POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Metodología para evaluar el desempeño en economía circular en el reciclaje de PET en Cuba / (Methodology for evaluating performance in the circular economy in PET recycling in

Original
Metodología para evaluar el desempeño en economía circular en el reciclaje de PET en Cuba / (Methodology for evaluating performance in the circular economy in PET recycling in Cuba) / Gutiérrez Benítez, O., Mckenn Tavio, L., Jiménez Borges, R., Castro Rodriguez, D.J.. - In: UNIVERSIDAD Y SOCIEDAD. - ISSN 2218-3620. - ELETTRONICO. - 17:6(2025), pp. 1-9.

Availability:
This version is available at: 11583/3005928 since: 2025-12-17T08:35:38Z

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)

13 September 2026

UNIVERSIDAD & SOCIEDAD

Fecha de presentación: julio, 2025
Fecha de aceptación: septiembre, 2025
Fecha de publicación: diciembre, 2025

METODOLOGÍA

PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO EN ECONOMÍA CIRCULAR EN EL RECICLAJE DE PET EN CUBA

METHODOLOGY FOR EVALUATING PERFORMANCE IN THE CIRCULAR ECONOMY 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
[1]Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Cuba.
[2]Empresa de Recuperación de Materias Primas de Cienfuegos, Cuba.
[3]Politecnico di Torino (POLITO). Dipartimento Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT), Italy.
*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

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. *Universidad y Sociedad 17*(6) e5576.

RESUMEN

Los plásticos, incluido el Tereftalato de Polietileno (PET), generan efectos negativos en la sociedad, el medio ambiente y la economía; e imponen externalidades y costos adicionales. En este contexto, la Economía Circular usa un enfoque sistémico para mantener el flujo circular de recursos, mediante la recuperación, retención o adición de valor; y su implementación es una prioridad en el manejo y reciclaje de este recurso; pero existen vacios metodológicos. 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. El objetivo fue desarrollar una metodología para evaluar y mejorar el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET. Tiene como eje central los ocho pasos en la solución de un problema. Se incorporaron elementos de metodologías existentes; y fue robustecido con aportes metodológicos como 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 de un plan de acciones correctivas y de oportunidades de mejoras continua. Las herramientas son utilizadas bajo el principio de las convergencias metodológicas. Desde la dimensión metodológica se deriva una herramienta pertinente y viable; y la dimensión práctica se materializa a través de los beneficios técnicos, económicos, ambientales y sociales de la implementación del plan de acciones. Es generalizable en las organizaciones empresariales del país, en particular en la industria de procesos.

Palabras clave:

Metodología, Economía circular, Reciclaje, Tereftalato de polietileno, Norma ISO 59020, Indicadores de circularidad.

ABSTRACT

Plastics, including polyethylene terephthalate (PET), generate negative effects on society, the environment, and the economy, imposing externalities and additional costs. In this context, the Circular Economy uses a systemic approach to maintain the circular flow of resources through recovery, retention, or value addition. Its implementation is a priority in

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

the management and recycling of this resource; however, there are methodological gaps. The sequence of operations for PET recycling in Cuba includes the supply chain and a mechanical recycling plant, the only one of its kind. The objective was to develop a methodological tool to evaluate and improve Circular Economy performance in PET recycling. Its central axis is the eight steps in solving a problem. Elements of existing methodologies were incorporated; and was strengthened with methodological contributions such as the process approach, the use of Six Sigma (6σ) tools, circularity assessment, environmental impact assessment, and the technical, economic, environmental, and social pre-feasibility study of a corrective action plan and continuous improvement opportunities. The tools are used under the principle of methodological convergence. From the methodological dimension, a relevant and viable tool is derived; and the practical dimension is materialized through the technical, economic, environmental, and social benefits of implementing the action plan. It can be generalized to the country's business organizations, particularly in the process industry.

Keywords: Methodology, Circular Economy, Recycling, Polyethylene Terephthalate, ISO 59020 standard, Circularity Indicators.

