

María de los Ángeles Álvarez-Ayala

Raúl Tauro

René D. Martínez-Bravo

Jorge Emigdio Sánchez-Pólito

Omar Masera



El papel de los biocombustibles sólidos en la generación de calor verde:

un enfoque hacia las micro, pequeñas y medianas industrias



El papel de los biocombustibles sólidos en la generación de calor verde:

un enfoque hacia las micro, pequeñas y medianas industrias



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

María de los Ángeles Álvarez-Ayala

Raúl Tauro

René D. Martínez-Bravo

Jorge Emigdio Sánchez-Pólito

Omar Masera

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt)
Plataforma Nacional Energía, Ambiente y Sociedad (Planeas)
Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace-ECC)
Grupo de Innovación en Ecotecnologías y Bioenergía (GIEB)
Aprovechamiento Sustentable de la Bioenergía en la industria (Asinbio)
Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES)
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



PLANEAS
PLATAFORMA NACIONAL ENERGÍA, AMBIENTE Y SOCIEDAD



PRONACES
ENERGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



Grupo de Innovación Ecológica y Bioenergía



Asinbio
Aprovechamiento Sustentable de la Bioenergía en la Industria



IIES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD
UNAM





Corrección de estilo

Andrea González Márquez
Julio Montoya

Diseño editorial

Arlen Hernández • tallerhojarasca.com
contacto@tallerhojarasca.com



Fotografías

Ana Laura Morales (pp. 5, 8, 12, 13)
Enrique Riegelhaupt (pp. 3, 11, 21, 43, 51)
Jimena Paz (pp. 4, 19)
María de los Ángeles Álvarez Ayala (pp. 6, 20, 46)
Raúl Tauro (pp. 1, 9, 40, 42, 45)
René Martínez (p. 44)

Citar como: Álvarez-Ayala, M.A., Tauro, R., Martínez-Bravo, R.D., Sánchez-Pólito, J.E., y Masera, O. (2024). *El papel de los biocombustibles sólidos en la generación de calor verde: un enfoque hacia las micro, pequeñas y medianas industrias*. México: Pronace ECC-Conahcyt.

Este cuaderno temático es producto de un proyecto apoyado por el Conahcyt en el año 2024. Los contenidos y el diseño editorial son responsabilidad de las y los colaboradores. El Conahcyt, con el fin de ampliar el acceso a los resultados y productos de los proyectos apoyados, difunde este documento sin que ello represente una postura institucional.

ISBN en trámite.

Diciembre de 2024.



Contenido

Resumen ejecutivo | **6**

Introducción | **8**

Metodología | **12**

Estimación de la demanda actual | **13**

Estimación de la demanda potencial de calor | **14**

Clasificación y caracterización de las industrias | **15**

Clasificación por demanda térmica | **16**

Clasificación por tamaño de empresa | **16**

Estimación de la demanda potencial de calor verde | **18**

Disponibilidad de biomasa | **18**

Opciones tecnológicas para la sustitución
de combustibles fósiles | **19**

Resultados | **20**

Energía térmica en el sector industrial en México | **21**

Demanda actual de calor verde en MiPyME | **22**

Estimación preliminar de la demanda potencial
de calor verde en MiPyME | **25**

Clasificación y caracterización de industrias | **25**

Identificación de las ramas industriales

de acuerdo a requerimientos de temperaturas | **26**

Caracterización de subramas identificadas | **27**



Estimación de la demanda potencial de calor verde | **32**

Disponibilidad de biomasa | **34**

Opciones tecnológicas para la sustitución
de combustibles fósiles | **36**

Perspectivas y necesidades | **39**

Conclusiones | **42**

Listado de tablas | **44**

Listado de figuras | **45**

Referencias | **46**



Resumen ejecutivo

La demanda de energía térmica en la industria de México representa el 56% del consumo energético total del sector, y más del 90% de esta demanda se cubre con combustibles fósiles, entre los que destacan el gas natural, el combustóleo y el gas licuado de petróleo (GLP). En este contexto, los biocombustibles sólidos (BCS) constituyen una opción versátil, competitiva y abundante para suplir una parte de la demanda térmica. Mediante la generación de *calor verde* —la energía térmica que se obtiene a partir de BCS—, los BCS contribuyen además a la descarbonización del sector industrial, así como a la generación de empleos y cadenas de valor locales.

En la actualidad, el BCS que más se utiliza en el sector industrial es la leña en miles de micro y pequeñas industrias —panaderías, alfarerías, ladrilleras, destiladoras de bebidas, entre otras. También se puede mencionar el uso intensivo de residuos agroindustriales como el bagazo de caña de azúcar para propósitos de cogeneración en grandes industrias, tal y como ocurre en los ingenios azucareros. En los últimos años ha aumentado el uso de los residuos agrícolas y forestales en la matriz energética del sector industrial para cubrir las demandas térmicas, aunque su participación aún es escasa y no existe información oficial que cuantifique la demanda.

Existen miles de mini, micro y pequeñas industrias distribuidas en todo el país que utilizan BCS —panaderías, talleres alfareros, ladrilleras, mezcaleras y otras muchas— y que generan numerosos puestos de empleo, lo que las convierte en piezas clave para la economía de las comunidades más vulnerables. Sin embargo, pese a su importancia, no se cuenta con información oficial sobre la cantidad y el tipo de BCS utilizados en las diferentes ramas industriales.

Para impulsar el uso eficiente de la biomasa es necesario tener un panorama claro de las industrias que utilizan BCS en la actualidad, saber cómo lo utilizan, y evaluar a las empresas que podrían convertirse en usuarios de estos combustibles mediante la sustitución de combustibles fósiles.

El presente reporte analiza la demanda actual y potencial de calor verde para varios nichos industriales. Por sus impactos sociales y económicos a nivel local, el trabajo está enfocado en la industria a escala de micro, pequeñas y medianas empresas (MiPyME). Este estudio no abarca a las grandes industrias, clasificadas como usuarias de alto consumo energético, cuyo potencial uso de BCS requiere un análisis detallado caso por caso.

En este reporte se estima una demanda actual de BCS por parte de un conjunto de MiPyME de 14.9 petajulios (PJ) al año, de los cuales el 82 % corresponde a leña, mientras que el 18 % restante es bagazo de caña. La leña es utilizada bajo un esquema de mercado informal en las industrias de mezcal artesanal, ladrilleras y alfarería, las cuales suelen utilizar hornos con quemadores ineficientes durante sus procesos. El bagazo de caña se utiliza sobre todo en la industria de manufactura de piloncillo artesanal.

El uso potencial de BCS se concentra en las industrias de lácteos, tequila, cerveza artesanal y caleras, donde existe posibilidad de sustitución de diferentes combustibles fósiles, como el GLP y el combustóleo. Nuestros resultados preliminares demuestran que se podría generar una demanda de BCS de 5 PJ anuales a corto plazo, la cual podría aumentar, si se contemplan otras industrias que en el presente están explorando el uso de los BCS, como las enfocadas en los cítricos, los beneficios del café, té y tabaco, las conservas de alimentos y la panadería, entre otras.

La información oficial que existe en la actualidad es muy limitada e imposibilita la obtención de datos estadísticos robustos. Para enriquecer las estimaciones de este trabajo, es necesario realizar estudios de caso representativos por cada rubro industrial identificado como usuario actual y potencial. A su vez, es imprescindible estimar de manera detallada parámetros como consumos específicos, demandas energéticas y la productividad anual de cada rubro industrial. Por último, consideramos que sería recomendable integrar las estimaciones de demanda de BCS en el sector de MiPyME en los balances nacionales de energía de México.

Introducción





Introducción

De acuerdo con el reporte de la IEA (2023), el consumo total de energía en el mundo durante 2022 fue de 442 exajulios (EJ). En dicho año, el sector industrial fue el principal consumidor con 167 EJ, por encima del residencial y el de transporte, con demandas de 133 EJ y 116 EJ respectivamente. La energía consumida en todos los sectores económicos se puede dividir de acuerdo a su uso final en calor —térmica—, electricidad y transporte (Solar Payback, 2018; Irena *et al.*, 2020; REN21, 2020). La energía térmica representa aproximadamente el 50% del consumo total de energía a escala global —considerando los usos residenciales, comerciales e industriales (Irena *et al.*, 2020; REN21, 2020)—, seguida del transporte con un 30% y la electricidad con el 20% restante.

Las fuentes energéticas que predominan en Estados Unidos son el gas natural y el carbón, mientras en Europa destacan la gasolina y otros derivados del petróleo, productos de la refinación (Eurostat, 2023). En América Latina, casi la mitad del consumo de fuentes de energía se centra en el petróleo y sus derivados; sin embargo, cabe destacar que la biomasa tiene una participación importante en la demanda general de energía, ya que alcanza el 20% del uso final, lo que la hace superior al gas natural —11%— e igual a la electricidad (Olade, 2022).

La generación de calor de proceso o vapor es el uso principal de la energía térmica en el sector industrial. Sin embargo, el tipo de actividad industrial a la que es destinada la energía difiere mucho según el acceso y desarrollo tecnológico de cada país. Por ejemplo, en Estados Unidos más de la mitad de la demanda del calor industrial se destina a grandes industrias y procesos como la producción de alcohol etílico y productos químicos orgánicos o la fabricación de plásticos y el refinamiento de petróleo (Mcmillan *et al.*, 2019). En Europa, de

manera general, la energía térmica se utiliza principalmente en grandes empresas: industrias de la pulpa y el papel, así como el sector de alimentos, bebidas y tabaco (Malico *et al.*, 2019). En América Latina, gran parte de la economía local y regional gira en torno a pequeñas industrias, en particular las agroalimentarias (FAO, 2004). A diferencia del norte global, la información sobre demanda térmica en las agroindustrias es poca y está dispersa.

