

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA LEÑOSA

Bulnes-Aquino Estefanía^{a,*}, Canché-Escamilla Gonzalo^{a,**}, Sacramento-Rivero Julio C.^b

^aCentro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 No. 130 x 32 y34, Col. Chuburná de Hidalgo, Mérida, Yucatán, C.P. 97205,

^bFacultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

Fecha de recepción: 30 de octubre de 2020 - Fecha de aceptación: 12 de marzo de 2021

Resumen

En este trabajo se usó el análisis de ciclo de vida para evaluar el impacto ambiental asociado en la producción de energía eléctrica a partir de la biomasa leñosa. En el estudio se consideró la producción de energía eléctrica para satisfacer la demanda de 341 viviendas en un período de un año, en una población rural de Yucatán. Se evaluaron las emisiones producidas durante la generación de electricidad en un equipo comercial Power Pallet PP20. El análisis tuvo un enfoque de cuna a la puerta, tomando como unidad funcional 1 kWh producido. Se observó una mitigación del impacto en las categorías de toxicidad humana y cambio climático de 77 % y 45 %, respectivamente. En la categoría de oxidación fotoquímica se observó el efecto contrario (-206 %) debido a las emisiones de monóxido de carbono derivadas de una combustión incompleta del syngas, dependientes de las condiciones de operación. Los principales consumos de agua y energía fueron de 75 % y 82 % respectivamente, atribuidos a la producción de diésel requerido en la etapa de pretratamiento. La razón de energía neta que se obtuvo fue de 4.3, lo que indica que el proceso es rentable en términos energéticos.

Palabras clave: Impacto ambiental, bioenergía, gasificador, syngas, emisiones

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ELECTRIC ENERGY PRODUCTION FROM THE WOODY BIOMASS GASIFICATION PROCESS

Abstract

In this work, life cycle assessment was used to evaluate the environmental impact associated with the production of electrical energy from woody biomass. The study considered the production of electricity to satisfy the demand of 341 homes in a period of one year, in a rural town in Yucatán. The emissions produced during the generation of electricity in a commercial equipment Power Pallet PP20 were evaluated. The analysis had a cradle-to-door approach, taking 1 kWh produced as the functional unit. The impact mitigation in human toxicity and climate change categories was 77 % and 45 %, respectively. In the photochemical oxidation category, the opposite effect was observed (-206 %) due to the carbon monoxide emissions derived from incomplete combustion of the syngas, depending

*fany_sakg@gmail.com; gcanche@cicy.mx

on the operating conditions. The main water and energy consumptions were 75 % and 82 % respectively, attributed to the production of diesel required in the pre-treatment stage. The net energy ratio obtained was 4.3, which indicates that the process is profitable in energy terms.

Keywords: Environmental impact, bioenergy, gasifier, syngas, emissions.

1. Introducción

En el estado de Yucatán, la generación de energía eléctrica se basa en el uso de combustibles fósiles como el gas natural o combustóleo, por medio de termoeléctricas de ciclo combinado (Navarro-Pineda et al., 2017). En años recientes las centrales eléctricas han tenido deficiencia de gas natural, por lo que su rendimiento ha disminuido en un 40 % con respecto a su capacidad habitual o se han visto en la necesidad de usar mayor cantidad de combustóleo para mantener su producción (CENACE, Centro Nacional de Control de Energía, 2018). La energía eléctrica es muy importante para satisfacer las necesidades de energía tanto de zonas urbanas como rurales. Frente a la necesidad del uso de la energía eléctrica y la escasez de las fuentes de combustible fósil para su generación, se abre paso hacia nuevas tecnologías de producción de energía eléctrica que usen como materia prima la biomasa.

El uso de la bioenergía, energía obtenida de la biomasa, además de presentar aspectos positivos en términos económicos en las comunidades—como la generación de empleos— también podría reducir los costos de producción de electricidad, especialmente al implementarse en zonas remotas fuera de la red. Por otro lado, mediante el uso de la bioenergía en las zonas rurales se incrementa la no dependencia de combustibles fósiles para satisfacer las necesidades energéticas de la población (Maier et al., 2019).

La biomasa sólida, como la leña, puede ser convertida a bioenergía mediante procesos termoquímicos tales como gasificación, pirólisis y combustión directa; siendo la gasificación el proceso más eficiente (Devi et al., 2003). Sin embargo, con excepción de la combustión, la difusión y uso de los métodos termoquímicos para la producción de energía en México es casi nulo. La gasificación es la conversión de la biomasa, o algún combustible sólido, en un gas energético a través de la oxidación parcial a altas temperaturas. Al gas producido se le conoce como gas de síntesis o syngas, que puede ser utilizado en motores de combustión interna para generar electricidad (Manning y Taylor, 2014). El gas de síntesis tiene el potencial para utilizarse en aplicaciones a pequeña escala para la generación de electricidad, proporcionando energía competitiva desde el punto de vista ambiental y económico para las áreas rurales (Kirsanovs et al., 2017).

El proceso de gasificación de biomasa leñosa podría ser implementado en las zonas rurales de Yucatán para la satisfacción de sus necesidades energéticas a través de la generación de energía eléctrica; sin embargo, es preciso evaluar el impacto ambiental que se tendrá por el uso de este proceso. El análisis de ciclo de vida es una herramienta aceptada globalmente para evaluar los impactos ambientales potenciales y recursos utilizados a lo largo del ciclo de vida del proceso, desde la adquisición de la materia prima, la fase de producción y uso, hasta la gestión de residuos (International Organization for Standardization, 2006). En estudios

recientes se han hecho ACV del proceso de gasificación para convertir biorecursos a bioenergía utilizando como biomasa residuos agrícolas (Rajabi et al., 2019), forestales (Casas-Ledón et al., 2019; Maier et al., 2019), sólidos urbanos (Dong et al., 2018), entre otros, según sea el contexto en el que se aborda el análisis. Los objetivos van desde comparar la gasificación con otros procesos térmicos (Briones-Hidrovo et al., 2021) hasta hacer comparaciones con escenarios convencionales (Ramachandran et al., 2017; Safarian et al., 2020). Por su parte, Rajabi et al. (2019), realizaron una comparación de la electricidad producida por la gasificación de residuos de viñedos contra la electricidad producida convencionalmente en el contexto iraní encontrando que la electricidad generada a partir de la gasificación fue una alternativa adecuada para reducir el impacto ambiental en las categorías de agotamiento de combustibles fósiles, demanda de energía acumulada y potencial de calentamiento global. En el contexto mexicano no se han realizado estudios comparativos del desempeño ambiental de la generación de electricidad a partir de la gasificación de biomasa contra el sistema convencional.

