

# enerLAC

Revista de  
Energía de  
Latinoamérica  
y el Caribe

Pronóstico  
Demanda  
Eléctrica

Energía Eólica  
y Gestión  
Sistemas  
Eléctricos

*Sulphuric  
acid-catalysed  
steam  
pretreatment*

Residuos  
Agrícolas  
Uruguay

Agenda 2030  
y América  
del Sur

Modelo de  
Adopción  
Energías  
Renovables

*SWH NAMA  
Concept  
for Belize*

Efectividad/  
Políticas de  
Fuentes  
Renovables



---

## COMITÉ EDITORIAL

Alfonso Blanco  
SECRETARIO EJECUTIVO DE OLADE

Pablo Garcés  
ASESOR TÉCNICO DE OLADE

Marcelo Vega  
COORDINADOR DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DE LA  
ASOCIACIÓN DE UNIVERSIDADES GRUPO MONTEVIDEO  
(AUGM)

Martha Ligia Vides Lozano  
ESPECIALISTA PRINCIPAL DE HIDROCARBUROS DE OLADE

Blanca Guanocunga  
BIBLIOTECARIA OLADE

---

## COORDINADORES DE LA EDICIÓN

DIRECTOR GENERAL  
Alfonso Blanco

DIRECTORES EJECUTIVOS  
Pablo Garcés  
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN  
Martha Ligia Vides Lozano

---

## REVISORES

Alfonso Blanco Bonilla. *Secretario Ejecutivo de OLADE*

Fabio García. *Especialista Asociado de OLADE*

Andrés Schuschny. *Director de Estudios y Proyectos e  
Información de OLADE*

Luis Guerra. *Consultor de OLADE*

Jaime Guillén. *Consultor de OLADE*

Alexandra Arias. *Consultora de OLADE*

Francisco Lotufo. *Universidad Estadual Paulista  
(UNESP). Brasil*

Guillermo Garrido. *Universidad Nacional de Córdoba  
(UNC). Argentina*

Gustavo Figueredo. *Universidad Nacional del Nordeste  
(UNNE). Argentina*

Leonardo Assaf. *Universidad Nacional de Tucumán  
(UNT). Argentina*

Byron Chiliquinga. *Gerente de Proyecto de Cooperación  
Canadiense*

Cristhian Carrasco Villanueva. *Universidad Mayor de San  
Andrés (UMSA). Bolivia*

Carlos Orestes Martín Medina. *Umea University. Suecia*

Patricia Arnera. *Universidad Nacional de la Plata  
(UNLP). Argentina*

Héctor Chávez. *Universidad Santiago de Chile. Chile*

## COLABORADORES

Gabriela Martínez. *Traductora OLADE*

Raquel Atiaja. *Técnica de Área Informática OLADE*

Ana María Arroyo. *Diseño y diagramación*

---

© Copyright Organización Latinoamericana de Energía  
(OLADE) 2018. Todos los derechos reservados.

2602-8042 (Impresa)  
2631-2522 (Electrónica)

Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y  
Fernández Salvador.

Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: <http://enerlac.olade.org>

Página web OLADE: [www.olade.org](http://www.olade.org)

Mail ENERLAC: [enerlac@olade.org](mailto:enerlac@olade.org)

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995 /  
2599-489

Fotografía de la portada Huerto Solar Fotovoltaico Fase II  
de Eosol. Durango. México. Foto cedida por la Secretaría de  
Energía del Gobierno de México.

Esta revista es financiada por la Cooperación Canadiense.



Global Affairs  
Canada

Affaires mondiales  
Canada

## NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad  
de los autores y no comprometen a las organizaciones  
mencionadas.



# APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS AGRARIOS EN URUGUAY

Gabriel Pena-Vergara <sup>1</sup>, Álvaro Durante <sup>2</sup>, Pedro Curto-Risso <sup>3</sup>

Recibido: 18/05/2018 y Aceptado: 24/07/2018  
ENERLAC. Volumen II. Número 1. Septiembre, 2018 (42-55).



<sup>1</sup> Docente Grado 2, Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial, Facultad de Ingeniería, Udelar, Uruguay, [gabpena@fing.edu.uy](mailto:gabpena@fing.edu.uy)

<sup>2</sup> Docente Grado 1, Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial, Facultad de Ingeniería, Udelar, Uruguay, [adurante@fing.edu.uy](mailto:adurante@fing.edu.uy)

<sup>3</sup> Profesor Agregado Grado 4, Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial, Facultad de Ingeniería, Udelar, Uruguay, [pcurto@fing.edu.uy](mailto:pcurto@fing.edu.uy)

## RESUMEN

La agricultura es una de las principales actividades en Uruguay, donde se generan gran cantidad de residuos de biomasa. En la actualidad, la mayoría de éstos no son empleados con fines energéticos. En el presente trabajo se estudia el potencial energético de los rastrojos de los principales cultivos cerealeros: soja, trigo, maíz, cebada y sorgo. Se realizan modelos de las principales tecnologías aplicables para la generación de energía eléctrica utilizando biomasa, tanto a pequeña como a gran escala. Se analizan el ciclo Rankine convencional a vapor de agua y el ciclo Rankine orgánico (ORC). Partiendo de los resultados de la cuantificación y datos de la caracterización de las biomásas, se realiza un cálculo del potencial energético de cada biomasa residual, para cada tecnología. Los resultados demuestran la existencia de un potencial energético actualmente desaprovechado, principalmente para los rastrojos de soja y trigo a nivel país. Son los rastrojos de maíz los de mayor potencial energético por unidad de superficie. En cuanto a las tecnologías, los mejores rendimientos se obtienen con el ciclo Rankine convencional, pero para una escala de potencia mayor que el ORC.

