



Ministerio de  
Agricultura, Ganadería y Pesca  
Presidencia de la Nación

## La caña de azúcar como cultivo energético

La caña de azúcar es uno de los principales cultivos de la Provincia de Tucumán, ocupando una superficie estimada para 2013 de unas 280.000 hectáreas.

Luego de realizada la cosecha mecanizada de la caña queda en el lote el residuo agrícola de cosecha (RAC), que en la mayoría de los casos es quemado por los productores por provocar los siguientes efectos negativos:

- Dificulta el cultivo mecánico, la fertilización y el control selectivo de malezas a través del colchón de residuo.
- Demora el brotado y genera discontinuidad del mismo, produciendo una disminución del rendimiento cuando las temperaturas son bajas y/o el suelo está muy húmedo luego de cosechar.
- Incrementa las poblaciones de plagas que se refugian y multiplican debajo del RAC. <sup>[1]</sup>

Al quemar la caña se genera la pérdida del 48% del RAC, presentando una serie de inconvenientes como:

- Incremento de la necesidad de herbicidas.
- Pérdida de nutrientes del suelo y afectaciones a los microorganismos.
- Disminución de la porosidad del suelo y como consecuencia de esto menor infiltración del agua.
- Eliminación de los enemigos naturales de las plagas. <sup>[2]</sup>

Además de esto, produce contaminación ambiental por la emisión de gases como CO, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>, generando como consecuencia, efectos adversos en la salud aumentando en gran medida las afecciones del aparato respiratorio (asma, neumonía y bronquitis), problemas en la vista y daños a la vestimenta y suciedad en las ciudades cercanas.

Toda esta biomasa que es quemada podría ser aprovechada para la generación de energía como una alternativa renovable de producción de energía, diversificando así la matriz energética de la provincia y el país y reduciendo los problemas mencionados anteriormente.

Tradicionalmente los ingenios azucareros cogeneran energía a partir de la fibra de caña de azúcar (bagazo), que sustituye los combustibles fósiles como el gas y el fuel-oil. <sup>[3]</sup>

A nivel internacional, numerosos países (Brasil, Cuba, Australia, entre otros) ya vienen empleando el RAC como fuente de energía alternativa. En nuestro país el caso de mayor difusión del uso energético del RAC es el del Ingenio Ledesma y de algunos ingenios de la provincia de Tucumán.

En 2012 Ledesma reemplazó 15 millones de metros cúbicos de gas natural, lo que representa un 10% del gas que es consumido anualmente por la empresa, que apunta además a seguir creciendo en esta sustitución por biomasa. Por otra parte, gracias al aprovechamiento de la fibra, hidroelectricidad de usinas hidroeléctricas y este proyecto de biomasa, hoy el 40% de la energía que usa Ledesma es renovable. <sup>[3]</sup>

- Cada 3 toneladas de biomasa se reemplazarían 1.000 m<sup>3</sup> de gas. <sup>[3]</sup>
- 40.000 toneladas de biomasa se procesaron en el último año en Ledesma. <sup>[3]</sup>
- 10% de reducción efectiva en el consumo de energías fósiles durante 2012 en Ledesma. <sup>[3]</sup>

## **Energía a partir del RAC**

La energía producida a partir de la biomasa tiene junto con la hidráulica, un papel preponderante en muchos países. Los residuos que resultan de la actividad agrícola y forestal, constituyen un amplio porcentaje de la misma. <sup>[4]</sup>

Actualmente, los residuos constituyen un gran problema medioambiental, pero pueden tener un gran potencial energético, siempre que se solucionen sus graves dificultades (bajo potencial energético y densidad), lo que ocasiona problemas de transporte y almacenamiento. Por medio de la densificación es factible aumentar la densidad de los residuos biomásicos, lo que facilita su manejo y permite su utilización como un combustible más homogéneo, solucionando el problema de los residuos y acondicionándolos para una posible utilización energética. <sup>[4]</sup>

Los factores que limitan la combustión óptima de las materias leñosas son esencialmente físicos: la densidad aparente, la granulometría y la humedad, además de su disponibilidad. <sup>[4]</sup>

Entre las biomásas, la caña de azúcar ocupa un destacado lugar por sus altos rendimientos agrícolas. El rendimiento en materia seca de la caña de azúcar, oscila desde 27-90 ton/año dependiendo si se realiza con riego, fertilización, métodos de cosecha, cultivo, etc. <sup>[4]</sup>

## **Características del RAC**

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad de convertir la energía solar en biomasa. Si se toman en cuenta solo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacenan alrededor del equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que puede producirse. <sup>[5]</sup>

La combustión de la biomasa no incrementa la concentración atmosférica de carbono, porque solo devuelve a la atmosfera el carbono que fijo la planta durante su crecimiento. <sup>[5]</sup>

La biomasa aprovechable energéticamente son el bagazo y los RAC. El bagazo representa el 30% de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso de la molienda; se obtiene con un 50% de humedad, esto significa que por cada hectárea cosechada es posible obtener anualmente 13,5 ton de bagazo equivalentes a 2,7 tce (tonelada de combustible equivalente: 37.5 MJ/Kg). <sup>[5]</sup>

Según bibliografía, es posible recolectar en promedio 3.75 ton de RAC por hectárea de caña cosechada, que son equivalentes a 0.62 tce <sup>[5]</sup>, esto contrasta bastante con datos obtenidos de ensayo realizado por equipo del PRECOP en la Provincia de Tucumán, en donde se logró recolectar alrededor de 13000 Kg RAC/ha (24000 Kg RAC/ha de residuo inicial), dejando un porcentaje en el suelo para favorecer los procesos de mineralización de la materia orgánica, retención de humedad edáfica, evitar erosión, etc.

## **Caracterización de la biomasa como combustible**

El término biomasa, en sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. El conocimiento de su composición y propiedades es de fundamental importancia para evaluar su potencialidad como materia prima en los procesos de conversión térmica. <sup>[5]</sup>

Las características del RAC como combustible son las siguientes:

1. Composición química:<sup>[5]</sup>

Elementos químicos	RAC (%)
Carbono	48.28
Hidrógeno	5.55
Oxígeno	45.61
Cenizas	9.5
Azufre	0.13
Nitrógeno	0.43

2. Calor específico de combustión:

Si la humedad promedio de los RAC es de 25% después de transcurridos tres días de secado natural, el valor aproximado de su calor de combustión será de 11825 kJ/Kg (2824 Kcal/Kg).<sup>[5]</sup>

**Características energéticas y ambientales del uso de biomasa cañera**

La caña de azúcar es capaz de almacenar el 1,7% de la energía existente en la radiación incidente en cultivos con irrigación y en condiciones experimentales, y 1,1% en campos bien atendidos con riego. Tiene un rendimiento genético potencial que se encuentra entre 200 y 300 t/ha que compite ventajosamente con otros cultivos.<sup>[5]</sup>

El rendimiento alcanzable en la zona donde el equipo PRECOP realizó el ensayo en la Provincia de Tucumán es de alrededor de 69000 Kg/ha siendo la variedad cultivada la LCP384 (soca 1).

Para un valor calórico de 17476 MJ/Kg de materia seca, con un contenido de materia seca del 30% y un rendimiento de 100 toneladas de caña integral por hectárea, la producción energética de la caña es 20 veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla hasta el ingenio.<sup>[5]</sup>

Cuatro toneladas de paja equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja con 30% de humedad: 11,7 MJ/Kg.).<sup>[5]</sup>

**Proporción de los compuestos de los residuos de la caña en el cañaveral -**

Residuos	Proporción (%)
Hojas secas	7
Hojas verdes	8
Cogollo	7

**Hojas secas:** presenta un contenido de celulosa similar al de los tallos de caña, pero con mayor contenido de sílice. Su contenido de fibra seca esta alrededor de 90%. Su forma alargada y estrecha, con cierta resistencia a la flexión, hace que su presencia en un bulto de caña adquiera mayor volumen. Se puede reducir su tamaño con facilidad en molinos de martillo. [2]

**Hojas verdes:** su contenido de fibra seca esta alrededor de 35% y el contenido de sus jugos tiende a parecerse al del cogollo. Tiene las características morfológicas de las hojas secas. [2]

**Cogollo:** tiene una longitud que puede variar entre los 10 y los 30 cm con una constitución física similar al tallo de caña, pero su jugo es rico en no azúcares y pobre en sacarosa. [2]

**Características de los RAC: datos físicos**

Parámetros	Valores
Densidad a granel (Kg/m3) a 40-55% de humedad	25-40
Densidad picado (Kg/m3) a 40% humedad	80
Densidad empacado (Kg/m3) a 30% de humedad	170-225
Briqueta mediana densidad a 25 % humedad	400
Briqueta alta densidad a 25 % humedad	1200

El poder calorífico de maloja de caña de azúcar con 15% de humedad es de 3100 Kcal/Kg. [6]

El PC superior es (según mediciones en la EEAOC) de 3500-3600 Kcal/Kg MS. Y el PC inferior varía entre 2300-2400 Kcal/Kg MS (con 15% de humedad y entre un 10 y 11% de cenizas).

**Características deseables del material picado para ser utilizado como combustible**

Algunas consideraciones que se deben tener en cuenta son:

- Los RAC son más fáciles de manejar cuando no están verdes porque se vuelven frágiles. La humedad de los mismos varía considerablemente según el tiempo que pasa después de cosechada la caña; se debe procurar procesar RAC con humedades inferiores al 50%. [7]
- La granulometría del RAC no es constante pero según estudios realizados por Cenicaña sobre la superficie específica<sup>1</sup>, el valor con el que conviene que salgan picados los RAC debe estar por debajo de los 3000 mm<sup>2</sup>/gr. [7]

**Usos del RAC**

Existen en la actualidad diversos usos alternativos a la quema a campo abierto que se le pueden dar a estos residuos agrícolas de cosecha (RAC), entre ellos se encuentran algunos que se emplean a gran

<sup>1</sup> **Superficie específica:** relación entre el área superficial total y la masa del sólido.

escala y donde la inversión por lo tanto es mayor, y otros de menor escala con menores inversiones para uso doméstico o en pequeñas producciones.

Entre los usos estudiados hasta el momento y los que aun se están evaluando se encuentran los siguientes:

- Hidrólisis, para la producción de etanol lignocelulósico (2G).
- Pirolisis.
- Gasificación, para generación de energía eléctrica y diversos productos químicos.
- Combustión, para generación de energía eléctrica o calor.

**Etanol lignocelulósico (2G)**

La tecnología de conversión de biomasa lignocelulósica en azúcares fermentecibles para la producción de etanol viene siendo considerada como una alternativa promisoría para atender la demanda mundial de combustibles. A pesar de que ya existen tecnologías para el procesamiento de la celulosa, la mayoría tienen alguna dificultad técnica o económica. Si bien, en general se da esta situación, en algunos países como Estados Unidos existen empresas que ya se encuentran instalando plantas de producción de etanol a partir de residuos de cosecha de maíz y planifican procesar alrededor de 600000 mega fardos de los mismos al año.

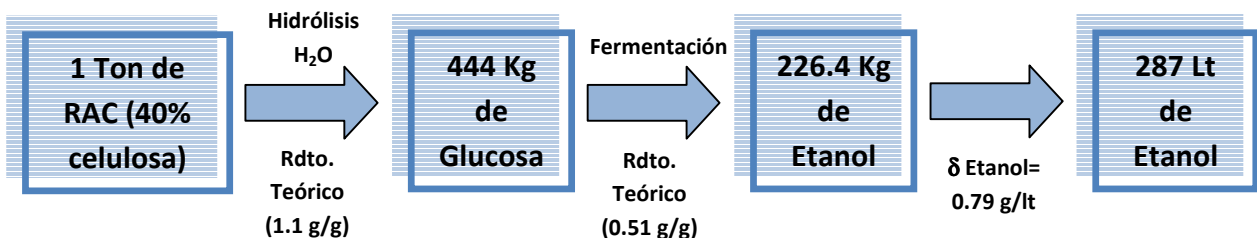
Una de las principales dificultades de la producción de etanol celulósico es desarmar la pared celular liberando los polisacáridos como fuente de azúcar fermentecibles de forma eficiente y económicamente viable. Los azúcares presentes en la maloja de caña se encuentran en forma de polímeros (celulosa y hemicelulosa) y están recubiertos por una macromolécula (lignina) formando la micro fibrilla celulósica. Debido a su interacción molecular y ausencia de agua en la estructura de la micro fibrilla, la celulosa presenta una estructura bastante recalcitrante difícil de ser descompuesta en monosacáridos fermentecibles. [8]

La composición química de la biomasa lignocelulósica de caña de azúcar generalmente contiene 40-44% de celulosa, 30-32% de hemicelulosa, 22-25% de lignina y una pequeña cantidad de cenizas. [8]

Comparada con la celulosa, la hemicelulosa (debido a su carácter de estructura amorfa) presenta una mayor susceptibilidad a la hidrólisis ácida al ofrecer una mayor accesibilidad a los ácidos minerales comúnmente utilizados como catalizadores. [8]

La lignina no presenta una estructura homogénea sino que posee regiones amorfas y estructuras globulares. La composición y organización de los componentes de la lignina varían de una especie a otra dependiendo de la matriz de celulosa y hemicelulosa. Esta actúa como una barrera física para las enzimas pudiendo capturarlas y haciendo necesario una mayor cantidad de las mismas y dificultando su posterior recuperación. [8]

La utilización de este residuo permitirá el aumento de la producción de etanol por hectárea de caña de azúcar sin necesidad de incrementar la superficie cultivada y sin afectar la sustentabilidad del sistema. [8]



**1- Potencial de producción de etanol por tonelada de RAC de caña de azúcar. [8]**

Tomando en cuenta los datos mencionados anteriormente y los rendimientos de caña de azúcar en nuestro país, se puede estimar que partiendo de una recolección de RAC de

alrededor de 13 ton/ha como ocurrió en el ensayo realizado en Tucumán, se podrían obtener unos 3730 lt/ha de etanol superando a la producción de etanol a partir de maíz en un 43% si tomamos un rendimiento promedio a nivel país de los últimos 10 años de 65 qq/ha<sup>2</sup> y 400 lt/ton en proceso de molienda seca (2600 lt/ha).

La reactividad de la celulosa es determinada tanto por los grupos funcionales presentes en su estructura, como por las interacciones físico-químicas existentes entre las moléculas. <sup>[8]</sup>

Teniendo en cuenta las características de la materia prima mencionadas anteriormente, la producción de etanol lignocelulósico requiere de las siguientes etapas: pre tratamiento, hidrólisis y fermentación.

El pre tratamiento tiene por finalidad alterar o remover la lignina y la hemicelulosa, aumentar el área superficial y reducir el grado de polimerización y cristalinidad de la celulosa, lo que lleva a un aumento de la digestibilidad del complejo enzimático y como consecuencia de esto un aumento de los rendimientos de azúcares. <sup>[8]</sup>

Estas características mencionadas son consideradas factores que interfieren en la eficiencia de la hidrólisis. <sup>[8]</sup>

Los pre-tratamientos pueden ser clasificados en físicos, químicos, biológicos o una combinación de algunos de ellos. <sup>[8]</sup>

Dentro de estos, los pre-tratamientos químicos y los combinados han recibido un mayor estudio ya que remueven la lignina sin degradar la cadena celulósica. <sup>[8]</sup>

Las características deseables de un pre tratamiento son: debe permitir una elevada recuperación de los carbohidratos, una elevada digestibilidad de la celulosa y la hidrólisis enzimática posterior, resultar en una elevada concentración de sólidos, además de una elevada concentración de azúcares libres en la fracción líquida, requerir una baja demanda energética, evitar la formación de subproductos, requerir de baja inversión y costo operacional. <sup>[8]</sup>

---

<sup>2</sup> Fuente: MAGyP.



Pre tratamiento	Componente			Ventajas	Desventajas	
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina			
Físico	Molino de bolas	Intensiva reducción del grado de cristalinidad	No remueve	No remueve	Reducción de cristalinidad, no requiere adición de químicos, no genera inhibidores	Elevado consumo energético
	Microondas	Cambia la estructura	Degradación	Degradación	Cortos tiempos de reacción, calentamiento homogéneo de la mezcla, mínima generación de inhibidores y bajo costo energético	---
Químico	Acido diluido	Poca despolimerización	80-100 % de remoción	Poca remoción y cambio de estructura	Alta producción de xilosa	Difícil recuperación del acido, corrosivo y relativamente costoso
	Hidróxido de sodio	Hinchazón significativa	Considerable solubilidad	Considerable solubilización >50%	Remoción efectiva de esteres	Reactivo caro, recuperación alcalina
	ARP	<5% de despolimerización	50% de solubilización	70% de solubilización	Efectiva deslignificación	Recuperación alcalina, relativamente caro
	Hidróxido de calcio	Poca despolimerización	Significativa solubilización	Solubilización parcial (40%)	Efectiva remoción de lignina y acetil, bajo costo	Menor efectividad debido a la baja solubilidad de la cal
	ozonólisis	No se observo despolimerización	Pequeña solubilización	Solubilización superior a 70%	Efectiva deslignificación en condiciones suaves	Caro, necesidad de mas ozono
	Organosolv	Hinchazón considerable	Significativo, casi completo	Significativo, puede ser casi completa	Alta producción de xilosa, deslignificación efectiva	Recuperación de solvente cara
Biológico	Biológico	20-30% de despolimerización	Solubilización superior a 80%	40% de deslignificación	Bajo requerimiento de energía, deslignificación efectiva	Perdida de celulosa, baja tasa de hidrólisis
Combinado	Explosión de vapor	Poca despolimerización	80-100% de remoción	Poca remoción y cambio de estructura	Eficiente energéticamente, ningún costo de reciclaje	Degradación del xilano como producto inhibitorio
	AFEX	Disminución del grado de cristalinidad	Solubilización superior a 60%	10-20% de solubilización	No se forman inhibidores, corto tiempo del proceso, retención de carbohidratos en el sustrato	Recuperación de amonio, no es efectivo para alta concentración de lignina
	Explosión de CO2	---	---	---	Mayor rendimiento que explosión de vapor, no genera inhibidores	Elevadas complicaciones de operación y procesos

**2- Efecto de los distintos pre tratamientos sobre los distintos componentes- ventajas y desventajas** <sup>[8] y [9]</sup>



### **Hidrólisis enzimática de la fracción celulósica** <sup>[9]</sup>

Este proceso requiere 3 clases de enzimas celulolíticas:

- **endo  $\beta$  1-4 gluconasas** que atacan zonas de baja cristalinidad de la fibra de celulosa creando terminales de cadena libres;
- **celobio hidrolasas o exogluconasa** que degrada la molécula removiendo las unidades de celobiosa de los extremos de cadena libres y,
- **$\beta$  glucosidasas** que hidrolizan la celobiosa para producir glucosa.

Para romper la hemicelulosa se requieren varias enzimas: xilanosa, b xiloxidasa, glucoronidasa, acetilesterasa, galactomanasa y glucomanasa.

Tanto los hongos como las bacterias pueden producir celulasas para la hidrólisis de los materiales celulósicos. <sup>[9]</sup>-

### **Destoxificación de los hidrolizados hemicelulosicos**

La principal preocupación en el pre tratamiento es la de minimizar, tanto la degradación de los azúcares, como la formación de compuestos inhibidores del metabolismo microbiano, limitar el consumo de químicos, energía y agua y la producción de residuos. <sup>[9]</sup>-

Los compuestos inhibidores se pueden dividir en 4 grupos:

- Sustancias que son liberadas por la estructura hemicelulosica como el acido acético
- Compuestos fenólicos y otros compuestos aromáticos derivados de la degradación parcial de la lignina. <sup>[9]</sup>
- Derivados del furano, furfural y 5-hidroximetilfurfural producto de la degradación de las pentosas y hexosas respectivamente. <sup>[9]</sup>
- Metales como el cromo, cobre, hierro y níquel provenientes del equipamiento <sup>[9]</sup>

Estos compuestos afectan tanto individual como sinérgicamente la fisiología de los microorganismos fermentadores, por lo tanto, es necesario eliminar o reducir estos compuestos para obtener rendimientos satisfactorios de la fermentación microbiana de los hidrolizados lignocelulosicos. <sup>[9]</sup>

**Algunos de los métodos empleados son los siguientes: -**

Clasificación	Tratamiento	Descripción
Físico	Evaporación	Reduce la concentración de compuestos volátiles, incluyendo al ácido acético, furfural y vanilina. Tiene la desventaja que incrementa los compuestos tóxicos no volátiles. <sup>[9]</sup>
	Uso de membranas	Previenen el contacto entre la fase acuosa (hidrolizado) y la fase orgánica (solvente) que es tóxico para los microorganismos. Las membranas tienen grupos funcionales superficiales fijados a sus poros internos que pueden eliminar inhibidores metabólicos como el ácido acético, 5-hidroximetilfurfural, furfural, fórmico, levulinico y ácido sulfúrico. <sup>[9]</sup>
Fisicoquímico	Resinas de intercambio iónico	Es el método más eficiente de detoxificación. Remueve los inhibidores derivados de la lignina, ácido acético y furfural del hidrolizado mejorando significativamente el rendimiento de la fermentación. Pueden ser reutilizadas. Entre las desventajas se encuentran el largo tiempo de procesamiento, posible degradación de moléculas biológicas frágiles, difícil de aumentar la escala y conlleva a una pérdida significativa de azúcares fermentecibles luego del proceso. <sup>[9]</sup>
	Neutralización	Es necesaria para llevar el hidrolizado a condiciones adecuadas para la fermentación. Los fenólicos y furfural son removidos por precipitación. Se emplea hidróxido de sodio y calcio. La adición de hidróxido de calcio produce sulfato de calcio que debe ser removido por centrifugado. <sup>[9]</sup>
	Overliming	Es el método más utilizado. Consiste en incrementar el pH del hidrolizado ácido seguido de una reducción hasta el pH deseado para la fermentación. El principio de este proceso es la precipitación de componentes tóxicos y la inestabilidad de algunos inhibidores a pH altos. <sup>[9]</sup>
	Carbón activado	Es un método de bajo costo y eficiente para la remoción de compuestos inhibidores. Este método remueve mayormente compuestos fenólicos y no provoca grandes cambios en los niveles de azúcares fermentecibles. <sup>[9]</sup>
	Extracción con solventes orgánicos	Debido a la alta disponibilidad de inhibidores como el ácido acético, furfural, vanilina, ácido 4-hidroxibenzoico, y fenoles de bajo peso molecular, la extracción por solventes ha sido considerada un método eficiente de detoxificación. Los solventes más comúnmente usados son el etilacetato, cloroformo y tricloroetileno. <sup>[9]</sup>
Biológico	Biológico	Utiliza enzimas específicas o microorganismos que actúan sobre los compuestos inhibidores presentes en el hidrolizado y los modifican. La ventaja es que genera pocos residuos y puede ser realizado directamente en el tanque de fermentación antes de la misma. Este método es más factible, amigable ambientalmente, con pocas reacciones secundarias y bajos requerimientos energéticos; sin embargo el proceso lleva bastante tiempo. <sup>[9]</sup>

## **Fermentación de azúcares de biomasa de caña de azúcar en etanol -**

### **Bioconversión de hexosas en etanol**

Es un proceso biológico en donde los azúcares son convertidos por microorganismos en alcohol y CO<sub>2</sub>. Los microorganismos comúnmente utilizados para este proceso son las levaduras y entre ellas la más usada es *Sacharomices Cerevisiae*. Esta levadura puede crecer tanto a partir de azúcares simples como la glucosa, como también sobre sacarosa. *S. cerevisiae* tiene una alta resistencia al etanol, consume cantidades significativas de sustrato en condiciones adversas y muestra una alta resistencia a los inhibidores presentes en el medio.<sup>[9]</sup>

Existen tres tipos de procesos para producir etanol celulósico:

1. **Hidrólisis y fermentación separadas o secuenciales:** el sustrato es pre tratado e hidrolizado enzimáticamente aparte para recuperar los azúcares. La solución de azúcares es luego fermentada a etanol por medio de microorganismos.<sup>[9]</sup>
2. **Fermentación y sacarificación simultáneas y 3. Cofermentación y sacarificación simultáneas:** en ambos casos la hidrólisis enzimática y la fermentación ocurren simultáneamente acortando los tiempos del proceso. En el primero de ellos, la glucosa es fermentada separado de las pentosas en un reactor separado mientras que en el segundo caso, la fermentación de la glucosa y xilosa ocurren de manera conjunta.<sup>[9]</sup>

### **Bioconversión de pentosas en etanol**

La utilización máxima de todos los azúcares es esencial para obtener una tecnología de producción de etanol económica y viable.

Para obtener los rendimientos de alcohol deseable es esencial que la fracción hemicelulósica sea fermentada con las mismas tasas de conversión que la fracción celulósica.

El hidrolizado de hemicelulosa contiene principalmente pentosas (xilosa y arabinosa) y algunas hexosas (manosa, glucosa y galactosa).<sup>[9]</sup>

### **Destilación del etanol**

El medio final está compuesto por agua y etanol, los cuales no pueden ser separados por los procesos de destilación convencionales porque forman una mezcla no ideal. La deshidratación es un método sofisticado porque forma una mezcla azeotrópica con el agua, la cual imposibilita separarlos en una columna de destilación simple. La purificación del etanol se lleva a cabo en tres etapas: destilación, rectificación y deshidratación. En los primeros dos pasos se obtiene una solución con alta concentración de etanol, luego la mezcla es deshidratada para obtener alcohol anhidro mediante un método de deshidratación.<sup>[9]</sup>

### **Pirolisis**

La pirolisis consiste en un calentamiento severo de la biomasa en ausencia de aire. La etapa previa antes de comenzar con el proceso, comprende la limpieza de los RAC y el picado del mismo, con el objetivo de reducir el contenido de humedad por debajo del 10% y disminuir el tamaño de partícula a niveles admisibles por el pirolizador.<sup>[10]</sup>

La pirolisis consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante (O<sub>2</sub>); es un proceso térmico de conversión en el que se utiliza un material con alto contenido de carbono para producir compuestos más densos y con mayor poder calorífico, que pueden ser empleados como combustibles directamente o luego de un tratamiento posterior. Los productos de la pirolisis son gases, líquidos y un residuo carbonoso, cuyas cantidades relativas dependen de las propiedades de la biomasa a tratar y de los parámetros de operación del equipo. En los últimos años la pirolisis se viene utilizando para la obtención de combustibles líquidos y productos químicos a partir del carbón y residuos orgánicos.<sup>[10]</sup>

Una técnica para generar biocombustibles líquidos consiste en realizar una pirolisis rápida de biomasa, con la cual se producen bio aceites, que luego de etapas posteriores de refinado, pueden generar compuestos con propiedades similares a las de los combustibles fósiles, tales como el diesel o la gasolina.<sup>[10]</sup>-

La tecnología de pirolisis se clasifica de acuerdo con el tiempo de residencia de la biomasa, la temperatura máxima y el producto principal.<sup>[10]</sup>-

Tecnología	Tiempo de residencia	Temperatura máxima (°C)	Producto principal
Carbonización	Horas-días	300-500	Carbón vegetal
Lenta	5-30 min	400-600	Bio-oleo, carbón, gas
Rápida	<5s	450-600	Carbón, gas
Rápida	<5s	700-900	Carbón, gas

1- Tipos de pirólisis<sup>[10]</sup>

### **Productos de la pirolisis**

El bioaceite como combustible tiene numerosas ventajas competitivas sobre los combustibles provenientes de la industria petrolera, tales como: bajas emisiones de oxido de nitrógeno, emisiones nulas de oxido de azufre, mayor densidad permitiendo transporte de mayor cantidad en una misma unidad de volumen.<sup>[10]</sup>-

Además, puede ser empleado como sustituto para diesel, aceite pesado, aceite liviano, gas natural en diferentes equipos y en la industria.<sup>[10]</sup>-

### **Briquetas de RAC para uso doméstico o pequeñas producciones**

El RAC se quema mediante una combustión incompleta (pirolisis) obteniendo como resultado carbonilla y gases que son liberados a la atmósfera.<sup>[11]</sup>

Con ese material se realiza una pasta junto con un aglutinante (miel de caña al 2,5%, harina de trigo, almidón de maíz o de mandioca al 10%) y con esta se fabrican las briquetas.<sup>[11]</sup>

Estas briquetas son ligeramente más livianas que el carbón de leña. El poder calorífico de las mismas varía entre 4400 kCal/Kg y 5200 kCal/Kg dependiendo del aglutinante utilizado. Los usos que se pueden dar a las briquetas son los mismos que para el carbón de leña.<sup>[11]</sup>

### **Gasificación**

La gasificación de la biomasa es un conjunto de reacciones termoquímicas, que se produce en un ambiente pobre en oxígeno (combustión incompleta) a altas temperaturas (600-1500 °C), y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases posibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras su debido acondicionamiento.

En este proceso, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrogeno. A esa mezcla de gases se la denomina gas de síntesis o syngas y tiene un poder calorífico inferior equivalente a la sexta parte del PCI del gas natural (de 1000 a 1100 Kcal/m<sup>3</sup>)<sup>[12]</sup>, cuando se emplea aire como agente gasificante.<sup>[13]</sup>

El agente gasificante es un gas, o mezcla de ellos, que aporta calor para iniciar la reacciones, y oxígeno.<sup>[13]</sup>

La gasificación puede aplicarse para sintetizar combustibles líquidos de alta calidad (proceso Fischer-Tropsch)<sup>3</sup>.<sup>[13]</sup>

<sup>3</sup> Es un proceso químico para la producción de hidrocarburos líquidos (gasolina, keroseno, gasoil y lubricantes) a partir de gas de síntesis (CO y H<sub>2</sub>). El producto obtenido a la salida de un reactor de Fischer-Tropsch consiste en una mezcla de hidrocarburos con una distribución muy amplia de pesos moleculares, que van desde los gases hasta las ceras pasando por la gasolina, el kerosén y el gasoil.

El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80% (según bibliografía), aunque en la planta piloto que se está construyendo en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC Tucumán) se habla de rendimientos térmicos cercanos al 89%. El resto de la energía introducida en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento del syngas, necesario para su secado y filtración, y en el lavado (cuando es necesario eliminar los alquitranes).<sup>[13]</sup>

Entre los factores que intervienen en la gasificación de un tipo específico de biomasa se pueden citar los siguientes:<sup>[14]</sup>

- **Temperatura:** el aumento de la temperatura favorece la producción de H<sub>2</sub> y CO, en detrimento de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O.<sup>[14]</sup>
- **Presión:** el aumento de la misma va en contra de las reacciones de gasificación, aumentando los alquitranes y los hidrocarburos. Los gasificadores de lecho móvil trabajan a presión atmosférica mientras que los de lecho fluidizado lo hacen con presiones que pueden alcanzar los 30 bares.<sup>[14]</sup>
- **Relación agente gasificante/biomasa:** la relación óptima aire/biomasa se sitúa alrededor de 1,5 y para lecho fluidizado entre 0.5 y 1.6.<sup>[14]</sup>
- **Composición química:** está directamente relacionada con los gases producidos.
- **Poder calorífico:** depende del punto anterior.<sup>[14]</sup>
- **Tamaño de partícula:** influye en el tiempo de calentamiento y en la difusión de los reactivos hacia y desde la partícula. Los tamaños adecuados para lecho móvil en contracorriente son de unos mm a 15 cm; para el de lecho móvil en corriente paralela de 3 a 10 cm y para el de lecho fluidizado de unos mm a 4 cm.<sup>[14]</sup>
- **Densidad, forma y dureza de las partículas:** afecta el movimiento de las partículas en el lecho y sobre la formación de bóvedas y canales preferenciales.<sup>[14]</sup>
- **Humedad:** para gasificadores de lecho móvil son convenientes humedades entre el 10-20% y para los de lecho fluidizado hasta el 40%.<sup>[14]</sup>
- **Características propias del gasificador.**<sup>[14]</sup>

La gasificación permite obtener altos rendimientos eléctricos a partir de biomasa.

Según el tipo de gasificador existen dos tipos de tecnologías utilizadas:

- **La de lecho móvil (fijo):** se divide en downdraft, cuando las corrientes de la biomasa y del agente gasificante son paralelas; y updraft cuando las corrientes mencionadas circulan en sentido opuesto o contracorriente.  
 En el gasificador updraft las partículas que entran por la parte superior se encuentran con los gases calientes que salen y producen su calentamiento rápido e inicio de su pirolisis. En su progresión hacia abajo se encuentran con gases reactivos y con oxígeno que producen las reacciones de oxidación y reducción y generan gases que salen al exterior también calientes.<sup>[14]</sup>  
 En el caso del downdraft, las partículas sufren el secado y la pirolisis de forma gradual en la fase inicial, para pasar luego a una zona de oxidación que recibe directamente el aire (agente gasificante) y, por último la zona de reducción, donde se producen los gases.<sup>[14]</sup>
- **La de lecho fluidizado:** el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible, hasta que las partículas de este se gasifican y convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del syngas. Estos pueden ser de régimen circulante o burbujeante.<sup>[14]</sup>

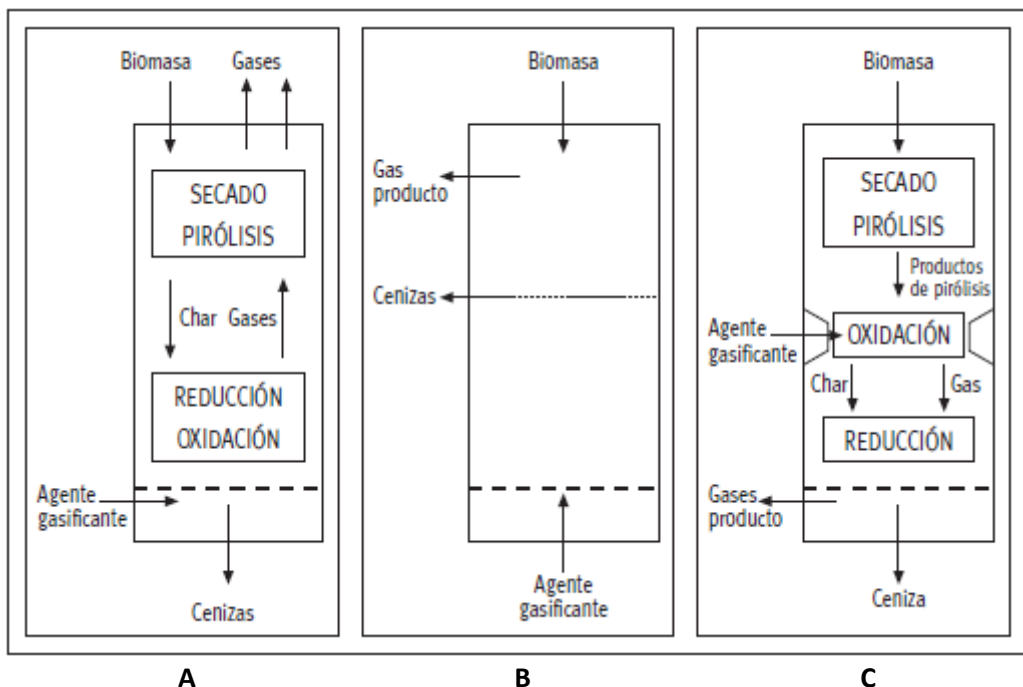
	<b>Lecho móvil</b>		<b>Lecho fluidizado</b>
	<b>Downdraft</b>	<b>Updraft</b>	

<b>Ventajas</b>	Bajo contenido de alquitranes en el gas, sistema de limpieza sencillo, alta conversión de la biomasa a gas.	Gas con mayor PCI y adecuado para combustión directa, buena capacidad de escalado.	Flexibilidad en cuanto a material de carga, fácil control de la temperatura.
<b>Desventajas</b>	Humedad de la biomasa limitada, cargas parciales, potencia eléctrica máxima 700-1000 Kw-elect.	Alto contenido de alquitranes, sistema de limpieza de mayor complejidad.	Combustión incompleta del carbono, alto contenido de alquitranes del gas, mala respuesta a los cambios de carga.

**2- Ventajas y desventajas de los distintos tipos de gasificadores**

En el proceso, la biomasa pasa por varias etapas:

1. **Calentamiento hasta los 100°C**, que provoca el secado de la misma por evaporación del agua que contiene, y que absorbe el calor sensible para elevar la temperatura, además del necesario para evaporar el agua. <sup>[14]</sup>
2. **Pirólisis**, en esta etapa también se absorbe calor; y se rompen las moléculas grandes generando otras de cadena corta que, a la temperatura del reactor, están en fase gaseosa. <sup>[14]</sup>
3. En los reactores updraft, esta etapa se denomina **reducción**, por combinación del vapor de agua producido en la primer etapa, con el dióxido de carbono que viene arrastrado por la corriente del gasificante, desde la cuarta etapa (oxidación) <sup>[14]</sup>
4. **Oxidación** de la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante. <sup>[14]</sup>



**3-Esquema de funcionamiento de gasificadores A- de lecho móvil (updraft), B- lecho fluidizado y C- lecho móvil (downdraft). <sup>[15]</sup>**

**Elementos principales de la gasificación**

**Agentes gasificantes**

Según el tipo de agente gasificante que se emplee, se producen efectos distintos en la gasificación y el syngas logrado varía en su composición y poder calorífico. <sup>[15]</sup> -

Los productos según tipo de gasificante empleado son:

- **Con oxígeno (O<sub>2</sub>):** Se forma CO <sup>[16]</sup>
- **Con aire:** Se forma CO + N<sub>2</sub> (es el sistema más utilizado) <sup>[12]</sup>
- **Con oxígeno (O<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O):** Se forma CO + H<sub>2</sub> (Sistema más adecuado para producir metanol o gasolina sintética). <sup>[16]</sup>
- **Con aire y agua (H<sub>2</sub>O):** Se forma CO + H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> (simultánea) <sup>[16]</sup>
- **Con aire y agua (H<sub>2</sub>O):** Se forma CO + N<sub>2</sub> y, separadamente CO + H<sub>2</sub> (sucesiva) <sup>[16]</sup>
- **A presión y con catalizadores:** Se forma CH<sub>4</sub>. <sup>[15]</sup>

### **Biomasa**

El tamaño del material utilizado debe ser homogéneo y lo suficientemente pequeño para que las reacciones se produzcan a una velocidad adecuada. Un tamaño de partícula pequeño permite aumentar la calidad del syngas, reducir el tamaño del reactor o bien aumentar el tiempo de permanencia para el craqueo de las fracciones más pesadas y condensables (alquitranes). <sup>[17]</sup>

Si el tamaño es excesivamente pequeño, la biomasa se puede atascar en los conductos o ser arrastrada junto con las cenizas volantes al exterior del reactor antes de tiempo. Cada gasificador precisa de un determinado tamaño de partícula que, en general, no debe ser inferior a 2-3 mm de diámetro. <sup>[17]</sup>

### **Composición de la biomasa para gasificación**

- Humedad entre 10 y 15% (90% MS). Si está más seca que su punto de equilibrio tiende a recuperar humedad al contacto con el aire ambiente. <sup>[17]</sup>
- La humedad facilita la formación de hidrogeno pero reduce la eficiencia térmica. <sup>[17]</sup>
- La cantidad de cenizas debe ser lo más reducida posible. Las cenizas absorben calor, ensucian filtros, erosionan los conductos, etc. <sup>[17]</sup>

### **Elección del equipo**

La elección del equipo a utilizar se debe realizar teniendo en cuenta tres aspectos esenciales:

- Tipo y cantidad de biomasa de la que se dispone
- Qué necesidades energéticas se pretende cubrir
- Grupo de factores varios (medioambientales y económicos). <sup>[17]</sup>

El uso que se le puede dar al syngas es la combustión directa para la producción de calor o el empleo en motores o turbinas para la generación de electricidad. En el primer caso no suele ser necesaria una limpieza excesiva del gas, pero para el segundo caso si tiene más importancia siendo más exigentes las turbinas que los motores. Los límites aceptables de contenido en partículas y alquitran para la utilización del gas en motores están en 50mg/m<sup>3</sup>, y para turbinas, en 20 y 10 mg/m<sup>3</sup> respectivamente. <sup>[14]</sup>

Tipo de gasificador	Partículas en suspensión mg/m <sup>3</sup>	Alquitranes mg/m <sup>3</sup>
Lecho móvil contracorriente	100-1000	10000-100000
Lecho móvil corriente paralela	100-6000	40-300
Lecho fluidizado	10000-100000	2000-10000

### **3- Contenido normal de partículas y alquitranes de los gases producidos en los 3 sistemas de gasificación. <sup>[14]</sup>**

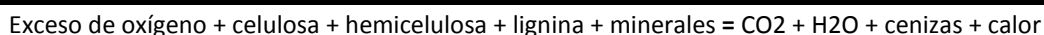
Los posibles usos finales son la producción eléctrica o la producción de calor, o ambas de forma combinada.

A su vez hay que tener en cuenta los siguientes factores:

1. Un motor de combustión interna alternativo distribuye de la siguiente manera la energía que consume:
  - 33-38% electricidad.
  - 35-40% calor a través del agua de refrigeración a 90°C.
  - 18-22% calor a través de los gases de combustión.
  - 5-8% pérdidas. <sup>[17]</sup>
  
2. Para utilizar el syngas en motores de combustión interna es necesario eliminar su contenido de alquitrán. <sup>[17]</sup>

### **Combustión** <sup>[14]</sup>

La combustión es el proceso de conversión en el cual se produce la oxidación completa del combustible. La combustión directa de la biomasa es el sistema más elemental y, por supuesto, más antiguo de recuperación energética de la misma. La combustión de la biomasa puede caracterizarse por la siguiente reacción química:



Para que se produzca la combustión de un biocombustible es necesario que este alcance una determinada temperatura que provoca los siguientes fenómenos:

- Desecación de la biomasa y eliminación del agua en forma de vapor
- Gasificación de los compuestos volátiles contenidos en la biomasa y descomposición inicial de las materias celulósicas, proceso que suele ocurrir a partir de 200-250 °C. Algunos de los gases que se desprenden son combustibles, como CO, H<sub>2</sub>, ácido acético, un poco de metano y algunos hidrocarburos, pero otros son inertes, como el vapor de agua o el anhídrido carbónico. <sup>[14]</sup>
- Inflamación de los compuestos volátiles desprendidos inicialmente, a partir de 300-500 °C, lo que provoca un aumento en la gasificación de la biomasa y su inflamación simultánea. <sup>[14]</sup>
- Carbonización de la biomasa, que ocurre a temperaturas elevadas, cuando los principales procesos de gasificación han concluido. En estas condiciones se produce la incandescencia del carbón, que ocurre prácticamente son llama. Al final de una combustión completa del carbón solo quedan las cenizas con elementos minerales, principalmente en estado de óxidos. <sup>[14]</sup>

La energía obtenida en forma de calor (producto primario del proceso) se utiliza en calderas para la producción de vapor y como calor de proceso en una multitud de aplicaciones, como son para uso doméstico o industrial, calefacción, etc.

### **Sistemas de combustión (hornos)** <sup>[14]</sup>

Un horno es básicamente un espacio recubierto de un material aislante en el que se introduce el combustible y el comburente para producir la combustión, obteniendo como producto humos calientes a una determinada temperatura y residuos (cenizas).

La calidad de un proceso de combustión de biomasa se puede caracterizar por la relación CO/CO<sub>2</sub> en los humos o por el contenido de CO en los mismos. Una buena combustión tiene una relación CO/CO<sub>2</sub> <0.07 y un contenido de CO que varía entre un 0,15% y un 0,85%.

Existen dos flujos de aire en los hornos, denominados primario y secundario.



En la mayoría de los equipos modernos de combustión, el combustible se sitúa sobre una parrilla a través de la cual caen las cenizas, y las entradas de aire primario y secundario están separadas. Según la disposición relativa de las entradas de aire primario y secundario se pueden dar tres tipos de sistemas: de combustión ascendente, de combustión horizontal y de combustión inversa.

#### **Calderas y recuperadores de calor** <sup>[14]</sup>

En las calderas se absorbe parte del calor de los gases de combustión y se transfiere al agua, que pasa al estado de vapor y aumenta su entalpía a una presión determinada. El vapor separado de la fase acuosa se hace fluir por los tubos sobrecalentadores donde aumenta su temperatura hasta los límites deseados.

Las calderas pueden estar integradas en el horno o separadas de él. En el primer caso pueden formar parte de las paredes (paredes de agua) o de la propia parrilla (parrilla refrigerada) y reciben el calor directamente de la cámara de combustión.

#### **Generación de electricidad y cogeneración con turbina de vapor** <sup>[14]</sup>

El vapor generado en las calderas puede ser utilizado como fuente de calor para la industria, para la generación de electricidad a través de un turbogruppo o ambos usos en conjunto (cogeneración).

El turbogruppo consiste en una turbina que va unida a por un rotor a un alternador que, al girar, produce energía eléctrica. La turbina gira accionada por la expansión del vapor procedente de la caldera, el cual, tras ceder parte de su energía a la turbina, se condensa y se vuelve a introducir en la caldera, funcionando prácticamente en circuito cerrado.

En la condensación del vapor se pierde una parte importante de la energía que llevaba el vapor inicial, lo que condiciona el rendimiento general del sistema. En las plantas dedicadas exclusivamente a generación de electricidad, la refrigeración del vapor para su condensación se efectúa mediante intercambiadores de calor en los que la refrigeración se consigue con aire, agua corriente o un sistema agua-vapor.

Existen dos grupos principales de turbinas: las que trabajan a contrapresión, cuyo vapor de salida tiene todavía una cierta entalpía y puede ser utilizado en procesos que necesiten vapor a baja presión, y las de condensación, en las que la entalpía del vapor se aprovecha al máximo en la turbina y sale con las mínimas condiciones para su entrada en el condensador, por lo que no se puede usar como vapor de proceso.

## **Bibliografía** -

- [1] Suleiman, J, Lima Verde Real, M, Macedo, I (2005). Biomass power generation - Sugar cane bagasse and trash. Piracicaba, Brazil: PNUD.
- [2] Valdés Delgado, A. Los residuos agrícolas de la cosecha cañera (RAC). Centro Gerencia Programa y Proyectos Priorizados- Ministerio Ciencia Tecnología y Medio Ambiente Cuba.
- [3] Biomasa, la “chispa” renovable en las producciones del NOA. (2013, 14 de Mayo). Mitre y el Campo. <http://www.mitreylcampo.com.ar/2013/05/14/biomasa-la-chispa-renovable-de-las-producciones-del-noa/>
- [4] Beltrán, P.F, Martínez, J.B.C, Veja, J.R.F, Acea, I.F, Medina, A.S y Mancio, V. (2011) Los residuos agrícolas y cañeros como alternativa energética del presente y del futuro.
- [5] Reyes Montiel, J.L, Perez Bermúdez, R, Betancourt Mena, J. Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental.
- [6] Azevedo Fagundes, S, Pierossi, M, Bastos, M. Biomassa da palha de cana- CTC. New Holland
- [7] Torres, G, Prieto, J.P. Desarrollo de un sistema de alimentación y picado de residuos agrícolas visto desde su metodología de diseño.
- [8] Santos, F.A, de Queiróz, J.H, Colodette, J.L, Fernández, S.A, Guimerães, V.M y Rezende, S.T. Potencial da palha de cana de açúcar para produção de etanol.
- [9] Canilha, L, Chandel, A, Santos Milessi, T, Fernandes Antunes, F, Costa Freitas, W, Almeida Felipe, M.G, Da Silva, S. (2012). Bioconversion of sugarcane biomass into etanol: an overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification and ethanol fermentation.
- [10] Castillo, E.F. Potencial del proceso de pirolisis como alternativa para la valorización de los residuos de cosecha en el sector azucarero colombiano.
- [11] Fernandez de Ullivari, E; Vallejo, J y Valeiro, Sardón, A. Briquetas de carbón con residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar.
- [12] Impulso de la Energía a partir de la Biomasa Jornada de Intercambios- apie.
- [13] IDAE (2007). Biomasa: gasificación.
- [14] Juana Sardón, J.M, (2003). Energías renovables para el desarrollo. Madrid, España: Paraninfo SA.
- [15] Arauzo, J. Experiencias en gasificación de biomasa.  
[www.upcomillas.es/catedras/crm/report06/Mesa%20I%20-%20Jesus%20Arauzo.pdf](http://www.upcomillas.es/catedras/crm/report06/Mesa%20I%20-%20Jesus%20Arauzo.pdf)
- [16] Wikipedia - <http://es.wikipedia.org/wiki/Gasificaci%C3%B3n>
- [17] Corporación EMA (2012). Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas utilizando recursos renovables.

## **Autores:**

Ing. Agr. Diego Mathier<sup>1</sup>, Ing. Agr. Pablo Saleme<sup>2</sup>, Ing. Agr. M. Sc. Mario Bragachini<sup>1</sup>, Ing. Agr. Federico Sánchez<sup>1</sup>, Ing. Agr. Marcos Bragachini<sup>1</sup>, Ing. Agr. José Méndez<sup>3</sup>.

1- INTA EEA Manfredi

2- INTA EEA Famaillá

3- INTA AER Totoras

Técnicos pertenecientes al Proyecto Integrador 1 del Programa Nacional Agroindustria y Agregado de Valor – Proyecto Específico 1 - Módulo 3: Tecnologías para el desarrollo de bioenergía a partir de recursos provenientes de la cadena de producción agropecuaria y agroindustrial (líquido, sólido y gaseoso).