Naturaleza y TECNOLOGÍA
Número Especial "Pasado, presente y futuro del PSE y sus aplicaciones"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

¿CÓMO APLICAR LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN SIN QUEDAR EN EL DISCURSO?

Claudia Gutiérrez Antonio [a,*], Salvador Hernández [b]

[a] Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Avenida de las Ciencias s/n esquina con Villas del Mesón, Juriquilla, Querétaro, 76230, México. claudia.gutierrez@uaq.mx; claugtez@gmail.com

[b] Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.

Resumen

Actualmente, la sociedad enfrenta complejas problemáticas, entre las que se encuentran el cambio climático, el declive de los combustibles fósiles, y la contaminación. En este contexto, se ha propuesto un nuevo concepto de desarrollo, en el cual el avance económico permita una mejora en la calidad de vida de las personas y el cuidado del medio ambiente. Para tal fin, se debe cambiar del modelo de economía lineal hacia uno circular. En el modelo de economía circular se busca mantener los recursos ya extraídos en las mejores condiciones durante el mayor tiempo posible; ello conlleva una menor explotación de nuevos recursos, así como la satisfacción de las necesidades de la sociedad. Si bien el objetivo es claro, la clave radica en la forma de implementarlos. Por ello, en este trabajo se presentan los principios de la economía de la economía circular, así como las estrategias que pueden implementarse en los procesos de producción del sector industrial. De esta manera, los procesos actuales de producción podrán ser sustentables, sumando así al desarrollo sostenible.

Palabras clave: economía circular; procesos sustentables; intensificación de procesos; optimización de procesos; valorización de residuos.

Naturaleza y TECNOLOGÍA

Número Especial "Pasado, presente y futuro del PSE y sus aplicaciones"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

¿HOW TO APPLY THE CIRCULAR ECONOMY TO PRODUCTION PROCESSES—BEYOND MERE RHETORIC?

Abstract

Nowadays, society faces complex problems, including climate change, dwindling fossil fuel resources, and pollution. In this context, a new concept of development has been proposed, in which economic progress will lead to an improved quality of life and environmental protection. To achieve this, a shift from a linear to a circular economy model is necessary. In short, the circular economy model seeks to maintain extracted resources in optimal condition for as long as possible. This entails less exploitation of new resources and the continued satisfaction of society's needs. While the objective is clear, the key lies in how these principles are implemented. Therefore, this paper presents the principles of the circular economy and the strategies that can be implemented in the production processes of the industrial sector. In this way, current production processes can become sustainable, thus contributing to sustainable development.

Keywords: circular economy; sustainable processes; process intensification; process optimization; waste valorization.

1. Introducción

Actualmente, la sociedad emplea diversos productos y servicios para el desarrollo de sus actividades tanto domésticas como laborales. Todos estos bienes y servicios se originan en procesos de producción, los cuales se definen como una serie ordenada de operaciones a través de las cuales las materias primas se convierten en productos y/o servicios. A su vez, los procesos de producción a gran escala nacen con la revolución industrial (Simandan, 2009), y se convierten el núcleo de la industrialización, ya que en ella los bienes y servicios se producen a gran escala (Trinder, 2021; Sousa y col., 2027). En ese suceso histórico, las formas de producción evolucionaron de los talleres artesanales a la producción en serie, siendo ésta última una forma más eficiente de producir (Simandan, 2009). Esto fue posible gracias a un conjunto de factores técnicos (la invención de la máquina de vapor), jurídicos (cambios en la propiedad), económicos (incremento de comercio), y de mercado (competitividad entre los países) (Trinder, 2021).