**Palabras Clave:** Biomasa, Ciclo Rankine, ORC, Potencial Energético, Rastrojos

## ABSTRACT

*Agriculture is one of the main economic activities in Uruguay and it causes the generation of an important amount of biomass residues. Currently, the majority of these biomass residues are not used with energetic purposes. Therefore, in this work it is studied the potential use of straw of the main cereal crops found in Uruguay as fuels for power generation; soybean straw, wheat straw, corn straw, barley straw and sorghum straw. Models of the main technologies for power generation with biomass are developed, in both small and large scale, in particular studying the Steam Rankine Cycle and Organic Rankine Cycle (ORC). From the results obtained from the quantification of each biomass and together with the data from its characterization as fuels, calculations are made for each biomass to study its potential use for power generation, for both technologies previously mentioned. The results show that there is a potential energetic use of these biomass residues that it is currently unexploited, mainly regarding the soybean straw and wheat straw in a whole country point of view. It is also shown that the corn straw is the biomass which has the highest potential of power generation per harvested area. With respect to the technologies, the Steam Rankine Cycle shows higher efficiency but the ORC is more suitable for smaller scales of power generation.*

**Keywords:** Biomass, Rankine Cycle, ORC, Energy Potential, Straws

## INTRODUCCIÓN

### Biomasa como combustible

La utilización de biomasa como combustible tiene asociado una serie de ventajas y desventajas respecto a otros combustibles o fuentes de energía. La biomasa se presenta como una fuente de energía renovable e inagotable, siendo considerada como un combustible de emisiones neutras de CO<sub>2</sub> y con beneficios para el cambio climático. Cabe destacar que esto no es estrictamente correcto al considerar el ciclo de vida completo de la biomasa (siembra, cosecha, transporte, etc.) donde las emisiones de CO<sub>2</sub> no son neutras debido al uso de combustibles fósiles. Dependiendo de las condiciones locales, puede ser un recurso barato y de gran disponibilidad, por lo cual presenta un potencial en la diversificación del suministro de combustibles y favorece la soberanía energética. Adicionalmente, colabora con la revitalización rural mediante la creación de puestos de trabajo. En algunas aplicaciones, las tierras utilizadas para cultivos energéticos pueden ser utilizadas también con otros fines, como por ejemplo para la agricultura o ganadería. Según la biomasa que se utilice, se puede dar valor a residuos de otras actividades, provenientes de actividades agrícolas (Saidur et al., 2011; Vassilev et al., 2010). Comparado con otras fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica, la biomasa no tiene problemas de almacenamiento, dado que puede considerarse como energía almacenada en sí misma. Además, a partir de ésta pueden ser generados otros tipos de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos o directamente energía térmica y/o eléctrica (Saidur et al., 2011).

Por otro lado, como principales desventajas se puede destacar su baja densidad energética, lo cual aumenta los costos de transporte, además de tener altos costos de cosecha y almacenamiento. Esto hace que la disponibilidad de la misma sea regional. En aplicaciones de quema directa, si esta no se realiza en buenas condiciones, puede contribuir fuertemente al calentamiento

global y a la emisión de material particulado. La explotación de cultivos energéticos puede generar daños al suelo y a la biodiversidad, o en ocasiones puede generar incluso una competencia con la producción de alimentos. Al día de hoy, se tiene un conocimiento insuficiente de la composición, propiedades y calidad de estas biomásas, las cuales presentan una gran variabilidad. Tampoco se tiene una terminología, sistema de clasificación y estándares aceptados a nivel mundial. Otra de las desventajas de las biomásas es su contenido de humedad elevado, así como de Cl, K, Na y Mn. (Saidur et al., 2011; Vassilev et al., 2010).

### Tecnologías para la generación de energía eléctrica con biomasa

De las principales tecnologías empleadas en la actualidad para la generación de potencia con biomasa como combustible, y también las que presentan una potencial aplicación en el futuro, tanto a pequeña como a gran escala, se destacan el Ciclo Rankine convencional y el Ciclo Rankine Orgánico. En el presente trabajo se analiza el desempeño de los ciclos mencionados, mediante la realización de modelos de los mismos y posterior simulaciones con las biomásas estudiadas. Cabe destacar que la utilización de motores de combustión interna, acoplados con un gasificador de biomasa, así como turbinas de combustión externa (Durante et al., 2017), son también tecnologías prometedoras para su uso con biomasa, pero no serán analizadas en el presente trabajo (EPA, 2007; EPA, 2015).

El ciclo Rankine se ha utilizado comercialmente para la generación de energía desde hace más de cien años, generalmente para potencias eléctricas mayores a 2MW. Sin embargo, las inversiones en la generación de energía con este tipo de tecnología se vuelven interesante a partir de la decena de *megawatts*, ya que en esas franjas de potencias se obtienen eficiencias considerablemente mayores. Esto se debe a que la implementación de métodos y tecnologías que aumentan el desempeño, como el calentamiento regenerativo y/o el recalentamiento, se vuelven

viabiles en sistemas de mayor porte (Lora & Venturini, 2012). De este modo, las plantas termoeléctricas de ciclo Rankine a vapor de agua que operan con biomasa, generalmente tienen una capacidad de generación entre 25MW y 50MW (Cortez et al., 2008), aunque existe la tecnología y ejemplos de aplicación por encima de los 100MW (Siemens, 2017). En la actualidad, el rango de potencias de generación eléctrica cuando se tiene biomasa como combustible, mediante el Ciclo Rankine a vapor, abarca desde los 6MW hasta 150MW (Gerssen-Gondelach et al., 2014; Siemens, 2017), rango considerado en el presente estudio. La eficiencia eléctrica para dichas plantas de generación eléctrica o CHP (*combined heat and power*), es entre 18% y 28% (Gerssen-Gondelach et al., 2014). Los principales factores que determinan el rendimiento alcanzado del ciclo, son la temperatura y presión de vapor a la entrada de la turbina. Los límites que presenta la tecnología en la actualidad permiten alcanzar presiones y temperaturas de vapor de 330bar y 650°C respectivamente (General, 2017).

