

Posibilidades de generación distribuida de energía eléctrica mediante gasificación de las principales biomásas residuales de Tucumán, Argentina¹

Federico J. Franck Colombres* ** y Dora Paz* ***

RESUMEN

El empleo de fuentes renovables para generación de energía eléctrica viene incrementándose constantemente en los últimos años a nivel mundial, debido principalmente a políticas ambientales para reducir los impactos del cambio climático. La biomasa puede considerarse una fuente renovable para la obtención de energía eléctrica "limpia". La provincia de Tucumán, en razón de su actividad agroindustrial, ofrece buenas perspectivas para su aprovechamiento. Para ello, en función del tipo de biomasa, es necesaria una tecnología adecuada para convertirla en energía en forma eficiente, y una alternativa promisoría es la gasificación. Esta tecnología podría implementarse de manera relativamente sencilla para generación de energía eléctrica en forma descentralizada, a diferentes escalas, en lugares con disponibilidad de biomásas adecuadas. Empleando el software de simulación Cycle Tempo 5.0 para resolver balances de materia y energía teniendo en cuenta un modelo de equilibrio termodinámico (Modelo 0-D), se evaluó el potencial de generación de energía eléctrica en motores de combustión interna, a partir de gas pobre obtenido mediante gasificación de las principales biomásas residuales de Tucumán sin aprovechamiento: los residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar y residuos de poda y renovación de citrus. Con estos residuos, que suman 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. Esto daría valor económico a estos residuos lo que favorecería a evitar su quema a cielo abierto, y la energía así generada, podría reemplazar parte de la proveniente de combustibles fósiles, aumentando la participación de renovables en la matriz energética, con beneficios sociales, ambientales y económicos.

Palabras clave: bioenergía, energía limpia, residuos agrícolas, caña de azúcar, cítricos.

ABSTRACT

Possibilities of distributed power generation through gasification of residual biomasses in Tucumán, Argentina

In recent years, the use of renewable sources for electric power generation has been steadily increasing worldwide, mainly due to environmental policies to reduce climate-change impacts. Biomass can be considered a renewable source for generating "clean" energy. The province of Tucumán, due to its agroindustrial activity, offers good prospects for the use of biomass. Appropriate technology is needed to convert biomass efficiently, and a promising alternative is gasification. This technology could be implemented in a relatively simple way to generate electricity in a decentralized manner, at different sizes of installations, in places with enough biomass available. Using the Cycle Tempo 5.0 simulation software to solve matter and energy balances by taking into account a thermodynamic equilibrium model (Model 0-D), the potential power generation in internal combustion engines was evaluated from the gas obtained by gasification of the main residual biomass in Tucumán without substantial current use: sugarcane harvest residues, and citrus pruning and renewal residues. With 1.229.208 t dry weight basis per year of this residual biomass, 774 GWh of electric energy could be generated annually, 27% of the total electric energy consumed in the province. This would give economic value to these wastes, which would help to avoid their in-field burning. The energy generated by means of gasification could partly replace that generated from fossil fuels, which would increase the participation of renewables in the energy matrix, and generate social, environmental and economic benefits.

Key words: bioenergy, clean energy, harvest wastes, sugar cane, citrus.

Fecha de recepción: 26/09/2019 - Fecha de aceptación: 15/09/2020

¹ Parte de los datos de este trabajo fueron presentados en VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (CAIM 2018), y XXX Congreso Internacional de la Caña de Azúcar (ISSCT 2019).

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. E-mail: federicofranck@eeaac.org.ar

** Departamento de Mecánica, Universidad Nacional de Tucumán.

*** Departamento Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial, Universidad Nacional de Tucumán.

INTRODUCCIÓN

El empleo de energías de origen renovable es cada vez mayor a nivel mundial (IEA, 2017; BP, 2017), debido principalmente a políticas ambientales para reducir las emisiones de GEI y los impactos del cambio climático, el aumento en el consumo global de energía, las perspectivas de un agotamiento de las reservas de combustibles fósiles en el mediano plazo y las políticas económicas. El uso de recursos no renovables en actividades humanas genera consecuencias ambientales, económicas y sociales negativas. Esto justifica la búsqueda de alternativas que disminuyan la dependencia de los combustibles fósiles y permitan sistemas más sustentables con el uso de recursos renovables como la biomasa y las energías solar, eólica, marina, geotérmica, etc.

