
Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación

Luis Ernesto Arteaga-Pérez^a, Yannay Casas-Ledón^b, Jagni Cabrera-Hernández^b, Lizet Rodríguez Machín^c

^a Unidad de Desarrollo Tecnológico. Universidad de Concepción. Av. Coordinera 2634. Parque Industrial Coronel. Coronel. Concepción. Chile. ^b Departamento de Ingeniería Química. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní km 5.5. Sta Clara. Cuba. ^c Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní km 5.5. Sta Clara. Cuba.

Gasificació de biomassa per la producció sostenible d'energia. Revisió de les tecnologies i barreres per la seva aplicació.

*Biomass gasification for the production of sustainable energy.
A review on technologies and its implementation barriers.*

Recibido: 27 de mayo de 2014; revisado: 17 de julio de 2014; aceptado: 28 de julio de 2014

RESUMEN

La biomasa es un material de origen natural con alto potencial para la obtención de combustibles, servicios y compuestos químicos de alto valor añadido, en condiciones sustentables. Este recurso puede transformarse a través de procesos biológicos y/o termoquímicos según la aplicación deseada. En la última década se ha evidenciado un notable incremento en la producción mundial de gas de síntesis procedente de la gasificación de la biomasa, esta situación se soporta en el interés mostrado por las corporaciones energéticas para la obtención de combustibles alternativos con base renovable; como son el bio-metano, FT diésel, etanol y el metanol. Unido a esto se desarrollan estudios de factibilidad técnica y económica para la implementación de sistemas de producción de electricidad y calor utilizando biomasa. Entre las alternativas tecnológicas más discutidas figuran: La integración en ciclo combinado de la gasificación (GB-IGCC), la producción de calor y potencia (CHP) y la integración con celdas combustibles de mediana y alta temperatura (GB-FC). El objetivo del presente artículo es recopilar información actualizada sobre la gasificación de biomasa, específicamente sobre los avances tecnológicos y las aplicaciones con más perspectivas de desarrollo a corto plazo y las barreras a vencer antes de su establecimiento a nivel global. Se pudo constatar que la generación distribuida a pequeña escala y los ciclos combinados son opciones que potencian el establecimiento futuro de un mercado para la producción sostenible de energía. Un elemento crítico a tratar en todos los diseños es la presencia de sustancias indeseables en los gases de gasificación (alquitrán, amoníaco, material particulado, NOx).

Palabras clave: Gasificación, biomasa, reactores, tecnologías

SUMMARY

Biomass is a natural material with high potential for the sustainable production of fuels, chemicals and services. This resource can be transformed through biological and/or thermochemical processes according to the desired application. In recent years a rise in the global production of syngas from biomass gasification is evident. This situation has been created by increasing interest in alternative fuels such as bio-methane, F-T diesel and methanol, as well as new applications for integrated heat/power production. Among the most discussed technological alternatives include: Integration into gasification combined cycle (BG-IGCC), the production of heat and power (CHP) and integration with fuel cells (BG-FC). This paper aims to collect updated information on the gasification of biomass, specifically technological advances, and the short term potential applications and on the burdens to overcome before its global introduction. It was found that the small-scale distributed generation and combined cycles are options that enhance the future establishment of a market for sustainable energy production. A critical element to be treated in all designs is the presence of undesirable substances in gasification gases (tar, ammonia, particulate material, NOx).

Key Words: Gasification, biomass, reactors, technologies

RESUM

La biomassa és un material d'origen natural amb alt potencial per l'obtenció de combustibles, serveis i compos-

*Autor para correspondencia: Email: l.arteaga@udt.cl
Telf: + (5641) 266 1855 Fax: + (5641) 275 1233

tos químics d'alt valor afegit, en condicions sostenibles. Aquest recurs pot transformar-se a través de processos biològics i/o termoquímics segons l'aplicació desitjada. En l'última dècada s'ha evidenciat un notable increment en la producció mundial de gas de síntesi procedent de la gasificació de la biomassa. Aquesta situació es suporta en l'interès mostrat per les corporacions energètiques per l'obtenció de combustibles alternatius amb base renovable; com són el bio-metà, FT dièsel, etanol i el metanol. Per consegüent es desenvolupen estudis de factibilitat tècnica i econòmica per a la implementació de sistemes de producció d'electricitat i calor utilitzant biomassa. Entre les alternatives tecnològiques més discutides figuren: La integració en cicle combinat de la gasificació (GB-GICC), la producció de calor i potència (CHP) i la integració amb cel·les combustibles de mitjana i alta temperatura (GB-FC). L'objectiu d'aquest article és recopilar informació actualitzada sobre la gasificació de biomassa, específicament sobre l'avançament tecnològic i les aplicacions amb més perspectives de desenvolupament a curt termini i les barreres a vèncer abans del seu establiment a nivell global. Es va poder constatar que la generació distribuïda a petita escala i els cicles combinats són opcions que potencien l'establiment futur d'un mercat per la producció sostenible d'energia. Un element crític a tractar en tots els dissenys és la presència de substàncies indesitjables en els gasos de gasificació (quitrà, amoníac, material en partícules, NOx).

Paraulesclau: Gasificació, biomassa, reactors, tecnologies.