Alternativamente se puede utilizar el ciclo Rankine Orgánico (por sus siglas en inglés ORC), para generar energía a partir de biomasa. En este tipo de ciclos, el fluido de trabajo es una sustancia orgánica de alto peso molecular, como: hidrocarburos (HCs), hidroclorofluorocarburos (HCFCs) y clorofluorocarburos (CFCs). La particularidad de estas sustancias es que, en su mayoría, la curva de saturación es asimétrica con pendiente invertida en la sección del vapor saturado. Esto genera que el vapor se seque en lugar de humedecerse en la expansión isentrópica ya que la curva de expansión se aparta de la curva de saturación, teniendo su punto final fuera de la zona de estado bifásico (vapor sobrecalentado). Por tal motivo, este tipo de fluido orgánico se clasifica como seco. A diferencia de cuando se emplea vapor de agua como fluido de trabajo, que en la expansión de la turbina se obtienen gotas de condensación que pueden dañar los álabes de las últimas etapas de expansión, con fluidos secos o isentrópicos, este problema se evita ya que se obtiene vapor saturado o sobrecalentado

a la salida de la turbina, lo cual permite utilizar turbinas mucho más sencillas. También aumenta la eficiencia isentrópica de las mismas (entre 85-90%), aumentan su vida útil y disminuyen las sollicitaciones mecánicas con respecto a la aplicación del mismo tamaño en un ciclo Rankine convencional (Algieri & Morrone, 2011). Por otra parte, algunas de estas sustancias poseen bajas presiones críticas, dando la posibilidad de trabajar en estados supercríticos, siendo realizable en la práctica de manera más económica y segura en comparación con la utilización de agua. En definitiva, los ciclos ORC pueden diseñarse para trabajar con vapor saturado, vapor sobrecalentado y en condiciones supercríticas (Algieri & Morrone, 2015; Barse & Mann, 2016).

Una consideración a tener en cuenta con estos fluidos orgánicos, es que se debe operar con temperaturas inferiores a 400°C para asegurarse que las temperaturas alcanzadas sean ampliamente menores a la temperatura de estabilidad química de los mismos. Las temperaturas alcanzadas en el hogar de la caldera superan los 900°C, lo que podría ocasionar que el fluido alcance localmente temperaturas mayores a la de estabilidad, y por esto es necesario trabajar con un circuito de aceite intermedio. De este modo, la caldera le aporta calor al aceite, que luego es conducido a un intercambiador de calor donde le transfiere su calor al fluido orgánico. La inclusión de este circuito intermedio tiene un efecto negativo en el rendimiento del sistema. (Algieri & Morrone, 2011; Angelino & Colonna di Paliano, 1998).

Los ciclos orgánicos presentan las desventajas de que algunos de los fluidos de trabajo son sustancias inflamables (en el caso de los hidrocarburos) o están prohibidas por el Protocolo de Montreal y Copenhague debido a que atacan a la capa de ozono (en el caso de los HCFCs y CFCs, también llamados “freones”).

Comparado con el ciclo Rankine convencional, los ciclos ORC permiten obtener eficiencias más altas cuando se trabaja con fuentes de calor de

baja temperatura (incluso inferiores a 100°C) y en aplicaciones de relativamente pequeña escala. Según Beni (2010), actualmente se cuenta con un rango de potencia eléctrica de entre 0,5MW y 8MW (Bini, 2010; Turboden). Para potencias menores a 2,5MW, se considera una tecnología industrial bien establecida, donde se obtienen soluciones eficientes en generación eléctrica y cogeneración de pequeña escala, de forma más confiable y sostenible. Como fuente de calor se puede utilizar, por ejemplo, la energía geotérmica, la quema de combustibles de baja calidad (como los residuos de biomasa), o vapor residual a baja presión cuando se tiene disponibilidad del mismo (Algieri & Morrone, 2015; Barse & Mann, 2016; Montouliu & Tenconi, 2015). En este ciclo, la principal medida para mejorar el rendimiento es la regeneración interna, es decir, precalentar el fluido antes del generador de vapor utilizando el vapor sobrecalentado a la salida de la turbina (Algieri & Morrone, 2011; Drescher & Brüggemann, 2006; EPA, 2007).

### **Alcance del trabajo**

Uruguay es un gran productor agrícola, actividad donde se generan residuos provenientes de distintos cultivos y/o procesos agroindustriales. En la actualidad, sin considerar la cáscara de arroz, bagazo de caña y los residuos de la industria maderera, el resto de las biomásas generadas como residuos en los procesos agrícolas o agroindustriales no son empleados con fines energéticos.

El presente trabajo tiene como objetivo cuantificar el potencial energético, para generación de energía eléctrica a partir de los residuos de biomasa generados en la cosecha de los principales cultivos cerealeros del Uruguay: soja, trigo, maíz, sorgo y cebada. Mediante la identificación y cuantificación de biomásas residuales, contemplando que una fracción de la biomasa generada permanece en el suelo como medida de conservación del mismo. Finalmente, en base a los resultados tanto de la cuantificación como de la caracterización de las biomásas, se

realiza un cálculo del potencial energético de cada una de las biomásas estudiadas, para las tecnologías ORC y Ciclo Rankine convencional.

## **CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOMASAS RESIDUALES NO TRADICIONALES**

### **Cuantificación de biomásas residuales**

Como primer paso para evaluar el potencial energético de las biomásas, se debe identificar y cuantificar la disponibilidad de estas. El relevamiento de los residuos generados en dichas actividades se realizó recurriendo a los medios publicados por oficinas de estadísticas agropecuarias dentro del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) de Uruguay, para la búsqueda de información. Se diferencian dos fuentes, los anuarios (DIEA, 2016) y los censos (DIEA, 2012). Como resultado se obtienen mapas de distribución de superficies plantadas para cada biomasa seleccionada por departamento, así como la generación de biomasa residual asociada a cada uno de ellos. De este modo se identifican como biomásas a estudiar en profundidad los rastrojos de los principales cultivos cerealeros del país (soja, trigo, cebada, sorgo y maíz).