El establecimiento y expansión de los procesos de producción impulsó la industrialización, y, con ello, el crecimiento de la economía. Este crecimiento se ha medido históricamente como el Producto Interno Bruto (PIB), también conocido como GDP (*Gross Domestic Product* por sus siglas en inglés); este indicador es registrado por el Banco Mundial. El primer registro del PIB data de 1960, año en el cual se reportó un valor de 1.37 billones de USD (WB, 2026). En contraparte, en 2024 el PIB reportado fue de 110.98 billones de USD; esto representa un incremento de 81 veces el PIB en 64 años. Todo este crecimiento de los sectores económicos, y de los procesos de producción, se ha soportado en el consumo de energía. En 1960, el consumo mundial de energía fue de 38,646.49 TWh (WEC, 2026); en contraparte, en 2024 se alcanzó la cifra de 181,912 TWh, valor que representa 4.7 veces el consumo de energía de 1960 (Our World in Data, 2026). No obstante, el crecimiento de los sectores económicos no se ha sostenido solamente en el consumo de energía; para lograr este crecimiento también se han explotado diferentes recursos naturales no energéticos, tanto renovables como no renovables. A este paradigma de crecimiento se le conoce como modelo de economía lineal; en éste se asume que la demanda y el crecimiento económico son constantes, y que los recursos tanto materiales como energéticos son infinitos. Es importante recordar que este paradigma económico nace en una época en la cual la esperanza de vida era de alrededor de 35 años, consecuencia de la pobreza de recursos materiales y de conocimiento en cuanto a la naturaleza de las patologías; por ello, la población prácticamente permanecía constante (Livi, 2021).

Bajo el modelo de economía lineal, el crecimiento de los sectores económicos permitió el desarrollo de la ciencia y la tecnología; esto a su vez ha mejorado y facilitado la calidad de vida de las personas. Como ejemplos pueden citarse los desarrollos en medicina que han prácticamente duplicado la esperanza de vida, así como las tecnologías de información y comunicación que conectan a nivel internacional a la sociedad. Por otra parte, el crecimiento, bajo este paradigma, ha causado un impacto negativo en el medio ambiente; algunas consecuencias incluyen la pérdida del 90% de la biodiversidad, y la triplicación de la extracción de los recursos naturales (UN, 2019).

Por lo anterior, en la década de los 70 tuvo lugar un proceso de reflexión en torno a los

sistemas de producción, la economía, y el medio ambiente; de dicho análisis se concluye que no es posible tener un crecimiento infinito en un planeta finito. Esto llevó a la definición de un nuevo concepto de desarrollo. Así, en el año 1987 se presentó el concepto de desarrollo sostenible en el informe "Nuestro Futuro Común"; éste fue generado por la Comisión Brundtland, constituida por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 1983 (CEPAL, 2026). En dicho informe se define al desarrollo sostenible como el desarrollo que permite satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro de satisfacer sus propias necesidades (CEPAL, 2026); de esta manera, el desarrollo sostenible busca atender tanto las demandas por una agenda de protección del medio ambiente como las de asegurar el desarrollo de los países con menor nivel de desarrollo (CEPAL, 2026).

Posteriormente, en 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas propuso la Agenda 2030 como un plan para alcanzar el desarrollo sostenible (ONU, 2026). La Agenda 2030 consta de 17 objetivos relacionados con las dimensiones del desarrollo sostenible: la economía, el desarrollo social y el medio ambiente (ONU, 2021). Para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible, propuestos en la Agenda 2030, debe adoptarse un nuevo modelo: la economía circular (ONU, 2021).

Así, en este artículo se presentará el concepto de economía circular, sus principios, así como los procesos de producción industriales. Con base en ello, se discutirá la aplicación de los principios de economía circular a los procesos de producción industrial. De esta manera, se contará con elementos para mejorar los procesos industriales, contribuyendo así a alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible.

2. Economía circular

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, la economía circular plantea un enfoque completamente distinto que permite estimular el crecimiento económico y generar empleo sin comprometer al medio ambiente, posicionándose como piedra angular para una recuperación económica resiliente y con bajas emisiones de carbono (ONU, 2021).

Con base en la literatura, no existe evidencia clara de que el concepto de economía circular tenga un origen o creador único (Winans y

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

col., 2017). De hecho, se han reportado diversas publicaciones para analizar definiciones existentes, intentando unificarlas y establecer principios comunes (Kirchherr y col., 2017; Kirchherr y col., 2023; Kirchherr y col., 2026). Sin embargo, la economía circular puede definirse como un cambio de paradigma que va desde las prácticas lineales de uso de recursos hacia prácticas circulares que enfatizan la gestión regenerativa y responsable de los recursos, generando valor social, económico y ambiental, al tiempo que reconceptualizan los residuos como un recurso valioso (Sreekumar y col., 2024).

