizativos, y buenas prácticas de operación y mantenimiento. Asimismo, con las medidas que requieran de inversiones, acorde al Decreto 327 Reglamento del proceso inversionista, y su legislación complementaria.

Los resultados obtenidos corroboran la validez de la metodología. Desde la dimensión metodológica constituye una herramienta pertinente y viable para evaluar y mejorar el desempeño en Economía Circular. Asimismo, es generalizable en las estructuras organizativas del Grupo Empresarial del Reciclaje (GER); así como en el resto de las organizaciones empresariales del país, en particular en la industria de procesos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al Haj Eid, Mohammad, Dandis, Ala' Omar, & Cathro, Virginia (2025). The social dimension of the circular economy: A review towards a comprehensive narrative. ***Sustainable Development 33*** (6), 8025-8040. https://doi.org/10.1002/sd.70054

Beltrán Sanz, J., Carmona Calvo, M. A., Carrasco Pérez, R., Rivas Zapata, M. A., & Tejedor Panchón, F. (2016). ***Guía para una gestión basada en procesos.*** http://www.centrosdeexcelencia.com/wp-content/uploads/2016/09/guiagestionprocesos.pdf

Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial. (2010). ***Manual de Producción Más Limpia.*** https://cegesti.org/wp-content/uploads/2025/01/manual_produccion_mas_limpia.pdf

Empresa de Recuperación de Materias Primas Cienfuegos. (2023). ***Manual Integrado del Sistema de Gestión.*** Inédito.

European Commission. (2020). ***A new Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe***. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF

European Commission. (2018). ***A European strategy for plastics in a Circular Economy***. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

Grunver Sostenibilidad. (22 de mayo de 2024). ***Economía Circular aplicada desde la serie de normas ISO 59000.*** https://grunver.com/economia-circular-aplicada-normas-iso-59000-grunver

Grunver Sostenibilidad. (7 de julio de 2023). ***CTI v4.0: Indicadores claves de la Economía Circular*** https://grunver.com/indicadores-de-economia-circular-cti-grunver

Gutiérrez Benítez, O., Mckenn Tavio, L., Jiménez Borges, R., Castro Rodríguez, D. J. (2025). Metodología para evaluar el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba. ***Revista Universidad y Sociedad 17(6)***. https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/5576

Gutiérrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. (2013). ***Control estadístico de calidad y seis sigmas.*** Tercera edición, Editorial McGraw Hill Educación, México.

Heras-Saizarbitoria, I., Boiral, O., & Testa, F. (2024). ISO 59000 Standards for the Circular Economy: a Call for Accuracy. Journal of ***Circular Economy and Sustainability, 4***, 1669–1675. https://doi.org/10.1007/s43615-024-00370-w

International Organization for Standardization. (2015a). ***Quality management systems, requirements*** (ISO Standard No. 9001: 2015). https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:9001:ed-5:v1:en

International Organization for Standardization. (2015b). ***Environmental management systems, requirements with guidance for use*** (ISO Standard No. 14001:2015). https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:en

International Organization for Standardization. (2024). ***Circular economy - Measuring and assessing circularity performance*** (ISO Standard No. 59020:2024). https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:59020:ed-1:v1:en

Lofrida Nathalie, Spada Emanuele, Gulisano Giovanni, De Luca Anna Irene, & Falcone Gia (2024). The social impacts of circular economy: disclosing epistemological stances and methodological practices. ***Environment, Development and Sustainability***, 1–34. https://doi.org/10.1007/s10668-024-05438-z

Oficina Nacional de Normalización. (2019a). ***Guía para reducir el impacto ambiental de los envases, embalajes y sus residuos*** (Norma Cubana NC No. 1316:2019). Inédito.

Oficina Nacional de Normalización. (2019b). ***Plásticos - Guía para la recuperación y reciclaje de residuos plásticos*** (Norma Cubana NC ISO 15270:2019). Inédito.

United Nations. (2015). ***Transforming Our Worl: The 2030 Agenda for Sustainable Development***. (A/RES/70/1). https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf

Pagani. (2012). ***Manual de Operación y Mantenimiento, Línea de Lavado de Cuba***. México. Inédito.

Thathsarani Pilapitiya, N., & Sandaruwan Ratnayake, A. (2024). The world of plastic waste: A review. ***Cleaner Materials Journal, 11***, 1–23. https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). ***National Strategy to Prevent Plastic Pollution*** (EPA 530-R-24-006).https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/final_national_strategy_to_prevent_plastic_pollution.pdf

U. S. Environmental Protection Agency. (2022). ***Progress Toward Transformative Change, Building a Circular Economy for All*** (EPA 530-R-22-004). https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-09/EPA_Circular_Economy_Progress_Report_Sept_2022.pdf

World Business Council for Sustainable Development. (2023). ***Circular Transition Indicators V4.0 Metrics for business, by business***. https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/Circular_Transition_Indicators_v4.pdf

World Wide Fund for Nature. (2021). ***Plastics: The costs to society, the environment and the economy.*** https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/wwf_pctsee_report_english.pdf

World Wide Fund for Nature. (2023). ***¿Who Paid for Plastic Pollution?***. https://files.worldwildlife.org/wwfcmsprod/files/Publication/file/6lohrny0o2_ENGLISH_WWF_ENABLING_GLOBAL_EQUITY_WEBV.pdf