INTRODUCCIÓN

La utilización de reservas energéticas fósiles, el cambio climático global, los conflictos bélicos y la corta vida proyectada para las reservas probadas y probables de combustibles han incrementado dramáticamente la inestabilidad mundial. El consumo global de energía se ha duplicado en los últimos 40 años llegando a la alarmante cifra de 8000 a 10000 Mton de petróleo equivalentes anuales [1]. Añadido a esto no se percibe un cambio sustancial en la distribución de las fuentes primarias, por ejemplo el uso electricidad subió de 9.4% en 1973 a 17.7% en 2011, el carbón se redujo de 13.7% a 10.1% mientras que el gas se mantuvo estable ($\pm 14\%$). El consumo de biocombustibles y residuales para la generación energética también se mantuvo prácticamente invariable, lo cual es una contradicción a todas las políticas que se han planteado en relación al desarrollo sostenible.

En este entorno de inestabilidad, la biomasa y en específico aquella de origen vegetal (madera, residuos agrícolas, cultivos energéticos), figura entre los candidatos más prometedores para cambiar el escenario vigente hacia un entorno sostenible [2]. La producción de energía y compuestos químicos está obligatoriamente ligada a la biomasa, particularmente a la fracción lignocelulósica de la misma. Nag [3] destacó que el cambio desde el petróleo hacia la biomasa es la clave para el desarrollo de una sociedad sostenible, la independencia energética y la gerencia de las emisiones con efecto invernadero. Se identifican como barreras fundamentales: la distribución geográfica discreta de la biomasa, el hecho de que quien define la política de consumo debe ser la disponibilidad y no la demanda y el relativo bajo contenido de energía por

unidad de volumen. Aunque los métodos para convertir la biomasa en productos químicos y energía son bastante comunes, la materia prima fundamental depende del lugar donde se pretende desarrollar la aplicación. En la medida que el precio del petróleo se incrementa la generalización del uso de la biomasa sigue ganando terreno lo que se evidencia en el aumento de la producción de biodiesel y etanol en la última década y el surgimiento del concepto de Biorefinerías. A pesar de que el potencial tecnológico de las biorefinerías ha sido claramente definido, la sostenibilidad de la aplicación queda en tela de juicio por la contradicción social de producir alimentos o energía de una misma fuente. Basado en este inminente riesgo Moncada y col. [4] define tres tipos de materias primas para biorefinería:

- Los cultivos que tradicionalmente se usan para producir alimentos (soya, caña de azúcar, maíz) y se denominan de primera generación [5].

- El segundo grupo o materiales de segunda generación, hacen referencia a los residuos agroindustriales obtenidos de la cosecha y procesamiento de las materias de primera generación. En este grupo se encuentran otros cultivos que no interfieren con los alimentos y que tienen potencial para producir combustibles como por ejemplo la *Jatropha Curcas*.

- El último grupo o tercera generación son las algas que se utilizan para producir determinados metabolitos.

El uso de la biomasa en esquemas complejos para generar electricidad y calor y producir compuestos químicos en biorefinerías involucra procesos biológicos y/o térmicos, el presente artículo profundiza en uno de los procesos clave para el desarrollo de la biorefinería térmica, la *gasificación*. Se ofrece una revisión actualizada de esta tecnología en cuanto a diseño del proceso, aplicaciones y barreras para su generalización. La literatura científica de habla hispana cuenta con escasos artículos especializados en esta temática y considerando el impacto de las investigaciones sobre los países de la región latinoamericana esta puede considerarse una debilidad.

GASIFICACIÓN DE BIOMASA. GENERALIDADES

La gasificación es una combustión en atmósfera con bajo volumen de oxígeno, mediante la cual se genera una corriente gaseosa y un residuo sólido con propiedades combustibles. Esta reacción se puede describir como la consecución de varios fenómenos: secado, descomposición térmica o pirólisis, combustión parcial, craqueo de gases, vapores y alquitranes y gasificación de los productos finales [6,7].

Un esquema típico de gasificación está integrado por el gasificador, el sistema de limpieza de gases y la aplicación final (quemadores directos, turbinas, síntesis de Fischer-Tropsch). El producto fundamental de la gasificación es el gas de gasificación también conocido como gas pobre y es una mezcla de CO_x , CH_4 , H_2 y $(\text{C}_2 + \text{C}_3)$. Sin embargo, en dependencia del modelo del reactor, la composición de la biomasa y las condiciones de operación, puede contener impurezas ($10 - 100 \text{ g/Nm}^3$) tales como NH_3 , H_2S , HCl , material particulado, metales y alquitranes [8-10]. Los alquitranes son compuestos orgánicos con peso molecular superior al del benceno ($>76 \text{ g/mol}$) (ej. naftaleno y aromáticos heterocíclicos). Estas mezclas complejas

suelen condensar obstruyendo los sistemas de tuberías, filtros, o los intercambiadores de calor aguas abajo del gasificador, y causan el fallo mecánico del equipamiento con las consiguientes pérdidas. Uno de los retos fundamentales de la gasificación es lograr eliminar de manera eficiente estos compuestos hasta los niveles permisibles de cada aplicación (Tabla 1).

Tabla 1. Contenido de alquitranes en aplicaciones para gases de gasificación. [11,12]

Aplicación	Nivel permisible de Alquitrán
Motor de gas	<100 mg/Nm ³
Turbina de gas	<50 mg/Nm ³
Turbina de combustión directa	<5 mg/Nm ³
Celda de carbonato fundido	<2000 ppmV
Celda polimérica	<100 ppmV
Fischer-Tropsch (F-T)	<1 ppmV

El contenido energético de los gases de gasificación varía en función de múltiples parámetros como son: modelo del reactor, características de la biomasa, temperatura, presión de operación y agente oxidante. En la Tabla 2 se resume a modo referencial el contenido energético de los gases de gasificación en función del agente oxidante.

