

EL GAS DE SÍNTESIS: ENERGÍA LIMPIA A PARTIR DE BIOMASA PARA UN FUTURO SOSTENIBLE

Gema Báez-Barrón ^a, Francisco Javier López-Flores ^{b,*}, José María Ponce-Ortega ^a

^a Departamento de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 58060, México.

^b Programa de Posgrado en Ingeniería Química, Departamento de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, 80000, México. francisco.lopez@uas.edu.mx

Resumen

La búsqueda de opciones sostenibles en términos energéticos ha sido impulsada por la creciente preocupación por el cambio climático, el incremento de las emisiones contaminantes y la dependencia de los combustibles fósiles. La biomasa se ha consolidado como un recurso energético fundamental para generar energía eléctrica y térmica mediante la gasificación, un proceso que convierte materiales orgánicos en gas de síntesis (*syngas*). El gas de síntesis es una mezcla de gases que contiene CO, H₂, N₂, CO₂, entre otros compuestos, lo que lo convierte en una opción prometedora para la producción de combustibles sintéticos, electricidad e hidrógeno verde. Además, la biomasa ofrece beneficios económicos y ambientales significativos, especialmente en regiones con abundante disponibilidad de residuos agrícolas, forestales o industriales. En los últimos años, la biomasa ha cobrado importancia debido a su capacidad para convertir desechos en energía y su potencial papel en la transición energética. Este trabajo explora qué es el gas de síntesis, cómo se produce, cuáles son sus aplicaciones y por qué se considera una pieza clave en la transición hacia sistemas energéticos más sustentables.

Palabras clave: Biomasa; Gasificación; Gas de síntesis (*syngas*); Transición energética; Energías renovables

SYNGAS: CLEAN ENERGY FROM BIOMASS FOR A SUSTAINABLE FUTURE

Abstract

The search for sustainable energy options has been driven by growing concerns about climate change, increasing pollutant emissions, and dependence on fossil fuels. Biomass has become a key energy resource for generating electricity and heat through gasification, a process that converts organic materials into synthesis gas (*syngas*). *Syngas* is a mixture of gases containing CO, H₂, N₂, CO₂, and other compounds, making it a promising option for producing synthetic fuels, electricity, and green hydrogen. Furthermore, biomass offers significant economic and environmental benefits, especially in regions with abundant agricultural, forestry, or industrial waste. In recent years, biomass has gained importance due to its ability to convert waste into energy and its potential role in the energy transition. This work explores what synthesis gas is, how it is produced, its applications, and why it is considered a key component in the transition to more sustainable energy systems.

Keywords: Biomass; Gasification; Synthesis gas; Energy transition; Renewable energies

1. Introducción

La búsqueda de alternativas energéticas sostenibles se ha vuelto fundamental ante la necesidad urgente de reducir las emisiones de contaminantes, mitigar el cambio climático global y enfrentar el agotamiento de los combustibles fósiles. En las últimas cuatro décadas, el consumo mundial de energía se ha duplicado, alcanzando un preocupante rango de 8,000 a 10,000 millones de toneladas equivalentes de petróleo anuales (Arteaga-Pérez y col., 2015).

Por esta razón, la generación de energía mediante sistemas que utilizan fuentes renovables es cada vez más importante. Estos sistemas tienen el beneficio adicional de diversificar la matriz energética y reducir la dependencia del petróleo, al mismo tiempo que disminuyen las emisiones mundiales de CO₂.

En este contexto de inestabilidad, la biomasa surge como una solución prometedora para transformar el panorama energético hacia un entorno sustentable. A pesar de ser uno de los recursos energéticos con mayor potencial en naciones desarrolladas y emergentes, aún no ha experimentado el crecimiento esperado. La gasificación de biomasa, que permite la producción de energía térmica y eléctrica,

destaca como uno de los sistemas más prometedores. Este proceso facilita la obtención de gas de síntesis (*syngas*), compuesto principalmente por H₂, N₂, CO, CO₂ y CH₄, junto con subproductos sólidos. Se trata de un gas energético que puede emplearse para generar electricidad, producir hidrógeno y sintetizar combustibles.

Los estudios más recientes han demostrado que el gas de síntesis ofrece, además de beneficios ambientales, oportunidades económicas para regiones con abundante disponibilidad de biomasa.

2. Gas de síntesis

El gas de síntesis es una mezcla de gases compuesta principalmente por H₂ y CO, además de CO₂, CH₄, H₂O, trazas de hidrocarburos superiores, posibles gases inertes presentes en el agente de gasificación y diversos contaminantes (Rauch et al., 2013). Es importante mencionar que la composición y las propiedades del gas de síntesis pueden variar debido a diversos factores, como se menciona a continuación en la Tabla 1 (Heidenreich y Foscolo, 2014; Ortiz, 2023).

Estos factores influyen además directamente en la generación de contaminantes, como los

que se muestran en la Tabla 2 (Göransson y col., 2010).

Tabla 1. Factores que influyen en la composición y propiedades del gas de síntesis

Factor	Descripción	Ejemplos
Materia prima de biomasa	La calidad del gas generado depende del tipo y composición de la biomasa.	Carbón, desechos orgánicos, residuos sólidos municipales, lodos papeleros, entre otros.
Condiciones de operación	Las variables operativas determinan en gran medida la calidad y rendimiento del gas producido, la formación de alquitrán y los costos de capital.	Temperatura, presión y tiempo de residencia.
Tipo de reactor	La configuración del reactor determina el régimen de flujo, el contacto gas-sólido y los mecanismos de transferencia.	Lecho móvil en co-corriente o contracorriente, lecho fluidizado burbujeante o circulante, o lecho arrastrado
Agente gasificante	El agente empleado define la composición final del gas de síntesis.	Vapor, aire, oxígeno o alguna de sus mezclas.