Así, en el concepto de economía circular se busca que, una vez extraídos los recursos naturales, éstos puedan mantenerse durante el mayor tiempo posible con la mejor calidad para que puedan seguir siendo utilizados. Esto implica que los residuos, generados en un entorno doméstico o industrial, sean vistos como materiales que pueden emplearse en otros entornos o aplicaciones. Un aspecto importante del modelo de economía circular es que no sólo incluye un cambio respecto a la forma de producción, sino también al consumo. En este aspecto es en donde la sociedad en su conjunto puede contribuir al desarrollo sostenible, independientemente de su rol laboral.

La economía circular tiene seis principios fundamentales: reducir, reusar, reacondicionar, reciclar, recuperar, y revalorizar (Figura 1).

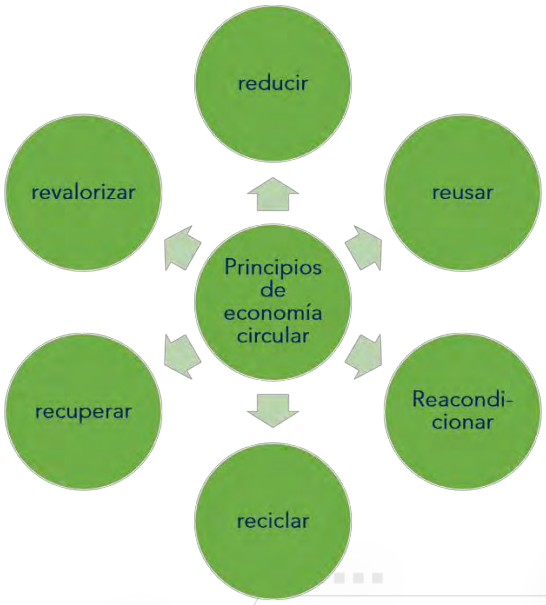


Figura 1. Principios de la economía circular.

Los principios antes mencionados forman parte del modelo 6R, el cual sirve como un marco práctico para procesos de producción sustentable y gestión de residuos (Dung y Hong, 2021; ISO, 2026; ONU, 2026). Cabe mencionar que este modelo se encuentra alineado con la norma ISO 14001 y con los Objetivos de Desarrollo sostenible (Dung y Hong, 2021; ISO, 2026; ONU, 2026). El modelo 6R se elige en este trabajo ya que estos principios pueden aplicarse en los diferentes sectores económicos para:

- Disminuir el uso de recursos o la generación de residuos (reducir)
- Emplear los materiales para el mismo uso o con otra finalidad (reusar)
- Modificar para mantener la calidad de los materiales (reacondicionar)
- Procesar un material usado para generar el mismo tipo de material (reciclar)
- Extraer o separar un material de interés a partir de residuos para ser utilizado nuevamente (recuperar)
- Generar un nuevo producto o servicio (energía, por ejemplo) a partir de un material o residuo (revalorizar).

El principio de reducir conlleva acciones para minimizar el uso de recursos (materiales y energéticos) o bien disminuir la generación de residuos en el proceso de producción. Esto posibilita reducir el impacto ambiental asociado a estos procesos, al mismo tiempo que se contribuye a preservar los recursos naturales.

Por otro lado, el principio de reusar implica el uso del material para una función similar o distinta de la original. En este caso, las modificaciones realizadas al material pueden ser mínimas, o inclusive no necesarias. Así, el material puede emplearse nuevamente, reduciendo la necesidad de adquirir nuevos bienes para ello.

El reacondicionamiento de un material conlleva modificaciones menores para que pueda emplearse nuevamente para su función original. Esto conlleva reparación o bien reposición de componentes; lo anterior posibilita prolongar la vida útil del material, con un impacto ambiental menor a aquel derivado de producirlo nuevamente.

En el caso del reciclaje, los materiales son recolectados e incorporados a procesos de producción ya existentes para obtener el mismo tipo de material. De esta manera, los materiales pueden emplearse nuevamente para su función original, evitando la

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

extracción de nuevos recursos materiales y energéticos.