En 2015, el 7,5% del consumo mundial de energía eléctrica ya estaba cubierto por las energías renovables (BP 2017), y se prevé que para 2040 habrá aumentado a alrededor del 30%. La matriz energética argentina está compuesta en más del 90% de combustibles fósiles, y el gas natural representa más del 50% del total y menos del 10% proviene de fuentes renovables (Secretaría de Energía de la Nación, 2018). El porcentaje de energía eléctrica obtenida a partir de fuentes renovables es aun menor, con lo cual el objetivo fijado por Ley Nacional N° 27.191, de 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, esta relación es aun más desfavorable: en 2014, la provincia generó 6.158.738 MWh de energía eléctrica, de los cuales solo 160.932 MWh provinieron de fuentes renovables, 2,6% del total (DEP, 2017), y 5,6% del consumo eléctrico de la provincia. Una alta proporción de la energía producida por Tucumán para la red nacional se genera a partir de gas natural en plantas termoeléctricas. Un mayor uso de recursos renovables para la generación de energía eléctrica disminuiría el uso de gas de petróleo y daría lugar a beneficios sociales, ambientales y económicos.

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.

Por ubicación geográfica y actividad agroindustrial, Tucumán posee buenas perspectivas para el aprovechamiento de biomasa, incrementadas 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 generada a partir de fuentes renovables.

Pero si bien 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 transesterificación de aceites vegetales para la obtención de biodiesel; los procesos bioquímicos o fermentativos (anaeróbicos) 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 requiere una tecnología específica, en algunos casos más desarrollada que en otros.

Una alternativa promisoría 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, 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 y RSU.

Para la generación de energía distribuida se podrían emplear, en forma relativamente sencilla, sistemas conformados principalmente por un generador eléctrico acoplado a un motor de combustión interna, alimentado por gases provenientes de la gasificación de biomasa con aire como agente de gasificación.

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 se suministra 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 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, 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 *et al.*, 2014). El desempeño energético de estos equipos se evalúa en general mediante la relación entre la energía química del gas producido y la de la biomasa empleada, que se denomina eficiencia fría, y si bien puede variar en función de diferentes factores que se mencionan más adelante, llega en ciertos casos a valores cercanos al 90% (Bizzoe Sánchez, 2010; Suárez *et al.*, 2017).

Aunque existen diferentes tipos de gasificadores, con diferentes ventajas y desventajas, en general los parámetros de calidad de la materia prima y sus variaciones inherentes son factores determinantes en el diseño y el proceso. La humedad de la materia prima al ingresar al reactor, o al gasificador propiamente dicho, es uno de los parámetros más importantes, ya que la eficiencia del proceso está fuertemente influenciada por esta, y una humedad relativamente elevada puede constituirse en una limitante para la marcha del proceso. Dependiendo del tipo de biomasa y gasificador utilizados, el contenido de humedad requerido en la entrada del reactor puede variar, pero se recomienda que sea inferior al 25%. Si se utiliza biomasa con mayor humedad, debe pasar por un proceso de secado previo. Otro parámetro importante es el tamaño de partícula o granulometría de la biomasa, que puede variar considerablemente, por lo que puede ser necesario un proceso de molienda previo.

Por otro lado, los gases de gasificación contienen gran cantidad de impurezas (principalmente partículas,

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. El tipo de sistema de limpieza necesario dependerá principalmente del uso que se les dé a los gases (motores de combustión interna, turbinas de gas integradas en un ciclo combinado, etc). Por lo tanto, 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. La elección dependerá de múltiples factores que pueden estar influenciados entre sí: propósito del gas producido (energía o bioproductos) y tipo de equipos 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). Además, el tipo de transporte y distancias, características de las posibles materias primas a emplearse y posibles fluctuaciones de estas, pre-tratamiento por torrefacción y densificado, entre otros, juegan un papel en la elección.

El objetivo de este trabajo es seleccionar, caracterizar y cuantificar los principales tipos de biomasa de la provincia de Tucumán, en función de su disponibilidad y requerimientos fundamentales para la gasificación, y realizar una evaluación preliminar de las posibilidades de generación de energía eléctrica a partir de ellas, mediante un sistema de gasificación que permita la generación distribuida de energía eléctrica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección, cuantificación y valoración de la biomasa de estudio

El Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina, WISDOM Argentina (Wisdom, 2009), muestra a Tucumán como la provincia argentina con mayor cantidad de biomasa aprovechable. La mayor parte de esta proviene de las explotaciones forestales, cítrica y azucarera, siendo estas dos últimas las fuentes de biomasa más importantes.

Estas materias pueden poseer contenidos de humedad muy variables, por lo que para cuantificarlas de forma sencilla y comparable en general se expresarán en base seca (b.s.), es decir, peso de la sustancia seca en el producto.

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, 2017). Para un promedio de 300 plantas/ha cuya biomasa seca está alrededor de 225 kg (b.s.) por planta, si se asume una renovación del 3,5% (Díaz y Paz, 2017), podría disponerse de una biomasa de renovación de 2,4 t (b.s.) por ha. Además, si consideramos que la poda representa 15 kg (b.s.) por planta, y se deja en promedio un 30% en campo, podría disponerse de 3,2 t (b.s.) por ha de la poda. Es decir, en conjunto, 5,6 t (b.s.) por ha. Así la biomasa disponible correspondiente a la poda y la renovación de los cítricos (PyR) resulta alrededor de 229.208 t (b.s.) por año. Además, la cáscara de limón representa 54 kg (b.s.) por t de fruta procesada,

para una producción de 1.350.840 t de limón (Federcitrus, 2017), considerando un procesamiento industrial del 70% de la fruta producida, se obtienen 52.974 t (b.s.) por 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 (b.s.) por tonelada de caña molida. Además, el empleo de la cosecha en verde ha dado lugar a la posibilidad de disponer del residuo agrícola de la cosecha de la caña de azúcar (RAC). Este representa la parte de la caña no molible, alrededor del 20% en peso de la misma. Se estima para Tucumán una generación promedio de RAC de aproximadamente 150 kg (b.s.) por t de caña (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 (Fandos *et al.*, 2017) y un rendimiento cultural medio de 61 t por ha, resulta una molienda anual media de 13,4 t, con un bagazo de 2 Mt (b.s.) por año y un RAC potencial de 1 Mt (b.s.) por 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 punto de fusión relativamente bajo, requiere ser quemado en baja proporción en conjunto con bagazo, o en calderas especiales y aún costosas.

Todas estas biomásas presentan el inconveniente de poseer contenidos de humedad variables y relativamente altos para ser utilizadas en la gasificación. La PyR tiene 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%; el bagazo remanente del procesamiento de la caña tiene humedades de alrededor de 50%, y el RAC al momento de la cosecha, de alrededor de 50%; los residuos forestales tienen características similares a las de la PyR; y los sorgos y sus derivados, similares a las de la caña y sus derivados.

Los residuos de campo -PyR, residuos forestales, RAC, etc.- pueden dejarse en campo un tiempo para reducir su humedad por secado natural, y en pocos días pueden lograrse valores cercanos al 15% (Aso *et al.*, 2008). Con esta humedad, la biomasa no solo puede ya ser gasificada, sino que además se logra una disminución de peso y un aumento de poder calorífico, energía por unidad de masa, que impacta positivamente en el transporte y balance energético global.

Para este estudio se consideró el empleo de RAC y de PyR, por ser actualmente las principales biomásas de Tucumán sin sustancial aprovechamiento, ambas factibles de gasificar, que además eventualmente se queman a cielo abierto generando diversos inconvenientes.

Sistema de generación

Se asumió un sistema de generación de energía eléctrica genérico conformado principalmente por un generador eléctrico acoplado a un motor de combustión interna, alimentado por gases provenientes de la gasificación de biomasa con aire como agente de gasificación (Figura 1). Si bien podría emplearse un motor que funcione

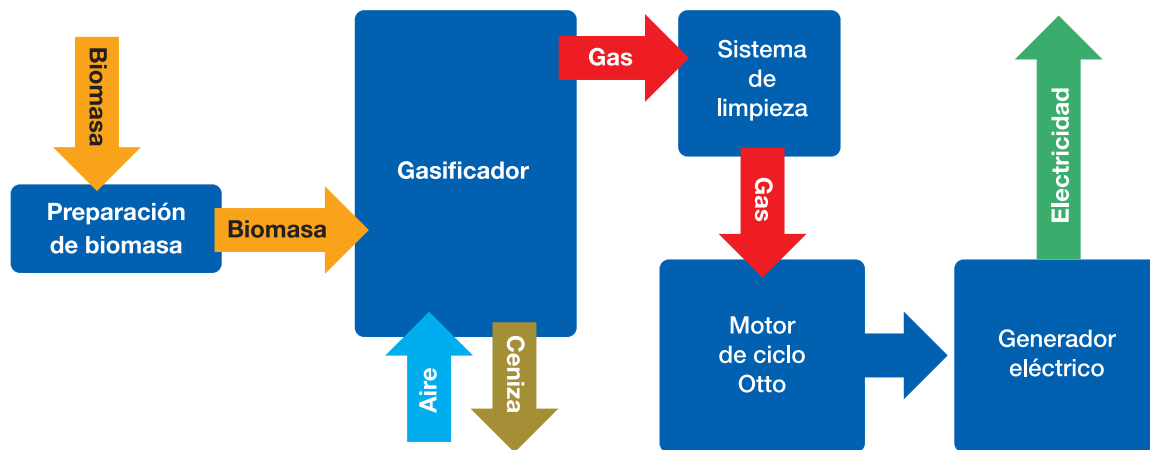


Figura 1. Sistema de generación asumido.

con el gas y soporte Diesel o Biodiesel, que logra rendimientos efectivos cercanos al 35%, se asumió un motor de ciclo Otto que funcione únicamente con el gas pobre, cuyo rendimiento efectivo varía entre 20 y 30% (Rearte et al., 2016), ya que no requiere combustible adicional. Se asume que el pretratamiento o preparación de la biomasa, el sistema de limpieza y los eventuales equipos auxiliares tienen un consumo de energía despreciable.

Energía de la biomasa

La energía de los combustibles sólidos suele determinarse experimentalmente en aparatos 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, como los gasificadores, el calor de la condensación del agua no se aprovecha, por lo que se descuenta del PCS, obteniéndose el poder calorífico inferior (PCI), que es la energía real aprovechable en los mismos. Para el cálculo del PCI se empleó la Ecuación 1 (Feijóo et al., 2015):

Ecuación 1

$$PCI = PCS \cdot (1 - w) - 2442 \times [9 \cdot H \cdot (1 - Cz) \cdot (1 - w) + w]$$

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 de combustible (b.h.)]
 2442 = calor de condensación del agua [kJ/kg] a 25°C
 H = contenido de hidrógeno en materia seca libre de ceniza (b.s.l.c.) [kg H₂/kg de combustible seco y libre de ceniza]
 Cz = contenido de ceniza en materia seca [kg de ceniza/kg de combustible (b.s.)]

En la Tabla 1 se presentan los valores de bibliografía utilizados para el cálculo del PCI.

Para el cálculo del PCI se asumió una humedad de la biomasa de 15% (b.h.).

Rendimiento de gasificación

El rendimiento de la gasificación generalmente se evalúa mediante la eficiencia de gas frío (η_f), que se define como la relación entre el flujo de energía obtenido con el PCI del gas pobre y el flujo de energía entregado con el PCI de la biomasa (Silva Lora et al., 2014; Bizzoe Sánchez, 2010) según la Ecuación (2), donde: m: caudal másico [kg/h]; B: Biomasa; G: Gas pobre.

Ecuación 2

$$\eta_f = (m_G \cdot PCI_G) / (m_B \cdot PCI_B)$$

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 la biomasa (además del tipo y diseño de reactor seleccionado, de la temperatura del reactor y de la relación masa de aire/masa de combustible, entre otros factores). Esto indica que no es posible asumir a priori un valor para la eficiencia de gas frío. Sin embargo, como puede inferirse de los párrafos anteriores, la composición de la biomasa tiene una fuerte influencia sobre la eficiencia de gas frío. 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 asumió 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). Luego se empleó el software Cycle-Tempo 5.0 (Universidad Tecnológica de Delft, 2010) para resolver los balances de

Tabla 1. Características de las biomásas.

Tratamiento	PyR	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) Díaz y Paz, 2017. 3) Feijóo et al., 2015.

materia y energía teniendo en cuenta el equilibrio termodinámico (Modelo de equilibrio ó Modelo 0-D), y así conocer la cantidad, composición y PCI del gas producido, y con ello se calculó la eficiencia según Ec. 2.

Cycle-Tempo es un simulador energético desarrollado por el Departamento de Energía de la Universidad de Delft, Holanda, para el análisis termodinámico y la optimización de sistemas para la producción de electricidad, calor y refrigeración (De Boeck *et al.*, 2011). Presenta como ventaja un esquema de programación avanzado con una amplia base de datos, que lo convierte en un programa altamente flexible y de clara estructuración que facilita la interactividad programa-usuario. Como desventaja, no es posible modificar el sistema de unidades ni cambiar puntos por comas en los resultados numéricos.

Energía eléctrica específica

Para el cálculo de la energía eléctrica específica (E_e), energía que puede obtenerse por unidad de cantidad de materia, se consideraron 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 empleó la Ecuación (3), donde: E_e [kWh/kg] y PCI_B [kJ/kg].

Ecuación 3

$$E_e = \eta_f \cdot \eta_{ef} \cdot \eta_{el} \cdot PCI_B / 3600$$

El cálculo de η_f se detalla en el apartado anterior. Para el motor y el generador eléctrico pueden asumirse rendimientos efectivo y eléctrico, respectivamente, con buena aproximación, ya que estos dependen principalmente del diseño y calidad constructiva de los equipos. Los motores de ciclo Otto poseen rendimientos efectivos (η_{ef}) entre 20 y 30% (Rearte *et al.*, 2016); y los generadores eléctricos, rendimientos eléctricos (η_{el}) de 95 a 97% (De Armas Teyra *et al.*, 2012). Se asumió 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 biomasa húmeda. Sin embargo, es conveniente expresarla en base seca para obtener la energía eléctrica específica en base seca, E_e^* [kWh/kg (b.s.)], según la Ecuación (4).

Ecuación 4

$$E_e^* = E_e / (1-w)$$

Potencial de generación de energía eléctrica

La estimación de la energía eléctrica (E) que podría obtenerse se realizó considerando la cantidad de biomasa seca (B^*) disponible, y la energía eléctrica específica mediante la Ecuación (5).

Ecuación 5

$$E = E_e^* \cdot B^*$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la Ec.1 y los valores de Tabla 1, asumiendo humedad del 15%(b.h.), resultó para PyR un PCI de 13.842 kJ/kg, y 10.495 kJ/kg para el RAC.

En las Figuras 2 y 3 se presentan los resultados de los balances obtenidos mediante simulación en Cycle Tempo; y en la Tabla 2, las características del gas pobre obtenido de la simulación.

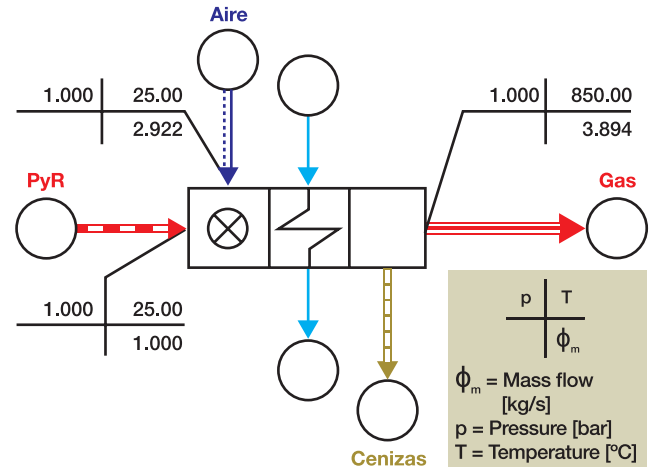


Figura 2. Balances en Cycle Tempo para gasificación de PyR (el punto indica coma decimal).

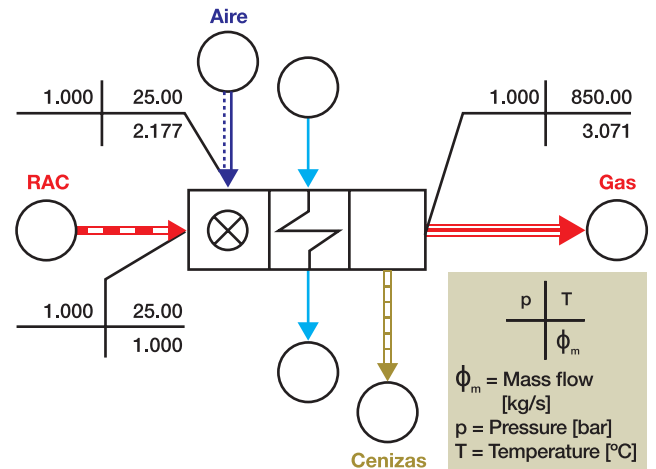


Figura 3. Balances en Cycle Tempo para gasificación de RAC (el punto indica coma decimal).

Tabla 2. 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
PCI [kJ/mol]	64,56	58,73
PCS [kJ/mol]	69,36	63,73

CONCLUSIONES

En las Figuras 2 y 3 puede observarse que por kg de biomasa, para PyR se requerirían 2,92 kg de aire y se generarían 3,894 kg de gas pobre; y para RAC se requerirían 2,18 kg de aire y se generarían 3,071 kg de gas, por lo que para igual cantidad de biomasa las instalaciones para generación de energía eléctrica mediante gasificación resultarían de menor tamaño empleando RAC que empleando PyR.

A partir de la Ecuación (2) se obtuvo una eficiencia de gas frío de 69,8% para PyR y de 66,9% para RAC. Si bien el PCI de PyR es un 32% mayor que el de RAC (13.842 vs. 10.495), con lo cual podría inferirse a priori que la combustión de PyR resultaría relativamente más conveniente que la de RAC, la eficiencia de gasificación obtenida con PyR es solo un 4,3% mayor que la obtenida con RAC (69,8 vs. 66,9).

La Tabla 3 muestra los resultados del cálculo de la energía eléctrica específica en base húmeda y seca obtenidos para cada caso mediante las Ec. 3 y 4, respectivamente.

Tabla 3. 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*	0,81	0,59

En Tabla 3 también puede observarse que por kg de biomasa se dispone de mayor energía térmica y se generará una mayor cantidad de energía eléctrica específica para PyR que para RAC.

La estimación de la energía eléctrica (E) que podría obtenerse con cada biomasa según Ec. 5 se presenta en la Tabla 4.

De Tabla 4 puede observarse que si bien la ener-

Tabla 4. Energía eléctrica potencial.

Biomasa	Cantidad	Energía específica (b.s.)	Energía eléctrica
	[t (b.s.)/año]	kWh/kg B (b.s.)	GWh/año
PyR	229.208	0,81	185,6
RAC	1.000.000	0,59	588,4

gía específica obtenida es mayor para PyR que para RAC, podría generarse mayor energía eléctrica con el RAC debido a que la cantidad disponible de este recurso es cuatro veces mayor.

Cabe destacar que la disponibilidad de estas biomasa puede variar en función de diferentes factores, principalmente la posibilidad de ser empleadas en otros usos. Además, la distribución espacial, la época del año y el tiempo en que están disponibles requieren para su aprovechamiento una planificación no menor.

Se puede concluir que empleando las principales biomasa residuales de Tucumán en sistemas de gasificadores con aire y motores de combustión interna de ciclo Otto, se podrían generar alrededor de 774 GWh por año, equivalente al 89% de la energía eléctrica consumida por la industria provincial, y a un 27% de la consumida en toda la provincia.

La tecnología de gasificación podría implementarse en forma relativamente sencilla, a diferentes escalas, en lugares con disponibilidad de biomasa adecuadas, tanto en zonas urbanas, industriales como en rurales, lo que favorece su aplicación para generación de energía eléctrica en forma descentralizada o distribuida 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 con aire y motores de combustión interna de ciclo Otto, podrían emplearse las principales biomasa residuales de Tucumán sin 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 por año de energía eléctrica de origen renovable, respectivamente; en conjunto, 774 GWh por año, equivalente al 89% de la energía eléctrica consumida por la industria provincial, y al 27% de la consumida en toda la provincia. Esto generaría un impacto social, económico y ambiental positivo, al permitir la creación de nuevas fuentes de trabajo, principalmente en zonas rurales, y daría valor agregado a biomasa que en algunos casos se queman a cielo abierto. Dicha energía, al provenir de biomasa, podría reemplazar parte de la energía generada a partir de combustibles fósiles, aumentando la participación de las energías renovables en la matriz energética, y favoreciendo al cumplimiento del objetivo fijado por Ley Nacional N° 27.191, de lograr una contribución de las fuentes de energía renovables del 20% del consumo de energía eléctrica nacional en el año 2025.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

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. Avance Agroind. 29 (1): 19-22.

Bizzo, W.A. e 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. [En línea] Disponible en <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2017.pdf> (Consultado 13 Septiembre 2020).

Casen, S.D.; E. R. Romero; J. Fernández de Ullivarri; P. Fernández González; A. Sánchez Ducca; D. Pérez; 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.

De Armas Teyra, M. A.; J.R. Gómez Sarduy y P. R. Viego Felipe. 2012. Operación eficiente de los bloques generador-transformadores en las unidades de generación distribuida. Ingeniería Energética. Versión On-line ISSN 1815-5901. Vol.33 no.3. La Habana sep.-dic. 2012.

- De Boeck, G; L. P. Garolera De Nucci; F.J. Franck Colombres; D. Paz y M. Octaviano. 2011.** Simulación de sistemas de cogeneración en la industria azucarera de Tucumán. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 88 (1): 29-36. ISSN 0370-5404.
- DEP. Dirección de estadísticas de la provincia de Tucumán. 2017.** Generación de energía eléctrica en Tucumán – Informe febrero de 2017: [En línea] Disponible en <http://estadistica.tucuman.gov.ar/>.
- 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. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 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 EEAOC 138. Junio 2017. ISSN 2346-9102.
- Federcitrus. Federación Argentina de Citrus. 2017.** Actividad Citrícola 17.
- 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. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán RIAT* 92 (2): 23-32. ISSN 0370-5404.
- García, R.; C. Pizarro; A. G. Lavín and J. L. Bueno. 2011.** Characterization of spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology* 103 (2012) 249–258.
- IEA. International Energy Agency. 2017.** [En línea] Disponible en <http://www.iea.org>.
- Rearte, M.; S. Abdelhamid; G. Martínez Pulido y M. Risso. 2016.** Introducción a la gasificación de biomasa en sistemas downdraft. Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Secretaría de Energía de la Nación. 2018.** [En línea] Disponible en <https://www.minem.gob.ar/energia-electrica/>.
- Silva Lora, E.E.; R. Vieira Andrade; C. G. Sánchez; E. Olivares Gómez e C. Vilas Bôas de Sales. 2014.** Gaseificação. En: Barbosa Cortez, L. A. ; E. E. Silva Lora & E. Olivares Gómez (Eds.). Biomassa para energia. Campinas: UNICAMP: 241-332.
- Suárez, L.; J. F. Pérez y R. Barrera. 2017.** Gasificación de madera para la obtención de un syngas útil en la producción de biocombustibles y/o productos químicos. *Rev. ion.* 201730(1): 57-71. Bucaramanga (Colombia).
- Sukumar V.; V. Manienyan 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 8(1): 196-206.
- Universidad Tecnológica de Delft, Holanda. 2010.** Cycle-Tempo 5.0. Autor y responsable de la página Teus van der Stelt (T.P:vanderStelt@tudelft.nl). [En línea] Disponible en <http://www.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=8c53f82e-a500-41f1-971b-629e832bfbef&lang=en> (Consultado 21 julio 2010).
- Wisdom. 2009.** Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Departamento Forestal, Servicios y Productos Forestales – Dendroenergía. [En línea] Disponible en https://www.minem.gob.ar/archivos/Reorganizacion/probiomasa/WISDOM_Arg_Informe_Final.pdf (Consultado 15 Julio 2019).