

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Tucumán
Escuela de Posgrado

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

**“Análisis energético, ambiental y económico del
uso de astillas de madera para la producción de
energía eléctrica en la industria azucarera de
Tucumán”**

Alumno: Lic. María Julieta Loi

Director: Dr. Augusto Uasuf

San Miguel de Tucumán
21 de noviembre de 2019

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

INDICE

1. Resumen.....	3
2. Introducción.....	4
3. Objetivos.....	7
4. Materiales y métodos.....	8
4.1. Análisis energético.....	8
3.1.1. Energías producidas	11
3.1.2. Ahorro en el consumo de energía fósil.....	13
4.2. Análisis ambiental.....	13
3.2.1. Emisiones de GEI.....	13
3.2.2. Emisiones fósiles evitadas.....	15
4.3. Análisis económico.....	15
5. Resultados y Discusión.....	16
5.1. Análisis energético.....	16
4.1.1. Energías producidas	16
4.1.2. Ahorro en el consumo de energía fósil.....	18
4.1.3. Tasa de retorno energético.....	19
5.2. Análisis ambiental.....	20
4.2.1. Emisiones de GEI.....	20
4.2.2. Emisiones fósiles evitadas.....	22
4.3. Análisis económico.....	23
6. Conclusiones.....	25
7. Bibliografía.....	27

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

1. RESUMEN

Una alternativa a los problemas causados por el uso de minerales fósiles es el desarrollo de energías limpias y renovables de origen biomásico, ya que pueden ser producidas y consumidas en un ámbito de CO₂ neutro y la biomasa está disponible mundialmente. La provincia de Tucumán, situada en la región Norte del país, tiene un gran potencial para la producción de bioenergía, específicamente biomasa y usarla en su principal industria, la azucarera.

El objeto de este estudio es analizar la sustentabilidad del uso de las astillas o chips de madera en la industria azucarera para la disminución del consumo del gas natural. Para analizar esta sustentabilidad, se comparo un sistema renovable frente a uno basado en combustibles fósiles desde tres puntos de vista: energético, ambiental y económico.

Si bien energéticamente, el uso de chips de madera no es beneficioso ya que la tasa de retorno energético (TRE) demostró ser 5 veces inferior que para las fuentes fósiles; si se ve que el uso de astillas de madera es beneficioso desde el punto de vista ambiental al disminuir las emisiones de GEI y económicamente resulta menos costoso que el uso de gas natural.

Palabras claves: chips de madera; sustentabilidad; ingenio azucarero; biomasa.

2. INTRODUCCION

A nivel mundial, existe un constante incremento en el consumo de energía, lo que conlleva a serios problemas que deben ser resueltos en el corto plazo. Las mayores reservas de combustibles fósiles están localizadas en algunos países, causando una gran volatilidad en el abastecimiento de los mismos (Uasuf, 2012). La quema de combustibles fósiles ha producido alrededor de las tres cuartas partes del aumento en el CO₂ por actividad humana en los últimos 20 años. El resto de este aumento se debe principalmente a los cambios en el uso del suelo, especialmente la deforestación. Como consecuencia se produce un incremento en los gases de efecto invernadero (GEI) provocando el calentamiento global y a la vez produciendo el cambio climático. En la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro de 1992, los gobiernos de los países industrializados afirmaron la necesidad de reducir las emisiones de GEI que luego condujo a la firma en 1997 del Protocolo de Kioto y finalmente en el Acuerdo de Paris del año 2016.

Actualmente, el uso de tecnologías de energía renovable para proporcionar electricidad, calefacción, refrigeración y transporte está instalado en todo el mundo, y las tendencias recientes sugieren un sostenido crecimiento mundial. Las energías renovables demuestran que, además de sus beneficiosas, también son un motor económico, creando empleos, ayudando a diversificar las fuentes de ingresos, y estimular nuevas tecnologías. El sector de energía renovable en general ha empleado, directa e indirectamente, alrededor de 11 millones de personas en todo el mundo en 2018. (REN21, 2019).

La bioenergía es una energía renovable producida de materiales derivados de fuentes biológicas (Cárdenas, 2017). Una alternativa a estos problemas causados por el uso de minerales fósiles es el desarrollo de energías limpias y renovables de origen biomásico, ya que pueden ser producidas y consumidas en un ámbito de CO₂ neutro y la biomasa está disponible mundialmente. Se denomina “biomasa” a toda porción orgánica proveniente de las plantas, los animales y de diversas actividades humanas (Ministerio de Hacienda y Energía, Presidencia de la Nación Argentina, 2019). El término “biomasa” abarca una variada serie de

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

fuentes energéticas: desde la simple combustión de la leña para calefacción hasta las plantas térmicas para producir electricidad, usando como combustible residuos forestales, agrícolas, ganaderos o incluso “cultivos energéticos”. Una gran ventaja de la utilización de recursos biomásicos para la generación de energía es que pueden producir combustibles líquidos, gaseosos y sólidos, y que pueden ser almacenados, transportados y utilizados con los mismos sistemas de abastecimiento de los combustibles fósiles. (Menéndez, 2013).

Argentina, tiene un potencial de producción de biomasa mucho mayor que otros países, debido a una combinación de vastas áreas de tierra con un buen potencial de producción de cultivos, condiciones climáticas favorables, prácticas agrícolas extensivas (Hamelinck et al., 2005). Para la Argentina, 2017 fue el “Año de las energías renovables” ya que se impulsó su uso teniendo como meta deseada que estas fuentes de energías renovables alcancen el 20% de la matriz energética nacional al 31 de diciembre de 2025. Las metas para el país están plasmadas en la Ley 27.191, y el programa que busca llevarlas a cabo es el “RenovAr” (Télam, 2018).

La provincia de Tucumán, situada en la región Norte del país, tiene un gran potencial para la producción de bioenergía. Es una provincia con numerosas agroindustrias como la azucarera y la citrícola. No obstante, la industria citrícola también posee desechos o subproductos biomásicos como ser la poda de plantas y la remoción de aquellas plantas no productivas. En un ingenio azucarero, el bagazo es el residuo de materia después de extraído el jugo de la caña. Es un residuo orgánico, renovable y amigable con el medio ambiente. El bagazo se quema actualmente para obtener energía útil para el proceso industrial y, con los equipos adecuados, es factible producir excedentes para vender a la red. Sin embargo, debido al alto contenido de humedad del bagazo (50-53%), se recurre al uso de combustibles fósiles como el gas natural para incrementar el funcionamiento y rendimiento de las calderas. A pesar de ello, es

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

gas natural es actualmente costoso y su uso es restringido (Cárdenas, 2018). Ante este escenario, numerosos ingenios de la provincia de Tucumán analizan la posibilidad de usar astillas de madera en conjunto con el bagazo para disminuir o sustituir el consumo del gas natural. Actualmente algunos ingenios tucumanos utilizan astillas o chips de madera traídas de la región NEA: principalmente de las provincias de Misiones y Corrientes, utilizando el *pino spp.* como principal especie (Ministerio Agroindustria Presidencia de la Nación, 2015). El inconveniente es que éstos, se transportan con un alto contenido de agua a lo que se le suma el costo del transporte hacia Tucumán.

Frente a esta situación, la industria azucarera se debe enfocar en la calidad de los recursos biomásicos. Dichos esfuerzos deben estar orientados en reducir el contenido de humedad y el costo económico de los mismos. El objeto de este estudio es analizar la sustentabilidad del uso de las astillas o chips de madera en la industria azucarera para la disminución del consumo del gas natural.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

3. OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio:

Análisis de la factibilidad energética, ambiental y económica del uso de las astillas de madera en la industria azucarera de la provincia de Tucumán para la disminución del consumo del gas natural.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Análisis energético del uso de las astillas de madera, como combustible adicional, frente al uso del gas natural en un ingenio azucarero.
2. Análisis ambiental del uso de las astillas de madera frente al uso del gas natural.
3. Realizar un estudio de la factibilidad técnico económico del uso de astillas de madera como combustible adicional, frente al uso de gas natural.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. Análisis energético:

El análisis energético se refiere a las energías invertidas y producidas por un sistema de combustible que serán relacionadas por medio de un balance energético. Existe un indicador de gran utilidad conocido como Tasa de Retorno Energético (TRE), el cual enuncia que, dada una determinada fuente de energía, su Tasa de Retorno Energético representa la cantidad de energía recuperada por cada unidad de energía invertida.

La Tasa de Retorno Energético - abreviada en adelante como TRE, EROI o EROEI en sus siglas en inglés - que es la relación entre la energía disponible de una fuente de energía y la energía gastada en su producción. Esto queda expresado en la ecuación 1:

$$\text{TRE} = \frac{\text{E obtenida}}{\text{E invertida}} \quad (\text{ecuación 1})$$

Es importante comparar el balance energético de un sistema renovable frente a uno basado en combustibles fósiles. Es mediante esta comparación que podremos tener un mejor entendimiento de la contribución real a la mitigación del calentamiento global por parte de los sistemas bioenergéticos.

En este estudio, los sistemas energéticos comparados son:

1. Sistema energético con combustibles fósiles: gas natural producido en Argentina usado como combustible para la generación de energía.
2. Sistema bioenergético con biomasa forestal: chips (astillas) de maderas producidos en el Noreste Argentino (NEA) y transportados hasta Tucumán para ser utilizados en una planta de producción de vapor para la generación de energía en un ingenio azucarero.

La figura 1 muestra un diagrama de flujo de los componentes para un sistema fósil (gas natural) y uno bioenergético (astillas de madera).

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

En este estudio, los límites del sistema para el gas natural comprenden desde la producción del gas natural, su distribución y combustión en caldera.

En el caso de las astillas de madera, los límites del sistema involucran desde la carga de los chips en origen (región NEA), transporte de los mismos en camión, descarga en el ingenio y combustión en caldera.

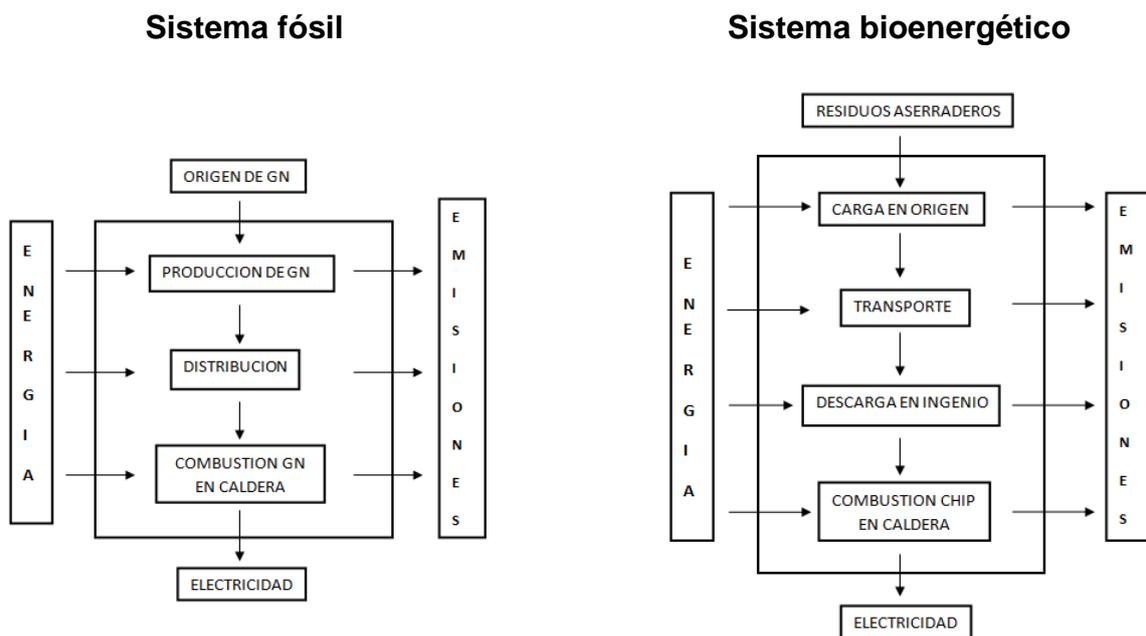


Figura 1. Diagrama de flujo para sistema fósil y bioenergético.