Aunque por escala de producción a nivel individual las MiPyME consumen menos energía que las grandes empresas, cuando observamos todo un nicho en muchos casos la demanda de calor puede resultar mayor en su conjunto en las pequeñas que en las grandes industrias. Sin embargo, las MiPyME aspiran a tecnificar y aumentar su capacidad de producción conforme al modelo capitalista, responsable por la extracción y el uso desmedido de recursos que han detonado la actual crisis ambiental. Con el paso del tiempo, ha sido evidente que no existe un crecimiento inclusivo pese a la extracción incesante de recursos; es decir, en los últimos años han aumentado tanto la desigualdad como la pobreza en el sur global (Coalición ECAMLC, 2022).

En México, las MiPyME aportan el 52 % del producto interno bruto (PIB), y una de cada diez pertenece al sector manufacturero (SE, 2024). El Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) estima que existen alrededor de 80 mil MiPyMEs en el sector industrial, las cuales incluyen alfarerías, ladrilleras, caleras, cerveceras, destiladoras, panaderías y empresas dedicadas al procesamiento de lácteos y piloncillo (Inegi, 2019).

El uso más limpio y eficiente de la energía en estas industrias es capaz de generar grandes beneficios sociales y ambientales. En particular, el uso eficiente de BCS puede contribuir no sólo a la disminución del uso de combustibles fósiles y a la mitigación de gases contaminantes, sino a la generación de empleos locales a lo largo de su cadena de producción. La amplia distribución geográfica de las MiPyME —en contraste con la localización puntual de las grandes industrias— podría extender sus beneficios sociales y ambientales a lo largo de todo el territorio nacional. Además, los proyectos de sustitución de combustibles fósiles por BCS en MiPyME podrían convertirse en casos de éxito que a su vez incentiven el uso de BCS en la mediana y gran industria.

Pese a la importancia y los beneficios derivados del uso de BCS en las MiPyME, existe un notable vacío de información energética representativa y robusta en torno a dichas industrias debido a su informalidad. En este sentido,

es crucial cuantificar la demanda de energía térmica y el potencial de generación de calor verde —que definimos como toda la energía térmica generada a partir de BCS— en las MiPyME de México, mediante la homologación de los escasos datos disponibles sobre el tema. Con ello, será posible generar información estadística esencial para la planificación energética a escala regional y nacional. Este reporte presenta una metodología para la obtención de datos de calidad, e identifica estrategias orientadas al impulso del uso de los BCS en México.



Metodología





Metodología

En la actualidad no existe una metodología unificada para estimar la demanda de BCS en el sector industrial a diferentes escalas espaciales, lo cual es imprescindible para planificar un uso ordenado y sustentable de la bioenergía en el país. La siguiente propuesta resume distintos trabajos y homologa los pasos seguidos en sus respectivas metodologías. Primero se evalúa la demanda de BCS con base en sus usuarios actuales, es decir, aquellos que, en sus procesos productivos, utilizan como combustible principal la leña, sus derivados y otros subproductos de origen agrícola. Enseguida, se detalla la metodología para estimar la demanda energética de usuarios potenciales o demanda potencial de BCS, que se entiende como aquella demanda máxima de BCS alcanzable en el sector industrial al sustituir combustibles fósiles. Aunque este trabajo se enfoca en MiPyME, la metodología generada se pretende adaptar y escalar a distintas ramas industriales.

Estimación de la demanda actual de BCS en la industria

Como se mencionó antes, la información sobre la demanda actual de BCS para usos térmicos en México es escasa. Existen muy pocos trabajos en el país que evalúan el uso de la biomasa como combustible en diferentes industrias. Algunos de ellos son estudios centrados en alfarerías (Maserá *et al.*, 2012), ladrilleras (Maserá *et al.*, 2012; Ruíz-Carmona, *et al.*, 2021), productos lácteos, cerveza artesanal, mezcal y caleras (Ruíz-Carmona, *et al.*, 2021). Sin embargo, no existe una estimación que compare y unifique los datos obtenidos en dichos trabajos.

En este reporte se hizo una recopilación de trabajos que documentan, bajo diferentes enfoques, el consumo de BCS para la generación de energía térmica. Se homologó la información existente con el objetivo de generar un escenario del consumo de acuerdo al tipo de industria y el consumo energético. Mediante la revisión de trabajos recientes, solicitudes de información a organismos oficiales e información obtenida de primera mano en visitas a MiPyME, se estimó la cantidad de BCS que se consume en diferentes actividades industriales con fines térmicos. Asimismo, se analizó la demanda energética para un conjunto de rubros industriales a dicha escala.

Estimación de la demanda potencial de calor industrial que puede ser generado con BCS

Ante la falta de una metodología unificada para la estimación de demanda de bioenergía en la industria, como primer paso se revisaron trabajos relacionados a la generación de calor industrial con energías renovables. El proyecto Solar Payback (2018) analiza la demanda de calor en el sector industrial, y realiza una descripción de las industrias de acuerdo a tres niveles de temperatura: bajo (<150 °C), medio (entre 150 °C y 400 °C) y alto (>400 °C). Aunque dicho estudio se enfoca en la generación de energía solar térmica, muchos pasos de su metodología pueden replicarse para otros combustibles, como los BCS.

Malico y colaboradores (2019) consideran una división de la demanda de energía en la industria de acuerdo al uso final: calor de proceso, calefacción de espacios y enfriamiento, entre otros. Al igual que Solar Payback (2018), toman en consideración intervalos de temperatura —menor a 100 °C, de entre 100 y 200 °C, de entre 200 y 500 °C, así como mayor a 500 °C— para identificar y proponer las tecnologías de cada rango y sector industrial. Desde una perspectiva tecnológica, tanto Dovichi y colaboradores (2023) como Buchner y colaboradores (2019) evalúan las tecnologías de uso final de biomasa con base en niveles de madurez tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés) y en la eficiencia de cada tecnología propuesta, si bien se enfocan en la generación de energía eléctrica.

En síntesis, los trabajos mencionados sugieren: a) clasificar las diferentes ramas industriales conforme a su demanda de energía térmica y al tamaño de las empresas, así como identificar el tipo de tecnología y de combustible utilizado

en los procesos que demandan calor; y b) estimar la demanda de energía térmica por rama. De forma complementaria, para una evaluación a escala de estudio de caso proponen: c) analizar la oferta de BCS; y d) identificar y proponer opciones tecnológicas que sustituyan a los combustibles fósiles por BCS y que mantengan la eficiencia de proceso.

Clasificación y caracterización de las industrias

Las industrias que se analizan en el presente reporte se encuentran dentro del sector manufacturero, con identificación 31-33 de acuerdo al Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) usado por el Inegi (2023), el cual considera una división de veinte sectores. Como se muestra en la figura 1, cada sector se divide en subsector, rama, subrama y clase. Identificar una empresa en una clase o rama permite generar metodologías de evaluación que puedan ser replicadas en una serie de estudios de caso.

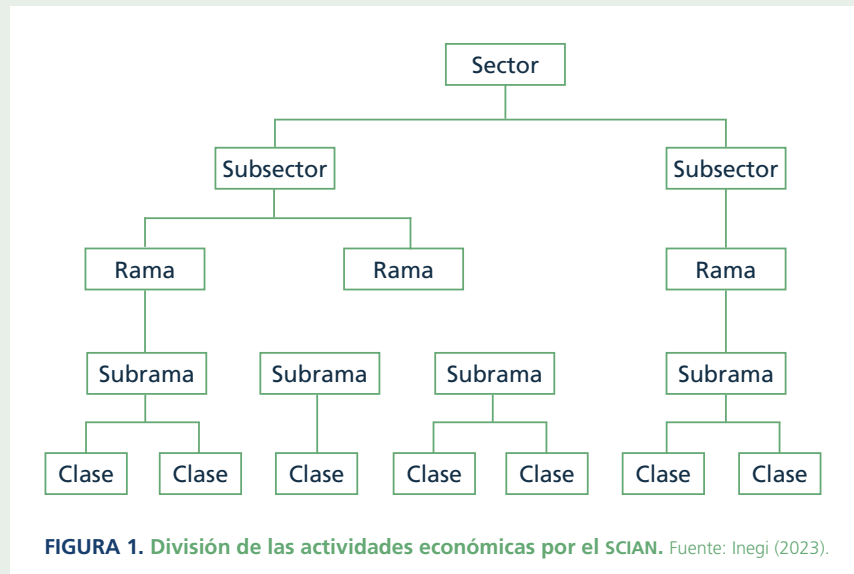


FIGURA 1. División de las actividades económicas por el SCIAN. Fuente: Inegi (2023).

De acuerdo con el Inegi (2023), las unidades económicas del sector manufacturero se dedican principalmente a: 1) la transformación de materiales o sustancias con el fin de obtener productos nuevos; 2) el ensamble en serie de partes y componentes fabricados; 3) la reconstrucción en serie de maquinaria y equipo industrial, comercial, de oficina y otros; 4) el acabado de productos manufacturados mediante procesos de teñido, tratamiento calorífico, enchapado y otros; y 5) la mezcla de productos para obtener otros diferentes.

Clasificación por demanda térmica

En primer lugar, se identificaron industrias con altos consumos térmicos por medio de referencias bibliográficas. Después, se analizó el rango de temperatura a la que consumen calor dichas industrias conforme a los trabajos de Saygin y colaboradores (2014) y Solar Payback (2018). La mayoría de MiPyME no consume calor en altas temperaturas. En relación a lo anterior, es oportuno mencionar que para los BCS es más factible alcanzar temperaturas bajas y medias, es decir, menores a 400 °C.

Clasificación por tamaño de empresa

Una vez identificadas las industrias con demandas térmicas debajo de 400 °C, se procedió a clasificarlas en micro, pequeñas, medianas y grandes, aunque se descartaron estas últimas como se explica más adelante. En la literatura fueron encontrados distintos criterios de clasificación para las MiPyME (tabla 1): número de empleados (Oh y Min, 2024), potencia instalada (Tauro *et al.*, 2018) y producción anual —conforme al estudio de un caso de cerveza artesanal— (Pino *et al.*, 2023), entre otros. En el presente reporte se toma la clasificación de tamaño de industria de acuerdo con el número de empleados, la cual es la misma variable utilizada en el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del Inegi (2019). La potencia de las tecnologías y la producción anual se consideran características complementarias.

TABLA 1. Clasificación de las MiPyME de acuerdo a distintos criterios

Dimensión de MiPyME	Número de empleados (Oh y Min, 2024)	Potencia en kilovatios (kW) (Tauro <i>et al.</i> , 2018)	Producción anual en hectolitros (hl) (Pino <i>et al.</i> , 2023)
Micro industria	<10	>50	5,000
Pequeña industria	11-100	>100	170,00
Mediana industria	101-250	>150	250,000

Fuente: elaboración propia a partir de Oh y Min (2024), Tauro y colaboradores (2018) y Pino y colaboradores (2023).

Las grandes industrias son aquellas que tienen más de 250 empleados y no son consideradas en este trabajo porque requieren de un estudio caso por caso. Además, fuera de los ingenios azucareros, por lo general utilizan gas natural, el cual tiene un costo muy bajo en el mercado nacional y no es económicamente competitivo con los costos actuales de los combustibles fósiles.¹

Para determinar el número de empleados de cada industria se utilizaron las bases de datos del DENE (Inegi, 2019). El Inegi (2023) utiliza el SCIAN para agrupar las actividades económicas productivas del país con el objetivo de que sea más fácil contabilizarlas y generar información al respecto.

Una vez hecha la clasificación, se contabilizaron las industrias existentes para cada nivel —micro, pequeña y mediana— y se descartaron las grandes. Enseguida, se detallaron las siguientes características en las industrias seleccionadas:

- Tipo de Combustible
- Poder calorífico
- Consumo específico
- Producción anual
- Demanda energética

¹ Aunque el precio actual del gas natural es mucho menor que el de la biomasa, para muchas empresas puede ser atractivo sustituirlo por BCS si se consideran las políticas internacionales de descarbonización o “carbón cero”. Además, el gas natural es un combustible fósil limitado, el cual suele ser importado en su mayoría para el mercado nacional.

Para la selección de industrias con gran potencial para el uso de BCS, es fundamental identificar el tipo de tecnología que utilizan, pues dependerá de ello el éxito del reemplazo de combustibles fósiles por BCS o la diversificación de los combustibles utilizados. En este sentido, en las subramas seleccionadas destacan las MiPyME, debido a que la sustitución tecnológica para el uso de BCS es mínima, es decir, se trata de industrias con un uso previo de un cierto porcentaje de BCS entre sus insumos combustibles, así como de actividades industriales cuyas tecnologías puedan ser fácilmente reemplazadas.

Estimación de la demanda potencial de calor verde

La estimación de la demanda potencial de calor verde en los distintos sectores seleccionados partió de la identificación del tipo de combustible utilizado en las diferentes industrias, así como de sus requerimientos energéticos y de la tecnología utilizada (Tauro *et al.*, 2018). A su vez, fue necesario especificar la producción anual de cada industria o rubro industrial, lo cual se multiplicó por el consumo específico para estimar la demanda energética anual. Con esta última, se obtuvo la demanda potencial de BCS anual para cada rubro, al dividir la demanda energética anual por el poder calorífico promedio de la biomasa. De esta forma, se obtuvo la cantidad necesaria de BCS en toneladas de materia seca al año.

Disponibilidad de BCS

De acuerdo con Dovichi y colaboradores (2023), una vez estimada la cantidad de BCS que necesita cada industria, es necesario analizar la disponibilidad del recurso cercano al usuario, o bien, determinar el pretratamiento de acuerdo a la tecnología de uso final propuesta y a la cadena de suministro. Para ello, se deben identificar los tipos de biomasa disponible —incluyendo la biomasa residual— y la ubicación de cada recurso, con el objetivo de seleccionar el BCS más promisorio para un uso eficiente y económicamente viable. Obtener la ubicación de la biomasa permite comparar el costo de cada tipo de BCS seleccionado —incluyendo los costos logísticos— con los costos de los combustibles fósiles utilizados por las empresas, con lo cual se hace posible seleccionar la opción más viable.

Opciones tecnológicas para la sustitución de combustibles fósiles

Para sugerir opciones de sustitución tecnológica, es importante considerar los requerimientos técnicos y logísticos, el tipo de biocombustible que se puede utilizar, así como las características de éste. El presente reporte constituye un acercamiento general a las posibilidades técnicas del uso de BCS para sustituir a los combustibles fósiles en varias ramas industriales. Brindar información particular que describa la situación de todas las industrias promisorias requiere de un análisis de estudios de caso.



Resultados





Resultados

Energía térmica en el sector industrial en México

El sector industrial ocupa el segundo lugar en consumo final de energía en el país, después del sector transporte (figura 2). La demanda de energía térmica en la industria representa el 56% del consumo energético total (Sener, 2023). Dicha demanda se cubre sobre todo con combustibles fósiles, entre los cuales el gas natural es el más utilizado con el 46.5%. Otros derivados del petróleo —combustóleo, diésel y GLP, entre otros— representan el 45.9%. Por último, las energías renovables conforman poco más del 7.6%, donde la biomasa cubre casi la totalidad de la demanda térmica.

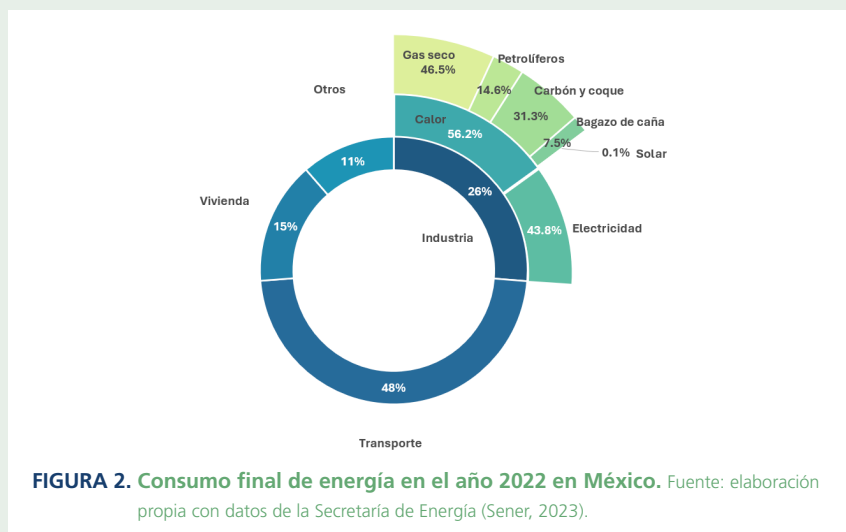


FIGURA 2. Consumo final de energía en el año 2022 en México. Fuente: elaboración propia con datos de la Secretaría de Energía (Sener, 2023).

Desde una perspectiva ambiental, el sector industrial es responsable del 17.3 % de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional, superado sólo por las emisiones del autotransporte al interior de localidades y ciudades (26.2 %), así como por la generación eléctrica (19 %) (INECC, 2014a). Además, el sector industrial contribuye ampliamente a las emisiones de carbono negro —que afecta de forma importante la salud— con el 27.6 % (Solar Payback, 2018).

Demanda actual de calor verde en MiPyME mediante BCS

En la actualidad, los BCS se utilizan en diferentes ramas industriales para cubrir en su mayoría necesidades térmicas de secado, cocción o producción de vapor. Tauro y colaboradores (2018) cuantificaron la demanda energética del sector industrial, considerando grandes y pequeñas industrias. Dicho estudio estimó que alrededor de 106 PJ/año de bagazo fueron utilizados como recurso energético primario para abastecer de energía térmica y eléctrica a los ingenios, mientras que el consumo de leña en MiPyME como ladrilleras y alfarerías correspondió a 28 PJ/año. Estos resultados demostraron que la participación de la bioenergía en el sector industrial cubrió aproximadamente el 12 % de la demanda total del sector en 2018. Sin embargo, como se discutió en el trabajo citado, los medios oficiales de información no contabilizan los BCS utilizados en aquel momento en otras industrias de menor escala, como las ladrilleras, los pequeños productores de azúcar o derivados y las destiladoras de bebidas, entre otras. Como se detalla a continuación, la falta de información homologada genera discrepancias entre resultados de diferentes trabajos.

Masera y colaboradores (2012) construyeron escenarios de uso de BCS en micro y pequeñas industrias —como ladrilleras y alfarerías—, y propusieron la sustitución de tecnologías para un consumo eficiente de BCS. Este trabajo es primordial para comprender el uso de BCS de los pequeños productores. Debido a que su actividad se considera informal, muchas veces no se sistematiza su información, pero es necesario extender la investigación a otros nichos.

Posteriormente, la investigación de Ruiz-Carmona y colaboradores (2018) planteó escenarios de consumo de BCS en la mediana industria para el procesamiento de lácteos, cerveza artesanal y mezcal artesanal, así como para caleras. Para la generación de escenarios, en varios de los sectores estudiados se utilizaron

casos de estudio puntuales para generar líneas base, como medida frente a la falta de información sobre el total de MiPyME.

La tabla 2 resume la información existente sobre la demanda térmica de diferentes ramas industriales de México. La tabla reúne datos obtenidos de los trabajos mencionados, comparados y corroborados por los autores del presente reporte.

TABLA 2. Estimación de la demanda actual de BCS para un conjunto de pequeñas industrias

	Combustible	Consumo específico	Unidades	Poder calorífico (MJ/kg)	Producción anual	Unidades	Demanda BCS (Ton)	Demanda energética (PJ)
Alfarerías	Leña	11.2 (a)	toneladas anuales de leña/ unidad de producción	16.0 (b)	59,838 (a)	número de industrias	670,186	10.7
Ladrilleras	Leña	1.9 (a)	MJ/kg ladrillo	16.0 (b)	768,138 (c)	toneladas de ladrillo	91,276	1.5
Mezcal artesanal	Leña	6.4 (d)	kg/litro	16.0 (b)	14,165,505 (e)	litros	91,226	1.5
Piloncillo	Bagazo	1.8 (f)	kg/kg panela	7.1	100,000 (g)	toneladas	180,000	1.3
Total							1,032,684	14.9

Fuente: a) Masera y colaboradores (2012); b) Ruiz-García y colaboradores (2021); c) Ruiz-Carmona y colaboradores (2021) —para esta estimación, el cálculo incluyó un supuesto de peso de una pieza de ladrillo de 3.4 kg, con una producción de 225 millones de ladrillos—; d) Ruiz-Camou y colaboradores (2023); e) Comercam (2023); f) - Sánchez-Castillo, M. A. (comunicación personal, 7 de mayo de 2024); y g) Cuevas Reyes y colaboradores (2017). Nota: la tabla no incluye el consumo de bagazo de caña en ingenios azucareros, que se estimó en 110 PJ para el año 2022 (Sánchez-Pólito, 2024); asimismo, existen muchas otras pequeñas industrias que utilizan leña —panaderías, caleras y productoras de lácteos, entre otras—, cuyo consumo no ha sido cuantificado a detalle, por lo que no se incluyeron en la tabla.

Los estudios realizados hasta el momento, sintetizados en la tabla anterior, son el resultado de un esfuerzo por cuantificar la demanda actual de BCS en la industria de México. Para el cálculo de la demanda energética —última columna de la tabla 2—, se determinó la producción anual de cada producto, y se usó como referencia la información de cámaras nacionales o trabajos regionales, aunque no siempre se encontró información detallada.

Otro parámetro importante para las estimaciones fue el consumo específico de combustible. La asignación de este parámetro implicó algunas dificultades, ya que durante la revisión de la literatura se distinguió una clara variabilidad en los datos de consumo específico reportados entre un estudio y otro, sobre todo cuando las unidades del producto se pueden medir por pieza, litro o kilogramo, por mencionar algunos ejemplos. Lo anterior exige una investigación a profundidad rubro por rubro para obtener datos de primera mano. Esta variabilidad dificulta realizar comparaciones: en el caso de las ladrilleras, el estudio de Masera y colaboradores (2012) reporta el consumo específico por pieza, mientras que otros lo reportan por kilogramo (Ruíz-Carmona *et al.*, 2019). En este nicho, las estimaciones de producción anual de Masera y colaboradores (2012) ascienden a las 5 petatoneladas (Pton) de ladrillo, mientras que Ruíz-Carmona y colaboradores (2019) reportan 0.8 millones de toneladas (Mton) de ladrillo al año. Esta diferencia supone una gran incertidumbre en el resultado final de la demanda energética.

Otro caso interesante del cálculo del consumo específico son las alfarerías, cuyo valor no puede asignarse por pieza, debido a que el diseño, tamaño y peso entre las distintas piezas que se producen es muy diverso. Por ello, Masera y colaboradores (2012) lo han reportado por ciclo de horneada, aunque es difícil determinar el valor de cada ciclo, ya que las piezas pueden tener usos finales muy diferentes, así como por la gran diversidad en las características de los hornos por su tamaño, componentes, etc.

El combustible más utilizado en las industrias mencionadas es la leña, bajo un esquema de mercado informal. Los hornos de estos ramos industriales usan por lo general quemadores ineficientes durante sus procesos. Sin embargo, además de los BCS, el GLP ha ganado terreno en los últimos años como parte del proceso de tecnificación de industrias como la de los lácteos o las alfarerías, donde se requiere un control riguroso de las emisiones de combustión.

Pese a los esfuerzos por generar una tabla completa que resuma la demanda actual de BCS en la pequeña industria de México, aún falta información actualizada sobre el consumo actual de BCS como astillas, pellets, bagazos y cáscaras, en industrias como la del tequila, jugos y concentrados, caleras y procesadores de café, entre otras. En el reporte publicado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) que se titula *El patrón de consumo de biocombustibles sólidos en México* (Sánchez-Pólito *et al.*, 2024), se estima que la demanda actual alcanza los 156 PJ, considerando una demanda

aproximada de 110 PJ anuales de bagazo —para cogeneración en ingenios azucareros— y otros 20 PJ de astillas, aserrín y otros residuos forestales —utilizados en medianas y grandes empresas que no han sido consideradas en este trabajo. En este contexto, es necesario que se realicen estudios de caso que permitan generar estimaciones robustas con metodologías replicables a diferentes escalas.

Estimación preliminar de la demanda potencial de calor verde en MiPyME

Con base en la clasificación propuesta por el SCIAN y como resultado de los pasos planteados en la metodología, se presenta la selección de las industrias promisorias para la evaluación de la demanda potencial de energía térmica.

Clasificación y caracterización de industrias

La revisión de literatura permitió organizar a las industrias de acuerdo a su consumo de calor, como se muestra en la figura 3. Entre los principales consumidores de calor, se encuentran la industria química, la de alimentos y bebidas, así como la de la pulpa, papel y cartón. En el caso de la industria química, su consumo se centra en temperaturas altas (>400 °C). La industria que tiene un mayor consumo de temperatura baja y media es la de la producción de alimentos y bebidas. Este conjunto de industrias se encuentra en el rubro “industria manufacturera” correspondiente a los números 31 y 32 en la clasificación del SCIAN (Inegi, 2023).

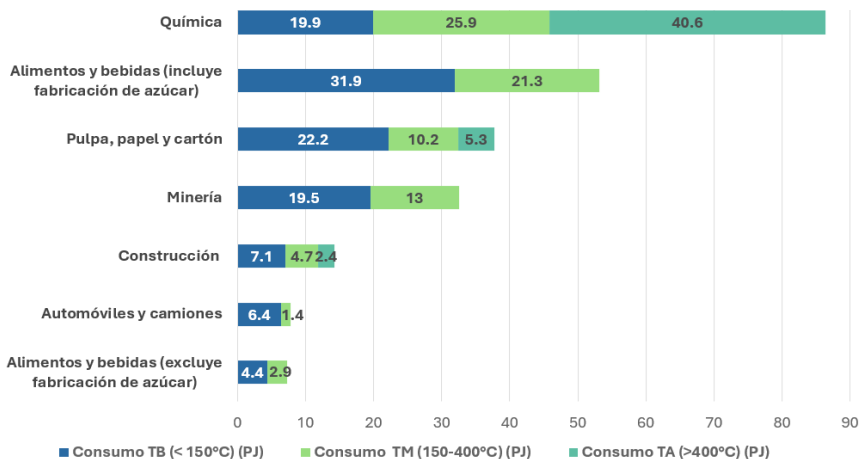


FIGURA 3. Consumo de calor en la industria, segmentado por intervalos de temperatura.

Fuente: elaboración propia con base en datos de la Sener (2021), Solar Payback (2018), así como de Saygin y colaboradores (2014).

Identificación de las ramas industriales de acuerdo a requerimientos de temperaturas

El calor se utiliza en una gran cantidad de ramas industriales. Algunos ejemplos son la automotriz —durante el procesamiento del caucho para la fabricación de neumáticos y los baños térmicos para el tratamiento de superficies—, la del corcho —durante su secado y cocción—, la del papel y el cartón —al generar vapor para obtener pastas y en los procesos de secado—, la química —para secado y columnas de destilación— y la textil —para la aplicación de tintes, así como para lavados y blanqueados—, entre otras.

La industria alimentaria dispone de una gran variedad de tecnologías para satisfacer usos térmicos. En particular, el calor verde se puede utilizar para calentar agua destinada a la limpieza de máquinas y equipos, o bien, para tareas de cocción, escaldado y limpieza de materias primas. De igual forma, el calor verde se puede emplear para producir vapor para la esterilización de productos y para procesos de deshidratado o pasteurización. El subsector de alimentos y bebidas destaca debido a que la mayor parte del calor que utiliza

es de baja temperatura (<150 °C). En la clasificación del SCIAN (Inegi, 2023), dicho subsector corresponde a los rubros “industria alimentaria” e “industrias de las bebidas y el tabaco”, bajo los números 311 y 312.

Como se mencionó en el punto anterior, más de la mitad del consumo de calor en la industria química está destinado a procesos de altas temperaturas, y sus actividades son de gran escala. Este estudio se enfoca en las MiPyME, por lo que no se considera esta rama industrial, y lo mismo sucede con la industria de la pulpa, el papel y el cartón.

Caracterización de subramas identificadas

Considerando la clasificación de industrias del DENU (Inegi, 2019) —“industria alimentaria” (311) e “industrias de las bebidas y el tabaco” (312)—, algunos estudios identifican el consumo energético de ciertas subramas entre las que destacan aquellas que se enfocan en productos lácteos y destilados. La evaluación de estas subramas —en cuanto al tipo de tecnología y combustible utilizado— es fundamental para identificar las posibilidades concretas del uso de BCS. Tanto el uso de combustibles fósiles costosos como el uso actual de BCS en tecnologías ineficientes y obsoletas convierten a las MiPyME en usuarios potenciales.

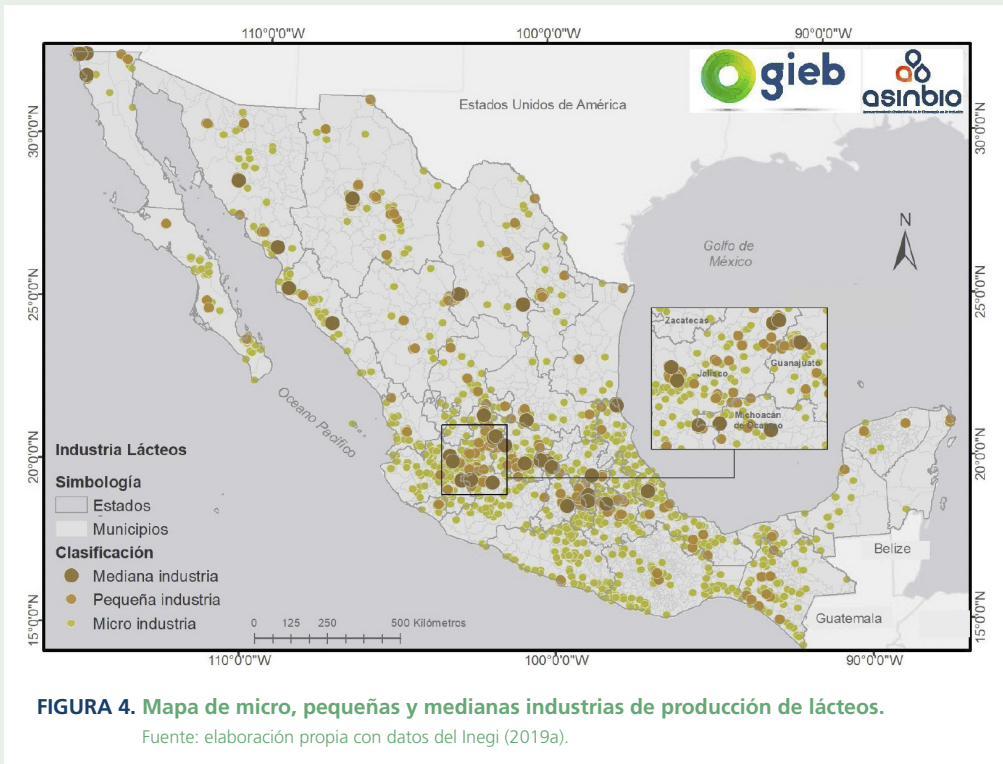
A continuación se detallan las características de producción de las principales industrias identificadas como potenciales usuarias de BCS.

Lácteos

Los lácteos tienen el código de identificación 311511 en el SCIAN (Inegi, 2023). Utilizan el calor principalmente durante la pasteurización y, de acuerdo con el DENU (Inegi, 2019), existen registros de 3,761 unidades económicas que se dedican a la “elaboración de leche líquida”. Aunque en la actualidad existen productores de leche que utilizan BCS, la mayoría de las empresas ha migrado al GLP o a una combinación de BCS y GLP.

Si bien estudios como el de Ruiz-Carmona y colaboradores (2021) evalúan el uso de calor en la preparación de otros derivados de los lácteos —como en la separación de suero para la elaboración de quesos—, en este reporte nos limitamos a analizar la producción de leche. La decisión de adoptar este enfoque se debe a la falta de conocimiento sobre el consumo específico de combustibles para las diferentes etapas de la elaboración de derivados lácteos.

La figura 4 muestra la distribución de las MiPyME de lácteos que se encuentran registradas en la base de datos del Inegi (2023). De acuerdo con la Cámara Nacional de la Industria de la Leche (Canilec, 2023), Jalisco es el principal estado productor de leche. El mapa muestra la mayor cantidad de MiPyME concentradas en la zona centro, sobre todo en Jalisco y sus colindancias.



Cerveza artesanal

La producción de cerveza —cuyo código en el SCIAN es 312120 (Inegi, 2023)— a pequeña escala cuenta con dos etapas en las que es necesario el uso de energía térmica de baja temperatura: 1) la maceración, en la que se agrega agua calentada a 65 °C a granos de cebada previamente molidos; y 2) la cocción, donde se hierve de manera vigorosa el mosto obtenido durante al menos una hora. Algunos cerveceros incorporan una pasteurización de la cerveza. Por lo general, se suele utilizar GLP para estas tareas.

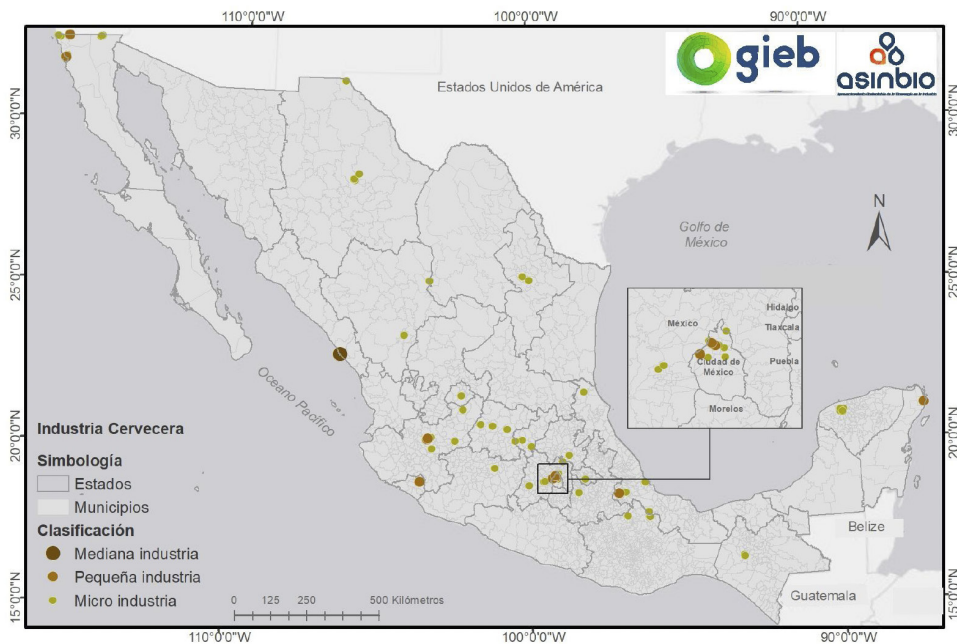


FIGURA 5. Mapa de micro, pequeñas y medianas industrias de producción de cerveza artesanal. Fuente: elaboración propia con datos del Inegi (2019a).

La distribución de las industrias que se dedican a la producción de cerveza artesanal conforme a la base de datos del Inegi (2023) se representa en la figura 5. En el DENEU (Inegi, 2019) se registraron 52 unidades económicas. La mayor parte de dichas industrias se distribuye en la región central del país, en la Ciudad de México y Jalisco.

Destilados de agave

La producción de tequila en México corresponde al rubro “elaboración de tequila”, código 312144 (Inegi, 2023). Su proceso de elaboración inicia con el jimado de los agaves, con lo cual se obtiene una piña que se lleva a un tratamiento de hidrólisis que requiere temperaturas entre 100 y 110 °C. Enseguida se separan los residuos del mosto del líquido, y éste se destila, lo que requiere temperaturas menores a 200 °C (CRT, 2019).

En la figura 6 se muestra la distribución de los destilados de agave, incluyendo las tequileras, con denominación de origen en los estados de Jalisco, Nayarit, Guanajuato, Michoacán y Tamaulipas. El DENUE (2019) registra 455 unidades económicas.

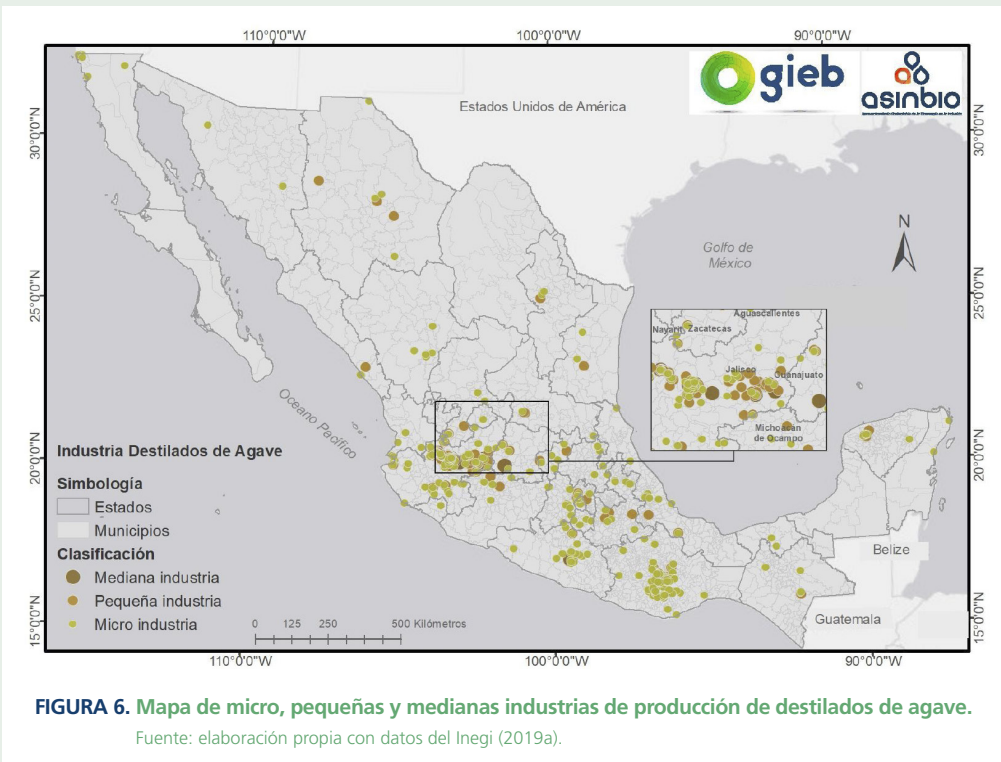


FIGURA 6. Mapa de micro, pequeñas y medianas industrias de producción de destilados de agave.

Fuente: elaboración propia con datos del Inegi (2019a).

Los estados mencionados —sobre todo Jalisco— muestran mayor número de MiPyME de destilados de agave. Además del tequila, existen destilados en otros estados del país, como por ejemplo: el sotol en Durango, Chihuahua y Coahuila; el bacanora en Sonora; y el mezcal en Oaxaca, Michoacán, Puebla y Guanajuato.

La demanda potencial reportada para este nicho se enfoca sólo en las tequileras. De acuerdo con la información del Consejo Regulador del Tequila (CRT, 2019), existe un total de 167 industrias productoras de tequila, de las cuales casi el 90% —es decir, 149 industrias— está compuesto por MiPyME.

Caleras

La producción de cal —código 327410 del SCIAN (Inegi, 2023)— en el ámbito rural es relevante para este reporte debido a que la tecnología que se utiliza es apta para la quema de combustibles biomásicos. En la actualidad existen pequeños productores que utilizan carbón de coque durante el proceso de calcinación de la piedra caliza, el cual se lleva a cabo en hornos que llegan a temperaturas entre 900 y 1200 °C durante 24 horas. Las características de los hornos de esta industria pueden facilitar el uso de BCS para sustituir parte del carbón utilizado.



La distribución de MiPyME de acuerdo con la figura 7 se concentra en el estado de Querétaro y sus colindancias. Se tiene registro de alrededor de 60 unidades económicas.

Estimación de la demanda potencial de calor verde mediante BCS

Para optimizar el aprovechamiento energético de los BCS, es indispensable el uso de tecnologías modernas y eficientes entre los usuarios actuales y potenciales. Retomando lo mencionado en la metodología, la demanda potencial de calor verde se define como el uso posible que tendrían los BCS en algunos ramos industriales al sustituir tecnologías ineficientes que utilizan combustibles fósiles, por calderas o quemadores eficientes de biomasa.

En la tabla 3 se muestran los sectores industriales que utilizan combustibles fósiles y que —por sus características técnicas y por los elevados costos de los combustibles que utilizan— podrían emplear BCS. La demanda energética se calculó a partir de los datos disponibles sobre su consumo específico y su producción anual.

TABLA 3. Demanda potencial de calor verde mediante BCS en empresas promisorias

	Combustible	Consumo específico	Unidades	Poder calorífico (MJ/kg)	Producción anual	Unidades	Demanda equivalente de BCS (Ton)	Demanda energética (PJ)
Caleras	Coque de petróleo	0.1 (a)	kg petcoke/ kg cal	33 (b)	970,515 (c)	Ton	205,823	4.1
Cerveza artesanal	GLP	0.2 (c)	MJ/l de cerveza artesanal	--	19 (c)	Millones de litros	162	<0.1
Lácteos	GLP	0.2 (c)	MJ/l de leche	--	30 (c)	Millones de litros	276	<0.1
Tequila	Combustóleo	14.9 (d)	MJ/l de tequila	--	54 (e)	Millones de litros	40,764	0.8
TOTAL							247,025	4.9

Fuente: elaboración propia a partir de: a) Red Mexicana de Bioenergía (Rembio, 2019); b) Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee, 2022); c) Ruiz-Carmona y colaboradores (2021); d) estimación al considerar que se emiten 1.1 kg de CO₂/litro de tequila (CMM, 2016), con un factor de emisión para el combustóleo de 0.074 MJ/kg de CO₂ (INECC, 2014b); e) estimación a partir de datos sobre el volumen de producción promedio de acuerdo al tamaño de industria y el número de industrias que estima el Comisionado Técnico del CRT, Martín Muñoz Sánchez (comunicación personal, 15 de julio de 2021).

Para el cálculo de la producción anual de los distintos rubros seleccionados, se recurrió a la información de diferentes cámaras y organizaciones, aunque, en varios casos, los datos contemplan también a las grandes industrias. Por ejemplo, en el caso de las tequileras, para 2024 el CRT (2025) estima casi 500 millones de litros producidos. A pesar de que hay dieciocho industrias grandes que producen más de 3 millones de litros por año cada una, tan sólo una empresa procesa casi el 40% de la producción total anual. Las otras diecisiete empresas se reparten el 50% de la producción anual, tras de lo cual resta un pequeño porcentaje de producción a las MiPyME.

En las industrias de lácteos y cerveza artesanal existe una subestimación de la demanda de energía. Esto se debe a que no se han realizado estudios que tengan un enfoque en este tipo de empresas que, en muchas ocasiones, son informales, por lo que la información respecto al número de MiPyME, su producción anual y su demanda de energía es incierta. En el caso de la cerveza artesanal, además del análisis de Ruiz Carmona y colaboradores (2021), no se dispone de información para estimar la demanda de energía térmica actualizada del rubro. Para la industria láctea, la producción anual que reportan Ruiz-Carmona y colaboradores (2021) asciende a 30 millones de litros, mientras que reportes como el de la Rembio (2019) parten de la producción total nacional bajo el supuesto de que el 15% corresponde a la producción de este sector, por lo que estiman un total de casi 2 mil millones de litros.

En el caso de la cal, la Rembio (2019) calcula una demanda dos veces mayor —poco más de 9 PJ— a la de Ruiz-Carmona y colaboradores (2021). Si bien los valores de consumo específico son los mismos, la producción anual difiere bastante en relación a la calculada por Ruiz-Carmona y colaboradores (2021) con datos de la Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera (Inegi, 2019b). La gran brecha que existe entre las estimaciones de distintos estudios demuestra la necesidad de actualizar la información disponible en este sector.

Además de las subramas detalladas en la tabla 3, existen otras que están comenzando a utilizar BCS o que tienen interés en su uso. En la actualidad, los casos de éxito son contados, y pueden ser consideradas como potenciales usuarios de BCS las industrias de los cítricos, los beneficios del café, té y tabaco, las cerveceras, etc. En el caso de la industria de los cítricos, el calor necesario puede ser suministrado al aprovechar sus propias cáscaras y bagazos. Los beneficios del café, té y tabaco, por su parte, requieren calor a baja temperatura para el secado de sus materias primas, por lo general en temporadas de baja radiación

solar. Las cerveceras, por último, tienen un creciente interés en sustituir el diésel o combustóleo por BCS, que puede provenir sobre todo de residuos agrícolas o forestales. En el presente no hay información oficial que permita estimar la demanda energética de estas subramas industriales.

Disponibilidad de BCS

Se estima que, a nivel nacional, el potencial energético teórico de la biomasa en forma de BCS alcanza los 1681 PJ/año, como resultado de un conjunto conformado en su mayoría por residuos y subproductos de bosques y actividades agrícolas (tabla 4). Si se consideran las restricciones de acceso a la biomasa, así como sus usos actuales para satisfacer necesidades energéticas y no energéticas en cada sector económico, se obtiene un potencial total disponible máximo equivalente a 1030 PJ/año. Este potencial de BCS está disponible en la actualidad, y tiene la capacidad de ampliar la oferta energética en cada sector de uso final, entre los que destaca el industrial.

TABLA 4. Valores estimados de los potenciales de BCS a nivel nacional (PJ/año)

Tipo de biocombustible sólido (BCS)		Potencial teórico sustentable (1)	Potencial total disponible mínimo (2)	Potencial total disponible máximo
BCS primarios forestales	Leña	1390	939	952
	Carbón vegetal			
BCS secundarios forestales	Astillas (3)	77	0	0
	Aserrín (4)	31	0	0
	Pellets (5)	<1	0	0
BCS secundarios de residuos agrícolas	Bagazo (caña)	108	0	57
	Bagazo (agave)	9	0	8
	Olote de maíz	66	0	13
Total		1681	939	1030

Fuente: Sánchez-Pólito y colaboradores (2024). Nota: 1) el potencial teórico de BCS derivados de biomasa forestal se refiere a la oferta proveniente de modelos de productividad de biomasa de vegetación nativa —bosques, selvas y matorrales— en México, y el potencial de biocombustibles derivados de residuos agroforestales se estima como la producción actual de los residuos primarios; 2) el potencial mínimo considera los usos no energéticos; 3) junto a la producción de astillas, se cuantifican costeros, puntas y recortes de la industria de transformación primaria; 4) no se contabiliza el aserrín que no se utiliza sobre todo en los aserraderos del norte del país; y 5) la producción de pellets es despreciable frente a los demás BCS, pero se considera en este reporte debido a su potencial mercado emergente.

En la tabla 4 se puede identificar que la mayor parte de la biomasa proviene del sector forestal, en específico, del manejo sustentable de bosques y selvas. Los residuos agrícolas secundarios tienen usos no energéticos como forraje o material para construcción, a excepción del bagazo de caña que se utiliza en gran medida para el autoabastecimiento energético de los ingenios azucareros. Pese a la disponibilidad de BCS, es importante considerar su dispersión geográfica, ya que puede originar altos costos logísticos. La distancia entre la oferta y la demanda de BCS es un factor determinante para evaluar la factibilidad de su uso energético.

Mientras la biomasa en México se concentra sobre todo en el sur y occidente del país (figura 8), la ubicación de las industrias (ver sección “Caracterización de subramas identificadas”) muestra que la mayor parte de la demanda se localiza en el centro del país, abarcando las regiones: occidente, bajío, centro y golfo. A su vez, en las regiones donde existe mucha distancia entre oferta y demanda, cobran relevancia BCS como los pellets, las astillas o las briquetas, para disminuir los costos logísticos que implica el abastecimiento de la demanda.

Un obstáculo para el uso de los BCS son los costos finales de la biomasa. Al sumar los costos de compra y los costos logísticos, el resultado debe ser menor a los costos de los combustibles fósiles utilizados en las empresas. Un ejemplo es el uso de astillas de madera, que pueden ser transportadas hasta 300 km del lugar de consumo, y ser aún económicamente competitivas con el precio del combustóleo (Tauro *et al.*, 2018).

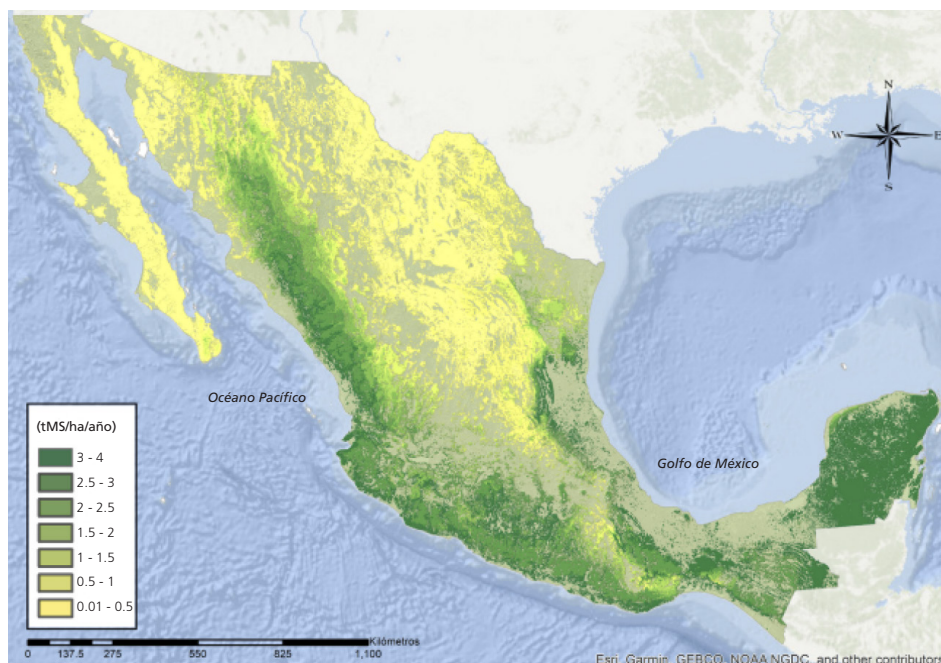


FIGURA 8. Distribución del potencial teórico de biomasa en México. Fuente: Sánchez-Pólito y colaboradores (2024).

Opciones tecnológicas para la sustitución de combustibles fósiles

Al evaluar las posibilidades técnicas del uso de BCS para sustituir combustibles fósiles, además de los costos de compra, se deben considerar las condiciones de pretratamiento de la biomasa seleccionada y sus posibilidades de uso en diferentes tecnologías. Por ejemplo, si pensamos en pellets de origen forestal, estos serían una alternativa para sustituir combustibles fósiles —GLP o combustible— en pequeñas industrias que requieran calor a baja y media temperatura (<400 °C) para producir vapor, agua caliente o aire caliente en procesos de secado. Los pellets pueden ser utilizados en calderas nuevas o usadas; en este último caso, es necesario sustituir el quemador de combustible fósil y adaptar un quemador de pellets a la caldera. La tabla 5 sintetiza una propuesta para la sustitución de combustibles fósiles en pequeñas industrias.

TABLA 5. Requisitos tecnológicos para la sustitución de combustibles fósiles por BCS

Tipo de industria	Biocombustible sólido (BCS)	Calidad requerida	Tecnología moderna para la conversión de energía	Requerimiento técnico
Pequeñas industrias	Leña	Bajo contenido de humedad (15-20 %)	Hornos eficientes de baja, media o alta temperatura	Sustitución de quemadores tradicionales o calderas ineficientes. Nuevos materiales de construcción. Mejorar conocimientos de construcción de quemadores. Espacio para abastecimiento y manejo de biomasa.
	Astillas	Bajo contenido de humedad (<35 %)	Quegador con forma de parrilla	Acondicionamiento de carga y descarga de astillas. Equipo para manejo de las astillas y para alimentar el quemador de manera mecánica. Capacidad de almacenamiento.
	Pellets	Bajo contenido de cenizas y buena durabilidad mecánica	Quegador de pellets	Acondicionamiento de carga y descarga. Sistema de alimentación neumática del quemador. Capacidad de almacenamiento.

Fuente: modificado de Tauro y colaboradores (2018).

Desde una perspectiva técnica y económica, los BCS más promisorios para uso a corto y mediano plazo son la leña y las astillas. La leña es el BCS más utilizado por su bajo costo y baja o nula necesidad de pretratamiento; además, puede ser alimentada de manera manual en hornos bien diseñados para su combustión eficiente. Las astillas surgen como resultado de la disminución de tamaño de diferentes subproductos de aserraderos o de residuos de tareas silvícolas,

y tienen la facilidad de ser alimentadas de manera automática en diferentes tamaños de quemadores. Los pellets son los BCS más costosos debido a que requieren diferentes pretratamientos, sin embargo, además de la alimentación automática como en el caso de las astillas, tienen una combustión muy eficiente y son económicamente rentables para largas distancias de transporte.



Perspectivas y necesidades





Perspectivas y necesidades

Este trabajo representa un primer esfuerzo por detallar la situación energética de las industrias que utilizan BCS en la actualidad. Asimismo, reporta valores preliminares para el caso de potenciales usuarios de BCS. Para obtener datos más concretos y generar estadísticas sobre los usuarios actuales y potenciales de BCS, es necesario:

- Generar un análisis detallado del uso de BCS para cada subrama industrial, mediante la selección de estudios de caso representativos.
- Considerar algunas limitantes en cuanto a la información disponible para los análisis con datos oficiales. La situación que se encuentra en campo y los datos obtenidos a través de cámaras de comercio varían ampliamente respecto a lo reportado por el Inegi. Esto puede deberse a que no se censan todas las industrias, y a que, en muchas ocasiones, la información no puede compartirse por completo de manera pública por motivo de acuerdos de confidencialidad, lo cual complica la investigación y disminuye la certidumbre al realizar las estimaciones.
- Investigar a profundidad, rubro por rubro, para obtener datos de primera mano, ya que existe variabilidad en los datos de consumo específico que se reportan entre un estudio y otro, sobre todo cuando las unidades del producto se pueden medir por pieza, litro, kg, etc. Las variaciones en la estimación del consumo específico son obstáculos para la replicación de estrategias en toda una clase de industrias.

- Tener en cuenta que estimar las producciones anuales de cada sector resulta difícil porque, por lo general, los datos disponibles a nivel nacional no especifican qué porcentaje le corresponde a las grandes industrias y a las MiPyME. En este sentido, se observan discrepancias entre estudios y reportes.
- Replicar este análisis en los rubros que utilizan calor en alguno de sus procesos y que no fueron incluidos en el presente reporte, tales como los beneficios del tabaco, café y té, la industria de cítricos y las cerveceras.
- Pensar en términos de bioeconomía circular para aprovechar los BCS con fines térmicos. De esta forma, las unidades productivas se pueden convertir en microbiorrefinerías rurales capaces de agregar valor a la biomasa residual, con un enfoque de emprendimiento social y economía solidaria. Sin embargo, para que esto suceda es necesario que se generen lineamientos y normativas que aceleren el mercado de los BCS en México y que se garantice un suministro confiable de BCS de calidad.

Conclusiones





Conclusiones

El sector industrial está acoplado a un sistema de producción que requiere un flujo constante y abundante de energía fósil y materias primas no renovables, y que ha ocasionado considerables daños ambientales y sociales. En este contexto, disponer de un conocimiento claro de la situación energética en el sector industrial es imprescindible para la planificación y el desarrollo de herramientas que contribuyan a sentar las bases para consolidar una transición energética justa y sustentable en México. Sin embargo, la información energética de las industrias que poseen los organismos gubernamentales por lo general no es pública, y, a su vez, dista mucho de los datos y estimaciones de las cámaras de cada industria y de los estudios de nicho particulares.

Los BCS en el sector industrial a pequeña escala se utilizan para cubrir necesidades térmicas de media y baja temperatura. Su uso en tecnologías modernas, limpias y eficientes resulta promisorio para sus usuarios actuales y potenciales. No obstante, aunque un gran número de MiPyME consume BCS, se subestima la energía que estos combustibles aportan al sector, debido a que dichas industrias no siempre son consideradas en los censos por su carácter informal.

Para obtener un panorama confiable de la demanda de BCS en las MiPyME en México, se requiere de un trabajo agrupado y puntual en cada nicho. A pequeña escala, se deben especificar las necesidades de cada rubro —la mayoría de los cuales se encuentran en el ámbito rural— para planificar escenarios de consumo responsable en términos de materias primas y de recursos energéticos.



Listado de tablas

TABLA 1. Clasificación de las MiPyME de acuerdo a distintos criterios | 17

TABLA 2. Estimación de la demanda actual de BCS para un conjunto de pequeñas industrias | 23

TABLA 3. Demanda potencial de calor verde mediante BCS en empresas promisorias | 32

TABLA 4. Valores estimados de los potenciales de BCS a nivel nacional (PJ/año) | 34

TABLA 5. Requisitos tecnológicos para la sustitución de combustibles fósiles por BCS | 37



Listado de figuras

- FIGURA 1.** División de las actividades económicas por el SCIAN | 15
- FIGURA 2.** Consumo final de energía en el año 2022 en México | 21
- FIGURA 3.** Consumo de calor en la industria, segmentado por intervalos de temperatura | 26
- FIGURA 4.** Mapa de micro, pequeñas y medianas industrias de producción de lácteos | 28
- FIGURA 5.** Mapa de micro, pequeñas y medianas industrias de producción de cerveza artesanal | 29
- FIGURA 6.** Mapa de micro, pequeñas y medianas industrias de producción de destilados de agave | 30
- FIGURA 7.** Mapa de micro, pequeñas y medianas industrias de producción de cal | 31
- FIGURA 8.** Distribución del potencial teórico de biomasa en México | 36



Referencias

- Buchner, G.A., Stepputat, K.J., Zimmermann, A.W., y Schomäcker, R. (2019). Specifying technology readiness levels for the chemical industry. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 58: 6957-69. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05693>
- Canilec (Cámara Nacional de la Industria de la Leche) (2023). Al alza producción lechera en México, crece 9% en los últimos cinco años. *Gobierno de México*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/al-alza-produccion-lechera-en-mexico-crece-9-en-los-ultimos-cinco-anos>
- CMM (Centro Mario Molina) (2016). *Estrategia de sustentabilidad de la cadena agave-tequila 2016*. <https://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2016/12/Estrategia-de-Sustentabilidad-2016-esp-1.pdf>
- Coalición ECAMLC (Coalición de Economía Circular de América Latina y el Caribe) (2022). *Economía circular en América Latina y el Caribe: Una Visión Compartida*. Coalición ECAMLC. <https://www.unep.org/es/resources/publicaciones/economia-circular-en-america-latina-y-el-caribe-una-vision-compartida>
- Comercam (Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal) (2023). *Informe Estadístico 2023*. México: Comercam. https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/INFORME-2023_PUBLICO.pdf
- Conuee (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía) (2022). Lista de combustibles y sus poderes caloríficos. *Gobierno de México*. <https://www.gob.mx/conuee/documentos/listas-de-combustibles-y-sus-poderes-calorificos>

- CRT (Consejo Regulador del Tequila) (2019). Proceso de elaboración del tequila. *Consejo Regulador del Tequila*. <https://old.crt.org.mx/index.php/es/el-tequila-3/elaboracion-normativa/63-proceso-de-elaboracion-de-tequila>
- ____ (2024). Información estadística de la cadena productiva agave-tequila. <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>
- Cuevas Reyes, V., Baca del Moral, J., Borja Bravo, M., Grass Ramírez, J., y Rivera Martínez, G. (2017). Agricultura familiar y tecnología para la elaboración de piloncillo granulado en la comunidad de Aldzulup Poytzen, San Luis Potosí. *Nova scientia* 9 (19): 481-501. <https://doi.org/10.21640/ns.v9i19.955>
- Dovichi Filho, F.B., Lora, E.E.S., Palacio, J.C.E., Venturini, O.J., y Jaén, R.L. (2023). An approach to technology selection in bioelectricity technical potential assessment: A Brazilian case study. *Energy* 272: 126995. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126995>
- Eurostat (2023). Energy statistics: an overview. *European Commission*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption
- FAO (Food and Agriculture Organization) (2004). *Calidad y competitividad de la agroindustria rural de América Latina y el Caribe. Uso eficiente y sostenible de la energía. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 153*. México: FAO. <https://www.fao.org/4/y5603s/y5603s00.pdf>
- IEA (International Energy Agency) (2023). Industry. *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/energy-system/industry>
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2014a). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. *Gobierno de México*. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- ____ (2014b). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf

- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2023). *Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, México SCIAN 2023*. Inegi. <https://www.inegi.org.mx/scian/#:~:text=M%C3%A9xico%20SCIAN%202023-,Sistema%20de%20Clasificaci%C3%B3n%20Industrial%20de%20Am%C3%A9rica%20del%20Norte%2C%20M%C3%A9xico%20SCIAN,estructura%20de%20la%20econom%C3%ADa%20mexicana>.
- ____ (2019a). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (México)*. Inegi. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denuel/>
- ____ (2019b). *Encuesta Mensual de La Industria Manufacturera (EMIM) 2007-2019*. Base 2008. <https://www.inegi.org.mx/programas/emim/2007/>
- Irena (International Renewable Energy Agency), OECD (Organization for Economic Co-operation and Development), IEA (International Energy Agency) y REN21 (2020). *Renewable energy policies in a time of transition. Heating and Cooling*. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-energy-policies-in-a-time-of-transition-Heating-and-cooling>
- Malico, I., Pereira, R.N., Gonçalves, A.C., y Sousa, A.M. (2019). Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112. 960-977. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.022>
- Masera, O., Berrueta, V., García Bustamante, C., Serrano-Medrano, M., y Martínez-Bravo, R. (2012). Escenarios de mitigación de gases de efecto invernadero, carbono negro y otros forzadores climáticos de vida corta, mediante el uso de biocombustibles sólido [informe final]. México: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- McMillan, C. (2019). Solar for Industrial Process Heat Analysis. *NREL Energy Analysis*. <https://www.nrel.gov/analysis/solar-industrial-process-heat.html>
- Oh, J., y Min, D. (2024). Prediction of energy consumption for manufacturing small and medium-sized enterprises (SMEs) considering industry characteristics. *Energy* 300: 131621. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131621>
- Olade (Organización Latinoamericana de Energía) (2022). *Panorama energético para América Latina y el Caribe 2022*. Ecuador: Olade. <https://www.olade.org/publicaciones/panorama-energetico-de-america-latina-y-el-caribe-2021-2/>

- Pino, A., Pino, F.J., y Guerra, J. (2023). Integration of solar energy in Small-scale Industries: Application to microbreweries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 57, 103276. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103276>
- Rembio (Red Mexicana de Bioenergía) (2019). *Elaboración de escenarios al 2050 para el aprovechamiento de biocombustibles sólidos para la generación de calor y electricidad en México. Primer reporte (industria pequeña)*. Morelia, Michoacán: Rembio.
- REN21 (2022). *Renewables 2022. Global status report*. REN21. <https://www.ren21.net/gsr-2022/>
- Ruiz-Camou, C., Núñez, J., y Musule, R. (2023). Evaluating the environmental performance of mezcal production in Michoacán, México: A life cycle assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 28 (12): 1658-1671. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-023-02237-y>
- Ruiz-Carmona, O., Islas-Samperio, J.M., Larrondo-Posadas, L., Manzini, F., Grande-Acosta, G.K., y Álvarez-Escobedo, C. (2021). Solid biofuels scenarios from rural agricultural and forestry residues for Mexican industrial SMEs. *Energies* 14 (20): 6560. <http://dx.doi.org/10.3390/en14206560>
- Ruiz-Garcia, V., Medina, P., Vázquez, J., Villanueva, D., Ramos, S., y Masera, O. (2021). Bioenergy devices: energy and emissions performance for the residential and industrial sectors in Mexico. *BioEnergy Research*, 1-13. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12155-021-10362-5>
- Sánchez-Pólito, J.E., Tauro, R., Argueta-Navarrete, P.I., Martínez-Bravo, R., Álvarez-Ayala, M.A., y Masera, O. (2024). *El patrón de consumo de los biocombustibles sólidos en México: un modelo para su análisis integral*. México: Pronace ECC-Conahcyt.
- Saygin, D., Gielen, D. J., Draeck, M., Worrell, E., y Patel, M.K. (2014). Assessment of the technical and economic potentials of biomass use for the production of steam, chemicals and polymers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40: 1153-1167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.114>
- Secretaría de Economía (SE) (2024). *Mipymes mexicanas: motor de nuestra economía*. Ciudad de México: SE. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/923851/20240626_Dosier_MIPYMES_SALIDA_Interactivo_5_.pdf

- Sener (Secretaría de Energía) (2021). *Balance Nacional de Energía 2020*. México: Sener. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf
- Solar Payback (2018). *Calor solar para la industria*. México: Solar Payback. https://www.solar-payback.com/wp-content/uploads/2018/06/Solar-Payback_Calor-Solar-para-la-Industria_Mexico.pdf
- Tauro, R., Serrano-Medrano, M., y Masera, O. (2018). Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power. *Clean Technologies and Environmental Policy* 20: 1527-1539. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-018-1529-z>

