

# ESTRATEGIAS PARA IMPLEMENTAR PROCESOS SUSTENTABLES DE PRODUCCIÓN

STRATEGIES TO IMPLEMENT SUSTAINABLE PRODUCTION  
PROCESSES

Valeria Caltzontzin Rabell<sup>1</sup>  
Araceli Guadalupe Romero Izquierdo<sup>1</sup>  
Sergio Iván Martínez Guido<sup>1</sup>  
Efraín Quiroz Pérez<sup>1</sup>  
Claudia Gutiérrez Antonio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma  
de Querétaro.

\*claudia.gutierrez@uaq.mx

# Resumen

Hasta nuestros días los esfuerzos de la comunidad científica internacional se encuentran orientados a lograr un desarrollo sostenible. En ese tenor, la Organización de las Naciones Unidas ha propuesto diecisiete objetivos, algunos relacionados con el sector industrial. La mayoría de las empresas productivas fueron concebidas bajo el concepto de economía lineal, donde tanto los recursos como la demanda son vastos. Este paradigma se ha encaminado hacia una economía circular, en la que las materias primas mantendrán condiciones óptimas el mayor tiempo posible para reintegrarse en la cadena, y a su vez permitirá reducir la extracción de nuevos materiales. En el presente artículo se propone una metodología que permita trazar la ruta de los procesos industriales hacia la sustentabilidad.

**Palabras clave:** integración energética, intensificación de procesos, optimización, procesos industriales, sostenibilidad, sustentabilidad, revalorización de residuos.

# Abstract

To this day, the efforts of the international scientific community are aimed at achieving sustainable development. In this context, the United Nations has proposed seventeen goals, some of which are related to the industrial sector. Most productive enterprises were conceived under the concept of linear economics, where both resources and demand are vast. This paradigm has moved towards a circular economy, in which raw materials will maintain optimal conditions as long as possible to be reintegrated into the chain, and in turn will reduce the extraction of new materials. This article proposes a methodology to trace the route of industrial processes towards sustainability.

**Keywords:** energy integration, process intensification, optimization, industrial processes, sustainability, waste revaluation.



---

## Introducción

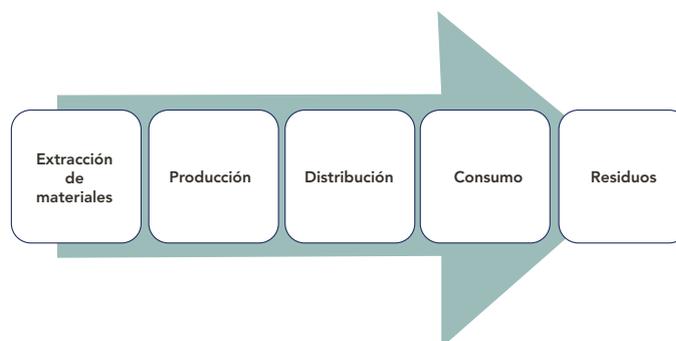
En las últimas décadas, se ha observado un constante crecimiento de los sectores económicos. De acuerdo con el Banco Mundial, el producto interno bruto (PIB) se incrementó 63 veces en el período de 1960 a 2019. Sin embargo, el crecimiento sostenido del PIB se detuvo en el año 2020, cuando disminuyó un 3 % a consecuencia del aislamiento social implementado durante la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2 [1]. Dichas medidas cambiaron de manera abrupta la forma de estudiar, trabajar, adquirir mercancías e incluso de acceder a servicios médicos y actividades recreativas [2]. Desde esta perspectiva, las cadenas de suministro sufrieron graves afectaciones, provocando una catastrófica desestabilización en el suministro de insumos y la fabricación de productos. La Agencia Internacional de Energía, junto con el Banco Mundial, presentó un plan sustentable de recuperación económica [3] y delimitó las áreas donde se debe enfatizar la inversión para superar la recesión económica de manera sustentable. En ellas se propone invertir en fuentes de energía renovables, progreso energético, innovación en tecnologías con reducida huella de carbono, producción de biocombustibles y revalorización de residuos.