Se diferencian dos etapas dentro de los sistemas a los fines de realizar los cálculos del balance de energía y emisiones correspondientes: una etapa indirecta que involucra los procesos para obtención de los combustibles y una directa relacionada con el proceso de combustión en caldera.

De acuerdo con Schlamadinger et al. (1997), cuando se comparan dos sistemas de energía es importante seleccionar y definir una unidad funcional (UF) que debe ser la misma en todos los casos de estudio. En este estudio, la unidad funcional era un MWh de electricidad producido a partir de los sistemas de bioenergía y el de combustibles fósiles.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

La recopilación de datos para el análisis energético del uso de astillas de madera para la producción de energía dentro de un ingenio azucarero típico se realizó a partir de entrevistas personales y bibliografía disponible (tabla 1).

Tabla 1: Parámetros operativos promedios característicos de un Ingenio azucarero de la provincia de Tucumán.

PARAMETRO	CARACTERISTICAS	REFERENCIA
Capacidad de molienda	10.000 t/d	(Andrade, C., 2019)
Eficiencia de caldera con gas natural	70 %	(Andrade, C., 2019)
Eficiencia de la caldera con biomasa	75 %	(Andrade, C., 2019)
Eficiencia de la combustión con gas natural	80 %	(Andrade, C., 2019)
Eficiencia de la combustión con astillas de madera	75 %	(Andrade, C., 2019)
Eficiencia del turbogenerador	38 %	(Andrade, C., 2019)
ASTILLAS DE MADERA		
Humedad	50 %	(Uasuf, A., 2019)
PCI	12 MJ/Kg	(Andrade, C., 2019)
GAS NATURAL		
PCI	34,75 MJ/m ³	(Di Bacco, G., 2019)

Para nuestro caso de estudio se consideró que el bagazo obtenido no cubre toda la demanda energética de la fábrica, situación normal en los ingenios, de ahí la necesidad de incorporar las astillas o chips de madera. Las calderas de los ingenios son bagaceras y diseñadas para el uso con biomasa como combustible. Cuando se incorpora gas natural a las calderas, la eficiencia resulta menor. Se considera una combustión completa. La energía consumida en el proceso fabril proviene en su gran mayoría del aprovechamiento del bagazo para producir vapor que se transforma en energía eléctrica, trabajo en las máquinas térmicas y que sirve además como elemento calefactor.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

En este estudio se denomina energía indirecta a la energía que se usa para generar el combustible. Cuando se habla de un sistema fósil, en base a gas natural, esta energía indirecta se refiere a la energía involucrada en la producción y distribución del gas. Si se trata de un sistema bioenergético a base de chips de madera, esta energía corresponde a la carga, transporte y descarga del chip.

La energía indirecta fue determinada por medio de factores de eficiencia. Estos factores comprenden la energía consumida durante el proceso como, por ejemplo, durante la extracción, transporte y distribución del combustible. Se asume que las pérdidas con cada sistema corresponden a las energías indirectas en cada caso. Un resumen de las energías indirectas involucradas en cada sistema energético se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Comparación de las energías indirectas en los dos sistemas energéticos.

Combustible usado	Eficiencia %	Energía indirecta (MWh/MWh_{combustible})
Gas Natural ^a	95	0,05
Chips Madera ^b	81	0,19

^a Eficiencia promedio del gas natural tomada de Gustavsson y Karlsson (2002); Hekkert et. al. (2005).