Los materiales también pueden ser recuperados, para de esta manera volver a ser empleados. En este caso, se deben diseñar procesos que posibiliten la separación y/o extracción de los mismos. Esto conlleva el uso de recursos materiales y energéticos para su implementación; por ello, debe garantizarse que dichos procesos sean eficientes.

Finalmente, se tendrán materiales que no pueden ser reusados, reacondicionados, reciclados o recuperados. En este caso, los materiales pueden ser revalorizados. La valorización de residuos se define como el conjunto de acciones asociadas para dar valor a los residuos transformados, bajo criterios de responsabilidad compartida, manejo integral, eficiencia ambiental, tecnológica y económica (DOF, 2026).

Estos seis principios se derivan de la comprensión de que el planeta es finito, y que sus recursos naturales deben usarse de manera eficiente, buscando además que éstos puedan regenerarse y conservarse. Finalmente, los recursos naturales, tanto renovables como no renovables, sostienen a la sociedad y los procesos de producción. Este tema se discute en la siguiente sección.

3. Procesos de producción

Los procesos de producción se definen como la secuencia ordenada y estructurada de operaciones de acondicionamiento, transformación, separación y transporte que permiten convertir una materia prima en uno o más productos de interés. Los procesos de producción permiten obtener productos no presentes en la naturaleza, o presentes, pero no en las cantidades requeridas, a partir de insumos disponibles en la naturaleza. Por ello, para que estas transformaciones puedan llevarse a cabo se requieren no sólo recursos materiales sino también energéticos. Esto conlleva que todos los procesos de producción tienen un impacto ambiental. Por ende, deben buscarse aquellos que tengan el mínimo impacto ambiental.

La escala de los procesos de producción depende de la demanda del producto en el mercado (Adams, 2018). Usualmente, es común intentar maximizar la escala de producción con el fin de maximizar la eficiencia, minimizar los costos de capital por unidad producida y lograr economías de

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

escala (Adams, 2018). Si la demanda es muy alta, los procesos de producción operan de manera continua, ya que de esta forma es posible satisfacer la alta demanda y lograr costos de producción reducidos; en este caso, los procesos usualmente operan alrededor de 8,500 horas anuales (Peters y col., 2003). En contraparte, los procesos de producción operan por lotes para la generación de productos con reducida demanda (Peters y col., 2003). Un ejemplo de un proceso de producción continuo es la industria petrolera, en la cual se obtienen combustibles para diferentes aplicaciones, entre las que destaca el transporte. Por otro lado, en la industria farmacéutica, los medicamentos son usualmente de reducida demanda, en comparación con los combustibles, debido a la diversidad de padecimientos y pacientes.

En los procesos de producción pueden transformarse flujos de materiales continuos, como es el caso de las industrias química o petroquímica, o bien discretos, como es el caso de la industria de la manufactura.

En los procesos donde se emplean flujos de materiales continuos se pueden listar operaciones unitarias de acondicionamiento, transformación, purificación y transporte. Típicamente, las operaciones de transformación se llevan a cabo en reactores, donde procesos de conversión químicos, bioquímicos, termoquímicos o biológicos pueden realizarse. Por su parte, las operaciones de acondicionamiento incluyen reducción de tamaño, tamizado, intercambio de calor, y agitación. En el caso de las operaciones de separación se tiene un catálogo más amplio, ya que el principio dependerá de las fases involucradas. Dentro de las operaciones de separación se incluyen secado, extracción sólido-líquido, extracción líquido-líquido, destilación, absorción, adsorción, cristalización, evaporación, filtración, y sedimentación. Para el transporte de materiales se cuenta con diferentes alternativas en función de las fases involucradas; en ellas se pueden listar compresores, bombas, y bandas transportadoras.

En los procesos donde se emplean flujos de materiales discretos se pueden listar operaciones unitarias de ajuste de tamaño, forma o propiedades de materiales. En el caso del ajuste de tamaño se mencionan a las operaciones de corte, ensamble y soldadura. Para el caso de las operaciones de forma se pueden listar el laminado, termoformado, extrusión, doblado, forja, o maquinado. Finalmente, operaciones como el temple,

revenido y recocido pueden citarse como tecnologías de tratamiento de materiales.