Sin duda las áreas definidas en este plan derivan del concepto de economía circular, el cual surge como una solución a los impactos de la producción y el consumo subordinados al modelo de economía lineal [4]. Tal

estándar considera que tanto la demanda de productos como las materias primas para generarlos son ilimitadas. Así pues, el objetivo es el constante incremento de la producción (Figura 1).

FIGURA 1.

Modelo de economía lineal.



Este modelo económico plantea que los productos generados se desechen una vez concluida su utilidad, o en su defecto, cuando un nuevo producto con mejores características se encuentre disponible. Si bien ha permitido el crecimiento sostenido de los sistemas de producción, también ha generado la pérdida de la biodiversidad, sobreexplotación de recursos naturales y acumulación de residuos [5]. Es por ello que la comunidad internacional ha comenzado una reevaluación del modelo de economía lineal y las consecuencias que acarrea, derivando en el nacimiento de los objetivos del desarrollo sostenible propuestos por la ONU [6].

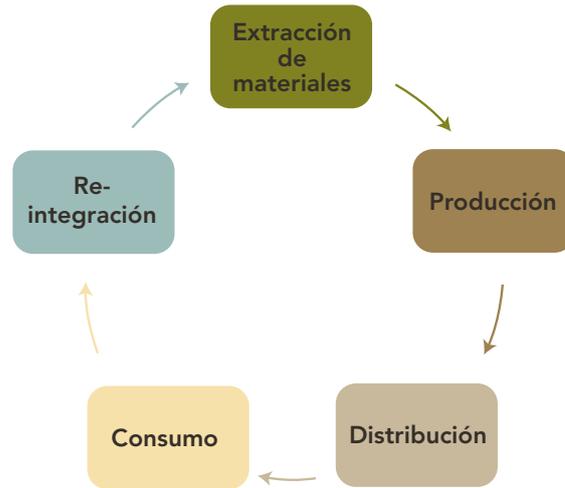


En el presente artículo se propone una metodología que permita trazar la ruta de los procesos industriales hacia la sustentabilidad. Este paradigma se ha encaminado hacia una economía circular, en la que las materias primas mantendrán condiciones óptimas el mayor tiempo posible para reintegrarse en la cadena.

Es natural que emerja una alternativa como el concepto de economía circular, el cual implica un cambio en la demanda de los productos. El nuevo modelo propone convertir bienes que se encuentren en su última etapa de vida útil en recursos para producir otros, lo que cierra ciclos y disminuye residuos [7]. De esta forma, los desechos no son el último eslabón, sino que estos se aprovechan para dar lugar a lo nuevo, al utilizar los recursos por el máximo tiempo posible. Adicionalmente, se implementan técnicas que permiten reinsertar los desechos en el mercado (Figura 2).



FIGURA 2.  
Modelo de economía circular.



El modelo de economía circular es una alternativa promisoriosa y relativamente novedosa para aprovechar al máximo los recursos. Dentro de las estrategias de reintegración se incluye al reciclaje, revalorización, reparación y reducción [5]. Por ejemplo, la Figura 2 muestra una clara disminución en la extracción de nuevos materiales, debido a que, aunque los predecesores fueron catalogados como residuos, *a posteriori* fueron reinsertados para su nuevo uso.

La mayoría de los procesos productivos hallados en operación fueron concebidos para perpetuar la economía lineal. Debido a lo anterior, es necesario implementar estrategias que faciliten la organización de cadenas productivas sujetas al concepto de economía circular, lo cual brindará sustentabilidad a los procesos.

El presente artículo abordará estrategias viables en procesos de producción que se encuentren en funcionamiento, en aras de alinearlos al concepto de economía circular. Para ello se comenzará con la revisión de los conceptos de sustentabilidad y sostenibilidad. Posteriormente, se describirán los elementos que integran los procesos industriales; con base en ello se expondrán las metodologías estratégicas que pueden implementarse en son de convertirlos en procesos sustentables, a la postre alineados a los conceptos de economía circular y desarrollo sostenible.

## Discusión

### Sustentabilidad y sostenibilidad

En la actualidad hay dos conceptos en el idioma español que, en ocasiones, se emplean de manera intercambiable: *sustentable* y *sostenible*. De acuerdo con la Real Academia Española [8], el término *sustentable* es un adjetivo que denota la conservación del estado. Por otra parte, el vocablo *sostenible* gira en torno al mantenimiento de una entidad durante largos periodos de tiempo sin agotar los recursos ni agravar al medio ambiente [8]. Queda definido que ambos adjetivos se enfocan a la manutención o conservación, aunque solo el segundo hace hincapié en los recursos y medio ambiente. Ambos se aplican principalmente al sustantivo *desarrollo*, que implica la evolución de una economía encaminada a mejorar los niveles de vida, progreso o crecimiento en el ámbito social, cultural y económico [8].

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, existen 17 objetivos para alcanzar el desarrollo sostenible, los cuales se presentan en la Figura 3.



FIGURA 3.

Objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas.

En la Figura 3 puede advertirse que los objetivos del desarrollo sostenible incluyen aspectos sociales, que no se enfocan únicamente a mantener o conservar el estado de los recursos. De ahí que el *desarrollo sustentable* se entienda como el principio que posibilita la fabricación de productos y servicios, siempre y cuando se mantenga un reducido impacto ambiental. Este principio sirve como cimiento para el desarrollo sostenible, el cual involucra aspectos sociales, como la cultura de paz, la erradicación del hambre, la igualdad de género, la salud y el bienestar. En síntesis, el primero contribuye al segundo.



En consecuencia, es de vital importancia contar con procesos sustentables de producción, es decir, que posibiliten generar productos, pero conservando los recursos naturales. Se trata desde luego de implementar estrategias que permitan una vasta sustentabilidad; acciones que desemboquen al concepto de economía circular y, al mismo tiempo, coadyuven al desarrollo sostenible. Una vez clarificados los conceptos de sustentabilidad y sostenibilidad, en la siguiente sección se continuará con los fundamentos de los procesos de producción.

### Procesos de producción

Se trata de una serie de operaciones que transforman las materias primas con el objetivo de generar productos de mayor utilidad. Los eslabones involucrados en una cadena típica de producción se presentan de manera simplificada en la Figura 4.

FIGURA 4.

Diagrama simplificado de un proceso de producción.



En este apartado se puede observar que el proceso de producción es lineal, dado que ingresa y somete las materias primas a una serie unidireccional de operaciones de transformación para la obtención de productos. Existen etapas de reacción, separación, acondicionamiento y transporte de las corrientes del proceso —en las cuales se incluyen materias primas y productos intermedios o finales—. La Tabla 1 presenta las operaciones habituales de transformación fundamentadas en la clasificación anterior.

TABLA 1.

Operaciones de transformación.

REACCIÓN	SEPARACIÓN	ACONDICIONAMIENTO	TRANSPORTE
Reactores homogéneos	Destilación	Reducción de tamaño	Bombeo
Reactores heterogéneos	Evaporación	Mezclado	Transporte por bandas y cadenas
	Extracción líquido-líquido	Agitación	Compresión
	Extracción sólido-líquido	Intercambio de calor	
	Sedimentación	Humidificación	
	Absorción	Tamizado	
	Adsorción		
	Cristalización		

Las operaciones de reacción permiten la transformación química de las materias en productos, usualmente con ayuda de catalizadores. Por otra parte, las rutinas de separación permiten obtener productos de interés con elevadas purezas, y recircular los materiales inalterados, con el fin de generar procesos más rentables (sustentables). Los procedimientos de acondicionamiento posibilitan modificar la cantidad de energía de una corriente, o el tamaño de las materias primas. Por último, el transporte posibilita el movimiento de las corrientes de proceso entre las otras operaciones. De esta forma, en un proceso de producción las materias primas se convierten en productos de interés mediante una serie de operaciones de transformación ordenadas y consecutivas. Debido a la naturaleza de las materias primas, así como a las limitaciones termodinámicas de dichos procesos, es imposible convertir la totalidad de los insumos en productos.

Usualmente en estos procesos se generan los productos de interés, subproductos y mermas; en ésta última categoría se incluyen materiales no procesados, dañados, fuera de especificación y residuos. Por ejemplo, en la producción de jugo de naranja se desechan los frutos en mal estado (dañados), aquellos con bajo contenido de jugo (fuera de especificación), así como las cáscaras y semillas (residuos). Estos residuos en su mayoría son desechados o confinados con base en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos [9]. No obstante, pueden tratarse mediante diferentes estrategias para reintegrarse en el mercado, como el reciclado y la revalorización.

Sin importar el tipo de operación del que se trate, en todos los casos se requiere energía para llevarlo a cabo, que puede ser térmica o eléctrica. Esta última se obtiene de las centrales de generación eléctrica. En este sentido, las centrales pueden funcionar con una amplia gama de recursos, tanto renovables (radiación solar, corrientes de agua, corrientes de aire, biocombustibles, geotermia) como no renovables (combustible nuclear, carbón, gas natural).

Por otra parte, la energía térmica puede ser adicionada (mediante agua caliente, vapor de agua, aceite térmico) o retirada (mediante agua de enfriamiento o refrigerantes) de las corrientes de proceso. Para incrementar la temperatura se disponen algunos combustibles, tales como gas natural, combustóleo, diésel, carbón, pellets o biogás. En contraste, para reducir la energía térmica se emplea principalmente electricidad,



refrigerantes y agua. Finalmente, cada una de estas fuentes diverge en disponibilidad, precio, intermitencia, eficiencia y poder calorífico; de igual manera, las emisiones de dióxido de carbono, y por ende la huella de carbón, difieren entre las fuentes.

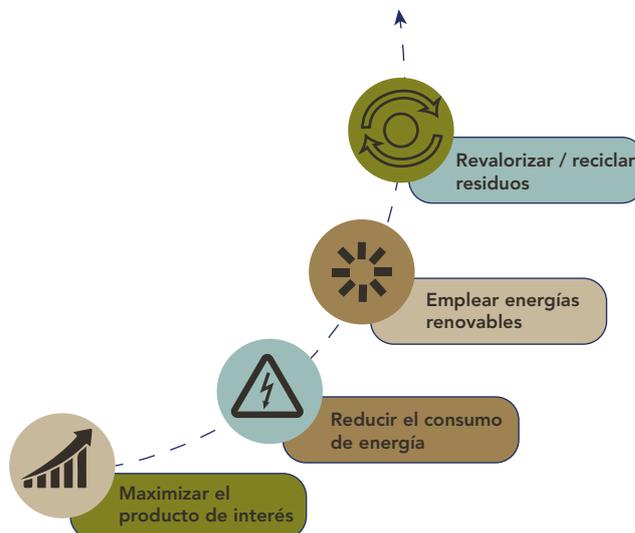
Los puntos anteriormente descritos son cruciales en los aspectos económico, ambiental y técnico de los procesos. En este caso, si se incrementa la producción, entonces los costos disminuyen. Por otro lado, si las mermas aumentan, la rentabilidad del proceso decae y su impacto ambiental se incrementa. En la siguiente sección se revisarán estos aspectos, a modo de integrar una metodología que permita incrementar la sustentabilidad de los procesos de producción, alineándolos así al concepto de economía circular.

### Estrategias a implementar en procesos industriales

A partir de la información expuesta en las secciones previas, se presenta la siguiente metodología (Figura 5). El primer aspecto a abordar es la maximización del producto de interés, manteniendo constante flujo de materia prima.

Para ello son precisas herramientas de optimización y simulación adecuadas al caso específico; respecto a los procesos continuos, Aspen Plus™ es una de las más completas y robustas disponibles. En lo que respecta a la manufactura, Delmia™ representa una de las principales alternativas de simulación.

**FIGURA 5.**  
Ruta rumbo a la sustentabilidad en los procesos industriales.



Una vez validado el modelo con los datos de producción, es posible implementar las siguientes estrategias a favor de maximizar la producción:

Realizar un análisis paramétrico de sensibilidad en el simulador de procesos, esto permitirá identificar las variables que afecten de manera significativa la generación del producto. A continuación, se ejecutarán cambios en dichas variables y se cuantificará su efecto en la cantidad de embarque generado, con el objetivo de evaluar las consecuencias de dichos cambios antes de implementarlos en el proceso real. Asimismo, dicho análisis puede acotarse a valores máximos o mínimos para cada uno de los equipos de proceso, con base en las especificaciones del proveedor. De este modo, es posible modificar las condiciones de operación de manera segura, conociendo de antemano una estimación confiable en los resultados esperados.

Implementar estrategias de optimización, las cuales pueden catalogarse en estocásticas o de programación matemática. En el caso de la segunda es importante disponer de un modelo matemático que permita describir el proceso, con el fin de implementarle solución. Para aplicar este tipo de optimización se sugieren modelos lineales, dado que garantizan la convergencia numérica de la solución. A su vez, es posible resolver problemas no lineales, sin embargo, en este caso, la búsqueda de valores iniciales influye de manera significativa en la solución del modelo. Por otra parte, las técnicas de optimización estocástica devienen de la naturaleza y destacan por su robustez, y por converger en la vecindad del óptimo; una de sus principales ventajas es que prescinde de la función matemática al momento de resolver un problema, y tampoco necesita que tanto las funciones como sus derivadas sean continuas. En el caso de la optimización matemática, su ventaja radica en el tiempo de cómputo, el cual es extremadamente reducido (en el orden de segundos o minutos), en comparación con los días o semanas necesarios para las técnicas de optimización estocástica.

Una vez ajustadas las condiciones del proceso para maximizar la cantidad de producto, deben enfocarse los esfuerzos en reducir el consumo de energía. Este aspecto se puede abordar mediante diversas estrategias:

El primer aspecto a revisar en este punto es la eficiencia energética del proceso, en términos de pérdida de energía tanto térmica como eléctrica. Debe auditarse el proceso para determinar y corregir los puntos de pérdida de energía, y así subsanar las deficiencias.



Como alternativa se sugiere la integración energética, la cual permite redirigir la energía disponible dentro del proceso para enfriar o calentar las corrientes del mismo. En esta estrategia se emplea, particularmente, la metodología del punto de pliegue, que permite identificar entre cuáles corrientes deben realizarse los intercambios de energía, para minimizar el uso de servicios externos de calefacción y refrigeración. Como resultado se teje una red de intercambio de calor en el proceso, que, si bien implica una inversión adicional, disminuye a largo plazo los costos de operación y, en consecuencia, el impacto ambiental asociado.

La intensificación de procesos posibilita reducir los requerimientos de energía, así como el tamaño de los equipos involucrados. Estos beneficios resultan de operar equipos con una mayor eficiencia en las tasas de transferencia de masa y calor, o bien, de la sinergia de dos o más operaciones unitarias. En este caso, se deben evaluar los equipos presentes en la operación, y analizar la posibilidad de modificaciones o reemplazos. Cabe mencionar que, a menudo, además de reducir la energía, los equipos intensificados incrementan la selectividad hacia el producto de interés y se obtienen diseños de procesos inherentemente más seguros y económicos debido al menor empleo de equipos de seguridad adicional. Es decir, la intensificación del proceso dará una reducción adicional en el costo final, ya que los equipos de menor envergadura son más asequibles.

Reducido el consumo de energía mediante la implementación de las estrategias antes mencionadas, los esmeros se enfocan hacia la adopción de energías renovables. A nivel industrial, algunos de los mecanismos para lograr este objetivo son los siguientes:

- Canales parabólicos para generar vapor de agua, el cual se empleará en el proceso industrial sin la necesidad de quemar combustibles fósiles.
- Turbinas que generen electricidad en caso de que amerite ajustar las corrientes de aire, en términos de la presión, o bien, si existen desfogues de gases calientes.
- Biocombustibles sólidos para satisfacer las condiciones de calentamiento de baja temperatura, comunes en las industrias. Este tipo de biocombustibles puede almacenarse con mayor facilidad y goza de precios competitivos.

- Biocombustibles líquidos y gaseosos para reemplazar las contrapartes de origen fósil. Pueden emplearse tanto en la operación de calderas, como en los motores de combustión interna y en el transporte de productos terminados.
- Paneles fotovoltaicos para satisfacer las necesidades de iluminación, así como de consumo de electricidad en las áreas administrativas de la empresa.

Tras maximizar la producción, reducir el consumo energético e incorporar energías renovables durante el proceso, el último eslabón concierne a la revalorización, reutilización y reciclaje de los residuos generados. Algunas de las estrategias son las siguientes:

- Recuperar de los residuos generados aquellos compuestos que puedan reutilizarse dentro del proceso a fin de disminuir la adquisición de nuevos insumos, minimizando los costos de operación, así como el impacto ambiental.
- Reciclar aquellos residuos que sean susceptibles, tales como vidrio, cartón, aluminio y plástico.
- Revalorizar los residuos clasificados como irreciclables e irrecuperables, para así generar nuevos productos que puedan insertarse en el mercado. Con ese objeto se dispone de tratamientos bioquímicos, termoquímicos, mecánicos, y biológicos. Los diferentes tratamientos amplían el rendimiento y costo; por ello, es importante analizar la gama de opciones y seleccionar aquellas con menos requerimientos de procesamiento. La estrategia expuesta aprovecha de manera integral los insumos del sector industrial y, en algunos casos, genera nuevos productos que posibilitan su participación en otros mercados.

## **Análisis de ciclo de vida**

Las cadenas de manufactura de bienes causan impactos en las zonas de extracción de materia prima, producción, uso y desechado de los mismos. Por tanto, es menester realizar un análisis del ciclo de vida (ACV)



[10]. En ese sentido, se han adoptado diversas perspectivas, tales como el uso intensivo de datos, análisis de escenarios, flujo de materiales, entradas y salidas (AFM). La ventaja de estos métodos consiste en que ofrecen un panorama cercano a la realidad. Por ejemplo, el AFM busca escenarios donde el aprovechamiento simbiótico de los recursos sea idóneo a través de la evaluación de flujos de materiales en parques industriales. En el análisis de entradas y salidas se busca conocer el efecto de la simbiosis industrial en las cadenas de suministro mediante el modelado de comportamiento [10]. Las metodologías expuestas permiten identificar aquellos parámetros que distinguen la sostenibilidad de los procesos de producción y con ello ofrecer soluciones favorables.

## Ecología industrial

Las estrategias antes mencionadas son aplicables para una empresa individual, aunque conjuntos de empresas o parques industriales pueden participar de las mismas acciones. La ecología industrial sugiere integrar las actividades actuales en un “ecosistema industrial”, donde los residuos o subproductos generados durante un proceso se aprovechen como entradas en otros [11]. Este concepto armoniza con la economía circular, dado que pretende maximizar el rendimiento de los recursos naturales y energía, al tiempo que minimiza el desperdicio.

Existen diversos puntos a considerar en su aplicación; por ejemplo, si los residuos de un parque industrial se comparten y reutilizan entre varias empresas, debe hacerse de manera integral. De lo contrario, se reciclarán fuera del parque, lo que aumentará el costo y complicará el proceso. Este nuevo sistema representa un cambio paradigmático que requiere más investigación acerca de sus implicaciones. Asimismo, se debe buscar que la recolección y transporte de los residuos sea eficiente. Para lograr ese objetivo es posible densificar los residuos; de ese modo, se consigue disponer de ellos en menos viajes.

Uno de los principales desafíos que este concepto presenta es la reticencia de las empresas a cooperar; en ese contexto, el gobierno y las políticas públicas juegan un papel clave, ya que se requieren regulaciones estrictas respecto a los residuos: si las políticas son estrictas, la participación de las empresas que reciclan sus residuos puede aumen-

tar. De la misma manera, se requiere incentivar en los consumidores la costumbre de adquirir productos reciclados, ya que esta actividad es vital para la transición. Un ejemplo de aplicación de las estrategias mencionadas en este trabajo es el Parque Ecoindustrial de Kalundborg, en Dinamarca [11].

## Conclusiones

Los procesos industriales actuales pueden ajustarse al concepto de economía circular mediante las estrategias orientadas a maximizar el producto de interés, reducir el consumo energético, incrementar el uso de fuentes renovables y revalorizar los residuos. La metodología propuesta permite trazar una ruta ordenada para lograr el incremento en la sustentabilidad de dichos procesos, evaluando en cada punto el costo-beneficio. De esta manera, y con ayuda de herramientas como el análisis de ciclo de vida, el sector industrial puede contar con procesos cada vez más sustentables que contribuyan al desarrollo sostenible, no sólo de manera individual sino como un conjunto para lograr una simbiosis industrial.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Sergio Iván Martínez Guido agradece el financiamiento para el programa posdoctoral PRODEP otorgado por la Secretaría de Educación Pública, mediante el proyecto PRODEP-UAQ/332/19. Araceli Guadalupe Romero Izquierdo agradece el financiamiento para el programa posdoctoral del Conacyt mediante el proyecto 869445. Valeria Caltzontzin Rabell agradece el financiamiento del Conacyt para la realización de sus estudios de posgrado.



## Referencias

- [1] WB. World Bank Data. (2022). *Domestic Product (current us\$)*. [En línea]. Disponible en: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.PIB.MKTP.CD>
- [2] P. Jiang, Y. V. Fan, y J. J. Klemeš. (2021, mar. 01). *Impacts of COVID-19 on energy demand and consumption: Challenges, lessons and emerging opportunities*. *Applied Energy*, vol. 285. Doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116441.
- [3] IEA. (2020, jun.). *Sustainable Recovery*. *World Energy Outlook Special report*. [En línea]. <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery>
- [4] J. R. J. Goddin. (2020, ene.). *Chapter 12-The role of a circular economy for energy transition*. Alena Bleicher, Alexandra Pehlken Eds., *The Material Basis of Energy Transitions*, AP., pp. 187-197. Doi: 10.1016/B978-0-12-819534-5.00012-X.
- [5] Y. V. Fan, P. J. Jiang, M. Hemzal, y J. K. Klemeš. (2021, feb. 01). *An update of COVID-19 influence on wasted management*. *Science of The Total Environment*, vol. 754. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142014.
- [6] I. Ari, y R. F. Yilmaz. (2019, dic.). *Chapter 4-Greening of industry in a resource and environment constrained world*. Sevil Acar, Erinċ Yeldan Eds., *Handbook of Green Economics*, Academic Press. Pp. 53-68. Doi: 10.1016/b978-0-12-816635-2.00004-3.
- [7] W. R. Stahel. (2016, ). *The circular economy*. *Nature*, vol. 531, pp. 435-438. <https://www.nature.com/articles/531435a>.
- [8] RAE. Real Academia Española (2013): *Diccionario histórico de la lengua española (DHLE)*.
- [9] DOF. Diario Oficial de la Federación. (2023, oct. 08). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263\\_180121.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf)
- [10] A. M. Walker, W. J. V. Vermeulen, A. Simboli, y A. Raggi. (2021, mzo. 01). *Sustainability assessment in circular inter-firm networks: An integrated framework of industrial ecology and circular supply chain management approaches*. *Journal of Cleaner Production*, vol. 286. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125457.
- [11] X. Yu, e Y. Zhang. (2021, sep.). *An economic mechanism of industrial ecology: Theory and evidence*. *Structural. Change and*

Economic Dynamics., vol.  
58, pp. 14-22. Doi: 10.1016/j.  
strueco.2021.03.008.