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto ambiental asociado a la producción de energía eléctrica en una localidad rural a partir de la gasificación de biomasa leñosa. Además, se busca comparar el potencial de mitigación del sistema propuesto con respecto al escenario convencional de producción de energía eléctrica en el contexto mexicano.

2. Metodología

El análisis de ciclo de vida (ACV) se realizó conforme a las etapas que se encuentran estandarizadas en la norma ISO 14044 y que se muestran a continuación.

2.1 Objetivos y alcances

El objetivo principal de este análisis de ciclo de vida es determinar la capacidad de mitigación, de los impactos potenciales en la categoría de cambio climático (GWP), formación de ozono troposférico (POCP), toxicidad humana (HTP), así como determinar el consumo de agua (WC) y retorno energético (NER), de un sistema de bioenergía consistente en la gasificación de material leñoso para la generación de electricidad en la localidad rural de Yaxhachén, Oxkutzcab, Yucatán. Esta localidad presenta una alta cobertura vegetal como se muestra en la **Error! Reference source not found.** Unidad funcional y límites del sistema. Todos los indicadores del estudio, como el consumo o las emisiones, se calcularon según la unidad funcional que se definió como 1 kWh. El enfoque de este estudio fue de cuna a puerta. Las etapas de manufactura y desmantelamiento de maquinaria no se incluyen en el sistema ya que su contribución es despreciable. El ACV cubre todos los pasos representados en la Figura 2. Estos pasos delimitan el sistema de estudio para poder compararse con otros escenarios. Para evaluar la carga ambiental del proceso, es necesario tener en cuenta las entradas y salidas de materiales y energía.

2.2 Inventario de ciclo de vida

Se recopilaron todos los datos de las entradas y salidas del sistema de producción de electricidad, para cada etapa incluida en los límites del sistema, obteniéndose datos cuantitativos y cualitativos sobre las emisiones al aire, agua y suelo, así como del uso de materias primas renovables y no renovables. Para obtener información sobre el uso de la leña y la demanda de energía eléctrica de las viviendas de la comunidad, se realizaron 35 encuestas a la población de la localidad, los datos recopilados se escalaron a las 341 viviendas de la comunidad de Yaxhachén. Así, se requieren

551,365 kWh para abastecer de electricidad a todas las viviendas en el transcurso de un año, para lo cual con base a las especificaciones del equipo de gasificación Power Pallet, se necesitan 661.64 t de leña. El inventario de la etapa de pretratamiento

se obtuvo de pruebas experimentales, mientras que para la etapa de proceso termoquímico y generación de electricidad se utilizaron factores de emisión reportados en la literatura (Ahmed et al., 2019).

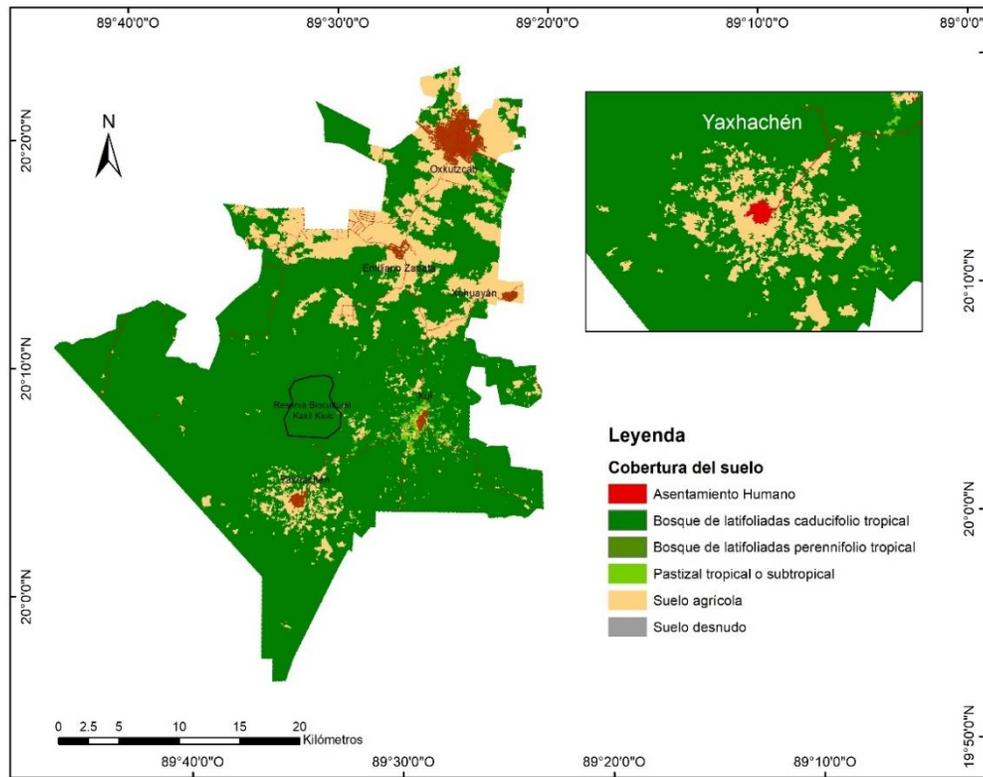


Figura 1. Mapa de uso de suelo del municipio de Oxkutzcab y la localidad de Yaxhachén. Elaborado con datos de la CONABIO, 2020

Los procesos que integran las rutas tecnológicas del proceso analizado son las siguientes:

Etapa de obtención de materia prima. El abastecimiento de biomasa será a partir de la recolección manual en el área establecida de explotación ubicada en la misma área en la cual la localidad se abastece del recurso. La recolecta de forma tradicional se orienta a las especies *Piscidia piscipula* (Jabín) y *Bursera simaruba* (Chacá) debido a su

amplia distribución en la Península de Yucatán y otras características físicas y químicas que los hacen atractivos para su uso como biomasa sólida tales como un poder calorífico del orden de 18 MJ/kg, contenido de carbón fijo del orden de 14-17 % (Tepale Gómez, 2020). La extracción de biomasa se llevará a cabo en el área donde la población de la localidad ya ejerce la práctica de extracción de leña para sus fines particulares.