Cabe mencionar que, si bien el presente artículo se enfoca en los procesos de producción, éstos no son entes aislados. La adecuada operación de un proceso de producción depende de su cadena de suministro; ésta se define como todos los eslabones necesarios desde la generación de las materias primas hasta la obtención de los productos. Por ende, tanto los procesos de producción como sus cadenas de suministro deben ser evaluados en términos técnicos, económicos y de sustentabilidad. Por otro lado, el análisis completo del ciclo de vida del producto también es un aspecto importante. El análisis del ciclo de vida comprende desde las materias primas que se usan para generarlo hasta el fin de su vida útil. Estas evaluaciones y análisis son requeridos para asegurar que efectivamente se está contribuyendo a la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible.

Sin importar si los procesos son continuos o discretos, todos ellos comparten la característica de emplear recursos materiales y energéticos para la generación de diversos productos. De igual manera, la mayor parte de los procesos productivos que operan actualmente nacieron bajo el paradigma de la economía lineal. Como se mencionó anteriormente, se debe realizar la transición de un modelo lineal a uno circular, para así alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible. La aplicación de los principios de economía circular en los procesos productivos se discute en la siguiente sección.

4. Aplicación de principios de economía circular a los procesos de producción

Como se mencionó anteriormente, la economía circular tiene seis principios fundamentales: reducir, reusar, reacondicionar, reciclar, recuperar, y revalorizar. Estos principios pueden aplicarse en los procesos de producción, lo cual permite contar con procesos sustentables de producción. Los procesos sustentables de producción se definen como aquellos en los que se realiza un uso eficiente de recursos materiales y energéticos para la generación de los productos de interés. Esto conlleva que en dichos procesos la cantidad de residuos generados, como su impacto ambiental, se reduce. Adicionalmente, los equipos deben ser compactos y eficientes, lo cual también contribuye a que estos procesos sean más seguros. Así, para contar con procesos

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

sustentables de producción deben aplicarse los principios de reducir, reusar, reacondicionar, reciclar, recuperar, y revalorizar.

La aplicación del principio de reducción puede realizarse mediante la optimización del proceso de producción. La optimización implica encontrar la mejor solución factible de un conjunto de posibles soluciones para un problema determinado (Valencia-Rivera y col., 2024). Existen tres principales tipos de optimización, según la herramienta empleada para la búsqueda de la mejor solución factible:

- Optimización clásica o matemática, la cual se basa en algoritmos de búsqueda que emplean, en la mayoría de los casos, funciones matemáticas conocidas y sus derivadas (Li, 2023).
- Optimización metaheurística, la cual se basa en algoritmos de búsqueda inspirados en un marco algorítmico independiente del problema, empleando usualmente la emulación de fenómenos de la naturaleza (Khan y col., 2023).
- Optimización estadística, la cual se basa en el empleo de datos experimentales generados mediante diseños de experimentos para determinar la solución óptima (McKelvey y Neves, 2021).

Es importante mencionar que la selección específica del tipo de optimización a emplear depende de la información disponible, así como del tipo de problema que se desea resolver. De allí que todas las estrategias son valiosas y deben considerarse para seleccionar la más apropiada al problema en específico que se desea resolver.

Además, en términos del uso de energía la reducción puede provenir de dos principales herramientas: la intensificación de procesos y la integración energética. La intensificación de procesos es una estrategia que permite aumentar la productividad, reducir el consumo de energía y lograr condiciones de operación más seguras, mediante el desarrollo de equipos más eficientes o multifuncionales (Anxionnaz y col., 2008). Sin embargo, estos beneficios deben ser evaluados, ya que la literatura muestra que no todas las propuestas son factibles. Por su parte, la integración de energía se enfoca en el aprovechamiento de la energía circulante en el proceso para disminuir, al menos de manera parcial, el consumo de servicios auxiliares.

Cabe añadir que, en este principio, la reducción también puede enfocarse en disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. En este caso, se busca el uso de energías alternas generadas con los residuos disponibles en el proceso; por ejemplo, generación de energía a partir de biomasa residual, corrientes de agua o aire que se liberan a la atmósfera, o uso de radiación solar para satisfacer los requerimientos del proceso. La disminución de la dependencia de fuentes no renovables de energía incrementa la resiliencia del proceso de producción (Monie y col., 2025).