INTRODUCCIÓN

La economía global se basa principalmente en la extracción, producción, uso y disposición de recursos; linealidad que constituye una barrera para el desarrollo sostenible ya que conduce al agotamiento de recursos, pérdida de biodiversidad, generación de residuos, emisiones y vertidos dañinos. Por su parte la Economía Circular es reconocida como un sistema económico con un enfoque sistémico para mantener el flujo circular de recursos, mediante la recuperación, retención o adición de valor (International Organization for Standardization [ISO], 2024a).

Lo anterior implica el cambio del modelo lineal prevaleciente (extraer, producir, consumir, desechar) hacia un modelo circular Multi-R (reducir, reutilizar, reciclar, repensar, rediseñar, refabricar, reparar, redistribuir, recuperar). Abarca los sistemas de producción y consumo que promueven la eficiencia en el uso de los materiales, agua y energía; y tiene en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales, y la extensión de su vida útil (U.S. Environmental Protection Agency [U.S. EPA], 2021; European Parliament, 2023).

La Economía Circular es transversal a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible. En particular el Objetivo 12 Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles establece en la meta 12.5 Reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

En este contexto, a nivel global la transición hacia la Economía Circular está siendo promovida e impulsada por el Pacto Verde Europeo, y el Nuevo Plan de Acción de Economía Circular por una Europa más limpia y más competitiva. Asimismo, por la Ley Pública Salvar Nuestros Mares 2.0 del Congreso de los Estados Unidos de América, y su Estrategia Nacional de Reciclaje.

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). Han sido publicadas las normas ISO 59004, ISO 59010, ISO 59014 e ISO 59020 (ISO, 2024a; International Organization for Standardization [ISO], 2024b; International Organization for Standardization [ISO], 2024c; International Organization for Standardization [ISO], 2024d).

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.

La Estrategia Ambiental Nacional de Cuba establece la necesidad de avanzar en la modernización de la infraestructura y la reconversión de las industrias, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de la Economía Circular, y de tecnologías y procesos industriales limpios. 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.

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 de la Era del Antropoceno (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).

En Cuba se reconoce la necesidad fortalecer la gestión racional de los plásticos de un solo uso, a lo largo de su ciclo de vida y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo; y en este ámbito la Resolución 96/2023 del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) 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).

La implementación y evaluación del desempeño en Economía Circular en el manejo y reciclaje del PET en Cuba es una necesidad para prevenir y minimizar la contaminación ambiental, y disponer de un producto exportable de alto valor agregado; pero existen vacios metodológicos.

En este contexto, el objetivo de la investigación es desarrollar una metodología para evaluar y mejorar el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de este recurso.

La investigación se contextualiza y justifica a partir de las políticas públicas para la transición hacia la Economía Circular, y de los vacios metodológicos existentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de los fundamentos teóricos-metodológicos, avances y tendencias en la transición hacia la Economía Circular, y su implementación en el manejo de los plásticos en el ámbito internacional (European Commission, 2018; WWF, 2021; U.S. EPA, 2024) y nacional (ONN, 2019b); y teniendo en cuenta los vacios metodológicos existentes, se construyó una metodología robusta para evaluar el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba (Figura 1).

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; ISO, 2024d), la evaluación de impacto ambiental (International 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

A continuación, se detalla la metodología:

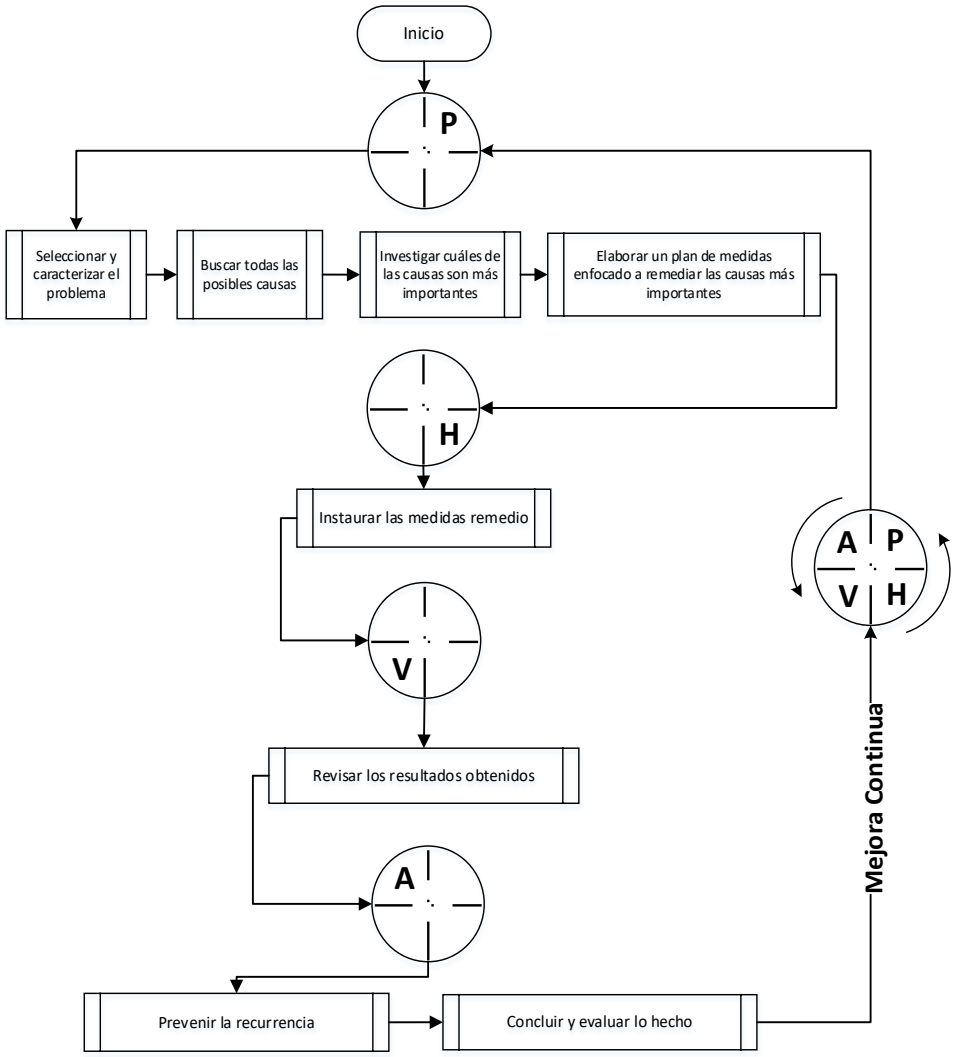
Paso 1: Seleccionar y caracterizar un problema (Etapa Planear).

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:

- 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.
- Proceso de la Planta de Reciclaje de PET:

Fig. 1: Diagrama heurístico de la metodología propuesta



Fuente: Elaboración propia, a partir de propuesta de Gutiérrez & De La Vara (2013)

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).

Se tuvieron en cuenta los Procedimientos establecidos (Empresa de Recuperación de Materias Primas Cienfuegos [ERMP], 2023); y se utilizaron los manuales técnicos y el catálogo de equipos del proveedor de la tecnología de proceso de la planta (Pagani, 2012).

Estudio del proceso de reciclaje de PET:

Se realizó el estudio documental y tecnológico del proceso de reciclaje de PET, con un enfoque basado en procesos, en correspondencia con la Norma ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements (ISO, 2015a), con la guía para una gestión basada en procesos de Beltrán et al. (2016), y de las herramientas básicas para la estrategia Seis Sigma (Gutiérrez & De la Vara, 2013). Se construyeron el Mapa de Proceso, el Diagrama de Proceso, la Ficha de Proceso, y el Diagrama SIPOC, por sus siglas en inglés Suppliers, Inputs, Process, Outputs and Customers.

Balance de flujo de materiales y de energía eléctrica:

Se tuvieron en cuenta los siete pasos para implementar la Producción Más Limpia (PML) propuestos por CEGESTI (2010). A partir del análisis del componente y elementos de entrada y salida identificados en el diagrama de flujo

SIPOC se construyó el balance de flujo de materiales y de energía eléctrica para las condiciones de diseño y para las condiciones de operación actuales.

Se utilizaron los registros históricos de producción, y se realizaron mediciones de las corrientes de entrada y salida de los materiales mediante pesajes y caudalímetros.

Se corroboraron con los datos tecnológicos de los manuales técnicos, y el catálogo de equipos del proveedor de la tecnología de proceso (Pagani, 2012).

Diagnóstico tecnológico del proceso de reciclaje de PET:

Se identificaron No Conformidades según la Norma Cubana NC ISO 15270:2019 Plásticos - Guía para la recuperación y reciclaje de plásticos (ONN, 2019a), que establece las condiciones técnicas que cubren la recuperación de plásticos, incluido el reciclaje; así como de los Procedimientos establecidos (ERMP, 2023).

Se identificaron los principales equipos tecnológicos instalados en la Planta de Reciclaje de PET, y las operaciones unitarias asociadas.

Se realizó el estudio de carga capacidad para identificar posibles cuellos de botella. También se identificaron los equipos tecnológicos críticos, atendiendo a la complejidad de operación y mantenimiento; y al estado técnico.

Diagnóstico ambiental del proceso de reciclaje de PET:

Se tuvo en cuenta el marco de referencia establecido para el sistema de gestión ambiental. Se utilizaron criterios establecidos para las auditorías y evaluación del desempeño ambiental de sitios y organizaciones.

Se realizó el diagnóstico del manejo de los residuos sólidos, líquidos y gaseosos generados, e identificados en el diagrama de flujo SIPCOC, según metodología para este fin del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA).

Asimismo, se tuvieron en cuentas recomendaciones técnicas para el diagnóstico tecnológico del estado, funcionalidad, y las condiciones de operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de residuales (STR).

Se sistematizaron los Informes de Monitoreo Ambiental de la Planta de Reciclaje de PET en correspondencia con la Norma Cubana NC 521: 2007 Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas-Especificaciones. Se identificaron No Conformidades teniendo en cuenta la legislación y normativas ambientales vigentes aplicables.

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

Se aplicó un cuestionario adaptado del propuesto por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Este instrumento fue completado mediante sesiones de lluvia o tormenta de ideas en la que participaron el equipo de investigadores; y directivos, especialista y operarios de la Empresa de Recuperación de Materias Primas (ERMP) Cienfuegos.

Indicadores de circularidad en el reciclaje de PET:

Se aplicó el ciclo de evaluación de la circularidad propuesto por Grunver Sostenibilidad (2023). Se identificaron, midieron y evaluaron indicadores de circularidad, según la Norma ISO 59020:2024 Circular economy - Measuring and assessing circularity performance (ISO, 2024d), y el marco de referencia establecido por el CTI v4.0 (Circular Transition Indicators version 4.0) (WBCSD, 2023). Se seleccionaron un total de 11 indicadores, divididos en cuatro grupos o módulos:

- Indicadores de Cerrar el Ciclo: Evalúa la capacidad para cerrar el ciclo de materiales. Se empezará su evaluación completando este primer módulo, cerrando su ciclo de materiales; donde los indicadores se mantienen como resultados por separado y no se combinan entre ellos.
  - % Circularidad material.
  - % Circularidad del agua.
  - % de energía renovable.
- Indicadores de Optimizar el Ciclo: Proporciona información sobre la criticidad de los materiales, la eficiencia en el uso de recursos y las estrategias de recuperación de mayor valor.
  - % de material crítico.
  - % tipo de recuperación.
  - Vida útil.
  - Circulación de agua en el lugar.
- Indicadores de Valor del Ciclo: Ilustra el valor agregado de los flujos de materiales circulares.
  - Productividad material circular.
  - Ingreso Circular Transition Indicators (CTI).
- Indicadores de Impacto del Ciclo: Mide el impacto de las estrategias circulares en el clima y la naturaleza.
  - Impacto de Gases Efecto Invernadero (GEI).
  - Impacto en la naturaleza.

Adicionalmente a los indicadores de circularidad establecidos fueron calculadas las emisiones de GEI (Flujo de entrada-Reciclaje y Flujo de salida-Reciclaje), determinadas por el consumo de combustible de la trasportación de la materia prima en la cadena de suministro, y de la trasportación del producto terminado.

Evaluación de impacto ambiental en el reciclaje de PET:

Se realizó la evaluación de los impactos ambientales potenciales a partir de las directrices y ayudas ofrecidas por la Norma ISO 14001:2015 Environmental management systems - Requirements with guidance for use; teniendo en cuenta la perspectiva del ciclo de vida, que incluye las etapas de adquisición de materias prima, producción, transporte/entrega, uso, tratamiento y disposición final.

Se tuvo en cuenta la Norma Cubana NC Guía 1316:2019 - Guía para reducir el impacto ambiental de los envases, embalajes y sus residuos (ONN, 2019a). Asimismo, el procedimiento para la gestión de los impactos ambientales negativos asociados a la recuperación de materias primas en Cienfuegos (Castro et al., 2016); y el Procedimiento P07-07 Identificación y Evaluación de Impactos Ambientales (ERMP, 2023).

Asimismo, las externalidades y costos adicionales inducidos a lo largo de su ciclo de vida sobre la sociedad, el medio ambiente y la economía (WWF, 2021).

Se hizo uso del diagrama de flujo SIPOC, por sus siglas en inglés Suppliers, Inputs, Process, Outputs and Customers; y de los balances de masa/energía eléctrica.

Se utilizaron los criterios de la Guía Metodológica de Evaluación de Impacto Ambiental, utilizando el software GAIA V1.0. Participaron en la evaluación de impacto ambiental el equipo de investigadores; y directivos, especialista y operarios de la Empresa de Recuperación de Materias Primas (ERMP) Cienfuegos, mediante sesiones de lluvia o tormenta de ideas.

Los resultados cualitativos y cuantitativos de los estudios técnicos realizados en este **Paso 1** permitieron identificar las no conformidades y anomalías en el desempeño en Economía Circular.

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

Se identificaron las causas raíces probables o potenciales de la situación problemática de la investigación, verificada en el **Paso 1.**

Se utilizaron las herramientas básicas para la estrategia Seis Sigma (Gutiérrez & De la Vara, 2013), entre ellas la Lluvia de Ideas y Diagrama de Ishikawa:

- Lluvia de ideas.
- Se realizaron sesiones de lluvia o tormenta de ideas en la que participaron el equipo de investigadores; y directivos, especialista y operarios de la UEB Planta de Plástico y de la Empresa de Recuperación de Materias Primas (ERMP) Cienfuegos.
- Diagrama de Ishikawa (o de causa-efecto).

Se construyó el diagrama de causa-efecto o de Ishikawa, un método gráfico que relaciona un problema o efecto con los factores o causas que posiblemente lo generan. La importancia de este diagrama radica en que obliga a buscar las diferentes causas que afectan el problema bajo análisis y, de esta forma, se evita el error de buscar de manera directa las soluciones sin cuestionar cuáles son las verdaderas causas. Se elaboró un diagrama del tipo 6 M, que consiste en agrupar las causas potenciales en seis ramas principales (6 M): métodos de trabajo, Mano de Obra, Materiales (Residuales), Maquinarias (Tecnologías), Mediciones y Medio Ambiente. Estos seis elementos definen de manera global todo proceso y cada uno aporta parte de la variabilidad y de la calidad de la salida del proceso. Para su elaboración se utilizó la herramienta de código abierto XMind 8.

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

A partir del análisis de resultados cualitativos y cuantitativos de los estudios técnicos detallados en los **Pasos 1 y 2**, y a juicio de los investigadores, los principales modos de fallos y sus efectos; y se estableció el orden de prioridad de las causas principales, según el número de prioridad de riesgos.

Se utilizó la herramienta de Análisis de Modo y Efecto de las Fallas (AMEF), propuesta por Gutiérrez & De La Vara (2013). La metodología de AMEF permite identificar, caracterizar y asignar una prioridad a las fallas potenciales de un proceso, a partir de un análisis de frecuencia, formas de detección y el efecto que provocan; estas fallas se jerarquizan, y para las fallas que vulneren más la confiabilidad del proceso será necesario generar acciones para eliminarlas o reducir el riesgo asociado con las mismas.

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

Se elaboró un plan de medidas correctivas y de oportunidades de mejoras continua del desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET. Se utilizó la herramienta de análisis crítico 5W2H, técnica que se utiliza para las propuestas de mejoras, y que consiste en un formato de matriz o tabla que se compone por los principales patrones de preguntas. Los 5 Ws son: what, why, where, when, who - en buen español: qué, por qué, dónde, cuándo y quién. Y los 2H son: How y How much - cómo y cuánto (Pérez & Lobelles, 2020).

Estudio de pre factibilidad técnico, economía, ambiental y social:

Se procedió teniendo en cuenta lo establecido en el Decreto 327 Reglamento del proceso inversionista y su legislación complementaria; y en la metodología para la elaboración de estudios de factibilidad del Ministerio de Economía y Planificación en Cuba.

Se realizó el estudio de pre factibilidad y pertinencia considerando los principales aspectos técnicos, económicos,

ambientales, y sociales que caracterizan el plan de medidas.

Para la estimación de los costos de inversión se utilizaron los criterios de estimación de la inversión de capital basado en el costo del equipamiento.

Para la estimación del costo total de operación y del estado de ingresos netos se utilizaron la ficha de costo y los datos contables del Dirección de Contabilidad y Finanzas de la Empresa de Recuperación de Materias Primas (ERMP) Cienfuegos.

En correspondencia con el reporte de WWF (2021) fueron considerados los efectos negativos del plástico en la sociedad, el medio ambiente y la economía; y los costos adicionales:

- Costos de gestión de residuos.
- Costo del servicio ecosistémico de la contaminación por plásticos en los ecosistemas marinos.

Se utilizó como base de cálculo los datos y costos estimados. El costo externo mínimo estimado según los elementos contabilizados arrojó una media de 8276.40 dólares por tonelada de plástico desechado.

Además, se consideró el costo evitado por pago de penalizaciones por parte de la Empresa Eléctrica debido al incumplimiento del factor de potencia eléctrica.

Se determinaron y evaluaron los Indicadores de Rentabilidad: Valor Actual Neto (VAN), Rentabilidad del Valor Actual Neto (RVAN), Tasa Interna de Rendimiento (TIR), y el Período de Recuperación Actualizado (PRA).

Se realizó un Análisis de Sensibilidad considerando un escenario crítico: Aumento costo de producción en +20 %, y una disminución del precio de venta en -20 %.

Los análisis de rentabilidad y de sensibilidad se realizaron para dos escenarios:

- Escenario A: Sin considerar las externalidades. Considerando las externalidades.
- Escenario B: Considerando las externalidades.

Se utilizaron las condiciones de financiamiento (Tasa de interés anual, plazo máximo de devolución del capital, y período de gracia) establecidas por las fuentes de financiamiento previstas para la moneda nacional y para la divisa.

Los cálculos se realizaron en pesos cubanos (CUP). En el caso de la partida de ingreso de ventas por exportaciones expresadas en dólares americanos (USD) se utilizó una tasa oficial aprobada para este fin por el Banco Central de Cuba (BCC) para el Grupo Empresarial del Reciclaje (GER) de 120 CUP/USD. En el caso de las partidas de costos de inversiones, pagos de servicio de deuda, y costos evitados por externalidades expresadas en dólares americanos (USD) se utilizó la tasa oficial aprobada por el Banco Central de Cuba (BCC) para el sistema empresarial de 24 CUP/USD.

Se elaboró un libro de cálculo en Microsoft Excel con los procedimientos económicos y financieros.

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 de la Empresa de Recuperación de Materias Primas (ERMP) Cienfuegos y del GER, con el acompañamiento de los autores.

CONCLUSIONES

Se construyó una metodología robusta para evaluar el desempeño en Economía Circular en el reciclaje de PET en Cuba; teniendo en cuenta los fundamentos teóricos-metodológicos, avances y tendencias en la transición hacia la Economía Circular; y los vacios metodológicos en su implementación en el manejo de los plásticos.

Tiene como eje central los ocho pasos en la solución de un problema, basado en el Ciclo de la Calidad PHVA. Se incorporaron elementos de metodologías existentes para la aplicación de la Producción Más Limpia (PML) y la Economía Circular; y fue robustecido con aportes metodológicos como el enfoque a proceso, el uso de las herramientas básicas de la estrategia de mejora continua Seis Sigma (6σ), la evaluación de la circularidad según el estándar ISO 59020 y sus herramientas de apoyo, la evaluación de impacto ambiental, que permitieron identificar las no conformidades y anomalías en el desempeño en Economía Circular. Asimismo, 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. Las herramientas generales y específicas multidisciplinarias para los estudios ingenieros fueron utilizadas bajo el principio de las convergencias metodológicas.

La metodología se contextualiza y justifica a partir de las políticas públicas para la transición hacia la Economía Circular, y de los vacios metodológicos. Desde la dimensión metodológica se deriva una herramienta pertinente y viable; y la dimensión práctica se materializa a través de los beneficios técnicos, económicos, ambientales y sociales de la implementación de un plan de acciones correctivas y de oportunidades de mejoras continua del desempeño. 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

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

Castro Rodríguez, D. J., Tejeda Sánchez, O., & Gutiérrez Benítez, O. (2016). Procedimiento para la gestión de los impactos ambientales negativos asociados a la recuperación de materias primas en Cienfuegos, Cuba. ***Revista Infociencia, 20*** (1), 1-12. https://www.ingentaconnect.com/content/doaj/10295186/2016/00000020/00000001/art00010

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. (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

European Parliament. (2023). ***Circular economy: definition, importance and benefits***. https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2023/5/story/20151201STO05603/20151201STO05603_en.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 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, https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s43615-024-00370-w.pdf

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. (2024a). ***Circular economy - Vocabulary, principles and guidance for implementation*** (ISO Standard No. 59004: 2024). https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:59004:ed-1:v1:en

International Organization for Standardization. (2024b). ***Circular economy - Guidance on the transition of business models and value networks*** (ISO Standard No. 59010:2024). https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:59010:ed-1:v1:en

International Organization for Standardization. (2024c). ***Environmental management and circular economy -Sustainability and traceability of the recovery of secondary materials- Principles, requirements and guidance*** (ISO Standard No. 59014:2024). https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:59014:ed-1:v1:en

International Organization for Standardization. (2024d). ***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

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.

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

Pérez Álvarez, H. M., & Lobelles Sardiñas, G. O. (2020). Metodología para la transición de NC ISO/IEC 17025:2017 en Refinería Cienfuegos S.A mediante técnicas prospectivas. ***Revista Universidad y Sociedad, 12***(2), 160–173. https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1495/1510

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, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397624000042/pdfft?md5=b66fe2f079853373d8430792715bdf64&pid=1-s2.0-S2772397624000042-main.pdf

U. S. Environmental Protection Agency. (2021). ***National Recycling Strategy, Part One of a Series on Building a Circular Economy for All*** (EPA 530-R-21-003). https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/final-national-recycling-strategy.pdf

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

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