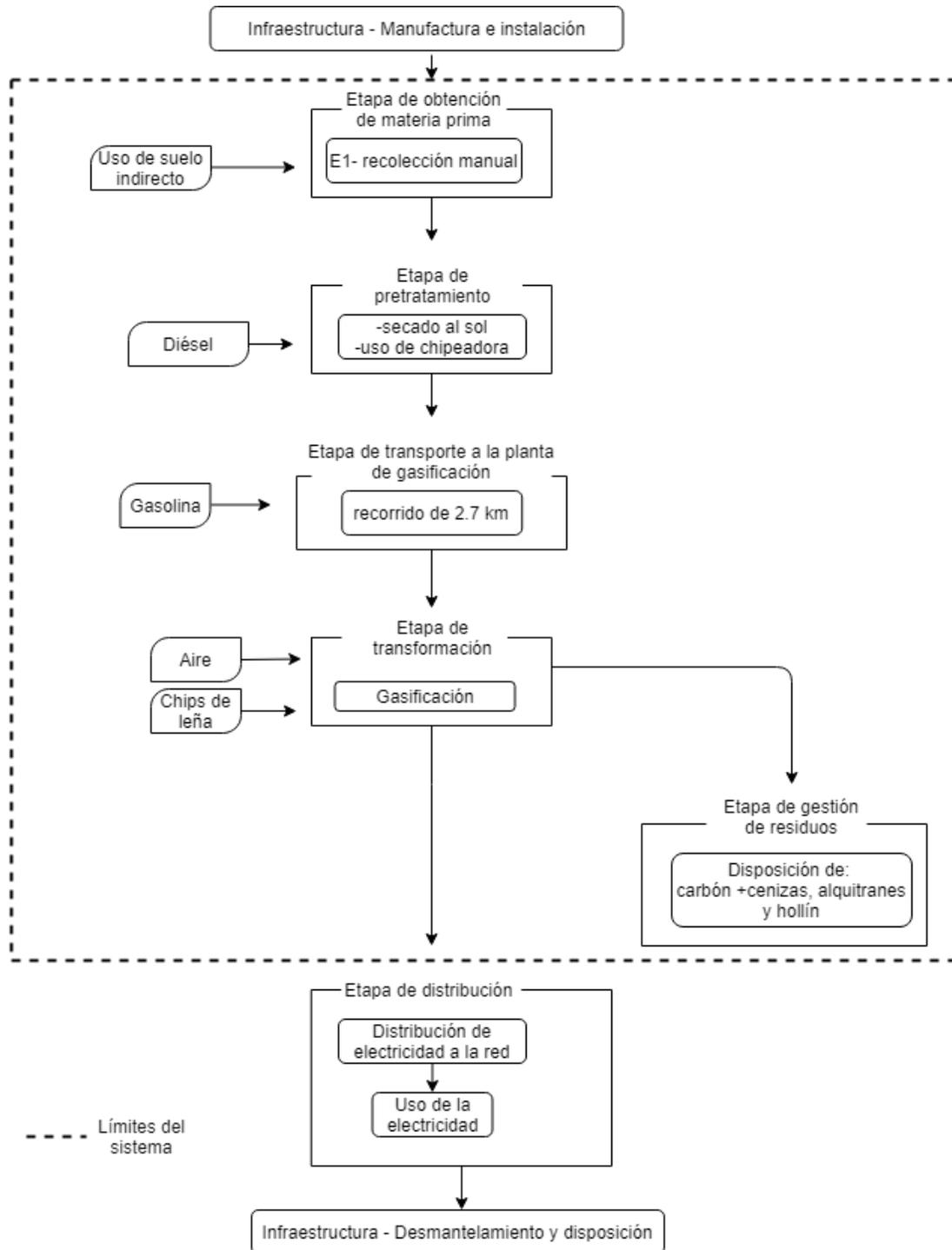


Figura 2. Diagrama que muestra los límites del sistema

En esta etapa no se contemplan insumos de materia y energía puesto que se asume el método de extracción tradicional, es decir de forma manual, usando un machete. Esta actividad se realizará por los mismos

pobladores de Yaxhachén teniendo como fundamento su conocimiento del lugar, las especies vegetales, y la forma más adecuada para realizar los cortes que preserven el recurso. Según lo reportado en el inventario

estatal forestal y de suelos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2014). El municipio de Oxkutzcab tiene una superficie de 85,652.08 ha de las cuales el 84 % (71,636.88 ha) corresponden a selva alta y mediana caducifolia con una densidad de 829 árboles/ha, así como 6 % (5,494.72 ha) de selva baja caducifolia con una densidad de 515 árboles/ha. La selva alta y mediana caducifolia cuenta con 29 % (20,889.31 ha) de disponibilidad para las especies de Jabín y Chacá, mientras que la selva baja caducifolia cuenta con 20 % (1,076.42 ha) de disponibilidad para las mismas especies.

Etapas de pretratamiento: Debido a que las condiciones óptimas a las que trabaja el gasificador requieren que el porcentaje de humedad de la biomasa no supere el 30 %

(siendo el recomendado por el fabricante del equipo del 20 %) y un tamaño de partícula de 1-4 cm, se consideró un secado natural en almacenes de leña teniendo como referencia las curvas de secado de madera al aire reportados en la literatura (Fuentes-Salinas et al., 2003). La leña se secará entre 6 y 7 días para alcanzar un contenido de humedad del 20 %. En la reducción de tamaño se considera el uso de una chipeadora modelo CH5653, que funciona con un motor 653cc Subaru EH alimentado con gasolina, con un rendimiento obtenido experimentalmente de 1.45 L por 163 kg de biomasa chipeada.

La zona de pretratamiento se ubicó en la zona de recolección de biomasa con el fin de evitar un transporte adicional, como se muestra en la Figura 3.