Por otro lado, la aplicación del principio de reusar implica la transferencia de materiales a otros sectores; éstos emplearán los materiales para una función distinta con mínimo procesamiento. De manera análoga, el principio de reciclaje también conlleva la transferencia de materiales a un proceso de producción dedicado a tal fin. En ambos casos, se debe definir una ruta óptima para el traslado de dichos materiales, en donde la optimización de procesos es la herramienta apropiada (Mohammadi y col., 2018).

Referente al principio de reacondicionar, en este caso se puede acoplar en un proceso de producción existente donde se fabrique el producto que se busca reacondicionar. Esto posibilitará contar con los insumos requeridos para la rehabilitación de los productos, minimizando los costos de logística, así como de infraestructura. Esto implicaría el establecimiento de una línea de procesamiento paralela a la línea de producción principal. En dicha línea paralela se emplearían recursos del proceso principal, y se añadirían operaciones de reacondicionamiento.

La aplicación del principio de recuperación conlleva el diseño de un proceso o una operación unitaria. Es decir, la recuperación de un material puede implicar una operación adicional, como evaporación, o un pequeño proceso, como filtrado y evaporación, por ejemplo. Finalmente, la revalorización de residuos conlleva también el diseño de un nuevo proceso de producción para generar energía o un producto de valor de agregado. En ambos casos, este proceso adicional se debe localizar en las instalaciones del proceso original, para así evitar la necesidad de una cadena de suministro adicional. Un aspecto por destacar es que la valorización de residuos puede servir para generar energía o materiales que pueden emplearse dentro del mismo proceso de producción.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Es importante mencionar que las estrategias antes mencionadas deben ser propuestas y evaluadas; la evaluación debe considerar indicadores económicos, de sustentabilidad, técnicos y sociales. En el aspecto económico, uno de los indicadores más ampliamente utilizado es el costo total anual; éste se calcula como la suma de los costos de operación más los costos de inversión (Peters y col., 2003). En el aspecto técnico, el cumplimiento del producto resultante con la normativa aplicable es el indicador más importante por satisfacer (Gómez-Castro y Gutiérrez-Antonio, 2022; Gutiérrez-Antonio y Gómez-Castro, 2022). En el aspecto de la sustentabilidad, se puede evaluar mediante el cálculo de las emisiones de CO_2 debidas a la operación, o bien se puede realizar un estudio más completo mediante el análisis del ciclo de vida (Gómez-Castro y Gutiérrez-Antonio, 2022; Gutiérrez-Antonio y Gómez-Castro, 2022). Finalmente, la evaluación de los impactos sociales puede realizarse con metodologías como el índice de desarrollo humano, que es una medida resumen del logro promedio en dimensiones clave del desarrollo humano: una vida larga y saludable, poseer conocimientos y disfrutar de un nivel de vida digno (UNDP, 2026). Cabe añadir que la evaluación debe realizarse tanto en el proceso base definido como en las mejoras realizadas al mismo; esto permitirá contar con una referencia clara y cuantitativa.

De manera simplificada, la Figura 2 muestra una ruta propuesta para la implementación de las estrategias de economía circular en los procesos industriales. El primer paso consiste en realizar un diagnóstico del proceso, lo cual permitirá identificar los recursos materiales y energéticos presentes en el proceso de producción. Estos residuos serán las materias primas susceptibles de ser usadas; por ejemplo, residuos líquidos que contienen un solvente de interés.

Posteriormente, se deben identificar las necesidades industriales para la recuperación o generación de productos de interés. Con base en ello, así como en la frecuencia de generación es posible jerarquizar las acciones. Para cada producto identificado se debe realizar la síntesis del proceso, con su respectiva validación a nivel experimental y su modelado. Por ejemplo, proponer un proceso para la recuperación del solvente antes mencionado. Posteriormente, con base en el modelado del proceso deben realizarse las evaluaciones técnicas (cuánto del producto se genera), económicas (cuánto cuesta producir esa cantidad), y ambientales

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

(cuál es el impacto ambiental por dicha producción). Esta evaluación permitirá contar con información para la toma de decisiones respecto de la implantación del proceso sintetizado. De esta manera es posible sumar de forma efectiva al desarrollo sostenible.