Tabla 2. Valor calórico de los gases de gasificación para diferentes agentes.

Agente oxidante	Valor calórico superior (MJ/m ³ N)
Aire	4 - 7
Vapor	10 - 18
Oxígeno	12 - 28

Proponer un esquema general para describir las reacciones involucradas en la gasificación de biomasa es muy complejo debido a la variabilidad en cuanto a la biomasa y las condiciones de operación [7]. La Figura 1 esquematiza el proceso y las rutas de reacción.

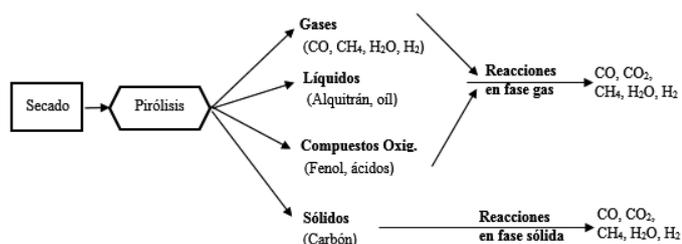


Figura 1. Esquema de la gasificación.

La reacción de Boudouard, water gas, hidrogasificación, la oxidación de carbono, la reacción de shift, la metanación y el reformado son comúnmente utilizadas para describir este proceso Tabla 3. Los elementos de la cinética de estas reacciones se reportan en Basu [7].

Tabla 3. Reacciones de gasificación [7].

Tipo de reacción	Ecuación estequiométrica	ΔH° (kJ/mol)
Reacciones del carbón		
R1 (Boudouard)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	+172
R2 (water-gas)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	+131
R3 (hidrogasificación)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74.8

R4	$C + 1/2O_2 \leftrightarrow CO$	-111
Reacciones de oxidación		
R5	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394
R6	$CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$	-284
R7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow 2H_2O + CO_2$	-803
R8	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	-242
Shift y metanación		
R9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41.2
R10	$2CO + 2H_2 \leftrightarrow CO_2 + CH_4$	-247
R11	$CO + 3H_2 \leftrightarrow H_2O + CH_4$	-206
R12	$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	-165

3. Tecnologías y reactores de gasificación.

El gasificador es el principal equipo en una planta de gasificación, este es responsable de obtener la composición del gas deseada y de garantizar una producción estable para las aplicaciones aguas abajo. Los gasificadores se clasifican por el método de contacto que utilizan entre las fases sólida (biomasa) y gaseosa (agente oxidante). Según el tipo de contacto, las características y capacidades de los reactores difieren considerablemente (Ver Tabla 4) y pueden agruparse en tres tipos: Gasificadores de lecho fijo, lecho fluidizado y de arrastre. Además de estas clasificaciones clásicas recientemente han surgido gasificadores en condiciones supercríticas y de plasma [7,13].

Tabla 4. Características de los diferentes modelos de gasificador

Parámetro	Lecho fijo/móvil	Lecho fluidizado	Arrastre
Aplicación	Baja	Media	Alta
Tamaño de partícula	< 51mm	< 6mm	< 0.15mm
Temperatura de salida	450 - 650°C	800 - 1000°C	> 1260°C
Tolerancia	Carbón	Carbón y biomasa	Carbón
Temperatura reacción	1090 °C	800 - 1000°C	1990°C
Requerimiento de vapor	Alta	Media	Baja
Naturaleza de cenizas	seca	seca	lodo
Eficiencia de gas frío	80%	89%	80%
Problemas operación	Produce alquitrán Los finos elevan la caída de presión.	Conversión de carbón	Enfriamiento del gas

3.1 Gasificadores de lecho fijo/móvil

En los reactores de lecho fijo/móvil las fases se ponen en contacto según el modelo de flujo en pistón. La biomasa se mueve lentamente como un pistón mientras se pone en contacto con un flujo de agente oxidante. Según la dirección del flujo de biomasa, estos reactores son de flujo ascendente (Figura 2a), descendente (Figura 2b), o cruzado y su capacidad varía desde 10 kW hasta 10 MW de carga térmica inicial. En estos reactores se pueden tratar tamaños de partículas que oscilan desde 1 hasta 100 mm, su eficiencia de gas caliente es de 75 - 95% y producen un gas pobre con 6 MJ/Nm³ de VCI. Las dificultades fundamentales radican en la baja eficiencia de transferencia de calor lo cual provoca disformidad en la distribución de temperaturas y aglomeración de combustible.

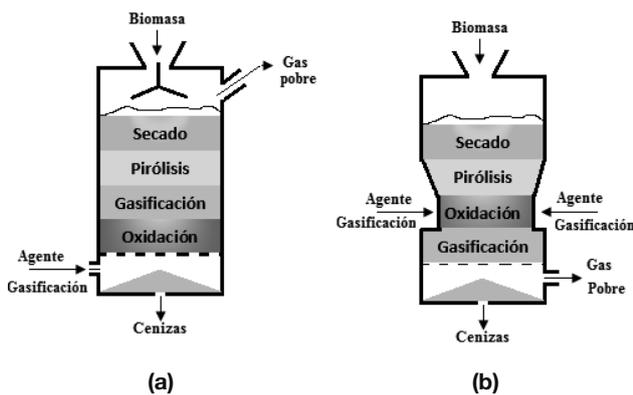


Figura 2. Flujo ascendente (a) y descendente (b) con zonas de reacción

Fenomenológicamente los reactores de lecho fijo combinan las zonas operacionales definidas en la Figura 2. Por ejemplo, en un reactor de flujo ascendente, la biomasa se alimenta por el tope, y el agente oxidante por el fondo de manera que la primera fase en contacto son las cenizas y el carbón no convertido y posteriormente toma lugar la pirólisis, la gasificación y por último el secado de la biomasa. Los gases en estos reactores abandonan por el tope [14].

3.2 Gasificadores de lecho fluidizado

Los gasificadores de lecho fluidizado presentan un excelente mezclado entre las fases y una distribución uniforme de temperaturas. El lecho está conformado por un material granular que puede ser inerte (arena de sílice) o un material con propiedades catalíticas (olivinas). Estos equipos son particularmente ventajosos para convertir biomasa y su producción de alquitranes varía de 1 a 50 g/Nm³, lo cual se promedia con fines prácticos a 10 g/Nm³. Hay dos tipos fundamentales de lecho: burbujeante y con recirculación.

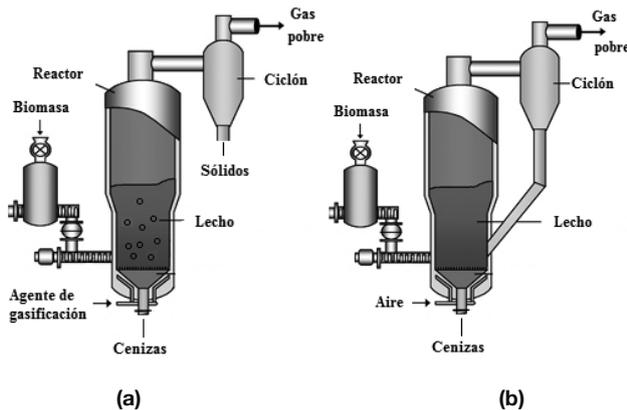


Figura 3. Gasificadores de lecho fluidizado, burbujeante (a), circulante (b).

En los **reactores de lecho burbujeante** el agente oxidante se alimenta por el fondo y conforma el medio de fluidización. Las partículas de biomasa se ponen en contacto con el lecho previamente calentado provocando un rápido secado y posterior pirólisis. En estos equipos la conversión de carbón no es completa debido al mezclado continuo por lo que las partículas que dejan el reactor están total o parcialmente gasificadas. Generalmente los

sólidos parcialmente convertidos, se reutilizan como fuente de calor en el mismo proceso. La aplicación del lecho burbujeante es a mediana escala (< 25 MW térmicos), y a baja (800°C) o alta temperatura (1000 °C), presiones atmosféricas o altas presiones (10 bar) con flexibilidad para tratar biomasa de diferentes características. El agente de gasificación se alimenta generalmente en dos etapas una por el fondo para mantener el lecho en suspensión y otra fracción por la parte superior para incrementar la conversión de los carbones parcialmente gasificados [15].

Los gasificadores de lecho circulante están compuestos por un lecho para la conversión de biomasa, un ciclón y un dispositivo para la recirculación de sólidos. La velocidad de fluidización (3.5 - 5.5 m/s) es superior a la de los lechos de burbujeo (0.5 - 1 m/s) y junto a la recirculación deben mantener el reactor en régimen de fluidización rápida. Existen plantas instaladas de hasta 60 MW térmicos. La configuración y el modo de operación de los lechos con recirculación son análogos a la de los craqueadores catalíticos de la industria petroquímica. La temperatura de operación varía entre 800 y 1000 °C para prevenir el burbujeo de cenizas. La inercia térmica y el mezclado vigoroso favorecen el trabajo con diferentes tipos de biomasa.

3.3 Gasificadores con arrastre

Estos equipos son adecuados para la integración con ciclos combinados. Operan a 1400 °C y presiones de 20 - 70 bar. Generalmente el material previamente pulverizado (<80µm) y mezclado con agua se alimenta junto al agente oxidante dentro de la cámara del reactor. La velocidad del gas es tal que facilita la transferencia de masa aunque el consumo es un 20% superior a los sistemas que operan de manera seca. La transferencia de calor al gas es rápida y este alcanza la temperatura de reacción inmediatamente, sin embargo en el caso de la fase sólida se comporta como un pistón. Estos reactores se han aplicado a gran escala para convertir carbón, coque de petróleo y residuos de refinerías. Los carbones de alta humedad y biomasa resultan problemáticos y disminuyen la eficiencia de gas frío. La factibilidad de estos reactores para tratar biomasa es baja debido a que provocan fusión de la ceniza con álcali y la reducción de tamaño para la biomasa en los límites es sumamente complicada.

3.4 Reactores de plasma

Los reactores de gasificación por plasma operan a elevadas temperaturas y tienen capacidad para convertir los hidrocarburos más complejos de la estructura a moléculas gaseosas sencillas. Estos equipos se han utilizado en el procesamiento de residuos sólidos urbanos con buenos resultados. Las elevadas temperaturas provocan la fusión de los inorgánicos que suelen estar en alto porcentaje cuando se tratan residuos. La energía proviene de un arco eléctrico formado por dos electrodos entre los que fluye un gas inerte y hacen que la temperatura de la zona de reacción alcance entre 2500 - 4500 °C. Los gases de gasificación abandonan el reactor a 1000 °C. La presencia de compuestos clorados limita la vida útil del reactor. La elevada temperatura de reacción hace que estos reactores sean insensibles al tipo de biomasa y están en capacidad de convertir prácticamente cualquier materia prima [7].

4. Limpieza de los gases de gasificación

Los gases de gasificación contienen gran cantidad de impurezas que afectan la eficiencia de los procesos de termocon-

versión instalados después del reactor. La calidad del gas está definida por el modelo de reactor, la composición química de la biomasa, la temperatura y la relación de equivalencia. De aquí que la eliminación de estas sustancias indeseables es uno de los retos fundamentales de esta tecnología. La limpieza de estos gases se desarrolla por métodos **primarios**: que se realizan antes o durante el proceso de gasificación e involucran el pre tratamiento de la biomasa, la utilización de materiales catalíticos mezclados con la biomasa o en el lecho de los reactores de fluidización. Los métodos **secundarios** a su vez pueden ser de gas seco (caliente) o de gas húmedo. Las tecnologías de gas caliente operan por encima de 500 °C. Los métodos de gas húmedos se aplican con gases a 20 - 60 °C, por lo que no son adecuadas para aplicaciones energéticas ya que involucra pérdidas de eficiencia al tener que enfriar el gas para su limpieza y luego calentarlo para utilizarlo en la generación de energía. La limpieza de baja temperatura se desarrolla fundamentalmente en lavadores (scrubbers), precipitadores electrostáticos en medio húmedo y torres de spray. Estos sistemas se discuten extensivamente en varias publicaciones y por su bajo interés en sistemas de producción de energía, no se profundiza en este trabajo [16-18]. En la **Tabla 5** se resumen algunos datos operacionales de los sistemas de limpieza de gases.

Tabla 5. Tecnologías para la remoción de contaminantes en gases de gasificación.

Tecnologías	Temperatura (°C)	Remoción de Alquitrán (%)
Filtro de arena	10-20	50-97
Lavador	50-100	50-90
Precipitador húmedo	40-50	0-60
Filtro de lona	130	0-50
Absorbedor de lecho fijo	130	50
Conversión catalítica	900	>95

La limpieza física en caliente se desarrolla por ciclones, filtros cerámicos y separadores electrostáticos en seco. Además, de estos métodos físicos la limpieza puede desarrollarse por métodos químicos como la conversión catalítica. La conversión catalítica se basa en el uso de materiales catalíticamente activos para reducir la energía de activación de las reacciones de craqueo de alquitranes y descomposición de amoníaco. Hasta la fecha se han probado numerosos compuestos con actividad para la eliminación de alquitranes, rocas calcinadas, dolomitas, olivinas [19,20], catalizadores a base de hierro y níquel [8,21-23], y carbones [21]. En la **Tabla 6** se resumen algunos materiales, las condiciones de operación y la conversión de contaminantes.

Tabla 6. Catalizadores utilizados en limpieza secundaria.

Catalizador	Temperatura	Conversión
Catalizadores para convertir Alquitranes		
Dolomitas	650 – 923 °C	43 – 95%
Hierro metálico	600 – 800 °C	10 – 90%
Fe ₂ O ₃ /SiO ₂	650 °C	100%
Olivina	800 – 900 °C	75 – 98%
Limonita	650 °C	95%
NiO-MoO ₂ /Al ₂ O ₃	440 – 460 °C	64 – 77%
Ni/ Carbón	650 – 850 °C	91 – 99%
Carbón	700 – 900 °C	81 – 100%

Catalizadores para convertir Amoníaco		
Ni-Ce/Al ₂ O ₃	500 °C	72%
Ni/SiO ₂	500 – 700 °C	93 – 97%
Ni-monolito	900 °C	100%
Limonita	500 – 750 °C	99%
Fe/ Carbón	650 °C	100%

Uno de estos métodos de limpieza o la combinación de ellos deben utilizarse para obtener los requerimientos de composición definidos en la **Tabla 1**. A continuación se discuten las aplicaciones energéticas de la gasificación de biomasa.

5. Aplicaciones de las tecnologías de gasificación de biomasa

La gasificación integrada con tecnologías de generación de calor y electricidad es el centro de atención de varios grupos investigativos a nivel internacional. En el presente artículo se ofrece una panorámica de las alternativas más prometedoras y se definen los retos fundamentales.

5.1 Gasificación - Generación de electricidad

Aunque el concepto de generar electricidad con biomasa no es nuevo, en la última década ha habido un incremento en el interés de desarrollar tecnologías altamente eficientes con este propósito. La biomasa es particularmente atractiva para estaciones de baja capacidad (<10 MW) y exhibe índices de eficiencia de alrededor de 35 - 40% o sea por encima de los ciclos tradicionales (<30%). Las aplicaciones más extendidas de gas pobre son: turbinas de gas, ciclos combinados, la producción de químicos y, más recientemente, la generación de energía en las celdas de combustible de alta eficiencia [24-29]. Una de las plantas más exitosas para producir calor y electricidad a partir de biomasa es la instalada en Austria (Güssing), esta cuenta con un gasificador de lecho fijo con recirculación y capacidad de 2 MW de electricidad y 4.5 MW térmicos. Los gases calientes limpios se utilizan en un equipo de combustión interna y en un ciclo combinado (CHP) [30]. Bridgwater [2] reportó un estudio de las tecnologías existentes considerando los aspectos de preparación, gasificación, limpieza de gases: Los resultados de esta investigación favorecen el uso de tecnologías de producción integrada en ciclos combinados a turbina de gas (B-IGCC). Los elementos básicos de una planta que integra gasificación y ciclo combinado (B-IGCC) incluyen un secador de biomasa, gasificador, sistema de limpieza, turbina de gas alimentada por gas derivado de la biomasa, un generador de vapor recuperativo, y una turbina de vapor [31] **Figura 4**.

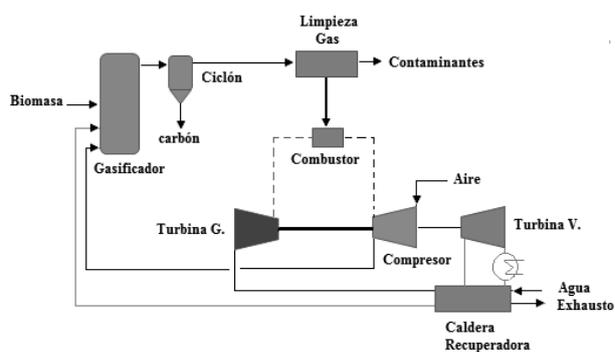


Figura 4. Esquema integrado de gasificación con ciclo combinado

Pelegri y col. [32] trataron las cuestiones económicas y ambientales asociados a los GB-IGCC y la producción combinada de azúcar, etanol y energía eléctrica. Estos autores demostraron que el excedente de energía eléctrica obtenida por cogeneración mejora el rendimiento exergo - ambiental del sistema y que los sistemas de cogeneración modernos pueden producir 2.5 veces la electricidad obtenida por medios tradicionales, generando de esta manera un beneficio económico notable para la fábrica. En otro trabajo reciente, Soltani y col. [33] informaron de un análisis exergético avanzado para una central eléctrica de ciclo combinado alimentada externamente con biomasa. Llegaron a la conclusión de que la red de intercambiadores de calor es un elemento esencial para disminuir la destrucción de exergía. La eficiencia de exergía sistema fue de 34 %.

La integración de las unidades de conversión de biomasa con pilas de combustible es una tecnología prometedora para alcanzar la viabilidad económica de la producción de calor y electricidad (Figura 5).

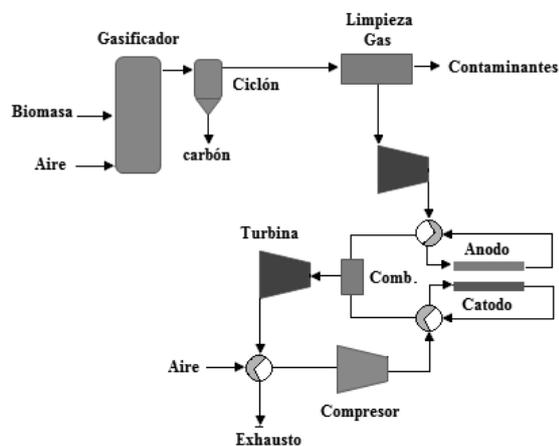


Figura 5. Esquema integrado de gasificación con celda combustible y turbina de gas.

Entre los diversos tipos de celdas combustible, las pilas SOFC y MCFC son las más atractivas debido a su alta eficiencia en la conversión de energía, la modularidad, compatibilidad ambiental, y a que favorecen reacciones in-situ para la conversión del gas a altas temperaturas (600 – 1000 °C) [31,32]. Omosun y col. [34] investigaron la integración de la producción combinada de calor y electricidad (CHP) de biomasa y celdas combustibles. La eficiencia teórica global fue de 60% para el proceso en caliente, mientras que el proceso en frío exhibió eficiencia del 34%. Además Panopoulos y col. [27] informaron de un sistema similar de capacidad inferior a 1 MW. Se demostró que el gas de escape de SOFC puede proporcionar el calor requerido por las reacciones de gasificación a una eficiencia eléctrica del 36%. Recientemente Sadhukhan y col. [24] realizó un análisis de una celda combustible integrada con un ciclo combinado de gasificación de biomasa (B-IGCC). Los autores definen el amplio espectro de estrategias de integración y también indicaron que los gases de salida de la pila pueden reciclarse como una fuente de combustible y humedad.

En la Tabla 7 se resumen algunos indicadores de eficiencia para diferentes sistemas de producción de calor y electricidad integrados a la gasificación de biomasa. Es notable el incremento de la eficiencia en los sistemas integrados a celdas combustibles y a ciclos combinados con turbinas de

gas. La eficiencia de referencia es la exergética por lo que los valores son un alto referente para comprender la capacidad de aprovechar la energía contenida en la biomasa.

Tabla 6. Indicadores de eficiencia para diferentes esquemas de gasificación integrados a la producción de energía.

Esquema	Biomasa	Eficiencia (%)	Ref.
GB-SOFC	Paja	No	[24]
GB-SOFC	Bagazo de caña	32	[25]
GB-SOFC	Madera	30.4	[26]
G-SOFC	Residuos de aceituna	36	[27]
GB-H ₂ Plant	Aceite de palma	19	[28]
GB-SOFC	Residuos de aceituna	36	[29]
CEST	Bagazo de caña	16 - 28	[31]
B-IGCC	Bagazo de caña	30	[32]
Caldera	Bagazo de caña	24 - 34	[35]
B-IGCC	Mazorcas	28	[36]
B-IGCC	Papel	34	[33]

*Nota

GB-SOFC: Gasificación de biomasa integrada a pila SOFC

GB-H₂Plant: Gasificación integrada a la producción de hidrógeno

B-IGCC: Gasificación integrada con ciclo combinado

CEST: Turbinas de vapor con extracción.

6. Barreras tecnológicas

Entre los elementos técnicos que conforman barreras para la generalización de los procesos de gasificación, figura la **formación de alquitrán**. Estas sustancias causan la desactivación catalítica además de que su condensación provoca la polimerización en estructuras y equipos tales como las turbinas y motores causando fallos. Los procesos disponibles para la eliminación de alquitranes son insuficientes y han conllevado a años de investigación, sobretodo en el campo de la catálisis y el lavado con solventes orgánicos. Este último es el que mejores resultados ha presentado. Las tecnologías probadas y disponibles en el mercado para la eliminación de otros componentes (no alquitranes) indeseados tampoco han sido suficientes para aplicaciones críticas como las celdas combustibles.

La alimentación de la biomasa a reactores de gasificación presurizados es un inconveniente, sobre todo a presiones superiores a los 10 MPa, para esto se aplican usualmente transportadores de tornillo. Sin embargo, el incremento de la humedad facilita la formación de masas compactas y el atascamiento de estos sistemas de alimentación. El tamaño de las partículas resulta ser otra dificultad, cuando exceden los límites establecidos suelen detener el rotor. Los gases en exceso permean a través de la alimentación y provocan riesgos de incendio y explosión. Cuando hay impurezas sólidas facilitan la erosión de las partes móviles (sobretodo arenas). Las bombas de pistón modelo Putzmeister GmgH son los dispositivos de mejor funcionamiento y han sido evaluadas para varias materias primas con excelentes resultados.

Los **costos** de la gasificación integrada a esquemas de generación de calor y electricidad superan considerablemente a las tecnologías tradicionales por lo que se necesita de políticas de subvención e incentivos para lograr difundir el uso de la biomasa. La tarea 33 de la Agencia Internacional de Energía (IEA) tiene como objetivo el monitoreo, la revisión y el intercambio de información para promover la cooperación internacional

y avanzar hacia el establecimiento de la gasificación de biomasa. Esta iniciativa agrupa un numeroso grupo de países: EUA, Dinamarca, Holanda, Nueva Zelanda, Austria, Italia y Finlandia. Existe a la fecha varios proyectos con unidades a escala piloto, demostrativa y comercial. La producción de calor y potencia son las dos aplicaciones que más se están desarrollando con un total de 37 proyectos de los cuales hay 6 en Noruega, 3 en Reino Unido y el resto en Alemania. A la vanguardia de aplicaciones sintéticas (etanol, bio-metano y metanol) están los Estados Unidos con 16 proyectos operacionales o en construcción.

Este ambiente internacional debe debutar en una reducción considerable de los costos y en el incremento de la competitividad de los procesos. Además, tal revolución investigativa facilitará la consolidación de las biorrefinerías como alternativa al uso de materias convencionales.

6. CONCLUSIONES

En el artículo se presentan las tecnologías fundamentales para la termoconversión de biomasa por gasificación. Se ejemplifican además, algunos de los proyectos para la integración con sistemas avanzados de producción de energía como las celdas combustibles y los ciclos combinados con turbinas de gas. Se puede constatar un incremento investigativo en esta área con numerosos proyectos en desarrollo, los cuales se concentran en Europa y América del Norte. La elección de la tecnología adecuada depende de muchos factores: disponibilidad de materia prima, composición de la biomasa, tipo de reactor, políticas de desarrollo y elementos ambientales. Escapó del alcance de este artículo pero los problemas ambientales asociados a esta tecnología deben evaluarse de manera global para poder establecer claramente sus ventajas.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unidad de Desarrollo Tecnológico, Universidad de Concepción, Proyecto Basal PFB-27, por el financiamiento a esta investigación.

8. REFERENCIAS

1. International Energy Agency (2013) Key world energy statistics. International Energy Agency (IEA). 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France. www.iea.org.
2. Bridgwater, A.V. (1995) The technical and economic feasibility of biomass gasification for Power generation. *Fuel* 74:631–53.
3. Nag, A. (2008). Biofuels refining and performance. McGraw-Hill Companies, Inc. DOI: 10.1036/0071489703
4. Moncada, J. El-Halwagi, M. Cardona, C.A. (2013) Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case. *Bioresource Technology* 135 533–543
5. Stoeglehner, G. Narodoslawsky, M. (2009) How sustainable are biofuels? Answers and further questions arising from an ecological footprint perspective. *Bioresource Technology* 100 (16), 3825–3830
6. Crocker, M. (2010) Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemicals. RSC Energy and Environment Series No. 1. ISSN: 2044-0774.
7. Basu, P. (2010), Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design. Academic Press. Elsevier. ISBN: 978-0-12-374988-8.
8. Richardson, Y. Blin, J. Julbe, A. (2012) A short overview on purification and conditioning of syngas produced by biomass gasification: Catalytic strategies, process intensification and new concepts. *Progress in Energy and Combustion Science* 38 765–781
9. Dou, B. Zhang, M. Gao, J. Shen, W. Sha, X. (2002) High-temperature removal of NH₃, organic sulfur, HCl, and tar component from coal-derived gas. *Ind Eng Chem Res* 41 4195–200.
10. Shen, Y. Zhao, P. Shao, Q. Ma, D. Takahashi, F. Yoshikawa, K. (2014) In-situ catalytic conversion of tar using rice husk char-supported nickel-iron catalysts for biomass pyrolysis/gasification. *Applied Catalysis B: Environmental* 152–153 140–151.
11. Stevens, D.J. (2001) Hot gas conditioning: recent progress with larger-scale biomass gasification systems. Update and Summary of recent progress. Golden, Colorado (US): NREL/SR-510-29952, National Renewable Energy Laboratory.
12. Hamelinck, C.N. Faaij, A.P.C. den Uil, H. Boerrigter, H.E. (2004) Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential. *Energy* 29:1743 - 1771.
13. Antal, M.J. Allen, S.G. Schulman, D. Xu, X. Divilio, R.J. (2000). Biomass gasification in supercritical water. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 39, 4040–4053.
14. Mc Gowan, T.F. (2009) Biomass and alternate fuel systems. An engineering and economic guide. John Wiley Sons. Inc. AIChE. ISBN 978-0-470-41028-8.
15. Brown, R.C. (2011) Thermochemical processing of biomass. 2011 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 9780470721117
16. Anis, S. Zainal, Z.A. (2011) Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15:2355–77.
17. Wang, L. Weller, C.L. Jones, D.D. Hanna, M. (2008) Contemporary issues in thermal gasification Of biomass and its application to electricity and fuel production. *Biomass and Bioenergy* 32:573–81
18. Mondal, P. Dang, G.S. Garg, M.O. (2011) Syngas Production through gasification and cleanup for downstream applications—Recent developments. *Fuel Processing Technology* 92:1395–410
19. Wang, T.J. Chang, J. Wu, C. Fu, Y. Chen, Y. (2005) The steam reforming of naphthalene over a nickel-dolomite cracking catalyst. *Biomass Bioenergy*; 28(5):508–14.
20. Simell, P. Hirvensalo, E. Smolander, V. (1999) Steam reforming of gasification gas tar over dolomite with benzene as a model compound. *Ind. Eng. Chem. Res* 38:1250–7.
21. Xu, Ch. Donald, J. Byambajav, E. Ohtsuka, Y. (2010) Recent advances in catalysts for hot-gas removal of tar and NH₃ gasification from biomass. *Fuel* 89:1784–1795.

-
22. Courson, C. Udron, L. Ski, D.W. Petit, C. Kiennemann, A. (2002) Hydrogen production from biomass gasification on nickel catalysts: tests for dry reforming of methane. *Catal. Today* 76(1):75–86.
 23. Abu El-Rub, Z. Bramer, E.A. Brem, G. (2008) Experimental comparison of biomass chars with other catalysts for tar reduction. *Fuel* 87(10–11):2243–52.
 24. Sadhukhan, J. Zhao, Y. Shah, N. Brandon, N.P. (2010) Performance analysis of integrated biomass gasification fuel cell (BGFC) and biomass gasification combined cycle (BGCC) systems. *Chem. Eng. Sci.* 65 1942–1954.
 25. Arteaga-Pérez, L.E. Casas-Ledón, Y. Pérez-Bermúdez, R. Peralta, L.M. Dewulf, J. Prins, W. (2013) Energy and exergy analysis of a sugar cane bagasse gasifier integrated to a solid oxide fuel cell based on a quasi-equilibrium approach. *Chem. Eng. J.* 228 1121–1132.
 26. Toonssen, R. Woudstra, N. Verkooijen, A.H.M. (2010) Decentralized generation of electricity with solid oxide fuel cells from centrally converted biomass. *Int. J. Hydrogen Energy* 35, 7594 - 7607.
 27. Panopoulos, K.D. Fryda, L. Karl, J. Poulou, S. Kakaras, E. (2006) High temperature solid oxide fuel cell integrated with novel allothermal biomass gasification: Part I: Modelling and feasibility study. *J. Power Sources* 159 (2006) 570–585.
 28. Cohce, M.K. Dincer, I. Rosen, M.A. (2011) Energy and exergy analyses of a biomass-based hydrogen production system. *Bioresour. Technol.* 102 8466–8474.
 29. Sordi, A. Da Silva, E.P. Neto, A.J.M. Lopes, D.G. Pinto, C.S. Araujo, P.D. (2009) Thermodynamic simulation of biomass gas steam reforming for a solid oxide fuel cell (SOFC) system. *Braz. J. Chem. Eng.* Vol. 26, 04, 745 - 755, October - December.
 30. Rentizelas, A. Karellas, S. Kakaras, E. Tatsiopoulos, I. (2009) Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications. *Energy Conversion and Management*; 50:674–81.
 31. Larson, E.D. Williams, R.H. Regis, M. Leal, L.V. (2001) A review of Biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with an analysis for Cuba. *Energy for Sustainable Development*. Volume V No. 1. March 2001
 32. Pellegrini, L.F. de Oliveira Jr, S. (2007) Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification. *Energy* 32 314–327.
 33. Soltani, S. Mahmoudi, S.M.S. Yari, M. Rosen, M.A. (2013) Thermodynamic analyses of an externally fired gas turbine combined cycle integrated with a biomass gasification plant. *Energy Conversion and Management* 70.107–115.
 34. Omosun, A.O. Bauen, A. Brandon, N.P. Adjiman, C.S. Hart, D. (2004) Modelling system efficiencies and costs of two biomass-fuelled SOFC systems. *J. Power Sources* 131, 96–106.
 35. Sosa-Arno, J. H. Nebra, S. A. (2011) First and Second Law to Analyze the Performance of Bagasse Boilers. *International Journal of Thermodynamics (IJOT)* Vol. 14 (No. 2), pp. 5158.
 36. De Kam, M.J. Morey, R.V. Tiffany, D.G. (2009) Biomass integrated gasification combined cycle for heat and power at ethanol plants. *Energy Conversion and Management* 50. 1682–1690.