Actualmente la mayor parte de la biomasa aérea producida en los cultivos cerealeros se destina como cobertura de suelo. Por otra parte, antes de establecerse las medidas contra incendios en los ámbitos rurales, la quema de la biomasa aérea que quedaba en el campo luego de la cosecha de un cultivo, era un procedimiento relativamente frecuente. Esta quema de rastrojos es una actividad poco defendible desde la óptica técnico-científica.

La información disponible de la producción de los cultivos cerealeros, a partir de las encuestas, es la producción del grano. Dado que el interés de este trabajo es el estudio de los residuos, se debe tener en cuenta el índice de cosecha para el cálculo de rastrojo generado. El índice de cosecha se define como la relación, en base seca, entre la biomasa que se cosecha (rendimiento del cultivo)

y la biomasa aérea total de dicho cultivo (rastreo más rendimiento) (Kemanian et al., 2007).

$$IC = \frac{\text{Biomasa cosechada (grano)}}{\text{Biomasa Total}} \quad (1)$$

Para los cálculos del rastrojo generado se utiliza un índice de cosecha de 40% para todos los cultivos. Además para las estimaciones de biomasa aprovechable y los posteriores cálculos, se considera únicamente el 65% del total de rastrojo generado. Esto es debido a las leyes de conservación del suelo que no permiten retirar

la totalidad del rastrojo, así como la inviabilidad tecnológica de recoger la totalidad de dicho material (Kemanian et al., 2007).

En la tabla 1 se presentan las biomásas residuales consideradas, su disponibilidad anual y producción por hectárea, ambos en base seca. En cuanto a la disponibilidad de biomasa, se destacan los rastrojos de soja y trigo, los cuales se generan en momentos diferentes del año (otoño y verano respectivamente). En orden descendente de cantidad de biomasa generada, continúan los rastrojos de maíz, sorgo y cebada, los cuales también se generan en verano u otoño.

Tabla 1. Cuantificación de biomásas residuales no tradicionales

Biomasa	Nomenclatura	Disponibilidad anual (T - b.s.)	Rendimiento aprov. (T/ha - b.s.)
Rastrojo de Soja	R. Sj	1.880.031	2,43
Rastrojo de Trigo	R. T.	1.398.841	3,08
Rastrojo de Maíz	R. M.	400.265	5,29
Rastrojo de Sorgo	R. Sg	288.671	4,09
Rastrojo de Cebada	R. C.	213.263	3,41

Fuente: Elaboración propia.

### Caracterización de biomásas estudiadas

Las características y calidad de la biomasa como combustible pueden variar en un amplio rango, dependiendo del tipo de biomasa y de la tecnología de pre-tratamiento que se le aplique. Por medio de éstos se pueden mejorar las propiedades del combustible, pero tiene asociado un costo adicional (van-Loo & Koppejan, 2008).

Las biomásas antes mencionadas fueron caracterizadas por nuestro grupo de trabajo (Pena-Vergara et al 2017). Dicha caracterización consistió en la realización de análisis de laboratorio para determinar la Humedad *in nature* (W), composición próxima (carbono fijo - CF, materia volátil - MV, cenizas - Cnz) y composición elemental (carbono -

C, hidrógeno - H, oxígeno - O y nitrógeno - N), poder calorífico inferior (PCI), análisis termogravimétrico y temperatura de fusión de cenizas (temperatura de deformación - DT). En la tabla 2 se presentan las principales características de las mismas.

**Comparado con otras fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica, la biomasa no tiene problemas de almacenamiento, dado que puede considerarse como energía almacenada en sí misma. Además, a partir de ésta pueden ser generados otros tipos de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos o directamente energía térmica y/o eléctrica**

Tabla 2. Propiedades de las biomásas residuales no tradicionales.

Biomasa	W (% b.h.)	Análisis Próximo (% b.s.)			Análisis Elemental (% b.s.s.c)				PCI (MJ/kg)	DT (°C)
		CF	MV	Cnz	C	H	O	N		
R. Sj	9,8	15,4	80,8	3,8	51,4	6,2	41,7	0,7	18,5	1.328
R. T.	8,1	15,7	75,1	9,2	49,8	5,9	43,2	0,2	16,5	974
R. M.	27	16,5	78,7	4,7	50,1	5,2	43,8	0,9	17,2	852
R. Sg	29	15	78	7	50,6	5,9	42,8	0,7	16,7	1.048
R. C.	8,8	15,5	77,1	7,4	48,8	6,1	44,8	0,3	16,9	811

Fuente: Adaptado de Pena-Vergara et al. (2017).