Tabla 2. Contaminantes generados durante la producción de gas de síntesis

Contaminante	Problema que representa
Metales alcalinos	Genera corrosión metálica a alta temperatura.
Partículas	Provocan contaminación ambiental y erosión de los componentes metálicos. Se generan a partir de compuestos que se condensan, carbón, material de lecho y cenizas.
Azufre y cloro	Podría provocar corrosión ácida de los metales y la presencia de contaminantes dañinos. Los catalizadores son sensibles a los compuestos de azufre y cloro.
Compuestos nitrogenados (NH ₃ , HCN)	Son indeseables por generar condensados corrosivos y contaminantes en los gases de escape como los NO _x , lo que implica un aumento de emisiones contaminantes.
Alquitrán	Provoca la obstrucción de filtros y válvulas. Además, genera corrosión metálica.

2.1 Aplicaciones del gas de síntesis

El gas de síntesis es una de las materias primas más importantes en la industria química, siendo además la vía principal para la obtención de hidrógeno y amoníaco (Ortiz et al., 1994). Su uso se distribuye aproximadamente en un 50% para la producción de amoníaco, 25% para hidrógeno, y el resto para metanol, productos Fischer-Tropsch (FT) y otros compuestos (Rauch y col., 2013).

A partir del gas de síntesis es posible obtener diversos tipos de energía o portadores energéticos, como calor, electricidad, biocombustibles, hidrógeno, biometano y productos químicos (Heidenreich y Foscolo, 2014). Además, puede ser utilizado como combustible en motores de combustión interna, turbinas o equipos de generación de calor y potencia (Estrada y Meneses, 2004). Este gas también se emplea para sintetizar compuestos orgánicos e inorgánicos, producir combustibles líquidos, reducir minerales de hierro y generar atmósferas reductoras para diversos procesos industriales (Ortiz y col., 1994). Su versatilidad permite su aplicación en sectores como el siderúrgico, metalúrgico, del vidrio y alimentario (ver Figura 1).

Las aplicaciones del gas de síntesis producido mediante la gasificación de biomasa son más

limpias y eficientes que las basadas en la combustión directa, ya que el gas es más fácil de almacenar y transportar que los sólidos (Gao y col., 2023).

Por estas razones, el gas de síntesis es un tipo de energía atractiva. Específicamente, es renovable, puede reducir las emisiones netas de carbono cuando la biomasa utilizada proviene de fuentes renovables y tiene la capacidad de transformar residuos en combustible de manera eficaz. Desde el punto de vista del balance de carbono, parte del carbono contenido en la biomasa se transforma en CO y CO₂ durante la gasificación, mientras que otra fracción puede permanecer en subproductos como el biocarbón. En términos energéticos, la eficiencia del proceso depende de la proporción del poder calorífico de la biomasa que se convierte efectivamente en gas utilizable, considerando también las pérdidas térmicas inherentes al sistema.

No obstante, los niveles de hidrógeno y la existencia de humedad y alquitranes en los componentes iniciales para la gasificación pueden llegar a ser problemáticos (Rogers, 2023). La producción, el transporte y el almacenamiento del gas de síntesis plantean problemas relacionados con los peligros que suponen, dado que está formado en su mayor

parte por monóxido de carbono e hidrógeno. Ambos son gases inflamables; además, el primero es tóxico, lo cual puede generar un grave peligro en caso de liberación incontrolada. En años recientes, estos desafíos se han mitigado mediante mejoras en el diseño de reactores, sistemas de limpieza de gas y

estrategias avanzadas de control del proceso. Por lo tanto, la evaluación de los riesgos es un componente esencial para determinar la seguridad en las operaciones de las instalaciones que emplean gas de síntesis (Stolecka y Rusin, 2019).

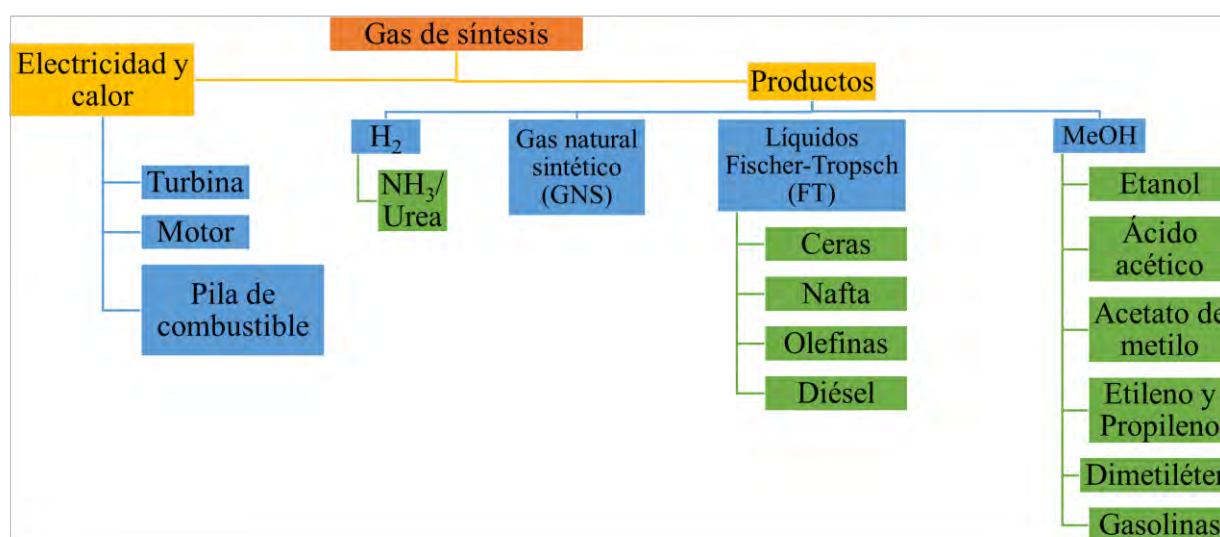


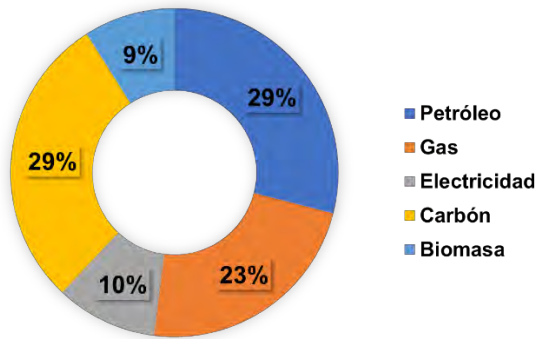
Figura 1. Aplicaciones del gas de síntesis

3. Biomasa

La energía de la biomasa ha sido reconocida como la quinta fuente principal de energía a nivel mundial (Estadísticas de Consumo Energético Mundial, 2024) (ver Figura 2). Según su origen, la biomasa puede clasificarse en tres grupos: residuos sólidos

municipales (basura doméstica, restos de cocina, desechos de jardines urbanos, etc.); residuos industriales (subproductos de prensado, orujos de vino, residuos farmacéuticos); y residuos agrícolas y forestales (residuos de cosecha, estiércol de ganado, residuos del procesamiento forestal) (Gao y col., 2023) (ver Figura 3).

Consumo energético mundial (2024)



El carbono, el oxígeno y el hidrógeno son los componentes principales de la biomasa, acompañados de pequeñas proporciones de elementos minerales como fósforo, potasio y azufre, entre otros. Los principales componentes orgánicos se conocen, generalmente, como hemicelulosa y celulosa.

Figura 2. Estadísticas De Consumo Energético Mundial.

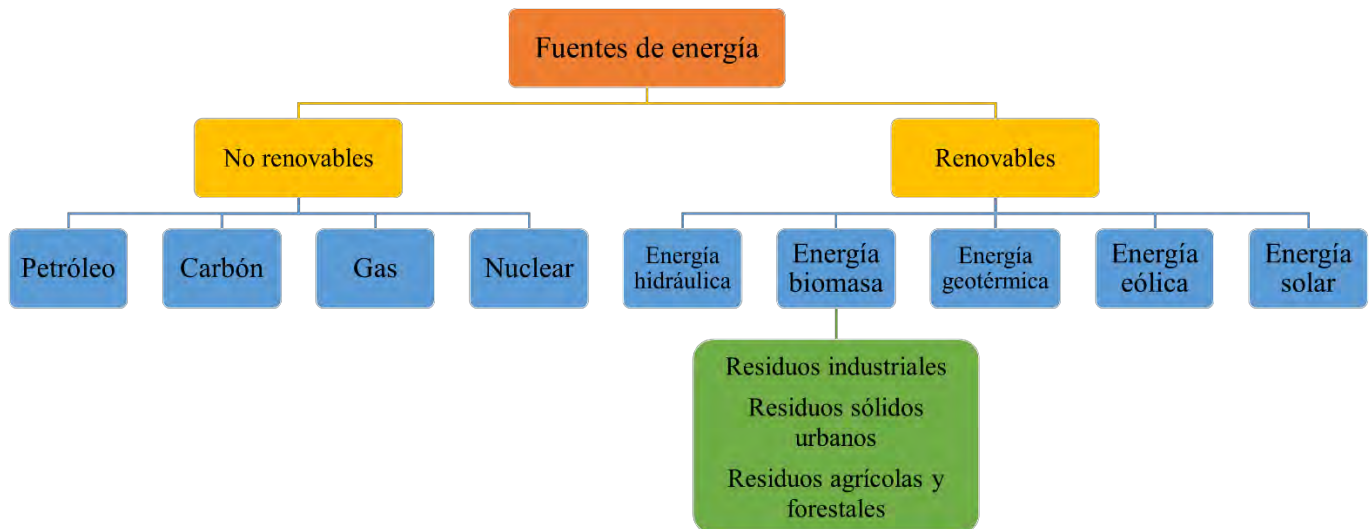


Figura 3. Fuentes de energía

4. Gasificación

La gasificación de biomasa es uno de los métodos más efectivos para convertir la biomasa en diversos tipos de energía, ya que permite obtener un gas utilizable tanto para la generación de energía térmica como eléctrica (Pérez y col., 2010).

La gasificación es un proceso globalmente endotérmico que produce principalmente gas de síntesis, una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, a temperaturas elevadas, normalmente superiores a 850 °C, y en presencia de agentes gasificantes, los cuales son gases reactivos que aportan al medio de reacción condiciones levemente

oxidantes (Ortiz, 2023). Este proceso puede describirse como la sucesión de varios fenómenos complejos: secado, descomposición térmica o pirólisis, combustión parcial, craqueo de gases, vapores y alquitranes, y gasificación de los productos finales (Arteaga-Pérez y col., 2015), mediante los cuales la composición biológica de la biomasa se transforma en gas de síntesis. La eficiencia de conversión de la gasificación varía entre el 70% y el 90%, dependiendo de las condiciones operativas y del tipo de reactor (Gao y col., 2023).

4.1 Proceso de gasificación

La gasificación es, en esencia, el proceso mediante el cual la biomasa sólida se transforma en un gas combustible compuesto principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono mediante un proceso termoquímico (Estrada y Meneses, 2004). El proceso empieza con el tratamiento de la materia prima, también conocido como pretratamiento (por estar situado antes del gasificador). Constará de varias etapas según el tipo de materia, pero incluye, generalmente, fases de secado y prensado para reducir la humedad (Castello-Belmar, 2014). El contenido de humedad en la biomasa puede oscilar entre un 15% y un

90%, dependiendo del origen y el tipo. Inclusive, puede llegar a exceder el 90% en casos como lodos residuales o algunas heces animales (Castello-Belmar, 2014). Luego viene la gasificación. Este proceso se desarrolla en una serie de etapas que pueden ocurrir de manera simultánea o secuencial, dependiendo del tipo de gasificador. La gasificación se divide en cuatro etapas características dentro del reactor:

1. Secado: Esta etapa ocurre entre 70 y 150 °C, y en ella se elimina el agua contenida en la biomasa. Es un proceso endotérmico debido al elevado calor de vaporización del agua, el cual se manifiesta a temperaturas próximas a los 100 °C.
2. Pirólisis: La biomasa experimenta una descomposición térmica en ausencia de oxígeno entre 200 y 600 °C. La pirólisis consiste en la degradación térmica de los polímeros que componen la biomasa lignocelulósica, generando biomasa carbonizada, vapores condensables (incluyendo agua y compuestos orgánicos volátiles) y gases permanentes.

El alquitrán, que resulta de la licuefacción de los gases condensables, es uno de los productos

generados a través de la pirólisis. Es importante tener en cuenta su presencia durante la gasificación por todos los problemas que involucra al ser un líquido viscoso (Castello-Belmar, 2014).

3. Oxidación: Aquí es donde se agrega el agente gasificante para que ocurra la oxidación total (combustión) de algunos gases presentes en el reactor. Este proceso se lleva a cabo entre 700 y 2,000 °C.
4. Reducción: En la zona de reducción se producen diversas reacciones endotérmicas a temperaturas superiores a los 800 °C, que aprovechan el calor generado en la etapa de oxidación para producir los componentes principales del gas de síntesis.

4.2 Variables del proceso y parámetros operativos

Es importante señalar que la composición y las propiedades del gas de síntesis pueden variar de forma significativa debido a diversos factores, entre ellos:

a) Materia prima de biomasa

La biomasa comprende una extensa gama de biomateriales, que incluyen desde carbón vegetal hasta residuos sólidos municipales, desechos orgánicos, madera, pasto energético, paja, algas y bagazo. Otros ejemplos relevantes son los lodos de depuración, los residuos agrícolas y forestales, así como los subproductos generados por las industrias alimentaria y maderera (ver Figura 4).

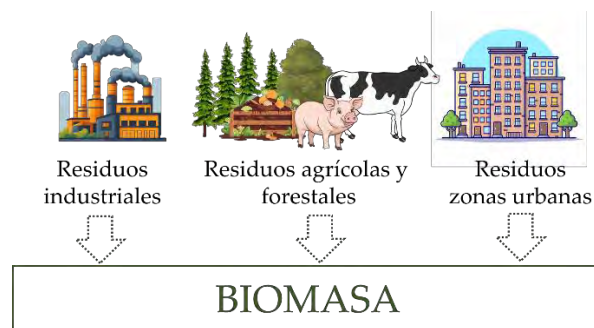


Figura 4. Tipos de Biomasa.

El empleo de diferentes tipos de biomasa implica diversos desafíos y consideraciones para su transporte, almacenamiento y alimentación al reactor, así como para la operación del gasificador y los sistemas de limpieza del gas de síntesis (Heidenreich y Foscolo, 2014). La composición elemental (C-H-O) y la presencia de lignina, celulosa y hemicelulosa influyen directamente en el rendimiento del gas, la producción de

alquitranes y el poder calorífico del gas de síntesis.

b) Condiciones de operación del gasificador

- **Temperatura:** Las reacciones endotérmicas de gasificación se favorecen a temperaturas elevadas, lo que incrementa la producción de H_2 y CO (Göransson y col., 2010). Temperaturas superiores también reducen la formación de alquitranes, aunque pueden aumentar la gasificación del carbón fijo y el desgaste térmico del reactor.
- **Presión:** Muchas reacciones de síntesis se llevan a cabo bajo alta presión, y durante el tratamiento del gas es habitual comprimir el gas de síntesis (Rauch y col., 2013). A mayores presiones puede incrementarse la fracción de metano debido al desplazamiento de equilibrio de la reacción de metanación.
- **Tiempo de residencia en el gasificador:** Un mayor tiempo de residencia del gas en el lecho favorece la descomposición de alquitranes y la conversión del carbón fijo (Göransson y col., 2010).

Sin embargo, tiempos excesivos pueden afectar la eficiencia térmica del reactor.

c) Tipo de reactor

La elección del reactor de gasificación no es trivial, ya que impacta toda la cadena de conversión (Rauch y col., 2013). Según su diseño, los gasificadores se clasifican en tres grupos principales: lecho fijo, lecho fluidizado y flujo arrastrado. Los dos primeros son los más estudiados y se dividen en: lecho fijo ascendente, lecho fijo descendente, lecho fluidizado burbujeante (BFB) y lecho fluidizado circulante (CFB) (Silva y col., 2019).

Reactores de Lecho Fijo: Los gasificadores de lecho fijo tienden a producir mayores cantidades de carbón y alquitranes y, por lo general, presentan una menor eficiencia de transferencia de masa y calor. No obstante, se emplean con frecuencia en plantas de pequeña escala debido a su facilidad de diseño y operación (Heidenreich y Foscolo, 2014). Su costo reducido y simplicidad los hacen ideales para aplicaciones rurales o descentralizadas. Según la dirección del flujo de biomasa, estos reactores son de flujo ascendente (Figura 5) o descendente (Figura 6).

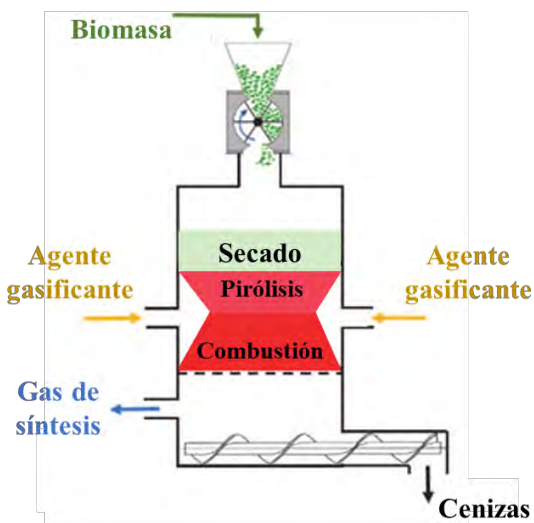


Figura 5. Gasificador de flujo ascendente (Mai y Nguyen, 2020).

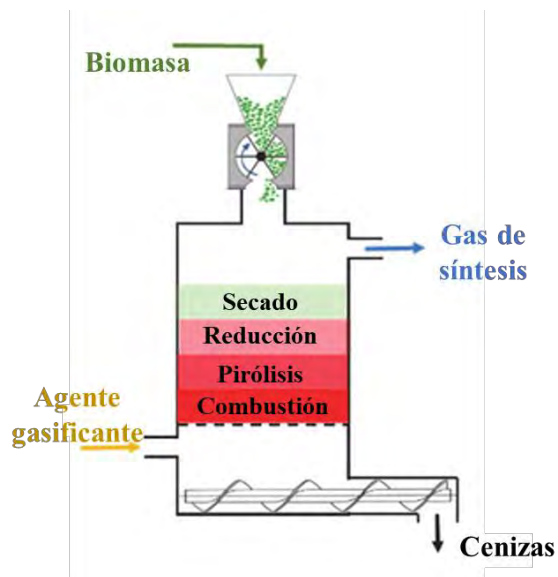


Figura 6. Gasificador de flujo descendente (Mai y Nguyen, 2020).

Reactores de lecho arrastrado: Estos reactores se diseñaron para la gasificación a gran escala. En ellos, el combustible, pulverizado y en suspensión acuosa, y el agente gasificante se alimentan por la parte

superior del reactor. Se operan a temperaturas y presiones elevadas y se consigue un gas con bajo contenido en alquitrane y un alto poder calorífico (Ortiz, 2023). Son comunes en aplicaciones industriales que requieren grandes volúmenes de gas limpio, como la síntesis de combustibles líquidos.

Reactores de Lecho Fluidizado: Los gasificadores de lecho fluidizado se rellenan con un medio inerte (generalmente arena) que favorece la transferencia de calor dentro del reactor, proporcionando mayor estabilidad, homogeneidad térmica y capacidad de procesamiento. La diferencia entre los BFB (Figura 7) y CFB (Figura 8) radica en la velocidad del agente gasificante. En los BFB, la velocidad se mantiene ligeramente por encima de la mínima de fluidización, lo que permite que el lecho permanezca en suspensión sin ser arrastrado. En los CFB, la velocidad del gas es muy superior a la mínima de fluidización, de modo que el material del lecho y los sólidos generados se arrastran hacia un separador y luego se reintegran al reactor, logrando mayor conversión (Ortiz, 2023).

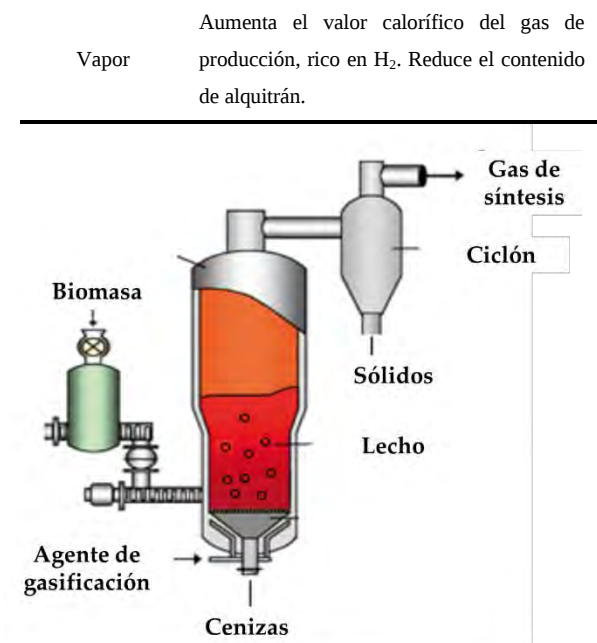


Figura 7. Gasificador de lecho fluidizado burbujeante (Arteaga-Pérez y col., 2015).

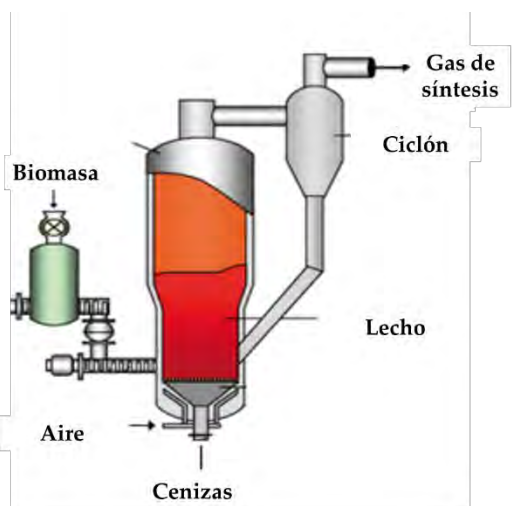


Figura 8. Gasificador de lecho fluidizado circulante (Arteaga-Pérez y col., 2015).

a) Agente gasificante

El agente gasificante es el oxidante suministrado al sistema para reaccionar con la biomasa durante la gasificación. Su elección

influye directamente en la composición final del gas debido al impacto que tiene en las reacciones del proceso (Ortiz, 2023). Los agentes gasificantes pueden ser vapor de agua, oxígeno o mezclas aire-vapor y vapor-oxígeno.

Cuando se utiliza aire para la gasificación, el gas estará diluido en nitrógeno, por lo que tendrá un poder calorífico bajo (entre 4 y 6 MJ/Nm^3), muy inferior al de otros combustibles como biogás (15 - 25 MJ/Nm^3) o gas natural (40 - 45 MJ/Nm^3). En cambio, cuando se emplean otros agentes como vapor, mezclas vapor-oxígeno o CO_2 , el gas generado se clasifica como gas de síntesis y presenta un poder calorífico mucho mayor (12-20 MJ/Nm^3) (Ortiz, 2023). El vapor de agua favorece las reacciones de desplazamiento agua-gas y de reformado, aumentando la fracción de H_2 ; mientras que el oxígeno incrementa la temperatura del reactor, lo que mejora la conversión de carbono y reduce alquitranes.

Su objetivo principal es convertir la materia prima en un gas energético. Las ventajas asociadas a los diferentes agentes de gasificación se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Ventajas de los distintos agentes gasificantes

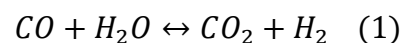
Agente gasificante	Beneficios
Aire	Rango medio de contenido de residuos y carbono. Mejora la combustión parcial en la gasificación. Minimiza los residuos y aumenta el H_2 , CO y CH_4 en el gas. Mejora la eficiencia de conversión química.
Oxígeno	Aumenta el valor calorífico del gas de producción, rico en H_2 . Reduce el contenido de alquitrán.

5. Valor energético del gas de síntesis

Su valor energético depende de varias propiedades que deben tenerse en cuenta:

- **Relación H_2 :CO:** Esta relación constituye un parámetro clave en la calidad del gas de síntesis, ya que determina su idoneidad para procesos de síntesis química posteriores. La relación óptima H_2 :CO puede variar en función de la aplicación, por ejemplo: para síntesis de metanol se requiere una relación distinta que para procesos Fischer-Tropsch, por lo que la etapa de acondicionamiento del gas es clave para

adaptar el gas de síntesis al uso final. En particular, para la mayoría de los procesos de síntesis se requiere una relación H_2 :CO de 2:1. Esta relación se logra a través del control de las condiciones de gasificación y del agente gasificante y, cuando el gas producido no cumple con el valor requerido, se ajusta en un reactor catalítico separado antes del reactor de síntesis. En este reactor ocurre la reacción de desplazamiento agua-gas (1), en la cual el CO reacciona con el vapor de agua para formar CO_2 y H_2 . De esta manera, se puede ajustar la relación H_2 :CO hasta el valor deseado y mejorar el aprovechamiento del gas (Göransson et al., 2010; Rauch y col., 2013).



- **Cantidad de inertes:** Impurezas como el nitrógeno actúan como gases inertes durante la síntesis y su concentración debe mantenerse lo más baja posible. Los inertes reducen la presión parcial de los componentes reactivos y, como consecuencia, disminuyen la conversión. Estos gases deben eliminarse, especialmente en reacciones de síntesis en las que el producto se separa como líquido y el gas residual no convertido se recicla, ya que, sin dicha depuración, los inertes se acumularían progresivamente (Rauch y col., 2013). Otras impurezas presentes en el gas de

síntesis suelen ser compuestos de azufre (por ejemplo, H_2S , COS), cloruro de hidrógeno, compuestos alcalinos y amoníaco. La formación de alquitrán constituye uno de los principales problemas en la gasificación de biomasa: su condensación a bajas temperaturas puede provocar obstrucciones en tuberías, filtros, unidades catalíticas o motores. Además, la presencia de alquitrán disminuye tanto el rendimiento del gas de síntesis como su valor calorífico (Heidenreich y Foscolo, 2014).

- Sensibilidad de los catalizadores: muchos catalizadores empleados en procesos de síntesis pueden ser envenenados por compuestos que contienen azufre, nitrógeno y cloro (Rauch y col., 2013). La presencia incluso de trazas de H_2S , NH_3 , HCl u otros contaminantes puede reducir drásticamente la actividad y la vida útil del catalizador. En consecuencia, los requisitos de pureza del gas de síntesis son especialmente estrictos en procesos catalíticos como la síntesis de amoníaco, metanol o combustibles sintéticos, lo que incrementa la importancia del pretratamiento y depuración del gas.

6. Proyectos innovadores y pilotos

Varios proyectos muestran las tendencias emergentes a escala real. En España, INERCO/CIUDEN (León) instaló una planta de 3 MW th enfocada a oxi-gasificación (aire, O_2/CO_2) para estudiar integración con captura de CO_2 y generación eléctrica mediante motores o cocombustión con carbón (INERCO, 2023). De forma similar, el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) opera un gasificador de 2 MW th (Navarra) que funciona con aire o mezcla vapor/oxígeno y puede procesar biomasa diversas (desde paja de cereal hasta pellets de madera) (INERCO, 2023). Ambos casos demuestran la flexibilidad tecnológica para adaptar el gasificador a distintos combustibles y objetivos (electricidad, calor o materia prima para biocombustibles de segunda generación).

En América Latina, la Universidad Nacional de Río Cuarto (Argentina) colabora con la empresa Canale SRL en un prototipo de gasificador para generación eléctrica. El sistema aprovecha astillas de madera de palets industriales como combustible, produciendo gas de síntesis para motores generadores (Guttlein, 2023). Se estiman mejoras continuas en la conversión (desde aproximadamente el 70% hasta 85–90%)

mediante la optimización de diseño y modelado cinético. Esto implica ajustar la configuración física y las condiciones de operación del reactor, así como desarrollar modelos matemáticos que describen la velocidad y el comportamiento de las reacciones químicas, con el objetivo de incrementar la eficiencia y el rendimiento del gas de síntesis. Otro ejemplo reciente es República Dominicana, donde la ONUDI puso en marcha la primera planta *downdraft* del país con control inteligente mediante IA. Allí se procesan astillas de acacia, madera residual y cáscaras de coco, generando gas de síntesis de calidad ajustable en tiempo real. Como subproducto se obtiene biocarbón (*biochar*), valorizado por su capacidad de secuestrar CO₂ y mejorar suelos.

En Asia, destacan pilotos como el de India. La empresa Arashi Hi-Tech operó ya en 2005 un sistema comercial de 1 MW en Tamil Nadu, alimentado con residuos de coco locales. El gas de dos gasificadores de 500 kW cada uno alimenta cinco generadores de 250 kW, suministrando electricidad al sistema eléctrico del estado (Lundgren y col., 2025). Este proyecto, basado en tecnología del Instituto de Ciencia de la India (IISc), ha funcionado miles de horas, demostrando la viabilidad de la gasificación a escala

industrial con biomasas tradicionales. En conjunto, estos casos ilustran cómo la tecnología pasa de la fase de laboratorio a aplicaciones reales, impulsando la descarbonización en sectores térmicos e industriales.

7. Perspectivas futuras

El futuro de la gasificación se integra con otros vectores energéticos y modelos de economía circular. Este concepto se refiere a un sistema en el que los recursos se mantienen en uso el mayor tiempo posible, se minimizan los residuos y se aprovechan los subproductos como nuevas materias primas. En este contexto, por ejemplo, residuos agrícolas, forestales o urbanos pueden transformarse en gas de síntesis, cerrando ciclos de aprovechamiento y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles (Cerdá y Khalilova, 2016). Entre las oportunidades se incluyen:

- Gasificación + Captura de CO₂ (BECCS): Al incorporar sistemas de captura/almacenamiento de carbono, la combinación gasificación-CCS permite obtener energía renovable con huella negativa de carbono.

Estudios indican que el gas de síntesis de biomasa (y especialmente el hidrógeno derivado) puede alcanzar emisiones netas por debajo de cero (-15 a -22 kgCO₂/kg de H₂) gracias a la separación intrínseca de CO₂ del proceso (Lundgren y col., 2025). De este modo, la gasificación se perfila como una vía clave para cumplir objetivos climáticos con emisiones negativas.

- **Hidrógeno verde:** La gasificación de biomasa es prometedora para producir hidrógeno renovable continuo (no intermitente). Lundgren y col. (2025) destacan que esta ruta resulta “económica y medioambientalmente beneficiosa” para generar hidrógeno “climáticamente positivo” (Lundgren y col., 2025). Se proyecta una producción de aproximadamente 100 kg H₂ por tonelada de biomasa seca, con costos competitivos frente al reformado de metano (aprox. 4 €/kg H₂, potencialmente <3 €/kg en el futuro con mejoras y escala) (Lundgren y col., 2025). Además, existen sinergias: el oxígeno de electrolizadores renovables puede usarse en el gasificador y el calor residual de la electrólisis puede secar

la biomasa, reduciendo costos globales.

- **Economía circular y *biochar*:** La gasificación genera biocarbón (*biochar*) como coproducto valioso. Este material carbonoso, rico en poros, mejora la fertilidad del suelo (retiene agua, nutrientes) y actúa como sumidero duradero de CO₂ (Abolanoz, 2025). Su uso en agricultura o tratamiento de aguas aporta una ruta de valorización de residuos que encaja con modelos circulares. Empresas ya integran *biochar* en cadenas productivas (forestales, agrícolas, construcción) para regenerar ecosistemas y reducir la huella de carbono (Abolanoz, 2025).
- **Electrificación descentralizada:** La modularidad de la gasificación permite instalaciones pequeñas para comunidades rurales dispersas. En zonas aisladas se están instalando gasificadores con capacidad de unos kW a MW, operando con desechos locales (cáscaras de arroz, astillas de madera, residuos agrícolas o animales). Estos sistemas alimentan motores o turbinas ligeras que

proveen electricidad y calor a aldeas (1,000-2,000 habitantes) (Mata y Mata, 2021), reduciendo la dependencia de diésel caro y contaminante. Este enfoque favorece el desarrollo rural sostenible, al aprovechar recursos locales y generar energía limpia cerca de la demanda.

En conjunto, la gasificación de biomasa evoluciona hacia soluciones integradas y más limpias. Los desarrollos futuros apuntan a cadenas productivas multisectoriales (energía, combustibles, fertilizantes) completamente interconectadas, donde la captura de carbono, la producción de hidrógeno y la economía circular convergen para maximizar el beneficio ambiental y social de esta tecnología.

8. Conclusiones

El gas de síntesis obtenido a partir de biomasa se consolida como una alternativa energética estratégica dentro de la transición hacia sistemas más sostenibles. Su versatilidad permite transformar una gran variedad de residuos agrícolas, forestales, urbanos e industriales en un gas energético capaz de generar electricidad, calor, biocombustibles, hidrógeno y productos químicos de alto valor.

Tal como se observó en este trabajo, la

composición del gas de síntesis y su calidad dependen en gran medida de la materia prima, las condiciones de operación y el diseño del reactor, por lo que la optimización de estos elementos es clave para maximizar el rendimiento y minimizar impurezas como los alquitranes.

Los avances recientes demuestran que esta tecnología ya no pertenece únicamente al ámbito experimental. Proyectos en España, Argentina, República Dominicana e India han validado la gasificación a escala real, logrando producir electricidad, calor y combustibles sintéticos a partir de biomasa locales con alta eficiencia. Estas iniciativas muestran que el gas de síntesis puede ser integrado con motores, turbinas, sistemas de captura de CO₂ e incluso métodos de control basados en inteligencia artificial, ampliando así su alcance y viabilidad.

De cara al futuro, la gasificación de biomasa se proyecta como un componente esencial de la bioeconomía circular. Su acoplamiento con tecnologías de captura de carbono (BECCS) tiene el potencial de generar energía con huella climática negativa; la producción de hidrógeno renovable mediante gasificación se vislumbra como una opción continua y competitiva; y el aprovechamiento del *biochar* como sumidero de carbono aporta un

beneficio ambiental adicional. Asimismo, la modularidad de los gasificadores abre oportunidades para electrificar de manera descentralizada a comunidades rurales, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.

En conjunto, el gas de síntesis producido a partir de biomasa representa una herramienta poderosa para valorizar residuos, diversificar la matriz energética y avanzar hacia un modelo más limpio y resiliente. Aunque persisten desafíos tecnológicos y económicos, las tendencias actuales muestran que esta tecnología está madurando rápidamente y que su papel dentro de los sistemas energéticos del futuro será cada vez más relevante.

Referencias

- Abolanoz. (26 de junio de 2025). *Biochar: innovación para la sostenibilidad y la economía circular. Casostenible*. Recuperado el 20 de noviembre de 2025 de <https://www.casostenible.com/post/biochar-innovaci%C3%B3n-para-la-sostenibilidad-y-la-econom%C3%ADa-circular>
- Arteaga-Pérez, L. E., Casas-Ledón, Y., Cabrera-Hernández, J., & Machín, L. R. (2015). Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 72(570), 138-145.
<https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/297249>
- Castello-Belmar, A. (2014). *Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa. [Tesis Pregrado, Universidad de Chile]*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132303>
- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía industrial*, 401(3), 11-20.
- Estadísticas de consumo energético mundial, Enerdata 2024*. Recuperado el 20 de noviembre de 2025 de <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
- Estrada, C. A., & Meneses, A. Z. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica*, 2(25), 155-159.
- Gao, Y., Wang, M., Raheem, A., Wang, F., Wei, J., Xu, D., Song, X., Bao, W., Huang, A., Zhang, S., & Zhang, H. (2023). Syngas

Production from Biomass Gasification: Influences of Feedstock Properties, Reactor Type, and Reaction Parameters. *ACS Omega*, 8(35), 31620-31631. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03050>

Göransson, K., Söderlind, U., He, J., & Zhang, W. (2010). Review of syngas production via biomass DFBGs. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.032>

Guttlein, F. (29 de marzo de 2023). UNRC: *Desarrollan un reactor de biomasa de alto rendimiento para generar electricidad*. La Ribera Web. Recuperado el 20 de noviembre del 2025 de <https://www.lariberaweb.com/unrc-desarrollan-un-reactor-de-biomasa-de-alto-rendimiento-para-generar-electricidad/>

Heidenreich, S., & Foscolo, P. U. (2014). New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 72-95. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.06.002>

INERCO. (6 de septiembre de 2023). *Gasificación de biomasa*. Recuperado el 20 de noviembre del 2025 de

<https://www.inerco.com/es/tecnologia-energetica/gasificacion-de-biomasa/>

Lundgren, J., Vreugdenhil, B., Ganjkanlou, Y., & Baldwin, R. (2025). *Biomass gasification for hydrogen production: IEA Bioenergy: Task 33*. Retrieved from IEA Bioenergy.

<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-114247>

Mai, T. P., & Nguyen, D. Q. (2020). *Gasification of biomass*. IntechOpen eBooks. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93954>

Mata, M. G., & Mata, M. G. (18 de agosto de 2021). *Pueblos inteligentes: Soluciones energéticas en pueblos aislados*. Rural Bridge. Recuperado el 20 de noviembre de 2025 de <https://ruralbridge.es/pueblos-inteligentes-soluciones-energeticas-en-pueblos-aislados/>

Ortiz, I. (2023). Gas de síntesis. 193-215. En: *Usos y Aplicaciones Energéticas de la Biomasa: Hacia una bioeconomía circular*. Guía científico-técnica. Manrique SM, Binda C, Salvo A. y Balderrama B. Editores. Una publicación de la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T). CYTED Ediciones. ISBN:978-84-15413-58-5. Madrid, España. 252 páginas.

Ortiz, J. I. G., Ortiz, M. A. G., Laborde, M. A., Ayastuy, J.L., & Marcos, M.P.G. (1994). Transformación catalítica del gas natural. III. Derivados convencionales del gas de síntesis: amoníaco y metanol. *Información Tecnológica*, 5(2), 29-39.

Ortiz, M.A.G., Marcos, M. P. G., Laborde, M. A., Ayastuy, J.L., & Ortiz, J.I.G. (1994). Transformación catalítica del gas natural. II. Obtención de gas de síntesis. *Información Tecnológica*, 5(2), 19-27.

Pérez, J., Borge, D., & Agudelo, J. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (52), 95-107.

Rauch, R., Hrbek, J., & Hofbauer, H. (2013). Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas. *Wiley Interdisciplinary Reviews Energy and Environment*, 3(4), 343-362. <https://doi.org/10.1002/wene.97>

Rogers, K. (2023, June 30). Syngas. *Encyclopedia Britannica*. Recuperado el 20 de noviembre del 2025 de <https://www.britannica.com/topic/syngas>

Silva, I. P., Lima, R. M., Silva, G. F., Ruzene, D. S., & Silva, D. P. (2019). Thermodynamic

equilibrium model based on stoichiometric method for biomass gasification: A review of model modifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109305>

Stolecka, K., & Rusin, A. (2019). Analysis of hazards related to syngas production and transport. *Renewable Energy*, 146, 2535-2555. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.102>