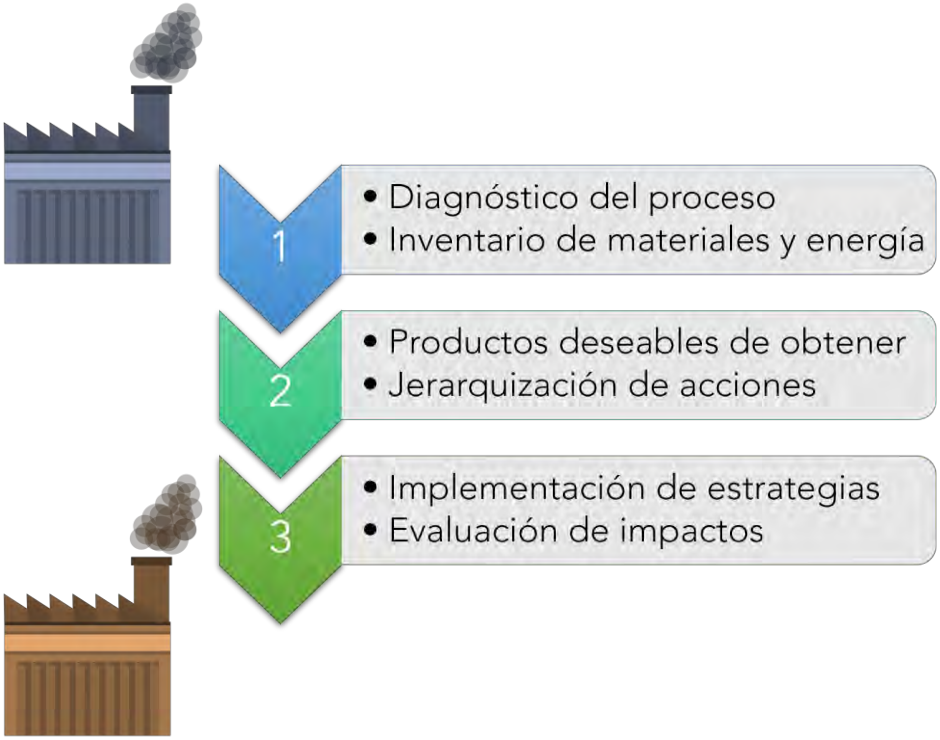


Figura 2. Ruta simplificada para la implementación de estrategias de economía circular en los procesos de producción.

5. Conclusiones

La sociedad demanda productos y servicios para la realización de sus actividades cotidianas. Estos productos y servicios se originan en procesos de producción, los cuales deben orientarse al modelo de economía circular. Para tal fin deben aplicarse los principios de reducir, reusar, reacondicionar, reciclar, recuperar, y revalorizar. La aplicación de estos principios se realiza mediante optimización de procesos, intensificación de procesos, integración energética, y uso de energías alternas. Es importante mencionar que las alternativas propuestas deben ser evaluadas considerando aspectos técnicos, económicos, sociales y de sustentabilidad. Esto permitirá seleccionar aquellas alternativas que efectivamente mejoren el proceso. De esta manera, los procesos actuales de producción podrán ser

sustentables, sumando así al desarrollo sostenible.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Universidad Autónoma de Querétaro y la Universidad de Guanajuato para el desarrollo de este trabajo.

Referencias bibliográficas

Anxionnaz, Z., Cabassud, M., Gourdon, C., y Tochon, P. (2008). Heat exchanger/reactors (HEX reactors): Concepts, technologies: State-of-the-art. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(12), 2029-2050. https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.06.012.