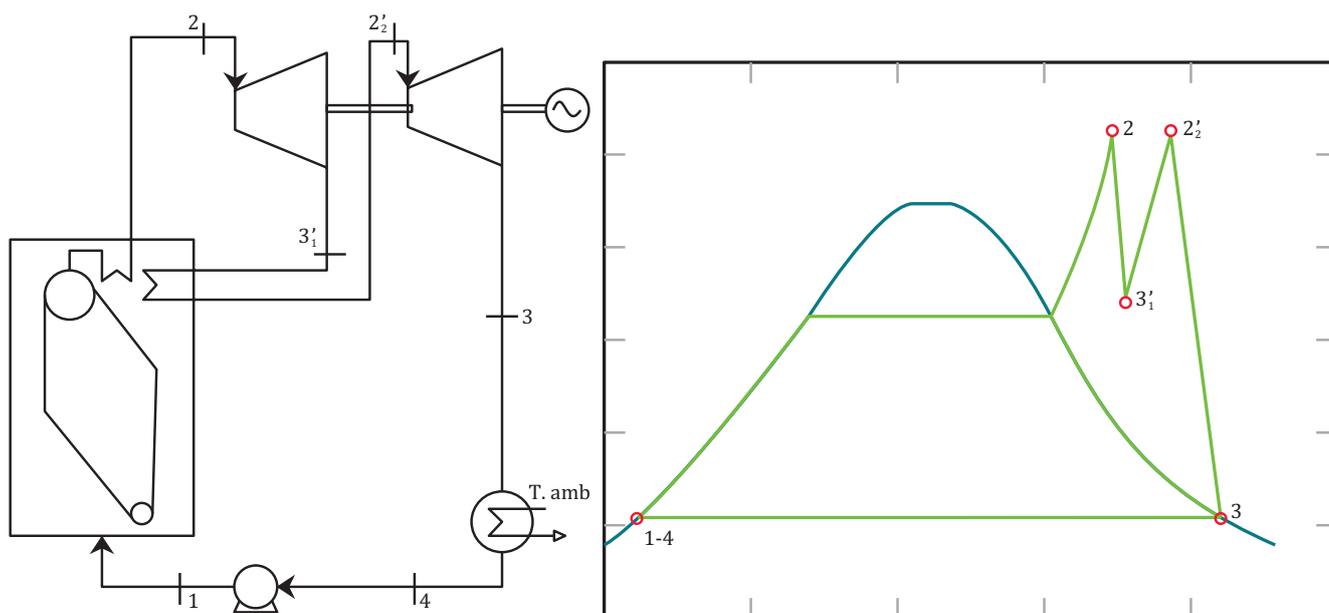
### MODELOS DE MÁQUINAS PRODUCTORAS DE POTENCIA

Para calcular el potencial energético de las biomásas se utilizaron modelos de dos máquinas térmicas capaces de operar con estos combustibles. De este modo, fueron considerados el ciclo Rankine convencional (utilizando vapor de agua) y el ciclo Rankine orgánico (ORC).

### Ciclo Rankine convencional (vapor de agua)

El ciclo de vapor considerado se esquematiza en la figura 1, donde se asume la expansión de vapor en dos etapas (2 a 3' y 2' a 3) con recalentamiento intermedio (3'a 2'), siendo ésta la configuración más usual en plantas de generación de potencia que operan bajo esta tecnología (Montouliu & Tenconi, 2015). Además de la expansión, el ciclo se compone por una etapa de condensación a baja presión (3 a 4), bombeo de agua líquida (4 a 1) y generación de vapor sobrecalentado (1 a 2).

Figura 1. Esquema de ciclo Rankine convencional y curva T-s



Fuente: Elaboración propia.

Con la finalidad de calcular la potencia y el rendimiento que se obtienen en la utilización de este ciclo, se debe determinar las condiciones termodinámicas del fluido en cada punto característico del ciclo. Para ello se fijan eficiencias isentrópicas y pérdidas de calor en la caldera, parámetros de operación de los distintos elementos que componen el ciclo, de tal forma de considerar irreversibilidades y también se imponen determinadas restricciones tecnológicas actuales.

Una de las principales limitantes es la presión y temperatura del vapor sobrecalentado antes de la primera etapa de expansión. Estos valores varían según la potencia del ciclo de vapor, lo que se traduce en tamaños muy diferentes de turbinas. Por lo tanto, para los cálculos se toman cuatro turbinas comerciales desarrolladas para plantas de generación a partir de biomasa y que abarcan los rangos de potencia estudiados. De este modo, para cada turbina se fija la presión y temperatura de entrada.

En cuanto a la expansión, no se encuentra en la literatura un criterio definido para fijar la presión intermedia  $P_3'$  a la salida la primera turbina. Sin embargo, un valor representativo de diversas plantas de generación eléctrica se obtiene al considerar que  $P_3'$  sea aproximadamente un 30% de  $P_2$ . En las etapas de expansión y bombeo se definen las eficiencias isentrópicas de estos equipos para considerar las irreversibilidades de estos procesos.

$$\mathcal{E}_T = \frac{h_2 - h_{3'}}{h_2 - h_{3s'}} \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_B = \frac{h_{1s} - h_4}{h_1 - h_4} \quad (3)$$

donde el subíndice "s" hace referencia al proceso isentrópico. Se asumen eficiencias isentrópicas de 85% para ambas etapas de expansión y 75% en el bombeo.

En el condensador se fija la temperatura de condensación en 50°C, lo cual corresponde a una presión de saturación de 0,12 bara. Este valor es superior al mínimo tecnológico en condensadores de 0,05 bara y viabiliza un intercambio de calor con una fuente fría del orden de 30°C (Angelino & Colonna di Paliano, 1998; Drescher & Brüggemann, 2006).

Una vez determinados todos los puntos del ciclo, la potencia eléctrica se calcula como:

$$P_E = m_{ft} [h_2 - h_{3'} + h_{2'} - h_3 - (h_1 - h_4)] \eta_{elec} \quad (4)$$

Donde  $m_{ft}$  corresponde al flujo másico de vapor y  $\eta_{elec}$  el rendimiento de conversión electromecánica.

De este modo, para el cálculo de la potencia se debe determinar el flujo másico de vapor, el cual se determina mediante un balance energético del generador de vapor.

$$m_F h_F + m_a h_a(T_a) = m_{ft} q_u + Q_P + m_g h_g(T_{ch}) \quad (5)$$

donde  $m_F$  corresponde al flujo másico de combustible,  $h_F$  la entalpía del combustible,  $m_a h_a(T_a)$  el flujo másico de aire por su entalpía sensible a la temperatura de entrada al sistema,  $m_{ft} q_u$  el flujo másico de vapor por el calor útil entregado al mismo ( $q_u = h_{vap} - h_{ag}$ ),  $Q_P$  las pérdidas de calor del generador de vapor por convección y radiación,  $m_g h_g(T_{ch})$  el flujo de gases de escape por su entalpía a la temperatura que se encuentran en la chimenea. La temperatura de chimenea  $T_{ch}$  se define mediante un *pinchpoint* de 20°C con respecto a la temperatura de evaporación del fluido de trabajo  $T_{ev}$ . Las pérdidas de calor se consideran como 2% de la energía que ingresa al generador de vapor.

Para estudiar la eficiencia a la que se genera energía a partir de cierta biomasa como combustible, se define mediante la ecuación 6 el rendimiento de conversión de combustible, referido al poder calorífico inferior.

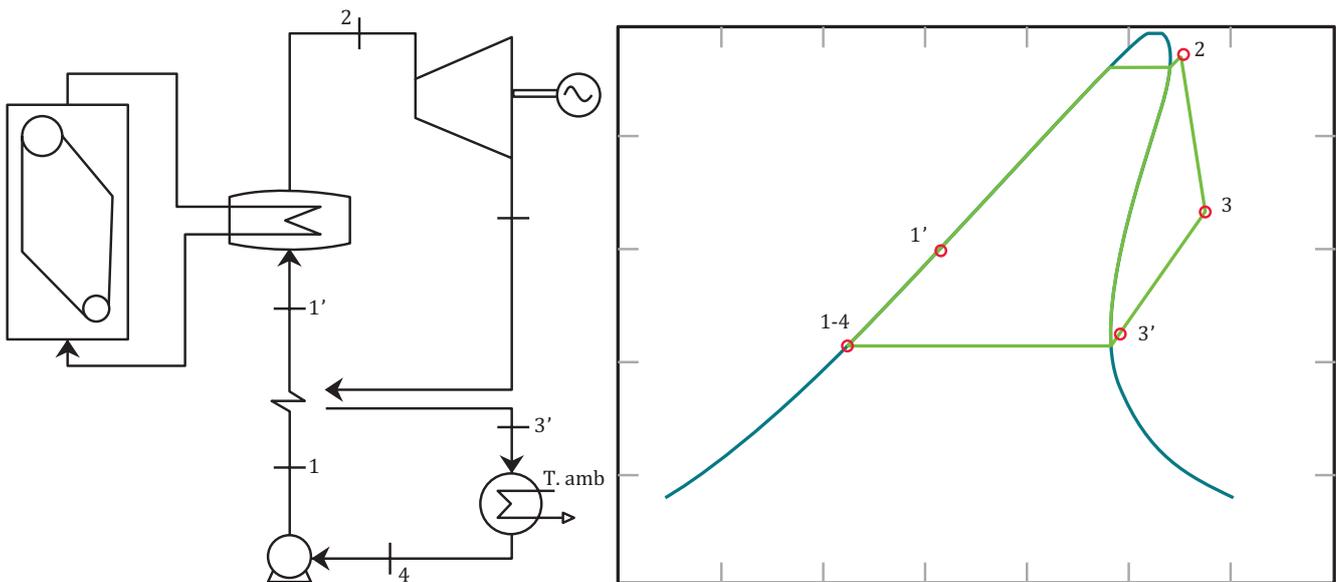
$$\eta = \frac{P_e}{m_F PCI_F} \quad (6)$$

### Ciclo Rankine Orgánico (ORC)

El modelado del ciclo Rankine orgánico es relativamente similar al Rankine convencional pero con algunas diferencias notorias. Se define el octametiltrisiloxano (OMTS) como fluido de trabajo, debido a que en la actualidad es el fluido más utilizado en la mayoría de las plantas a biomasa (Algieri & Morrone, 2011; Pezzuolo et al., 2016). Para determinar las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo, se emplea la base de datos de distribución libreCoolprop (Bell et al., 2014). Debido a que el OMTS es un fluido seco en su expansión, se considera

únicamente un sobrecalentamiento de 5°C. Siguiendo las configuraciones típicas de los sistemas ORC (Duvia et al., 2009; Obernberger et al., 2002) y aprovechando las ventajas que permite la utilización de un fluido orgánico, se emplea un intercambiador de calor interno a modo de recuperador de calor y aceite térmico como fluido intermedio. Además, no se consideran recalentamientos intermedios en la expansión. El uso de aceite térmico como fluido intermedio está ligado a las temperaturas máximas que pueden soportar los fluidos orgánicos, las cuales generalmente son mucho menores a las temperaturas alcanzadas en la combustión (Algieri & Morrone, 2015; Schuster et al., 2009). En la figura 2 se esquematiza el ciclo considerado.

Figura 2. Esquema de ciclo Rankine orgánico y curva T-s



Fuente: Elaboración propia.

El fluido de trabajo seleccionado presenta una temperatura crítica de 291°C, además los aceites térmicos generalmente no deben exceder los 315°C. De este modo y considerando un sobrecalentamiento del OMTS de 5°C, los parámetros de entrada a la turbina seleccionados son los siguientes:  $T_2 = 285 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_2 = 11,95 \text{ bara}$ .

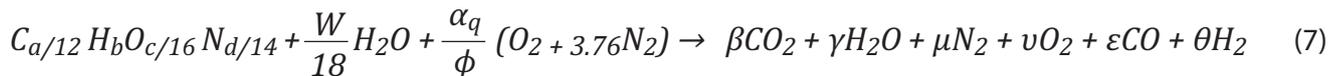
En cuanto a la condensación, diversos autores (Angelino & Colonna di Paliano, 1998; Drescher & Brüggemann, 2006) establecen un mínimo en la presión del condensador para sistemas ORC, por motivos tecnológicos y constructivos, de 0,05 bara. La temperatura de saturación, correspondiente a dicha presión, para el OMTS es 66,6 °C, la cual es

suficientemente elevada para poder intercambiar calor con la fuente fría a temperatura ambiente.

De la misma forma que para el ciclo Rankine convencional, se asumen eficiencias isentrópicas de 85% y 75% para la turbina y compresor respectivamente, así como un rendimiento electromecánico de 90%.

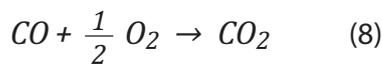
### Reacción de combustión

La reacción de combustión se resuelve a partir de la estequiometría y el equilibrio químico de los productos, dejando por fuera otros factores como los considerados en la cinética química. Se considera a las biomazas como un combustible húmedo, con una composición elemental determinada. Para cualquier biomasa, la reacción se puede escribir como:



Donde  $C_{(a/12)}H_bO_{(c/16)}N_{(d/14)}$  representa un mol de combustible seco y a, b, c y d son la fracción másica de cada elemento.  $\alpha_q$  la cantidad estequiométrica de  $O_2$  en el aire y  $\phi$  la riqueza de la mezcla combustible-aire.

Adicionalmente se considera la reacción de disociación,



mediante la ecuación de equilibrio químico a la temperatura T y presión atmosférica,

$$k_p(T) = \frac{(x_{CO_2})}{(x_{CO})(x_{O_2})^{1/2}} \quad (9)$$

donde  $(x_i)$  representa las fracciones molares de cada especie y T corresponde a la temperatura de llama adiabática. Para resolver la combustión planteada se sigue el desarrollo expresado en Medina et al. (2014).



Para los cálculos se fija un exceso de aire en la combustión de 50%, para todos los rastrojos y las dos tecnologías consideradas. Este valor es acorde a los distintos tipos de quemadores empleados para biomasa (EPA, 20017).

### RESULTADOS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO

Según se mencionó anteriormente, los rangos de potencias que se adecúan a cada tipo de tecnología considerada en este trabajo son los siguientes:

- Rankine convencional: 6 MW a 150 MW
- ORC: 0,5 MW a 8,0 MW

### Ciclo Rankine convencional

Según los parámetros del ciclo fijados en la página 48 y para las cuatro turbinas de vapor consideradas, independientemente de la biomasa en cuestión, se obtienen los resultados presentados en la tabla 3 (Siemens, 2017).

Tabla 3. Principales características del ciclo de vapor.

Modelo de Turbina	SST-111	SST-150	SST-300	SST-600
Rango de Potencia (MWe)	6 - 12	12 - 20	20 - 50	100 - 150
(bar)	130	103	120	165
(°C)	530	505	520	565
(%)	36,6	35,5	36,2	37,8

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4, se muestran los valores de potencia eléctrica que se podrían obtener para cada biomasa. A nivel país se tiene un potencial total superior a 700 MW considerando los rastrojos generados por los cinco cultivos en cuestión, donde prácticamente la mitad corresponde a los rastrojos de soja (340 MW), seguido por los rastrojos de trigo (225 MW). El rendimiento eléctrico de conversión de combustible que se obtendría en este sistema, bajo las consideraciones antes mencionadas, es entre 23,0% y 25,6% respecto al PCI. Se observa que las biomásas con menor contenido de humedad presentan mejores rendimientos. Una alternativa para aumentar este rendimiento es disminuir la temperatura de los humos, los cuales sobrepasan los 330°C. Para disminuir esta temperatura se puede recurrir a economizadores y/o precalentadores de aire en el generador de

vapor, los cuales no fueron contemplados en el modelo.

Considerando una planta que genere 10 MWe durante 300 días al año y con la finalidad de visualizar el requerimiento de biomasa para operar la misma, se calcula la superficie necesaria donde se debe cosechar el rastrojo para satisfacer dicha demanda. De esta forma, considerando cada rastrojo de forma independiente, son necesarias 23.000ha de soja, 20.200ha de trigo, 12.000ha de maíz, 16.800ha de sorgo o 17.800ha de cebada. Esto equivale a radios de acción entre 6 y 9 km dependiendo del cultivo. Este mismo resultado pero visualizado desde otra óptica, implica que los rastrojos de maíz son la biomasa con mayor potencial por hectárea, en orden descendente se ordenan: rastrojo de sorgo, rastrojo de trigo, rastrojo de soja y por último el rastrojo de cebada.

Tabla 4. Potencial de generación de energía eléctrica a partir de ciclo Rankine convencional.

Biomasa	Pot. (MW)	Rend. (%)	Pot. esp. (W/ha)
R. Soja	340	25,6	439
R. Trigo	225	25,6	495
R. Maíz	63	23,6	832
R. Sorgo	42	23,0	595
R. Cebada	35	25,1	559

Fuente: Elaboración propia

### Ciclo Rankine orgánico

Bajo las consideraciones de presión, temperatura, tipo de fluido, rendimientos isentrópicos y demás parámetros explicitados en la Sección 3.2, el rendimiento del ciclo resulta en 27,2% y la temperatura de los humos en la chimenea es de 300°C.

En la tabla 5 se presenta, para cada biomasa, el consumo de combustible por año necesario para alimentar una planta de generación de un *megawatt* operando 300 días al año. Además, se presenta el rendimiento de generación que se obtendría y el potencial de generación a partir de

la cosecha parcial de los residuos por hectárea. Se observa que los rendimientos del ORC con estas biomásas se encuentra entre 18,0% y 19,6%, donde la humedad de la biomasa es el factor que más influyen en esta fluctuación. En cuanto al consumo de combustible, las biomásas con mayor poder calorífico son las que presentan menores requerimientos de consumo. Debido a la generación de biomasa por hectárea y considerando que los rendimientos son muy similares para cada uno de ellos, los rastrojos de maíz son la biomasa estudiada con mayor potencial por unidad de superficie, seguido de los rastrojos de sorgo, trigo, soja y por último de cebada.

Tabla 5. Potencial energético a partir de ORC.

Biomasa	Consumo (T/año.MWe)	Rend. (%)	Pot. esp. (W/ha)
R. Soja	7.195	19,5	316
R. Trigo	8.062	19,5	326
R. Maíz	8.177	18,0	687
R. Sorgo	8.594	19,5	454
R. Cebada	7.828	19.6	304

Fuente: Elaboración propia

Si bien el fluido de trabajo empleado en este ciclo es el usualmente utilizado, el rendimiento puede ser incrementado cambiando dicho fluido, teniendo en cuenta factores ambientales y de seguridad.

### CONCLUSIONES

El presente trabajo se centró en el cálculo del potencial energético de biomásas residuales generadas en actividades agrícolas, particularmente en los rastrojos de los cultivos cerealeros con mayor extensión en Uruguay. Se evaluó la disponibilidad de las mismas, se definieron dos tecnologías para la producción de potencia y se obtuvieron los valores de potencia eléctrica generada en períodos anuales, para cada una de las biomásas estudiadas.

En cuanto a disponibilidad a nivel nacional, los rastrojos de soja son los de mayor producción neta, seguidos de los rastrojos de trigo, maíz, sorgo y cebada. Considerando la producción de residuos por hectárea (rendimiento de cultivo), el orden decreciente de la generación de rastrojos es la siguiente: maíz, sorgo, cebada, trigo y soja.

De las tecnologías evaluadas, los mejores rendimientos se alcanzan con el ciclo Rankine convencional, del orden de 25%, para rangos de potencia entre 6 y 150 MWe. El ORC se presenta como una alternativa en pequeña escala pero con menores rendimientos, entre 18,0% y 19,6%.

Si se considera la totalidad de los rastrojos de residuos cerealeros, que se encuentran distribuidos en gran parte del territorio, se presenta un

potencial de generación eléctrica de 700MW. Por motivos económicos, de recolección y transporte, se debe pensar un aprovechamiento de dichos residuos en forma regional y escalas de potencia menores.

Los rastrojos de soja son la biomasa estudiada con mayor potencial de generación de energía con 340MWe. Además de la gran disponibilidad, esta biomasa presenta aceptables cualidades como combustible, lo que se ve reflejado en buenos rendimientos obtenidos para cada tecnología. Como desventaja presenta una producción de materia por hectárea inferior a otras biomásas, lo que puede afectar los costos de logística.

En términos relativos a la superficie, los rastrojos de maíz son el residuo estudiado con mayor potencial con 316W/ha. Esto se debe a las diferencias en generación de biomasa por hectárea y que los rendimientos de los ciclos no varían fuertemente entre los diferentes rastrojos.

## REFERENCIAS

- Algieri, A. & Morrone, P. (2011). Comparative energetic analysis of high-temperature subcritical and transcritical Organic Rankine Cycle (ORC). A biomass application in the Sibari district. *Applied Thermal Engineering*.
- Algieri, A. & Morrone, P. (2015). Energy Analysis of Organic Rankine Cycles for Biomass Applications. *Thermal Science*.
- Angelino, G. & Colonna di Paliano, P. (1998). Multicomponent Working Fluids for Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy*.
- Barse, K. & Mann, M. (2016). Maximizing ORC performance with optimal match of working fluid with system design. *Applied Thermal Engineering*.
- Bell, I., Wronski, J., Quoilin, S. & Lemort, V. (2014). Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp ([www.coolprop.org](http://www.coolprop.org)). *Industrial & Engineering Chemistry Research*.



- Bini, R. (2010). State of the art of ORC technology for biomass plants. *Turboden*.
- Cortez, L., Lora, E. & Olivares-Gómez, E. (2008). Biomassa para energia. San Pablo/Brasil: Ed.Unicamp.
- DIEA. (2012). Censo general agropecuario 2011. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Uruguay.
- DIEA. (2016). Anuario estadístico agropecuario 2015. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Uruguay.
- Drescher, U. & Brüggemann, D. (2006). Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomasspower and heatplants. *Applied Thermal Engineering*.
- Durante, A., Pena-Vergara, G., Curto-Risso, P. L., Medina, A. & Calvo Hernández, A. (2017). Thermodynamic simulation of a multi-step externally fired gas turbine powered by biomass. *Energy Conversion and Management*.
- Duvia, A., Guercio, A. & Rossi, C. (2009). Technical and economic aspects of Biomass fuelled CHP plants based on ORC turbo generators feeding existing district heating networks. *Turboden*.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2007). Biomass Combined Heat and Power Catalog of Technologies. *Combined Heat and Power Partnership*.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2015). Catalog of CHP Technologies. *Combined Heat and Power Partnership*.
- General Electric. (2017). <https://www.gepower.com/steam/steam-turbines/reheat>.
- Gerssen-Gondelach, S., Saygin, D., Wicke, B., Patel, M. & Faaij, A. (2014). Competing uses of biomass: Assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Kemanian, A., Stöckle, C., Huggins, D. & Viega, L. (2007). A simple method to estimate harvest index in grain crops. *Field Crops Research*.
- Lora, E. & Venturini, O. (2012). Biocombustíveis, Vol.1. Rio de Janeiro/Brasil: Ed. Interciência.
- Medina, A., Curto-Risso, P., Calvo Hernández, A., Guzmán-Vargas, L., Angulo-Brown, F. & Sen, A. K. (2014). Quasi-dimensional simulation of spark ignition engines. *Springer*.
- Montouliu, J. & Tenconi, M. (2015). Notas del curso Energía 2. Facultad de Ingeniería - Udular: Departamento de Termodinámica Aplicada - IIMPI.
- Obernberger, I., Thonhofer, P. & Reisenhofer, E. (2002). Description and evaluation of the new 1.000 kWel Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria. *Euroheat & Power*.
- Pena-Vergara, G., Durante, A., Curto-Risso, P., Franco, E., Pina, A., Amaya, A. & Tancredi, N. (2017). Characterization of residual biomass from agricultural and agroindustrial activities. COBEM-2017, 0668.
- Pezzuolo, A., Benato, A., Stoppato, A. & Mirandola, A. (2016). The ORC-PD: A versatile tool for fluid selection and Organic Rankine Cycle unit design. *Energy*.
- Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S. & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2262-2289.
- Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E. & Spliethoff, H. (2009). Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Applied Thermal Engineering*.
- Siemens. (2017). Turbines for Biomass Plants. [www.siemens.com/energy](http://www.siemens.com/energy).
- Turboden. Biomass, ORC cogeneration system for your green waste.
- van-Loo, S. & Koppejan, J. (2008). The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing. *Earthscan*.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913-933