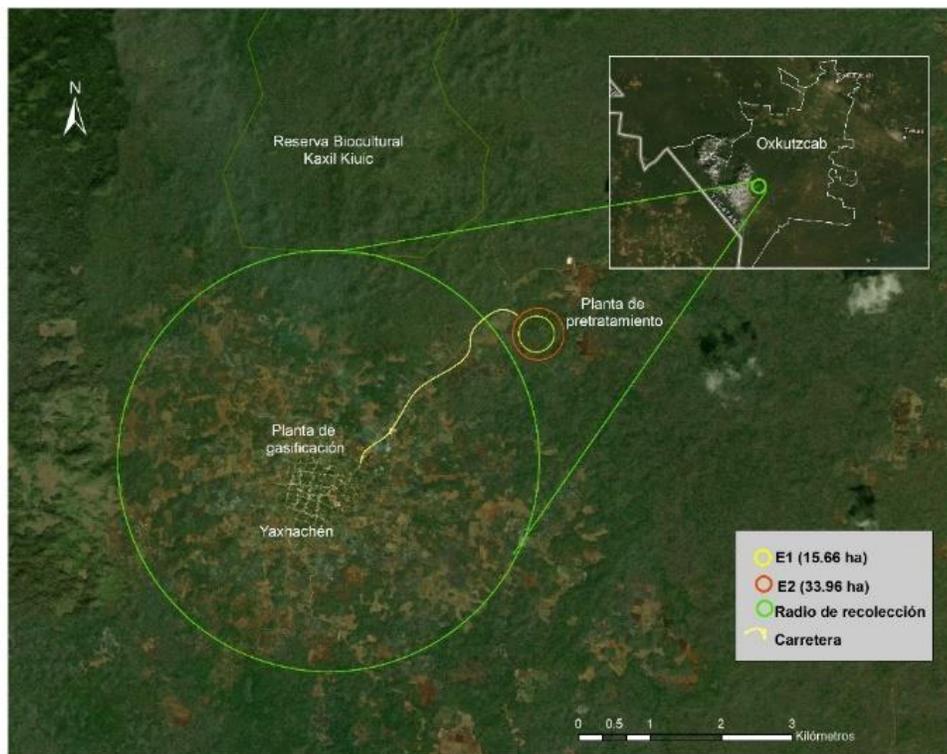


Figura 3. Ubicación del área de colecta de leña en la periferia del radio de recolección habitual por parte de los habitantes de Yaxhachén.

Etapa de transporte: la biomasa una vez pretratada se trasladará a la planta de gasificación, por lo que considero que su ubicación esté en las cercanías del área de recolección de biomasa, con la finalidad de que la distancia de transporte de la biomasa sea mínima (3 km), ver Figura 3. El consumo de gasolina para esta actividad se tomó de las encuestas realizadas a la comunidad en donde se reportó que una vivienda requiere de 5.36 L de gasolina por año para la actividad de recolección, por lo que esta cantidad se extrapolo a las 341 viviendas de la localidad, así se obtuvo una demanda de 1,828.51 L de gasolina por año. Se utilizan como vehículos de transporte camionetas con rendimientos de 12 km/L y motocicletas de 40 km/L. En promedio se recorren 152.6 km al año.

Etapa de transformación: En esta etapa se consideró un sistema integrado de gasificación- motogenerador de electricidad de la marca Power Pallet. El gasificador utilizado es de tipo Downdraft que utiliza aire atmosférico inyectado en el centro del reactor para oxidar parcialmente el combustible (Ahmed et al., 2019). Las dimensiones del equipo son: 1.4 m x 1.4 m

x 2.2 m. La tolva del gasificador con capacidad de 330 L, se alimenta con los chips de biomasa leñosa, se enciende el gasificador y transcurrida la transformación de la biomasa sólida a gas— tras haber ocurrido las reacciones de pirolisis, combustión y craqueo de alquitrán—, el gas de síntesis producido se hace circular a través de un ciclón para eliminar las partículas arrastradas. Posteriormente, se enfría el gas de síntesis y se hace pasar a través de un separador de alquitrán. Finalmente, el motor de combustión interna quemará el gas de síntesis para generar electricidad (ver Figura 4) (Maneerung et al., 2018), el generador acoplado al motor de combustión cuenta con una regulación automática de voltaje. Los gases de escape se componen principalmente de NO_x, CO₂, CO y CH₄ (Ahmed et al., 2019). Los datos de emisiones del gas de escape al aire se obtuvieron de datos reportados en la literatura. Los datos de residuos generados en esta etapa se obtuvieron experimentalmente con pruebas directas en el equipo Power Pallet; los residuos considerados son: una mezcla de carbón y cenizas, partículas finas (hollín) y alquitrán.

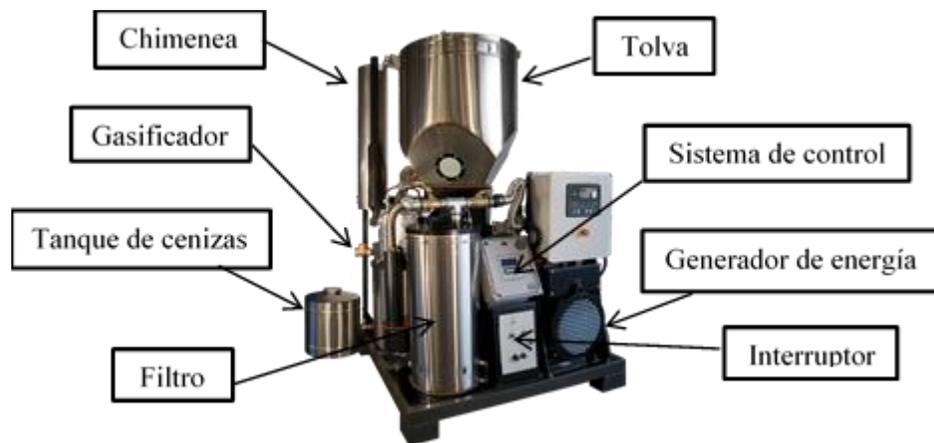


Figura 4. Componentes del equipo gasificador-generador.

La energía producida cubrirá una demanda anual de 551,364 kWh, es decir, 1,510 kWh por día que puede ser cubierta equipos Power Pallet operando durante 24 horas —3 equipos operando las primeras 12 horas del día y los otros 3 equipos operando las 12 horas restantes— a una potencia de 20 kW. La electricidad producida se inyectará a una red eléctrica particular, es decir, desconectada de la red administrada por el gobierno.

Etapas de gestión de residuos: En el proceso de gasificación, se obtiene como residuos una mezcla de carbón y cenizas (en el reactor de gasificación), partículas finas y alquitranes. Estos residuos se dispondrán en el relleno sanitario. El alquitrán producido durante el proceso de gasificación representa la fracción condensable de hidrocarburos. El carbón residual presenta un importante contenido de carbono de 86-88 % en peso seco (Vonk et al., 2019), por lo que se contempló su uso en otras aplicaciones como mejorador de suelos.

2.3 Método de evaluación de impactos

Se utilizó el método CML-IA v3.03 del software SimaPro v8.1. Este método evalúa los impactos ambientales potenciales en las categorías de línea base, y se eligió por ser la más utilizada para ACV de biocombustibles (Maneerung et al., 2018). Se estimó el porcentaje de mitigación en las categorías de impacto ambiental seleccionadas para el sistema de generación de electricidad mediante gasificación de

biomasa. Los resultados obtenidos se compararon con las emisiones de un sistema de generación de electricidad a partir de la mezcla energética usada en el contexto mexicano disponible en el software antes mencionado.

La tasa de retorno energético (NER) es la relación entre la salida de energía de los productos y la energía (no renovable) de los insumos utilizados a lo largo del ACV (Amouri et al., 2017). Para este estudio, el cociente sería la energía eléctrica total producida mediante la gasificación de biomasa leñosa entre la cantidad de energía consumida durante todo el ciclo de vida. El indicador de consumo de agua se refiere al consumo de agua durante el ciclo de vida que deja de estar disponible en las reservas acuíferas al término del ciclo de vida estudiado. Para este estudio los datos de consumo de agua se obtuvieron del inventario de la base de datos Ecoinvent v2.1 incorporado en el software SimaPro.

Los datos obtenidos en el inventario de ciclo de vida (balance de masa y energía), se ingresaron al software SimaPro, obteniendo una modelación de todos los procesos del ciclo de vida del escenario propuesto. Con la ayuda de este software se calculó cuantitativamente los impactos ambientales, por categoría de impacto, para cada etapa del proceso. Los módulos utilizados del programa SimaPro para modelar cada insumo se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Módulos del software SimaPro v8.1 utilizados para modelar cada insumo del escenario propuesto.

Parámetro	Flujo	Nombre del módulo en SimaPro
Electricidad (sistema actual)	Salida	Electricity, high voltage {MX} market for Alloc Def, U
Chipeadora	Entrada	Wood chipping, chipper, mobile, diesel, at forest road {RoW} wood chipping, mobile chipper, at forest road APOS, U
Alquitrán	Salida	Wood ash mixture, pure {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, U
Carbón- cenizas	Salida	Wood ash mixture, pure {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, U
Transporte	Entrada	Transport, combination truck, gasoline powered/US
NO _x	Salida	Nitrogen oxides
CO ₂	Salida	Carbon dioxide, biogenic
CO	Salida	Carbon monoxide
CH ₄	Salida	Methane
Hollín	Salida	Wood ash mixture, pure {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, U

2.4 Interpretación de resultados

En el ACV de generación de electricidad mediante gasificación de biomasa, se evaluaron las categorías de impacto ambiental de punto medio, es decir, se estimó el peligro potencial de las emisiones cuando aumentan su concentración en alguno de los repositorios ambientales (agua, suelo, aire). Las categorías de GWP, POCP y HTP son las categorías más relevantes en los análisis de sistemas bioenergéticos y son las categorías en las que se centró este análisis.

Se comparó el rendimiento ambiental de la producción de electricidad mediante la gasificación de biomasa y la obtenida en la generación de electricidad actual a base de combustible fósil. Se utilizó el módulo del

mix eléctrico mexicano de la base de datos Ecoinvent para la determinación de impacto ambiental de éste último. En este trabajo, solamente se comparó el ACV de la producción de electricidad, sin considerar el impacto de la distribución y abastecimiento de electricidad a los hogares.

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis de inventario

Los valores del inventario de ciclo de vida, referenciado a la unidad funcional del kWh), para el sistema de generación de electricidad por gasificación de la biomasa leñosa se resumen en la Tabla 2. Como se puede observar en la tabla de inventario, las emisiones de CO₂ son significativamente mayores al resto de los gases, esto se debe a la presencia de CO₂ en el syngas y a la conversión del CO a CO₂ durante la

combustión del syngas, este comportamiento ya ha sido reportado en otros estudios (Shah et al., 2010; Indrawan et al., 2017). La presencia de monóxido de carbono y metano en este gas se atribuye a

una combustión incompleta del syngas. Se observa también la obtención una gran cantidad de la mezcla carbón+cenizas como residuo del gasificador.

Tabla 2. Inventario de ciclo de vida para el escenario propuesto. Se muestran los datos anuales para el sistema propuesto y la cantidad referenciada a la unidad funcional (1 kWh).

Etapa	Parámetro	Unidad	Cantidad	Cantidad / kWh	Fuente del dato
	Energía	kWh	551,364	1.00E+00	Tomado de encuestas
Extracción	Leña	kg	661,637	1.20E+00	Dato calculado**
Transporte	Gasolina	L	1,828	3.32E-03	Tomado de encuestas
Pretratamiento	Diésel	L	7,062	1.28E-02	Experimental
Generación de electricidad	NOx	kg	1,587	2.88E-03	Dato calculado*
	CO ₂	kg	1,012,305	1.84E+00	Dato calculado*
	CO	kg	7,476	1.36E-02	Dato calculado*
	CH ₄	kg	5,756	1.04E-02	Dato calculado*
Residuos	Carbón + cenizas	kg	31,506	5.71E-02	Experimental
	Alquitrán	kg	1,418	2.57E-03	Experimental
	Hollín	kg	15,753	2.86E-02	Experimental

*Dato calculado a partir de lo reportado por Ahmed et al., 2019. **Dato calculado con base al rendimiento del equipo Power Pallet.