CEPAL - Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2026). *Acerca de Desarrollo Sostenible*. https://www.cepal.org/es/temas/desarrollo-sostenible/acerca-desarrollo-sostenible

DOF - Diario Oficial de la Federación (2026). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf

Dung, N.Y.P., y Hong, T.H. (2021). Circular Economy Policies of Some Asian Countries and Recommendations for Vietnam, *Proceedings of the International Conference on Emerging Challenges: Business Transformation and Circular Economy (ICECH 2021)*. https://doi.org/10.2991/aebmr.k.211119.045

Gómez-Castro, F.I., Gutiérrez-Antonio, C. (2022). *Biofuels and Biorefining. Volume 1: Current Technologies for Biomass Conversion*, Elsevier.

Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F.I. (2022). *Biofuels and Biorefining. Volume 2: Intensification Processes and Biorefineries*, Elsevier.

ISO (2026). *ISO 14001:2026, Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso*, ISO, https://www.iso.org/es/norma/14001.

Khan, M.N., Sinha, A.K., y Anand, A. (2023). Use of metaheuristics in industrial development and their future perspectives. En Seyedali Mirjalili, Amir H. Gandomi (eds.). *Comprehensive Metaheuristics* (pp. 195-202), Academic Press.

Kirchherr, J., Reike, D., y 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.

Kirchherr, J., Yang, N.H.N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M.J., y Hartley, K. (2023). Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 107001. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001.

Kirchherr, J., Nienhuis, B., Clement, J., y Schultz, F.C. (2026). Conceptualizing the sharing economy: An analysis of 201 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 233, 108997. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2026.108997.

Li, Q. (2023). A comprehensive survey of sparse regularization: Fundamental, state-of-the-art methodologies and applications on fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*, 229, Part A, 120517, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120517.

Livi Bacci, M. (2021). La evolución de la población mundial. *Revista OC:TL,* Gran Angular, 4.

McKelvey, F., y Neves, J. (2021). Introduction: optimization and its discontents. *Review of Communication*, 21(2), 95–112. https://doi.org/10.1080/15358593.2021.1936143.

Mohammadi, M., Harjunkoski, I., Mikkola, S., y Jämsä-Jounela, S.L. (2018). Optimal planning of a waste management supply chain. En M.R. Eden, M.G. Ierapetritou, G.P. Towler (Eds). *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 44 (pp. 1609-1614), Elsevier.

Monie, S.W., Gustafsson, M., Önnered, S., y Guruvita, K. (2025). Renewable and integrated energy system resilience – A review and generic resilience index. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 215, 115554. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115554.

Peters, M., Timmerhaus, K., y West, R. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Mc Graw-Hill.

Simandan, D. (2009). Industrialization. En R. Kitchin, N. Thrift (Eds). *International*

Encyclopedia of Human Geography (pp. 419-425), Elsevier.

Trinder, B. (2021). European Industrial Heritage: The International Story, ERIH – European Route of Industrial Heritage e.V.

ONU - Organización de las Naciones Unidas (2021). *La economía circular: in modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente*. https://news.un.org/es/story/2021/03/1490082

ONU - Organización de las Naciones Unidas (2026). *¿En qué consiste el desarrollo sostenible?*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2023/08/what-is-sustainable-development/

Our World in Data (2026). *Energy mix*. https://ourworldindata.org/energy-mix

Sreekumar, N.M., Sudheep, N.M., y Radhakrishnan, E.K. (2024). Framework for implementing circular economy in agriculture. En E.K. Radhakrishnan, A. Kumar, R. Aswani (Eds.). *Developments in Applied Microbiology and Biotechnology - The Potential of Microbes for a Circular Economy* (pp. 25-52). Academic Press.

UN – United Nations (2019). *Global resources outlook 2019: natural resources for the future we want*. https://digitallibrary.un.org/record/4047319?v=pdf

UNDP - United Nations Development Programme (2026). *Human Development Index (HDI)*. https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicies/HDI

Valencia-Rivera, G.H., Benavides-Robles, M.T., Vela Morales, A., Amaya, I., Cruz-Duarte, J.M., Ortiz-Bayliss, J.C., y Avina-Cervantes, J.G. (2024). A systematic review of metaheuristic algorithms in electric power systems optimization. *Applied Soft Computing*, 150, 111047. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111047.

WEC - World Energy Council (2026). *Publications*. https://www.worldenergy.org/publications

Winans, K., Kendall, A., y Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, Part 1, 825-833. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

WB - World Bank (2026). *GDP (current US$)*. https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD