

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Tucumán
Escuela de Posgrado

**La gasificación como alternativa para
generación distribuida de energía
eléctrica a partir de biomasas residuales
de Tucumán, Argentina**

Ing. Federico José Franck Colombres

Trabajo Final Integrador para optar al Grado Académico
Superior de Especialista en Ingeniería Bioenergética

Tutor: Dra. Ing. Dora Paz

San Miguel de Tucumán
Año 2017

La gasificación como alternativa para generación distribuida de energía eléctrica a partir de biomasas residuales de Tucumán, Argentina

Federico José Franck Colombres

RESUMEN

El empleo de fuentes renovables para la generación de energía eléctrica se viene incrementando constantemente en los últimos años a nivel mundial, debido principalmente a que se espera a mediano plazo un agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y por políticas económicas y ambientales. La biomasa puede considerarse una fuente renovable para la obtención de bioproductos y energía eléctrica “limpia”. Tucumán, debido a su actividad agroindustrial, ofrece buenas perspectivas para el aprovechamiento de biomasas. Para ello, en función del tipo de biomasa, es necesaria una tecnología adecuada para convertir la biomasa en forma eficiente, una alternativa promisorio es la gasificación. En este trabajo se evalúa el potencial de generación de energía eléctrica en motores de combustión interna a partir de gas pobre obtenido mediante gasificación de las principales biomasas residuales de Tucumán sin sustancial aprovechamiento actual, residuos de cosecha de caña y residuos de poda y renovación de citrus. Con estos residuos, en conjunto 1.229.208 toneladas en base seca por año, se podrían generar anualmente 774 GWh de energía eléctrica, un 27% de la energía eléctrica total consumida en la provincia.

Palabras clave: bioenergía, energía limpia, residuos agrícolas, caña de azúcar, residuos cítricos, poda de citrus, Cycle Tempo.

Introducción

Contexto energético

Si bien a nivel mundial el consumo de energías de origen fósil había venido aumentando considerablemente desde mediados del siglo XIX hasta principios de este siglo, últimamente se viene incrementando el empleo de las energías de origen renovable y se prevé que su utilización sea cada vez mayor (Figuras 1, 2 y 3). Esto es en parte por el aumento del consumo energético global, en parte porque se espera a mediano plazo un agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, y en parte también por políticas económicas y ambientales. El empleo de recursos de origen no renovable en las actividades humanas en ciertos casos genera impactos ambientales, económicos y sociales negativos. Este es por ejemplo el caso del empleo de combustibles fósiles. Los países que basan su economía en combustibles fósiles como el petróleo, el carbón o el gas natural, tienen dificultades para desarrollar modelos sostenibles. Una economía basada en combustibles no renovables genera implicancias negativas para el medio ambiente. La incertidumbre en la oferta y el precio del recurso causan un gran impacto en la política energética, especialmente si las reservas disponibles o las explotaciones propias del recurso no son suficientes y es necesario importarlo. Esto justifica la búsqueda de alternativas que disminuyan la dependencia de los combustibles fósiles y permitan sistemas más sostenibles, como el empleo de recursos renovables: biomasa, energía solar, eólica, marítima, geotérmica, etc. (United Nation, 1998; Cárdenas *et al.*, 2013).

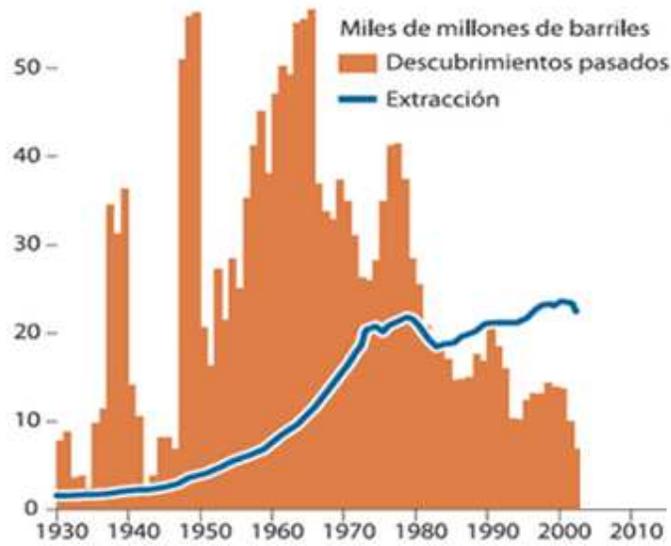


Figura 1. Historial de descubrimientos y extracción de petróleo (en base a ASPO, 2004)

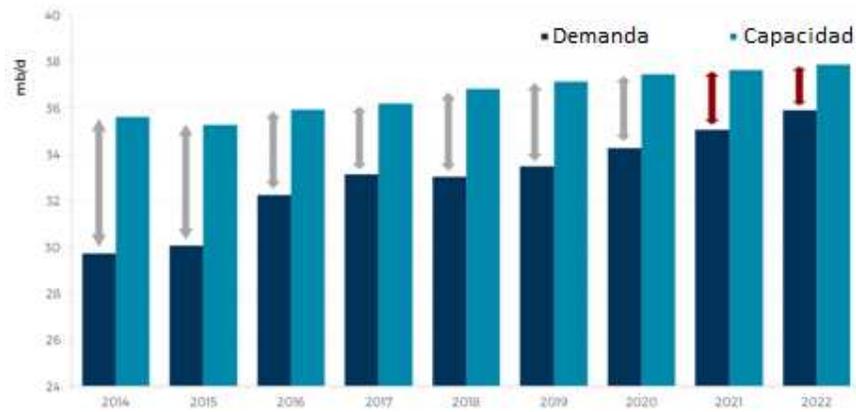


Figura 2. Capacidad y demanda de crudo de OPEC. Histórico y perspectivas (en base a IEA News, 2017)

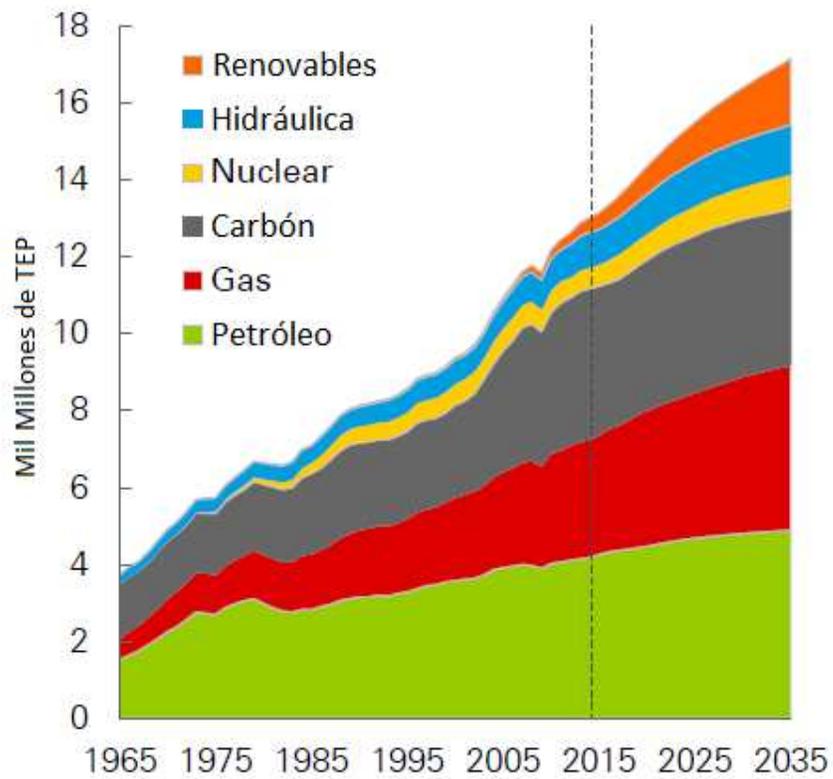


Figura 3. Consumo de energías primarias, histórico y perspectivas (en base a BP, 2017)

La matriz energética mundial en 2015 ya estaba compuesta por un 15% de renovables (Figuras 3 y 4), y se proyecta que para el año 2035 esté compuesta por un 20% (Figura 3).

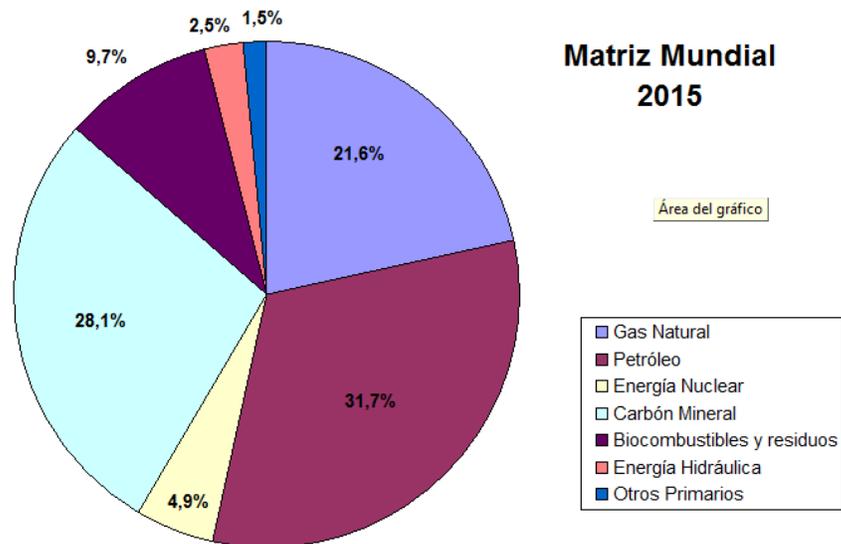


Figura 4. Matriz energética mundial de 2015 (en base a IEA, Statistics 2017)

La matriz energética argentina está compuesta por más del 90% por combustibles de origen fósil, de los cuales el Gas Natural representa más de un 50% del total. Menos de un 10% corresponde a energías renovables (Figura 5).

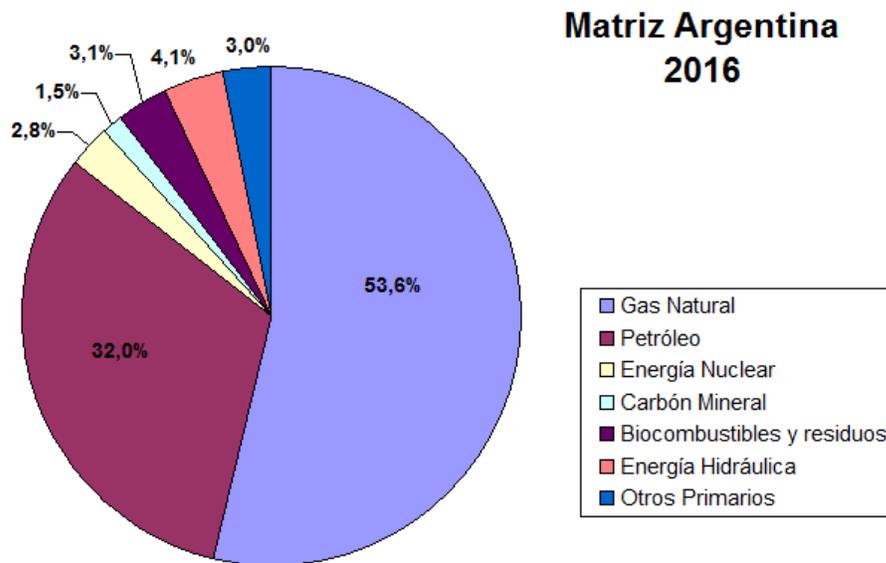


Figura 5. Matriz energética argentina de 2016
(en base a Secretaría de Energía de la Nación)

El porcentaje de energía eléctrica obtenida a partir de fuentes renovables es aún menor, con lo cual el objetivo fijado por ley nacional 27.191, lograr una contribución de las fuentes de energía renovables de 20% del consumo de energía eléctrica nacional en el año 2025, representa un reto importante.

En Tucumán, esa relación es aún más desfavorable, en 2014 la provincia generó 6.158.738 MWh de energía eléctrica, de los cuales sólo 160.932 fueron a partir de renovables, es decir un 2,6% (DEP, 2017), que a su vez representa el 5,6% del consumo de energía eléctrica de la provincia (Tabla2). Tucumán produce energía eléctrica para la red nacional en un alto porcentaje a partir de gas natural en centrales termoeléctricas (Tabla 1). Además, en algunas ocasiones durante los últimos años, en los meses de invierno, de gran demanda para calefacción y coincidentes con las zafas de las industrias azucarera y citrícola, las demandas de gas natural y energía eléctrica han sido mayores que la disponibilidad de estos servicios, lo que ha

generado cortes de suministro a las agroindustrias locales, con el consiguiente perjuicio económico para la región.

En la Tabla 1 se presenta el consumo de gas natural de las industrias, de las centrales termoeléctricas y el total de la Provincia de Tucumán para el año 2016. En la Tabla 2 el consumo de energía eléctrica del año 2015.

Tabla 1. Consumo de gas natural de Tucumán del año 2016

Industria	Residencial	Comercial	Entes oficiales	Centrales eléctricas	GNC	Total
316.902	124.954	22.552	2.562	146.156	120.994	734.120

Fuente: ENARGAS, en base a datos de las Licenciatarias de Distribución. Valores expresados en miles de m³ de 9300 kcal/m³.

Tabla 2. Consumo de energía eléctrica de Tucumán del año 2015

Residencial	Comercial	Industrial	Alumbrado público	Total
1.405.990	479.385	871.200	126.235	2.882.811

Fuente: Ministerio de Energía y Minería, Distribución de Energía Eléctrica Facturada y Cantidad de Usuarios por tipo y por jurisdicción provincial. Valores expresados en MWh/año.

Un mayor aprovechamiento de energías renovables para la generación de energía eléctrica, permitiría disminuir la cantidad de energía generada a partir de gas natural, con beneficios sociales, ambientales y económicos.

Tucumán, debido a su ubicación geográfica y al tipo de actividad agroindustrial que en ella se practica, ofrece buenas perspectivas para el aprovechamiento de biomasa, las cuales se incrementaron recientemente con la aprobación de la Ley Nacional N° 27.424 de “Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública”, que posibilita la inyección a la red de distribución, de excedentes de energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables.

Biomásas

La biomasa se considera un recurso renovable, siempre y cuando se obtenga mediante un manejo sustentable, y como tal es una de las opciones más prometedoras para la obtención de bioproductos y energía eléctrica. La energía obtenida a partir de ella, se estipula energía renovable, o energía “limpia”, ya que puede considerarse que la cantidad de dióxido de carbono

emitido durante su aprovechamiento es equivalente a la que fue previamente absorbida a través de la fotosíntesis, por lo que tiene un impacto ambiental relativamente bajo respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero. (Cárdenas *et al.*, 2013 y Villegas Aguilar *et al.*, 2005).

Es conveniente que la biomasa empleada para tales fines no compita en su obtención con los cultivos alimentarios, y este es el caso, por ejemplo, de los cultivos energéticos en zonas marginales y de los residuos agrícolas, forestales, industriales y urbanos, que por sus cantidades aprovechables representan un gran potencial.

Por otro lado, la biomasa sin aprovechamiento puede generar ciertas complicaciones. Este es por ejemplo el caso de las explotaciones azucareras y cítricas en las que los residuos de la cosecha de caña (RAC) y los residuos de poda de citrus, se dejan en los campos de cultivos, sin aprovechamiento energético ni económico, y dando lugar a incendios accidentales con graves problemas socio-ambientales: liberación de partículas y compuestos como CO₂, SO₂, NO_x, dioxinas, furanos y otros (que afectan el medioambiente y la salud con problemas como el calentamiento global, la lluvia ácida, enfermedades respiratorias y visuales, etc.); problemas eléctricos por quema debajo de líneas de alta tensión; accidentes de tránsito por disminución de la visibilidad en rutas; problemas agronómicos como pérdidas de carbono y nitrógeno del suelo por volatilización; etc.

En otros casos, la biomasa es aprovechada, pero con eficiencias que podrían mejorarse, como por ejemplo en el caso del bagazo, residuo del proceso de producción de azúcar de caña, que se aprovecha mediante combustión para la generación de vapor en calderas, pero con humedades de la biomasa de aproximadamente 50%, porcentaje en peso en base húmeda (b.h.), con lo cual se pierde gran parte de su energía en la etapa de secado dentro del horno antes del proceso de oxidación. Por unidad de masa de materia seca es necesario evaporar la misma cantidad en masa de agua de la biomasa.

Si bien, por lo expuesto anteriormente, el aprovechamiento de la biomasa representa una alternativa prometedora para disminuir el empleo de combustibles fósiles, es necesario un proceso adecuado para transformar

dicha biomasa, el cual dependerá principalmente del tipo de biomasa en cuestión y del desarrollo de las correspondientes tecnologías disponibles, entre otros factores. Los procesos más destacados actualmente son la esterificación y transesterificación de aceites vegetales para la obtención de biodiesel; los procesos bioquímicos o fermentativos (anaeróbicos y aeróbicos) para la obtención de biogás y etanol; y los procesos termoquímicos de conversión (combustión, pirólisis, gasificación, licuefacción) principalmente para obtener calor, combustibles o como etapa previa para la obtención de bioproductos (Sukumar *et al.*, 2015). Cada uno de ellos, con una tecnología específica, en algunos casos más desarrollada que en otros.

Gasificación

Una alternativa promisoriosa para el aprovechamiento de la biomasa, es el proceso de gasificación, ya que posee una tecnología conocida, aunque aún en desarrollo, que promete grandes beneficios, y puede ser empleada con distintos fines: energéticos, ambientales y para la elaboración de subproductos; y a partir de una importante variedad de materias primas: residuos agrícolas, cultivos energéticos, residuos forestales, efluentes sólidos y líquidos, RSU, etc.

La gasificación es un proceso termoquímico de conversión de un insumo, sólido o líquido, en un gas con características combustibles, a través de una oxidación parcial a temperaturas intermedias (entre las recomendadas para pirólisis y las recomendadas para combustión), por medio de un agente oxidante en el orden del 20-60% del oxígeno estequiométrico necesario para combustión. En este proceso son suministradas cantidades restringidas de oxígeno, en la forma de oxígeno puro, o a través de aire atmosférico o vapor de agua, en función principalmente del uso final del gas a obtener. El desempeño de estos equipos se evalúa en general mediante la eficiencia fría, relación entre la energía química del gas pobre y de la biomasa, que si bien puede variar en función de diferentes factores, llega en ciertos casos a valores cercanos al 90% (De Boeck *et al.*, 2009; Bizzo y Sánchez, 2010; Cabrera *et al.*, 2012; Arteaga Pérez *et al.*, 2015; Suarez *et al.*, 2017). El gas

puede ser aprovechado como materia prima para la producción de combustibles líquidos u otros bioproductos mediante procesos químicos; para producción de electricidad empleando un ciclo termodinámico (ciclo Clausius-Rankine o de turbina de vapor, motores de combustión interna de ciclo Otto, turbinas de gas, ciclos combinados, etc.); puede ser empleado directamente para generar energía térmica (hornos, calderas, etc.); o para la cogeneración de energías (Eléctrica, calor, refrigeración, etc.)(Silva Lora y Venturini, 2012; Silva Lora, *et al.*, 2014).

Proceso de gasificación

Proponer un esquema general para describir el proceso de gasificación y la secuencia de reacciones en él involucradas es complejo debido a la variedad de condiciones de operación que pueden presentarse. Sin embargo, pueden reconocerse cuatro procesos fundamentales: secado, pirólisis, combustión (oxidación) y reducción (gasificación propiamente dicha); con reacciones fisicoquímicas endotérmicas y exotérmicas. La Figura 6 ilustra los procesos involucrados, sus interacciones y rutas de reacción, donde pueden observarse además los productos finales, intermedios y el aprovechamiento del calor liberado por la combustión. Según el tipo de gasificador, estos subprocesos puedan estar más o menos diferenciados, realizándose prácticamente por etapas en diferentes zonas del reactor, o en forma simultánea.

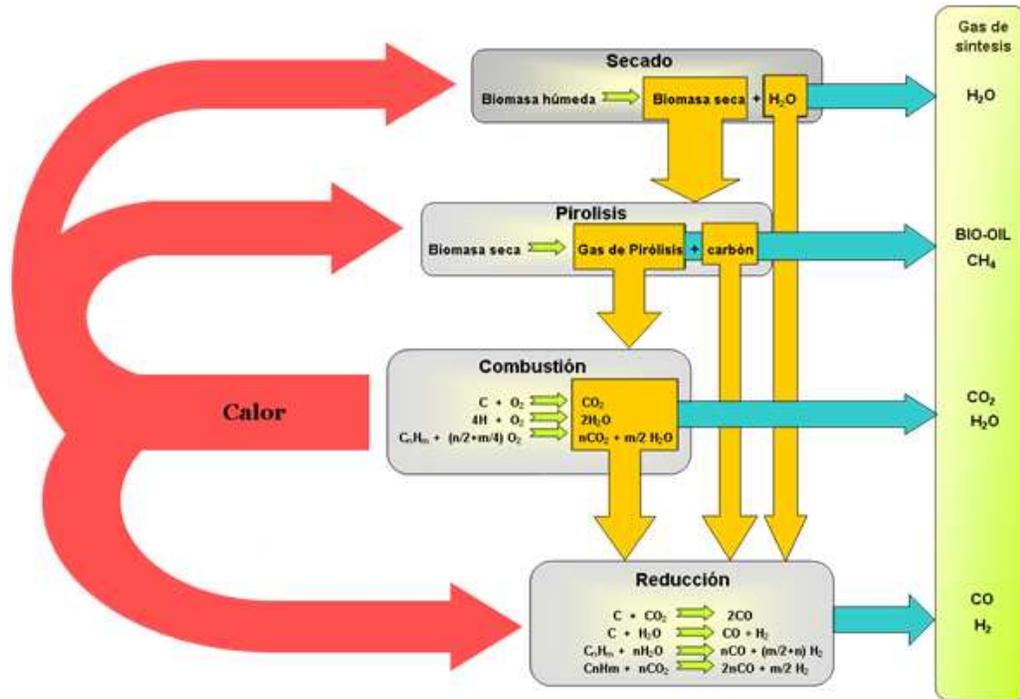


Figura 6. Esquema del proceso de gasificación
(De Boeckel *et al.*, 2009)

Tipos de gasificadores

Los gasificadores pueden ser clasificados por su poder calorífico (bajo o medio); por el tipo de agente gasificante (aire, oxígeno, vapor, hidrógeno); presión de trabajo (atmosférico, de baja presión, o presurizados); tipo y forma de material alimentado (carbón, biomasa, residuos; pulverizado, peletizado, etc.); movimiento relativo entre el material y el agente (contracorriente, cocorriente, flujo cruzado); extracción de cenizas (secas o fundidas) y por el método de contacto que utilizan entre las fases sólida y gaseosa (lecho fijo, lecho fluidizado, lecho arrastrado, etc.) (Ramirez y Sánchez, 2010; Arteaga *et al.*, 2015). Según el tipo de contacto, las características y capacidades de los reactores difieren considerablemente, las cuales se resumen en la tabla 3 para los tipos de gasificadores más difundidos.

Tabla 3. Características de los gasificadores (Arteaga *et al.*, 2015)

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

Lecho fijo o móvil

En estos equipos la biomasa se mueve lentamente mientras se pone en contacto con un flujo de agente oxidante. En estos reactores se pueden emplear biomásas con tamaños de partículas relativamente grandes y variables, con una amplia gama entre 1 y 100 mm. Las dificultades fundamentales radican en la baja tasa de transferencia de calor que provoca irregularidad en la distribución de temperaturas y aglomeración de combustible. En estos equipos los subprocesos se encuentran medianamente definidos en las distintas zonas del reactor.

Si el reactor es de **flujo ascendente**, contracorriente o “updraft” (Figura 7a), la biomasa se alimenta por la parte superior, y el agente oxidante por el fondo de manera que la primera fase en contacto son las cenizas y el carbón no convertido. Luego toman lugar la pirólisis, la gasificación y el secado de la biomasa. Los gases en estos reactores salen por la parte superior, a una temperatura relativamente baja, luego de precalentar el material alimentado, lo que hace que el gasificador tenga una alta eficiencia. Poseen baja concentración de partículas debido a que el lecho actúa como filtro. Tienen una buena conversión del carbón, sin embargo, como el gas abandona el reactor cerca de la zona de pirólisis, posee un alto contenido de alquitranes.

Su punto de diseño más crítico es la grilla, que se encuentra en la zona de combustión con altas temperaturas y que debe dejar pasar las cenizas, sin pérdidas de combustible.

En un reactor de **flujo descendente**, cocorriente o “*downdraft*” (Figura 7b), el secado del material y la pirólisis se realizan por efecto del calor transferido básicamente por conducción a través del lecho, la biomasa se alimenta por la parte superior y el gas abandona el gasificador por la parte inferior, cercano a la zona de oxidación, con lo que el gas posee menos alquitranes, pero posee altas concentraciones de partículas. En la zona de oxidación, poseen una reducción de sección denominada garganta, que obliga a los productos de la pirólisis a concentrarse en esa zona de alta temperatura, lo que favorece su descomposición. La temperatura de los gases producidos es mayor que para el caso anterior, debido a que no se produce una transferencia de calor por contacto directo entre el gas y el material de las zonas de secado y pirolisis.

No son aptos para combustibles con altos tenores de cenizas y puntos de fusibilidad bajos, y con grandes variaciones en el contenido de humedad del combustible.

Para el caso de **corrientes cruzadas** o “*cross draft*” (Figura 7c), el agente oxidante, se introduce lateralmente al equipo y el gas producto sale por el lado opuesto. Las diferentes etapas de la gasificación tienen lugar en forma concéntrica a la zona de inyección del oxidante, característica que limita su uso a pequeña escala. Poseen rápida respuesta a las variaciones de la carga, pero requieren un combustible limpio y seco ya que son sensibles a la variación del contenido de humedad del combustible y a su composición. En cuanto a la calidad del gas poseen características intermedias entre los dos tipos anteriores.

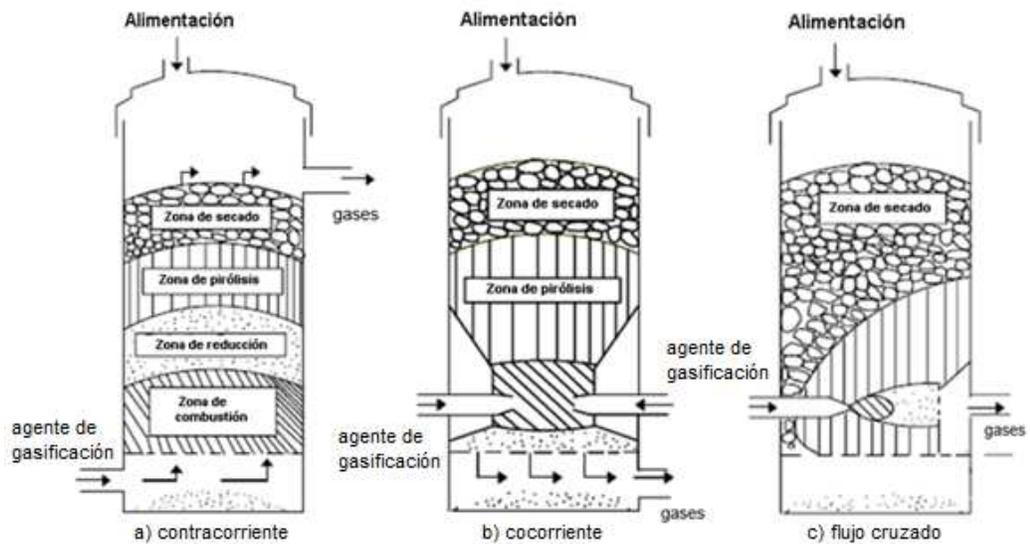


Figura 7. Gasificadores de lecho fijo (Silva Lora *et al.*, 2014)

Lecho fluidizado

Las partículas de combustible se introducen en un lecho conformado por un material granular, el cual puede ser inerte (arena) o con propiedades catalíticas (olivinas, dolomitas), que se mantiene en constante fluidización por el flujo ascendente de un gas, en general el agente gasificante. La principal ventaja de estos gasificadores es la uniformidad de temperatura obtenida en el lecho, debida a que el movimiento constante de las partículas favorece el contacto entre las ellas, haciendo que estas se mezclen más fácilmente en forma constante, mejorando la transferencia de calor entre el agente y el material suspendido en el lecho mientras se produce la reacción. Esto permite producir un gas homogéneo de manera continua.

Las cenizas se puedan descargar en forma seca o aglomerada, pero el lecho fluidificado se mantiene por debajo de la temperatura de fusión de la ceniza, para evitar aglutinaciones y solidificaciones, que podrían conducir a la pérdida de la fluidificación.

Estos equipos tienen una relativamente baja producción de alquitranes, entre 1 y 50 g/Nm³. Se aplican a mediana escala y poseen buena flexibilidad para emplear biomásas de diferentes características.

Hay dos tipos fundamentales: lecho fluidizado burbujeante y lecho fluidizado recirculante. En los **reactores de lecho burbujeante** (Figura 8a) el agente

oxidante fluye a velocidades de fluidización relativamente bajas, de 0,5 a 1 m/s. La conversión de carbón no es completa, no todas las partículas que dejan el reactor salen totalmente gasificadas.

Los **gasificadores de lecho circulante** (Figura 8b) poseen velocidades de fluidización relativamente altas, entre 3,5 y 5,5 m/s, que le permiten una recirculación de los sólidos, dando una mayor conversión de carbón.

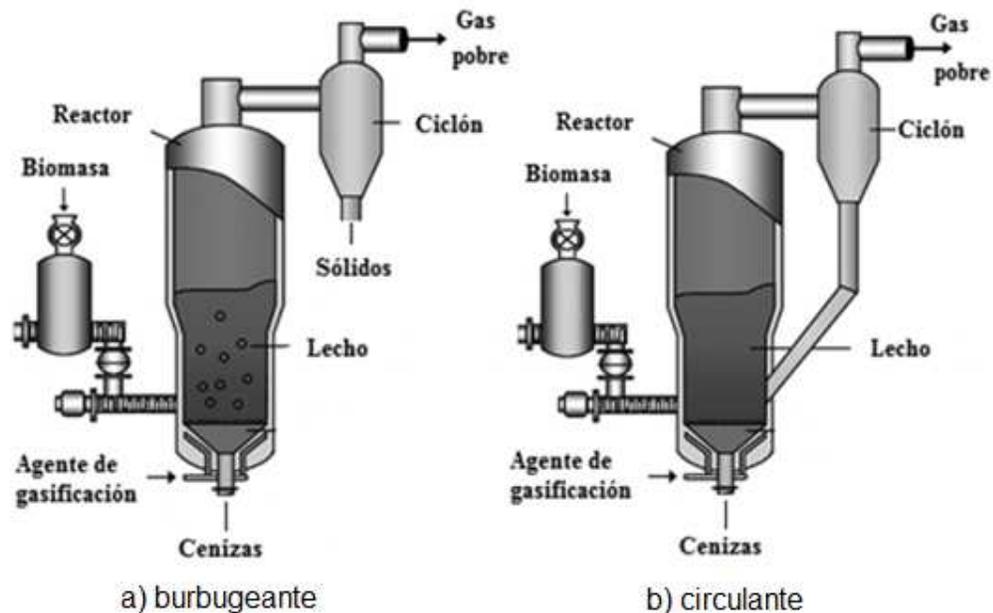


Figura 8. Gasificadores de lecho fluidizado (Arteaga *et al.*, 2015)

Lecho arrastrado

El material previamente pulverizado es alimentado mezclado con agua o junto al agente gasificante, y fluyen en la misma dirección con velocidades superiores a la de los otros tipos de gasificadores (Figura 9). El reactor opera a relativamente altas temperaturas y a presión. La temperatura de reacción se alcanza rápidamente, debido a una buena transferencia de calor fomentada por la alta velocidad del gas, redundando en una elevada velocidad de reacción y un tiempo de residencia muy corto.

Requieren de un sistema de recuperación de calor del gas que sale del reactor.

Se emplean a gran escala con carbón, coque y residuos de refinerías.

En algunos casos son operativos con altas temperaturas de escorificación (altos puntos de fusión de la ceniza), en otros las cenizas se extraen fundidas por la parte inferior.

Difícilmente se emplean con biomásas, ya que para las temperaturas de trabajo y los puntos de fusión típicos de las biomásas, requerirían extracción de cenizas fundidas, y además, porque en general las biomásas requerirían una importante y complicada reducción granulométrica a tamaños muy finos.

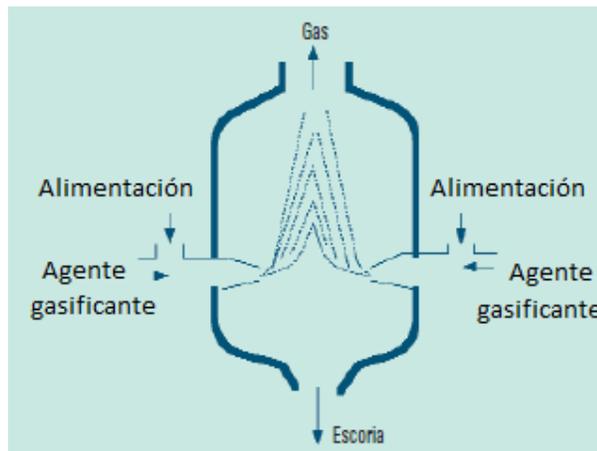


Figura 9. Gasificador de lecho arrastrado (Treviño)

Limpieza de los gases

En general los gases pobres producidos en la etapa de gasificación deben ser luego sometidos a algún proceso de limpieza, el cual dependerá del uso que se les dé a los gases (motores de combustión interna, turbinas de gas integradas en un ciclo combinado, etc.).

Los gases de gasificación contienen gran cantidad de impurezas (principalmente particulado, alquitranes, compuestos nitrogenados, clorados o azufrados) que afectan la operación y eficiencia de los sistemas instalados después del reactor.

Por ello es necesario reducir o eliminar estas sustancias indeseadas, lo que aún representa uno de los principales retos de esta tecnología. La limpieza de los gases puede realizarse por métodos primarios, antes o durante la gasificación; y por métodos secundarios, directamente sobre los gases aguas abajo del reactor, los cuales a su vez pueden ser de gas seco, en caliente, a temperaturas mayores a 500 °C; o de gas húmedo, con

temperaturas entre 20 y 60 °C, que requieren enfriar el gas para su limpieza (Arteaga *et al.*, 2015).

Entre los primarios se tiene el pre tratamiento de la biomasa, la utilización de materiales catalíticos mezclados con la biomasa o en el lecho de los reactores de fluidización, manejo operativo del reactor (buscando mayores temperaturas en el interior del reactor, mayor relación agente gasificante/biomasa, tiempos de residencia de la biomasa mayores en el interior del reactor, altas velocidades de calentamiento).

La limpieza en caliente se desarrolla por métodos físicos (ciclones, filtros cerámicos y separadores electrostáticos en seco), o por métodos químicos (conversión catalítica y conversión termoquímica).

La limpieza de baja temperatura se desarrolla fundamentalmente en lavadores (“scrubbers”) o precipitadores electrostáticos en medio húmedo.

Para las aplicaciones que requieren un bajo contenido de alquitranes se destacan el craqueo térmico, el catalítico y los lavadores, cuyas características principales se mencionan a continuación.

Eliminación de alquitranes por conversión mediante craqueo térmico.

Los alquitranes procedentes de la biomasa y residuos lignocelulósicos son muy estables y refractarios al craqueo térmico. Se requieren temperaturas entre 1000 a 1300°C y aumento del tiempo de residencia. No obstante, como la temperatura de gasificación suele ser menor, resulta necesario el aporte externo de calor. Este aumento de temperatura se logra con un aporte adicional de calor logrado por combustión del gas producido u otro combustible, lo que disminuye la eficiencia del reactor.

Eliminación de alquitranes por conversión mediante craqueo catalítico.

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, (dolomitas, olivinos, carbones). Estos procesos necesitan temperaturas del orden de los 800 a los 900°C y logran una eficiencia de remoción del 90-95%. La dolomita puede usarse directamente en el lecho del gasificador o mediante el uso de un reactor secundario aguas abajo del gasificador. La primera alternativa utiliza el calor del reactor, no obstante la vida del catalizador es baja, y en la

segunda se debe aportar calor, lo que puede impactar negativamente en la eficiencia (Castellels y Velo García,2012).

Eliminación de alquitranes por lavado

En el lavado de los gases a través de “scrubbers”, los alquitranes quedan retenidos en el líquido de lavado, que pueden ser agua o fluidos orgánicos tales como aceite vegetal, aceite de motor, Diésel, ésteres metílicos ácidos, biodiesel, etc. Cuando se emplea agua se genera el problema de eliminación de las aguas residuales contaminadas con compuestos orgánicos. Además el agua tiene baja efectividad en la absorción de alquitrán. Los líquidos orgánicos, debido a su densidad y viscosidad, son más efectivos en la absorción de alquitrán. Por ello estos aceites se consideran ampliamente como reemplazos adecuados para el agua. En ambos casos es necesario enfriar los gases, en mayor medida si se emplea agua (Panayiotis, 2016).

Si bien existen distintos tipos de gasificadores, con ventajas o desventajas relativas, en general la calidad de la materia prima, y las fluctuaciones que pueda tener, son un factor determinante en el diseño y en la marcha del proceso en todos los casos.

Uno de los factores que influye en la selección del tipo de gasificador y en su diseño es el tamaño de partícula o granulometría de la biomasa. Esta puede variar considerablemente al momento de su obtención, por lo que puede llegar a ser necesario un proceso de picado o molienda previo.

La humedad de la materia prima al ingreso del reactor, o gasificador propiamente dicho, es uno de los parámetros de calidad más importantes, ya que una humedad relativamente elevada puede constituirse en una limitante para la marcha del proceso, y además la eficiencia del mismo está fuertemente influenciada por ésta. “Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 23%. El secado es un proceso transversal a los procesos termoquímicos, se puede realizar en el mismo proceso o de manera separada del mismo. Cuando se realiza al interior del proceso se debe tener en cuenta que el agua requiere 2442 kJ/kg para ser vaporizada a

25°C y aproximadamente 1700 kJ/kg para alcanzar 850°C durante los procesos de pirolisis y gasificación, por lo tanto, esta energía debe ser obtenida del proceso” (García, 2011). En función del tipo de biomasa y del tipo de gasificador empleado, el contenido de humedad requerido a la entrada del reactor puede variar, siendo recomendado que sea menor a 25% (Lora y Venturini, 2012). Si se tienen biomásas con mayor contenido de humedad deberá emplearse algún proceso de secado previo.

Además, el propósito del gas condiciona la selección del gasificador en conjunto con un adecuado sistema de limpieza.

Por ello, la selección tanto del tipo específico de gasificador como de secador, de picadora o molino y sistema de limpieza, debe encararse en forma holística, ya que todos estos equipos pueden tener requerimientos y características operativas muy diferentes según su tipo y diseño; y su elección dependerá de múltiples factores que pueden estar influenciados entre sí: propósito del gas producido (energía o bioproductos) y tipo de equipos en que para ello se emplee (turbina de gas, motores de combustión interna, etc.), eficiencias, costos de inversión y operativos, tecnologías disponibles, escala (que puede influir en que el equipo sea autotérmico o no), tipo de transporte y distancias, características de las posibles materias primas a emplearse y sus posibles fluctuaciones, pre-tratamiento por torrefacción, densificado, entre otros.

En este trabajo se asume un sistema de gasificación genérico conformado principalmente por un gasificador de aire, con un eventual secador de ser necesario, y un motor de combustión interna. Este puede ser un motor que funcione únicamente con el gas pobre, en cuyo caso se tiene un rendimiento efectivo del motor entre 20 y 30%, ó puede emplearse un motor que funcione con el gas y soporte Diésel o Biodiesel, que logra rendimientos efectivos cercanos al 35% (Rearte *et al.*, 2016; Scozzina y Langnton, 2017).

La gasificación de biomasa así planteada es una tecnología que puede implementarse en forma relativamente sencilla, lo que favorece su aplicación para generar energía eléctrica en forma descentralizada o distribuida en lugares con disponibilidad de biomásas adecuadas.

Esta tecnología podría implementarse tanto en zonas urbanas, industriales como rurales, con un impacto social, económico y ambiental positivo. Permitiría la generación de nuevas fuentes de trabajo, principalmente en zonas rurales, al dar valor agregado a biomásas que hoy no tienen aprovechamiento y que en algunos casos generan impactos ambientales, económicos y sociales negativos.

Objetivos

Evaluación energética preliminar del sistema de gasificación con motor de ciclo Otto para la generación de energía eléctrica en Tucumán a partir de sus principales biomásas residuales.

Objetivos específicos:

- Seleccionar el tipo de biomasa en función de su disponibilidad en la región y sus características fundamentales para gasificación.
- Caracterización energética de las biomásas seleccionadas.
- Evaluación energética preliminar del sistema propuesto con cada biomasa para generación de energía eléctrica.

Selección, cuantificación y valoración de la biomasa de estudio.

En Tucumán se encuentran varios tipos de biomásas factibles de ser gasificadas, como los residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC), bagazo de caña de azúcar, residuos forestales y de aserraderos, cáscara de limón, renovación y poda de citrus, cáscara de trigo, entre otros.

En un estudio realizado por Montico y Di Leo, 2009, se indica que la provincia de Tucumán ocupa el cuarto lugar en producción de los principales cultivos de Argentina con 13.500.000 t para la campaña 2006-2007. En este también puede notarse la importante cantidad de residuos generados para cada tipo de cultivo, que indica que la biomasa residual de los cultivos de Tucumán podría tener un potencial importante, pero es necesario considerar aún la cantidad de biomasa que puede ser recolectada sin comprometer las condiciones agronómicas para cada cultivo.

El Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina, WISDOM (Wisdom, 2009), muestra a Tucumán como la provincia argentina con mayor cantidad de biomasa aprovechable (Tabla 4).

Tabla 4. Residuos aprovechables por actividad y provincia (Wisdom, 2009)

PROVINCIA	Residuos de poda de cítricos	Residuos de poda de vid	Residuos de poda de otros Frutales	Residuos poda de olivo	Residuos Arroz en campo	Residuos Agrícolas Cañeros (RAC)	Residuos de Bagazo no utilizados	Residuos cáscara mani	Residuos Industria Arrocera	Residuos desmote Algodón	Residuos de orujo de oliva	Residuos de aserraderos	Total
Valores expresados en toneladas de biomasa en base seca por año													
BUENOS AIRES	16.300,2	78,0	37.658,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17.399,0	71.436,1
CAPITAL FEDERAL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5.378,0	0,0	0,0	0,0	5.378,0
CATAMARCA	5.747,1	9.315,3	28.025,0	91.741,9	0,0	62,5	32.003,0	0,0	0,0	0,0	25.448,0	127,0	192.469,8
CHACO	231,9	0,0	403,7	0,0	10.765,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34.736,8	0,0	16.702,0	62.839,2
CHUBUT	0,3	23,9	2.209,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1.143,0	3.376,7
CORDOBA	204,0	710,9	6.377,8	0,0	0,0	0,0	0,0	180.011,0	0,0	319,4	0,0	3.910,0	191.433,1
CORRIENTES	73.706,7	0,0	962,8	0,0	173.821,0	0,0	0,0	0,0	29.046,0	5.856,7	0,0	516.984,0	799.977,2
ENTRE RIOS	141.849,9	41,9	2.321,0	0,0	144.585,0	0,0	0,0	0,0	84.450,0	0,0	0,0	160.445,0	533.892,7
FORMOSA	3.303,6	0,0	16,8	0,0	12.303,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2.172,0	0,0	12.759,0	30.554,5
JUJUY	20.134,8	206,6	4.533,3	0,0	0,0	161.640,6	85.295,0	0,0	0,0	159,7	0,0	7.527,0	279.487,0
LA PAMPA	0,0	285,1	2.722,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1.397,0	4.404,8
LA RIOJA	554,1	21.846,0	22.845,8	98.331,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48.193,0	0,0	191.770,0
MENDOZA	0,0	361.502,7	296.597,2	35.785,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	114.399,0	4.572,0	812.856,7
MISIONES	24.887,1	0,0	1.076,8	0,0	789,0	0,0	2.736,0	0,0	2.648,0	0,0	0,0	840.935,0	873.051,9
NEUQUEN	0,0	2.130,6	46.776,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2.794,0	51.700,6
RIO NEGRO	0,0	4.768,2	221.828,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3.302,0	229.896,0
SALTA	17.406,3	5.093,6	3.243,5	0,0	0,0	52.609,4	135.089,0	0,0	0,0	2.737,9	0,0	55.021,0	271.200,8
SAN JUAN	12,6	113.515,8	26.591,8	16.272,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45.490,0	2.032,0	203.914,2
SAN LUIS	3,0	0,0	192,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6.342,7	0,0	762,0	7.300,6
SANTA CRUZ	0,0	0,0	1.100,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	381,0	1.481,2
SANTA FE	1.572,3	0,0	3.671,1	0,0	46.907,0	0,0	19.847,0	0,0	6.111,0	1.985,0	0,0	6.350,0	86.443,3
SANTIAGO DEL ESTERO	1.986,0	49,4	310,2	0,0	0,0	4.500,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11.742,0	18.587,6
TIERRA DEL FUEGO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	254,0	254,0
TUCUMAN	102.872,1	123,9	2.435,1	0,0	0,0	697.359,4	881.011,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10.973,0	1.694.774,5
Totales	410.772,0	519.691,7	711.600,8	242.130,8	388.950,0	916.171,9	1.155.971,0	180.011,0	127.633,0	54.310,0	233.530,0	1.677.411,0	6.618.183,1

La mayor parte de la biomasa aprovechable de Tucumán proviene de las explotaciones forestales, cítrica y azucarera, y estas dos últimas son sus fuentes de biomasa más importantes.

La superficie plantada con cítricos en Tucumán en el año 2016 fue de 40.930 ha y la producción de fruta de 1.401.420 t (Federcitrus). Para un promedio de 300 plantas/ha cuya biomasa seca está alrededor de 225 kg*/planta, (*:seco, en base seca (b.s.)), si se asume una renovación del 3,5% (Díaz y Paz, 2017) se podría disponer de una biomasa de renovación de 2,4 t*/ha. Además, si consideramos que la poda representa 15 kg*/planta, y se deja en promedio un 30% en campo, se podría disponer de 3,2 t*/ha de la poda. Es decir, en conjunto, 5,6 t*/ha. Así la biomasa disponible correspondiente a la poda y la renovación de los citrus (PyR), ronda las 229.208 t*/año. Además, la cáscara de limón ronda los 54 kg*/t fruta procesada, para una producción de 1.350.840 t de limón (Federcitrus), y considerando un procesamiento industrial del 70% de la fruta producida, se obtienen 52.974 t*/año de cáscara, cuyo mercado potencial para producción de pectinas fluctúa

significativamente, y quedan muchas veces remanentes importantes sin comercializar.

En el caso específico de la caña de azúcar de Tucumán, Se considera que un ingenio tipo de Tucumán produce 150 kg* de bagazo por tonelada de caña molida (TC). Además, el empleo de la cosecha en verde ha dado lugar a la posibilidad de disponer del RAC. Este representa la parte de la caña entera que no es tallo molible, y ronda el 20% en peso de la misma. Se estima para Tucumán una generación promedio de RAC de aproximadamente 150 kg*/TC (Casen *et al.*, 2011); y teniendo en cuenta los porcentajes de recolección óptimos en función de las condiciones agronómicas de las diferentes regiones de la provincia, se estima un porcentaje de recolección medio del 50%.

Para un área de cosecha en Tucumán de alrededor de 275.000 ha (Figura 10) y un rendimiento cultural medio de 61t/ha, resulta una molienda anual media de 13,4 millones de TC, con un bagazo de 2 millones de t*/año, y un RAC potencial de 1millón t*/año. El bagazo se aprovecha actualmente mediante combustión en calderas para la generación de vapor. El RAC actualmente no se aprovecha en gran medida mediante combustión, ya que, debido a su elevado contenido de cenizas, y de punto de fusión relativamente bajo, requiere ser quemado en baja proporción en conjunto con bagazo, o en calderas especiales y aún costosas.

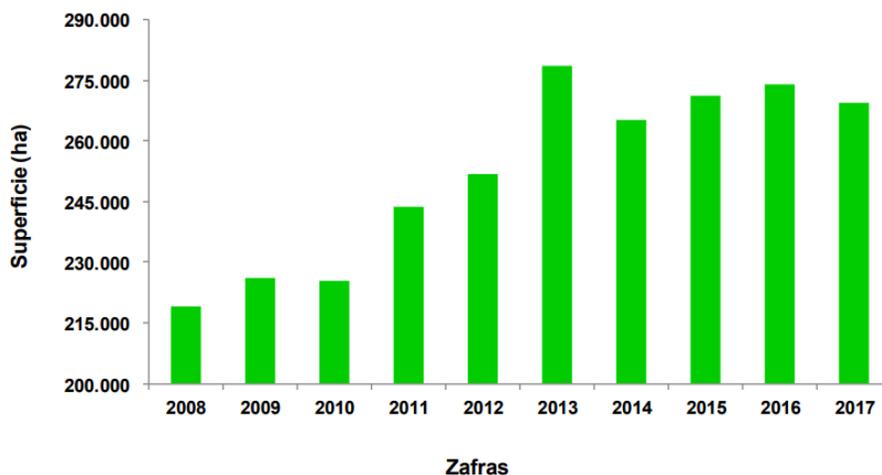


Figura 10. Superficie cultivada con caña de azúcar en Tucumán
(Fandos *et al.*, 2017)

La biomasa residual de la caña de azúcar y del limón representa una cantidad importante, sin embargo, tiene el problema de su estacionalidad. La cosecha de la caña de azúcar en Tucumán tiene lugar desde mayo hasta octubre, y la generación de los residuos citrícolas entre agosto y noviembre (Díaz y Paz, 2017). Si se quiere operar todo el año, para evitar capacidad ociosa de la planta industrial, o porque en el caso de entregar energía a la red convenga hacerlo en forma continua, sería necesario conseguir biomazas alternativas en los periodos comprendidos entre diciembre y abril, o almacenar parte de la biomasa generada entre mayo y noviembre. El almacenamiento de estas biomazas es posible, pero debido a su relativamente baja densidad, en general se trata de volúmenes relativamente muy importantes, por lo que su manejo y logística son complejos. Otras biomazas complementarias podrían ser por ejemplo los residuos forestales, el sorgo (fibroso y sacarífero); cuyas disponibilidades estarían dadas durante todo el año para el caso de los primeros, y para el caso del sorgo, entre los meses de marzo y mayo, con la ventaja adicional en el caso del sorgo sacarino de poder ser procesado para la producción de alcohol en forma complementaria a la producción sucroalcoholera con las mismas maquinarias agrícolas e instalaciones industriales en las que se procesa la caña de azúcar, y que se encuentran fuera de operación en dicho periodo (Romero *et al.*, 2012; Cruz y Paz, 2017).

Todas estas biomazas presentan el inconveniente de poseer contenidos de humedad variables y relativamente altos para ser utilizadas en la gasificación.

Los residuos de la poda y de la renovación de citrus tienen humedades de 40 a 50% al momento de la correspondiente operación; luego del procesamiento industrial del limón, la cáscara remanente posee una humedad de alrededor del 95% (previo al secado requerido para su exportación); el bagazo remanente del procesamiento de la caña tiene humedades alrededor de 50%, y el RAC de caña al momento de la cosecha alrededor de 50%; los residuos forestales tienen características similares a los de la poda y renovación de citrus, y los sorgos y sus derivados similares a las de la caña y sus derivados.

Los residuos de campo: residuos de poda y renovación de citrus, residuos forestales, RAC, etc., pueden dejarse en campo durante un tiempo en busca de reducir su humedad mediante el secado natural. Dependiendo de la época del año y de las condiciones climáticas, la humedad de la biomasa puede descender considerablemente hasta valores cercanos al 15% en pocos días, a modo de ejemplo en la Figura 11 se muestra la variación de humedad del RAC en función del tiempo de secado natural luego de la cosecha obtenido por Aso *et al.*, 2008. Con dicha reducción de la humedad de la biomasa, esta no sólo puede ya ser gasificada, sino que además se logra una disminución de su peso y un aumento de su poder calorífico, energía por unidad de masa, lo que impacta positivamente en el transporte y el balance energético global. En tal sentido, también pueden considerarse el secado forzado, la torrefacción y la densificación para tales fines, sin embargo, estos consumen energía y requieren equipamiento adicional. En cuanto a la fusibilidad de las cenizas, las maderas tienen una temperatura de deformación inicial de 1200°C (Francescato *et al.*, 2008; Carmona y Urzúa, 2013) y el RAC superior a 1000°C (Zamora *et al.*, 2015), con lo que podrían seleccionarse gasificadores de extracción de cenizas secas en todos los casos.

Para este estudio se considera el empleo del RAC y de los residuos de renovación y poda de citrus, por ser actualmente las principales biomásas de Tucumán sin sustancial aprovechamiento, factibles de gasificar, y que además eventualmente se queman a cielo abierto generando los inconvenientes antes mencionados.

Si bien a veces estas biomásas residuales, RAC y PyR, no resultan disponibles porque eventualmente se queman a cielo abierto, a pesar de que existen leyes nacionales (Ley nacional 26.562) y provinciales (Leyes provinciales N° 6253, Art. 38°; N° 7459 modificador ia del Art.38°, y el decreto regional N° 795/3) con afán de evitarlo; dar un valor económico a estos residuos favorecería a evitar su quema.

En la tabla 5 se resumen las cantidades de dichas biomásas disponibles en Tucumán.

Tabla 5. Principales Biomosas residuales disponibles en Tucumán (en base seca)

Biomasa	Cantidad
	[t*/año]
Renovación y poda de citrus (PyR)	229.208
Residuos agrícolas de cosecha de caña (RAC)	1.000.000

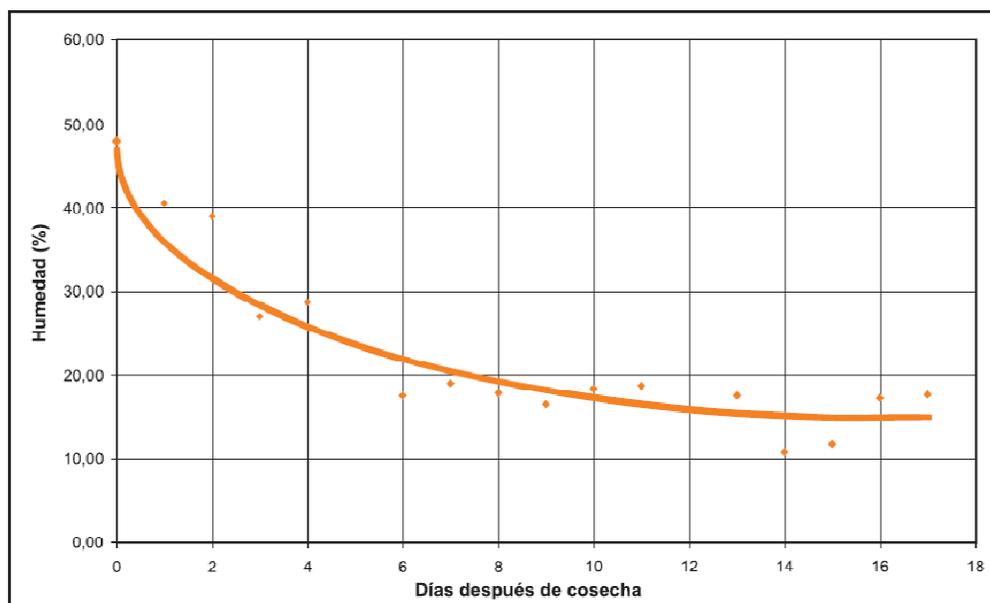


Figura 11. Secado natural de RAC (Aso *et al.*, 2008).

Energía de la biomasa

La energía de los combustibles sólidos suele determinarse experimentalmente en equipos especiales denominados bombas calorimétricas. En estas se mide la cantidad de energía desprendida durante la combustión completa y el calor cedido durante la condensación del agua contenida en los gases producidos en la combustión. Esta energía total obtenida en la bomba calorimétrica, referida a la unidad de cantidad de materia, se denomina poder calorífico superior (PCS). En los equipos en que los gases salen a temperaturas relativamente elevadas, el calor de la condensación del agua no se aprovecha, por lo que se descuenta del PCS, con lo que se obtiene el poder calorífico inferior (PCI), que es la energía aprovechable en estos equipos, de los cuales forman parte los gasificadores. Según Feijóo *et al.*, 2015, el PCI puede calcularse a partir de la Ecuación 1, suponiendo que la condensación tiene lugar durante el enfriamiento a 25°C en cuyo caso el calor de condensación del agua es 2442 kJ/kg.

$$PCI = PCS^* \cdot (1 - w) - 2442 \times [9 \cdot H \cdot (1 - Cz) \cdot (1 - w) + w] \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

PCI= poder calorífico inferior [kJ/kg de combustible (b.h.)].

PCS*= poder calorífico superior [kJ/kg* de combustible (b.s.)].

w = contenido de agua del combustible [kg agua/kg combustible (b.h.)].

H = contenido de hidrógeno en materia seca libre de ceniza (b.s.l.c.)

[kg H₂/kg combustible seco libre de ceniza].

Cz = contenido de ceniza en materia seca. [kg de ceniza/kg* combustible (b.s.)]

En la Tabla 6 se presentan los valores de bibliografía obtenidos para el cálculo del PCI.

Tabla 6. Características de las biomásas

	Poday Renovación	RAC(3)
Carbono % (b.s.l.c.)	54,74% (1)	46,00%
Hidrógeno % (b.s.l.c.)	5,72% (1)	6,10%
Oxígeno % (b.s.l.c.)	38,68% (1)	46,70%
Cenizas % (b.s.)	2,45% (2)	11,39%
PCS [KJ/kg*] (b.s.)	17.942 (2)	13.966

Fuentes: 1) García *et al.*, 2011. 2) Diaz y Paz, 2017. 3) Feijóo *et al.*, 2015.

En base a la Tabla 6 y la Ecuación 1, asumiendo un contenido de humedad del 15%(b.h.) para ambas biomásas, se obtuvo el PCI, que resultó 13.842 kJ/kg para PyR, y 10.495 kJ/kg para el RAC.

Rendimiento de gasificación

El rendimiento de la gasificación generalmente se evalúa mediante la eficiencia fría (η_f), que se define como la relación entre la energía obtenida en el PCI del gas pobre y la energía entregada con el PCI de la biomasa según la Ecuación 2.

$$\eta_f = (m_B \cdot PCI_B) / (m_G \cdot PCI_G) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde: m: caudal másico [Kg/h]; B: Biomasa; G: Gas pobre

Por lo tanto, la eficiencia depende por un lado de la calidad (composición) de la biomasa, y por otro de la composición del gas producido con ella, el cual depende a su vez de la calidad de biomasa, además del tipo y diseño de reactor seleccionado, de la temperatura del reactor y de la relación de equivalencia (masa de aire/masa de combustible) o del factor de aire (aire real/aire estequiométrico), entre otros factores. Esto indica que no es posible asumir a priori un valor para la eficiencia fría.

Sin embargo, como puede inferirse de lo anterior, la composición de la biomasa tiene una fuerte influencia sobre la eficiencia fría. Por ello, para estimar esta eficiencia, sin tener aún una escala definida que permita la adecuada selección de un tipo de gasificador y su diseño, conocida la composición y el PCI de la biomasa, se asume una temperatura de reacción de 850°C (valor adecuado para minimizar la generación de alquitrán sin comprometer la eficiencia de gasificación) y que los gases abandonan el reactor a esta temperatura (supuesto conservador); y se emplea el software de simulación Cycle Tempo 5.0 (Delft, 2010), para resolver los balances de materia y energía, teniendo en cuenta el equilibrio termodinámico (Modelo de equilibrio ó Modelo 0-D), y conocer la cantidad, composición y PCI del gas producido. En las Figuras 12 y 13 se presentan los resultados para PyR y RAC respectivamente y en la tabla 7 las características del gas obtenido en ambos casos.

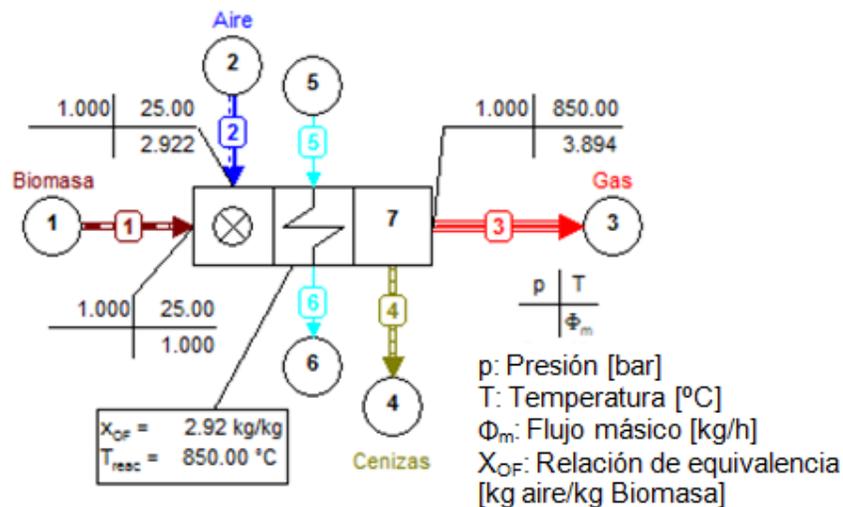


Figura 12. Balances en Cycle Tempo para gasificación de PyR

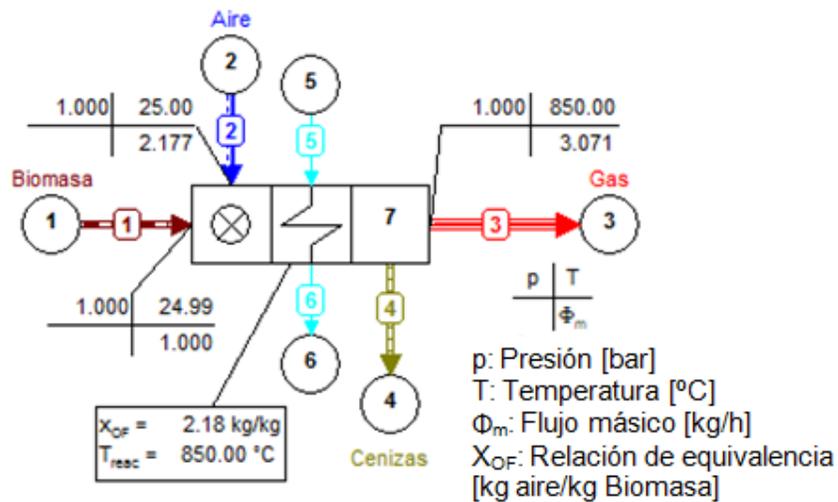


Figura 13. Balances en Cycle Tempo para gasificación de RAC

Tabla 7. Características del gas pobre

	PyR	RAC
CO ₂	11,77%	13,09%
CO	13,48%	11,04%
H ₂	10,92%	11,37%
N ₂	53,47%	49,86%
H ₂ O	10,36%	14,64%
Peso molar medio [kg/kmol]	26,02	25,69
LHV [kJ/mol]	64,56	58,73
HHV [kJ/mol]	69,36	63,73

A partir de la Ecuación 2, se obtuvo una eficiencia fría de 69,8% para los residuos de poda y renovación y de 66,9% para el RAC.

Energía eléctrica específica

Para el cálculo de la energía eléctrica específica (E_e), energía que puede obtenerse por unidad de cantidad de materia, se consideran los rendimientos o eficiencias de los equipos que componen la instalación: eficiencia fría del gasificador (η_f), rendimiento efectivo del motor (η_{ef}) y rendimiento del generador eléctrico (η_{el}), y se emplea la Ecuación 3.

$$E_e = \eta_f \cdot \eta_{ef} \cdot \eta_{el} \cdot PCI_B / 3600 \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde: E_e = Energía eléctrica específica [kWh/kg]

El cálculo de (η_f) se detalla en el apartado anterior. Para el motor y el generador eléctrico, es posible asumir un rendimiento efectivo y un rendimiento eléctrico respectivamente con buena aproximación, ya que estos dependen principalmente del diseño y calidad constructiva de los equipos. Se asume un rendimiento efectivo del motor (η_{ef}) de 27% y un rendimiento del generador eléctrico (η_{el}) del 95%.

La E_e está referida a unidad de cantidad de materia a la humedad que la biomasa posee al ingresar al reactor. Sin embargo, es conveniente expresarla en base seca, para obtener la energía eléctrica específica en base seca, E_e^* , según la Ecuación 4.

$$E_e^* = E_e / (1-w) \quad \text{Ecuación 4.}$$

En la Tabla 8 se muestran los resultados del cálculo de la energía específica en base húmeda y seca.

Tabla 8. Energía eléctrica específica

	Unidades	PyR	RAC
Humedad biomasa	%	15,00%	15,00%
PCI biomasa	kJ/kg	13842	10495
Energía específica	kWh/kg	0,69	0,50
Energía específica (b.s.)	kWh/kg*	0,810	0,588

Energía eléctrica potencial

La estimación de la energía eléctrica (E) que podría obtenerse se realiza considerando la cantidad de biomasa en base seca (B^*) disponible en cada caso y la energía eléctrica específica mediante la Ecuación 5.

$$E = E_e^* . B^* \quad \text{Ecuación 5.}$$

En la Tabla 9 se presenta el potencial de este sistema para generación de energía eléctrica en Tucumán, a partir de sus principales biomásas sin sustancial aprovechamiento actual, RAC de caña y residuos de poda y renovación de citrus, para cada una de ellas.

Tabla 9. Energía eléctrica potencial

Biomasa	Cantidad	Energía específica (b.s.)	Energía eléctrica
	[t*/año]	kWh/kg B*	GWh/año
PyR	229.208	0,810	185,6
RAC	1.000.000	0,588	588,4

Los residuos cítricos y el RAC, en conjunto, podrían generar 774 GWh/año, equivalente al 89% de la energía eléctrica consumida por la industria provincial, y a un 27% de la consumida en toda la provincia (ver Tabla 2).

Conclusiones

La tecnología de gasificación podría implementarse en forma relativamente sencilla, a diferentes escalas, lo que favorece su aplicación para generación de energía eléctrica en forma descentralizada o distribuida en lugares con disponibilidad de biomasa adecuada, en el marco de la reciente Ley Nacional N°27.424 de “Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública”. Empleando sistemas de gasificadores de aire y motores de combustión interna, se podrían emplear las principales biomasa residuales de Tucumán sin sustancial aprovechamiento actual, anualmente 1.000.000 de toneladas en base seca de RAC de caña de azúcar y 229.208 toneladas en base seca de residuos de poda y renovación de citrus, para la generación de 185,6 y 588,4 GWh/año de energía eléctrica de origen renovable respectivamente, en conjunto 774 GWh/año, un 27% de la energía eléctrica total consumida en la provincia.

Esto daría un valor económico a dichos residuos lo que favorecería a evitar su quema a cielo abierto, perjudicial para el medio ambiente.

Dicha energía generada, al provenir de biomasa, podría reemplazar parte de la energía generada a partir de combustibles fósiles, con lo cual aumentaría la participación de las energías renovables en la matriz energética, esto generaría beneficios sociales, ambientales y económicos, y favorecería al cumplimiento del objetivo fijado por ley nacional 27.191, lograr una contribución de las fuentes de energía renovables de 20% del consumo de energía eléctrica nacional en el año 2025.

Bibliografía

- Arteaga Pérez, L.E.; Y.Casas Ledón; J.Cabrera Hernández, L. Rodríguez Machín. 2015.** Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación. Rev. AFINIDAD LXXII, Vol. 72, Número 570: 138-145. <http://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/download/297249/386236>
- Aso, G.; E.A. Feijóo; S.M. Sosa y Dora Paz. 2008.** Residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar. Experiencias de secado natural en el campo. Revista Avance Agroindustria/29 (1): 19-22.
- ASPO. 2004.** Asociación para el Estudio del Cenit del Petróleo y el Gas. Boletín N° 39 - Marzo 2004. www.crisisenergetica.org/staticpages/index.php?page=20040226195710925.
- Bizzo, W.A. y C.G.Sánchez. 2010.** Estequiometría das Reações de Combustão e Gaseificação. En: Sánchez, C.G. Tecnologia da Gaseificação de Biomassa. Editora Átomo: 215-246.
- BP. 2017.** Energy Outlook. 2017 edition. www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf.
- Cabrera, G.; S.Madriñan y D.Muñoz. 2012.** Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial Vol 10 No. 1 (166 - 172) Enero - junio 2012
- Cárdenas, G.J. y P.Garolera De Nucci. 2013.** Sostenibilidad en la producción de biocombustibles. Avance Agroindustrial EEAOOC. Argentina. 33 (2): 39-43.
- Carmona C., R. y Á.Urzúa M. 2013.** Caracterización de biomasa leñosa con fines energéticos disponible en Chile. <http://www.libros.uchile.cl/files/presses/1/monographs/398/submission/proof/files/assets/basic-html/page31.html>
- Casen, S.D.; E.R.Romero; J.Fernández de Ullivarri; P.Fernández González; A.Sánchez Ducca; D.Peréz; F.Soria; P.Digonzelli; L.Alonso y D.Duarte. 2011.** RAC potencialmente disponible en el área cañera de Tucumán y alternativas de enfiado. En: Resúmenes de la Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar, 17, Orán, Salta, R.Argentina, pp. 179-183.

Castells, X.E. y E.Velo García. 2012. La gasificación: Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos, ISBN 978-84-9969-130-S. Madrid. España.

Cruz, M.C.; G.DeBoeck y D.Paz. 2017. Estudio preliminar del aprovechamiento de sorgo fibroso como combustible para abastecer energéticamente un ingenio durante la inter-zafra en Tucumán. RIAT. Tomo 94 (2), en prensa.

De Boeck, G.; G.Aso y D.Paz. 2009. Gasificación: alternativa tecnológica para la utilización de la biomasa como fuente energética. Avance Agroind. 30 (1): 16-20.

Delft,2010. Universidad Tecnológica de Holanda.Cycle Tempo 5.0. Autor y responsable de la página Teus van der Stelt (T.P:vanderStelt@tudelft.nl). <http://www.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=8c53f82e-a500-41f1-971b-629e832bfbef&lang=en>.

DEP. 2017. Dirección de estadísticas de la provincia de Tucumán. Generación de energía eléctrica en Tucumán – Informe febrero de 2017: <http://estadistica.tucuman.gov.ar/archivos/6PBP/3INFORME/Informe%20-%20Oferta%20de%20energ%C3%ADa.pdf>.

Diaz G.F. y D.Paz. 2017. Evaluación técnico-económica de una planta de gasificación de biomasa residual del cultivo del limón para el abastecimiento energético de una citrícola de Tucumán. Parte I. RIAT. Tomo 94 (2): 1-6. ISSN 0370-5404.

Fandos,C.; J.Scandaliaris, P.Scandaliaris, J.I.Carreras Baldrés y F.J.Soria. 2017.Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2017 en Tucumán. Reporte Agroindustrial. Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán EEAO. N°138. Junio 2017. ISSN 2346-9102.

Federcitrus. Federación Argentina de Citrus. Actividad Citrícola Nro 17. <http://www.federcitrus.org/newsite/estadisticas/>

Francescato, V.; E.Antonini y L.Zuccoli Bergomi. 2008. Manual de combustibles de madera. Producción - Requisitos de calidad - Comercialización.

http://www.biomassstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf_vsebine/Handbook/Handbook_E.pdf

García Fernández, L.E. 2011. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia.

García, R.; C.Pizarro; A.G.Lavín; J.L.Bueno. 2011.“Characterization of Spanish biomass wastes for energy use”. *Bioresource Technology* 103 (2012) 249–258.

Feijóo, E.A.; M.A.Golato, F.J.Franck Colombres, D.Paz y G.J.Cárdenas. 2015.Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán. *RIAT. Tomo 92 (2):* 23-32.

IEA News.2017. International Energy Agency. News 6 March 2017. Global oil supply to lag demand after 2020 unless new investments are approved soon. www.iea.org/newsroom/news/2017/march/global-oil-supply-to-lag-demand-after-2020-unless-new-investments-are-approved-so.html.

IEA Statistics. 2017. International Energy Agency. Key world energy statistics.www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf.

Montico, S y N.DiLeo. 2009.Energía potencialmente obtenible de los rastrojos de cultivos en Argentina.<http://www.unr.edu.ar/descargar.php?id=4593>.

Panayiotis N. 2016. Removal, Utilization and Separation of Tars from Syngas.Master of Science in Sustainable Energy Technology. Delft University of Technology.<http://repository.tudelft.nl/>.

Ramirez Behainne, J.J y C.G.Sánchez. 2010. Gaseificadores: conceitos básicos. En: Sánchez, C.G. *Tecnologia da Gaseificacao de Biomassa*. Editora Átomo: 27-45.

Rearte, M.; S.Abdelhamid, G.Martínez Pulido, M.Risso. 2016. Introducción a la gasificación de biomasa en sistemas downdraft. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación y Desarrollo Tucumán.

Romero, E.R.; G.J.Cárdenas; M.Ruiz; S.Casen; P.Fernández González, A.Sánchez Ducca; B.S.Zossi; G.De Boeck; C.Gusils; J.Tonatto; M.Medina; R.Caro y J.Scandaliaris. 2012. Integración del sorgo azucarado

a la cadena de aprovechamiento bioenergético de la caña de azúcar en Tucumán, R. Argentina. EEAOC - Avance Agroindustrial 33 (1): 13-17.

Secretaría de Energía de la Nación. <https://www.minem.gob.ar/energia-electrica/>

Silva Lora, E.E.; R.Vieira Andrade; C.G.Sánchez; E.Olivares Gómez y C. Vilas Bôas de Sales. 2014. Gaseificação. En: Barbosa Cortez, L. A. ; E. E. SilvaLora & E. Olivares Gómez (Eds.). Biomassa paraenergia Campinas: UNICAMP: 241-332.

Silva Lora, E. E. y O.J. Venturini. 2012. Biocombustíveis. Volume 1. Editora Interamericana.

Scozzina, E.F. y G.Langnton. 2017. Biomasa: consideraciones generales de la gasificación respecto de ciclos térmicos para generación de electricidad y calor. Consejo Profesional de Ciencias Forestales de Chaco. <http://www.cpcfch.org.ar/expotrabajosvoluntarios>

Suárez L, Pérez JF y Barrera R. 2017. Gasificación de madera para la obtención de un syngas útil en la producción de biocombustibles y/o productos químicos. Rev.ion. 2017;30(1):57-71.Bucaramanga (Colombia). <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v30n1/0120-100X-rion-30-01-00057.pdf>

Sukumar V., V.Manieniyam and S.Sivaprakasam. 2015. Bio oil Production from Biomass using Pyrolysis and Upgrading - A Review.International Journal of ChemTech Research CODEN (USA): IJCRGG ISSN: 0974-4290 Vol.8, No.1: 196-206.

Treviño Coca, M. Tecnología de Gasificación Integrada al Ciclo Combinado – Aplicación Real en España, ELCOGAS Puertollano. <https://es.scribd.com/document/265417407/Pag-Elcogas-GICCtecnologiaimpiadelcarbon>

United Nation, 1998. Framework Convention on Climate. Change:<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.

Villegas Aguilar, P.J.; O.Cruz Fonticiella; A.Rubio González; B.Bucki Wasserman y F.Pérez Egusquiza. 2005. Evaluación del impacto ambiental del uso de biomasa en las fábricas de azúcar cubanas. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar12/HTML/articulo01.htm>

Wisdom Argentina. 2009. Análisis del balance de energía derivada de la biomasa en Argentina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Departamento forestal Servicios y Productos Forestales – Dendroenergía.

<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0900s/i0900s00.pdf>.

Zamora Rueda G. del H.; M.G.Mistretta; F.L.Peralta; C.E.Gutiérrez; E.A.Feijóo; M.A.Golato; D.Paz y G.J.Cárdenas. 2015. Caracterización energética del residuo agrícola de la cosecha de la caña de azúcar (RAC) de Tucumán. XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES). San Rafael, Mendoza 3, pp. 06.09-06.18.