3.2 Evaluación de impacto ambiental

En la Tabla 3 se muestra el consumo de agua y la energía consumida en las diferentes etapas del ciclo de vida del proceso. Se observa que en la etapa de pretratamiento se consume hasta 6.28 m³/MWh, que representa un 75 % del total de agua consumida en el ciclo de vida. Esto es debido al uso de la chipeadora que funciona con diésel. Las etapas de pretratamiento y de transporte son las que consumen energía

fósil. En la etapa industrial, la energía requerida en el proceso de gasificación es la energía generada en la zona de combustión de la biomasa. La razón de energía neta para el sistema que se obtuvo fue de 4.3, lo cual indica que el proceso es rentable en términos energéticos, comparado con el NER de la electricidad producida mediante carbón que es de 3.8 (Zang et al., 2020). En general, la tasa de retorno energético en los sistemas de bioenergía se encuentra en un rango de 1 a

13, dependiendo del tipo de biomasa y el proceso usado, por lo que el valor obtenido está dentro de este rango; por otra parte, es similar al valor obtenido en sistemas de

gasificación de biomasa para producción de electricidad que han reportado valores de 4.10 (Zang et al., 2020) y 3.63 (Briones-Hidrovo et al., 2021).

Tabla 3. Consumo de agua fresca y energía consumida durante la producción de electricidad a partir del proceso de gasificación de biomasa leñosa.

Etapa	Consumo de agua (m ³ /kWh)	Porcentaje (%)	Energía consumida (kWh/kWh)	Porcentaje (%)
Transporte	0.00E+00	0.00	3.84E-02	16.44
Industrial	0.00E+00	0.00	0.00E+00	0.00
Gestión de residuos	2.07E-03	24.76	2.37E-03	1.02
Pretratamiento	6.28E-03	75.24	1.93E-01	82.54
Total	8.34E-03	100.00	2.33E-01	100.00

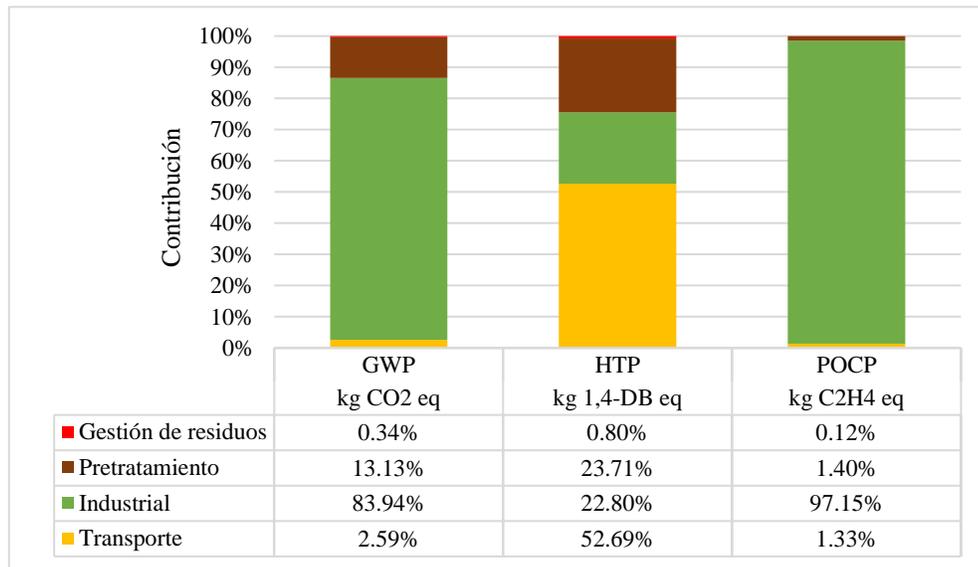


Figura 5. Distribución y valores totales de los impactos ambientales potenciales en las categorías GWP, HTP y POCP.

3.2.3 Impactos potenciales: GWP, HTP y POCP

En la Figura 5, se muestra la distribución de los impactos ambientales potenciales de los

escenarios estudiados para cada etapa durante la producción de electricidad. Se observa que el mayor impacto del transporte se presenta en la categoría de HTP. La etapa

industrial contribuye en forma notable a las categorías de POCP y GWP, debido a las emisiones de CO y CH₄ presentes en los gases de escape de motor de combustión interna. Las emisiones de CO₂ no tienen un impacto en el sistema porque se trata de emisiones biogénicas y se consideran neutras.

3.2.4 Impactos potenciales: otras categorías

En la Figura 6 se muestran otros impactos ambientales potenciales del sistema de producción de energía eléctrica en los escenarios estudiados. A continuación, se describen las emisiones que contribuyen a cada categoría de impacto en cada etapa del sistema.

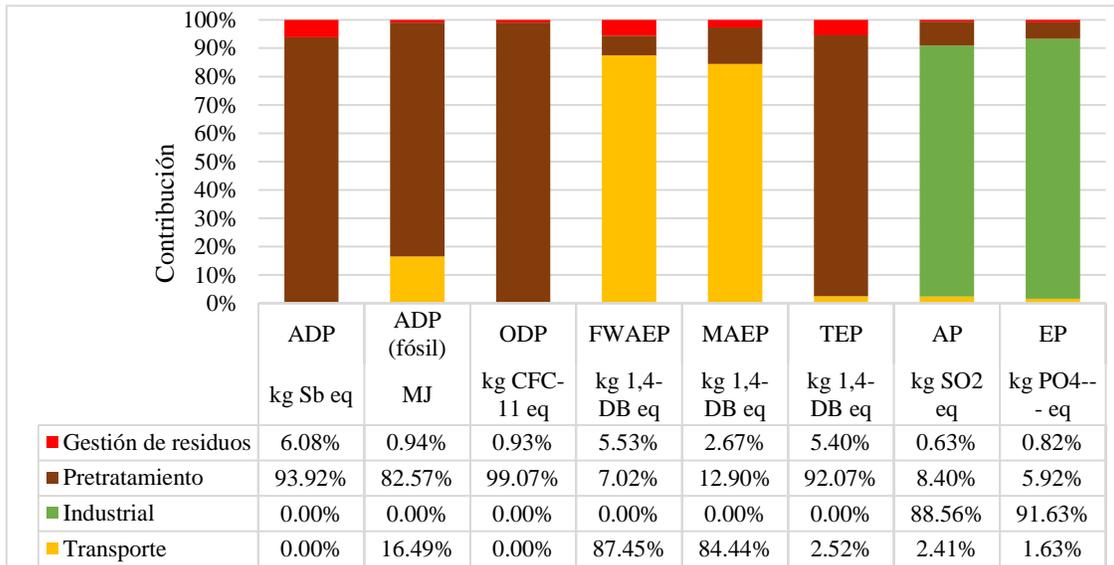


Figura 6. Otros impactos ambientales potenciales del sistema de bioenergía en los escenarios estudiados.

El pretratamiento está relacionada al uso de una chipeadora que funciona con diésel por lo que las emisiones de CO₂, NO_x en su combustión afectan principalmente a las categorías de: ODP (potencial de reducción de la capa de ozono), ADP (potencial de reducción de recursos abióticos), TEP (potencial de toxicidad terrestre) y ADP fósil (potencial de reducción de recursos abióticos fósiles). Este resultado concuerda con lo reportado por Casas-Ledón et al., pues menciona que el uso de combustible

fósil por la maquinaria forestal impacta negativamente a la categoría de ODP.

La etapa de transporte incluye las emisiones debidas a la combustión de gasolina utilizada en los vehículos que se encargarán de llevar los chips de leña, estas emisiones impactan principalmente a las categorías de: FWAEP (potencial de toxicidad en agua dulce) y MAEP (potencial de toxicidad en agua marina). Esto concuerda con lo obtenido por Casas-Ledón et al., pues menciona que la etapa de transporte

contribuye con valores superiores al 53 % para estas categorías.

En la etapa industrial las emisiones representadas son las producidas durante la combustión del syngas en el motor de combustión interna que producirá la energía eléctrica, las emisiones de NOx impactan significativamente a las categorías de AP (potencial de acidificación) y EP (potencial de eutrofización). Este resultado es similar al reportado por Rajabi et al. 2019, y Casas-Ledón et al. 2019, pues mencionan que las emisiones de NOx generadas en la combustión del syngas son las causantes del impacto en la categoría de AP —ya que no se le puede atribuir al SO₂ pues la biomasa contiene cantidades insignificantes de azufre— y EP.

La etapa de gestión de residuos presentó contribuciones poco significativas en las categorías de impacto evaluadas, sin embargo, podría proponerse el uso del residuo carbón+cenizas (biocarbón) como mejorador del suelo.

En la Figura 7 se presenta el desglose de las contribuciones a cada categoría de impacto. Se observa que las emisiones de CH₄ y CO en la etapa industrial son las principales contribuyentes a las categorías de GWP y POCP respectivamente. Aberilla et al. 2019, obtuvieron un resultado similar pues reportan que la emisión de CH₄ del proceso de gasificación representa un 37 % a la categoría de GWP. En la etapa de transporte el mayor aporte a la categoría de HTP se atribuye a la combustión de la gasolina, lo cual emite NOx y material particulado nocivos para la salud.

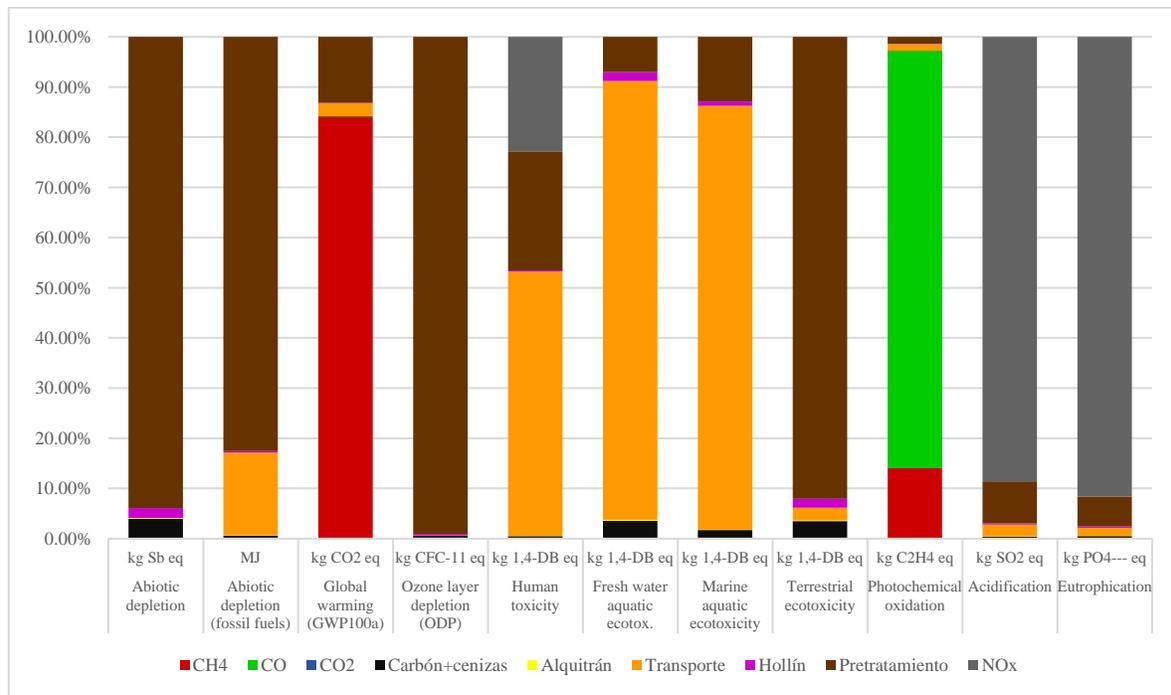


Figura 7. Desglose de las contribuciones a las categorías de impacto.

3.3 Comparación del sistema propuesto y el actual de generación de electricidad.

En la Tabla 4 se muestra el potencial de mitigación ambiental del uso de gasificación de la biomasa para la generación de electricidad con respecto a la electricidad producida de la red en México (con una matriz energética de combustibles fósiles).

Se observa que existe mitigación en las categorías de GWP y HTP cuando se usa biomasa; sin embargo, en la categoría de POCP presenta mayores emisiones en comparación al sistema actual, que en la tabla se reporta como “mitigación negativa”, atribuible a las emisiones de CO del gas exhausto por la combustión incompleta del syngas en el motor.

Tabla 4. Potencial de mitigación de impacto ambiental para la generación de electricidad mediante uso de biomasa con respecto al sistema alternativo fósil.

Categoría de impacto	Unidad / kWh	Impacto total	Sistema alternativo	% mitigación
GWP	kg CO _{2eq}	3.47E-01	6.29E-01	45
HTP	kg 1,4-DB _{eq}	1.52E-02	6.66E-02	77
POCP	kg C ₂ H _{4eq}	4.42E-04	1.45E-04	-206

4. Conclusiones

En el análisis de ciclo de vida del escenario estudiado para la producción de energía eléctrica, se encontró que tiene la capacidad de mitigar el impacto en las categorías de GWP 45 % y HTP 77 %; sin embargo, en la categoría de POCP no se lograron mitigar los impactos ambientales con respecto al sistema fósil debido a las emisiones de CO en el gasificador. La razón de energía neta del sistema que se obtuvo fue de 4.3, lo cual indica que el proceso de gasificación es rentable en términos energéticos por lo que la mejora más relevante para el proceso de gasificación, en términos ambientales, es

disminuir las emisiones de CO a la atmósfera mediante el incremento de la eficiencia de combustión en el dispositivo de generación de electricidad.

Agradecimientos

Al CONACYT, por la beca otorgada No. 929047. Al fondo sectorial Conacyt-Sener Sustentabilidad por su apoyo al proyecto 249581. Al Q. I. Santiago Duarte Aranda, por su apoyo técnico en las pruebas en el equipo Power Pallet y en la aplicación de las encuestas. A la M. en C. Karla D. Chikani Cabrera por su apoyo en el uso del software SimaPro.

Referencias

- Aberilla, J. M., Gallego-Schmid, A., & Azapagic, A. (2019). Environmental sustainability of small-scale biomass power technologies for agricultural communities in developing countries, *Renewable Energy* 141, 493–506.
- Ahmed, O. Y., Ries, M. J., Northrop, W. F. (2019). Emissions factors from distributed, small-scale biomass gasification power generation: Comparison to open burning and large-scale biomass power generation. *Atmospheric Environment* 200, 221-227.
- Amouri, M., Mohellebi, F., Zaïd, T. A., & Aziza, M. (2017). Sustainability assessment of *Ricinus communis* biodiesel using LCA Approach, *Clean Techn Environ Policy* 19, 749–760.
- Briones-Hidrovo, A., Copa, J., Tarelho, L. A. C., Gonçalves, C., Pacheco da Costa, T., & Dias, A. C. (2021). Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion, *Journal of Cleaner Production* 289, 125680.
- Casas-Ledón, Y., Flores, M., Jiménez, R., Ronsse, F., Dewulf, J., & Arteaga-Pérez, L. E. (2019). On the environmental and economic issues associated with the forestry residues-to-heat and electricity route in Chile: Sawdust gasification as a case study, *Energy* 170, 763–776.
- CENACE, Centro Nacional de Control de Energía. (2018). Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y RGD 2019—2033. <https://www.cenace.gob.mx/Docs/Planeacion/ProgramaRNT/Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y RGD 2019-2033.pdf>
- Cherubini, F., & Ulgiati, S. (2010). Crop residues as raw materials for biorefinery systems – A LCA case study, *Applied Energy* 87, 47–57.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (2020). Cobertura del suelo de México a 30 metros, 2015. Esquema de Clasificación del Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura del Suelo de América del Norte (NALCMS). CONABIO.
- Devi, L., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2003). A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass and Bioenergy* 24, 125-140.
- Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Chi, Y., Weiss-Hortala, E., Ni, M. (2018). Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: Theoretical analysis and case study of commercial plants. *Science of The Total Environment* 626, 744–753.
- Fuentes-Salinas, M., Luna-Sánchez, D., Osorio-Suárez, J., & Corona-Islas, J. (2003). Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 9, 171-176.

Indrawan, N., Thapa, S., Bhoi, P. R., Huhnke, R. L., & Kumar, A. (2017). Engine power generation and emission performance of syngas generated from low-density biomass, *Energy Conversion and Management* 148, 593–603.

International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040:2006, Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>

Kirsanovs, V., Blumberga, D., Veidenbergs, I., Rochas, C., Vigants, E., & Vigants, G. (2017). Experimental investigation of downdraft gasifier at various conditions. *Energy Procedia*, 128, 332-338.

Maier, J. M., Sowlati, T., & Salazar, J. (2019). Life cycle assessment of forest-based biomass for bioenergy: A case study in British Columbia, Canada. *Resources, Conservation and Recycling* 146, 598-609.

Maneerung, T., Li, X., Li, C., Dai, Y., & Wang, C.-H. (2018). Integrated downdraft gasification with power generation system and gasification bottom ash reutilization for clean waste-to-energy and resource recovery system. *Journal of Cleaner Production* 188, 69-79.

Manning, D. T., & Taylor, J. E. (2014). Migration and fuel use in rural Mexico. *Ecological Economics* 102, 126-136.

Navarro-Pineda, F. S., Handler, R., & Sacramento-Rivero, J. C. (2017). Potential effects of the Mexican energy reform on life cycle impacts of electricity generation in Mexico and the Yucatan region. *Journal of Cleaner Production* 164, 1016-1025.

Rajabi Hamedani, S., Del Zotto, L., Bocci, E., Colantoni, A., & Villarini, M. (2019). Eco-efficiency assessment of bioelectricity production from Iranian vineyard biomass gasification. *Biomass and Bioenergy* 127, 105271.

Safarian, S., Unnthorsson, R., & Richter, C. (2020). Performance analysis and environmental assessment of small-scale waste biomass gasification integrated CHP in Iceland. *Energy* 197, 117268.

Shah, A., Srinivasan, R., D. Filip To, S., & Columbus, E. P. (2010). Performance and emissions of a spark-ignited engine driven generator on biomass based syngas. *Bioresource Technology* 101, 4656–4661.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). *Inventario estatal forestal y de suelos*, Yucatán 2013.

Tepale Gómez, M. A. (2020). Evaluación de dos especies leñosas de la península de Yucatán como posibles cultivos dendroenergéticos. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

Vonk, G., Piriou, B., Felipe Dos Santos, P., Wolbert, D., & Väitilingom, G. (2019). Comparative analysis of wood and solid recovered fuels gasification in a downdraft fixed bed reactor. *Waste Management* 85, 106–120.

Zang, G., Zhang, J., Jia, J., Lora, E. S., & Ratner, A. (2020). Life cycle assessment of power-generation systems based on biomass integrated gasification combined cycles. *Renewable Energy*, vol. 149, pp. 336–346.