^b Eficiencia de producción del chip de madera, considerando un PCI de 12.000 MJ/tonelada (Andrade, C., 2019).

3.1.1. Energías producidas

Se refiere a la energía final obtenida en forma de electricidad en el turbogenerador de contrapresión del ingenio y de vapor de escape o baja presión a partir del uso de astillas o chips de madera en comparación de aquella energía obtenida cuando se parte de gas natural como fuente de energía.

Para determinar la energía final obtenida con cada combustible, en el proceso de obtención de energía eléctrica, se realiza un balance de energía de ambos sistemas por separado. Este balance permite conocer, mediante la cantidad de energía que ingresa al sistema, la que puede obtenerse de él. La figura 2 muestra el esquema

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

correspondiente a la obtención de energía con los ingresos y los productos que salen del mismo y que son considerados en estos cálculos dentro del ingenio partiendo de gas natural y de chips de madera.

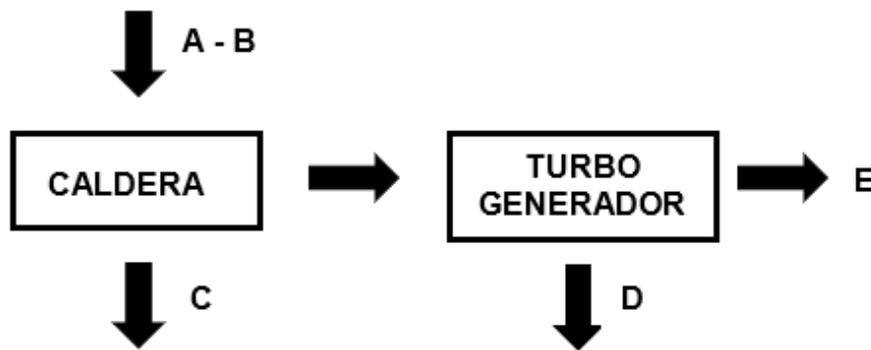


Figura 2. Esquema del balance de energías para cada combustible.

De acuerdo con este esquema, el balance de energía resulta en la expresión de la ecuación 2:

$$A - B = C + D + E \quad (\text{ecuación 2})$$

En donde:

A: Energía propia del combustible con la que ingresa en el sistema = PCI

B: Energías indirectas involucradas en la obtención del combustible = dato

C: Pérdidas del sistema = $PCI * (1 - \text{ef combustión} * \text{ef caldera})$

D: Energía obtenida en forma de electricidad = $PCI * \text{ef combustión} * \text{ef caldera} * \text{ef turbogenerador}$

E: Energía obtenida en forma de vapor de escape.

De esta manera, ingresan al sistema del ingenio la energía propia del combustible (ya sea gas natural o astillas de madera) representada por su poder calorífico inferior (PCI) menos las energías indirectas involucradas en la obtención de cada combustible. En cuanto a los flujos de energías salientes, tenemos las pérdidas de del sistema, el vapor de escape o de baja presión y finalmente la energía eléctrica producto del accionar del turbogenerador.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

Dado que los términos A, B, C y D del balance son datos o pueden ser calculados directamente, nos queda solo despejar el término E que será calculado utilizando la ecuación 3:

$$E = A - B - C - D \quad (\text{ecuación 3})$$

Para obtener los valores correspondientes a cada término, sabemos que 1 kg de combustible genera su valor de PCI en MWh. Se adopta la unidad MWh/Kg de combustible. Como el objetivo es generar 1 MWh de electricidad, entonces se pueden calcular cuántos Kg de cada combustible serían necesarios para tal fin.

Una vez calculado el valor de E, y teniendo en cuenta la definición de la tasa de retorno energético, la relación entre la energía disponible de una fuente de energía y la energía gastada en su producción, se plantea la ecuación correspondiente para su cálculo. De esta manera se llega a la ecuación 4:

$$\text{TRE} = \frac{D+E}{B} \quad (\text{ecuación 4})$$

3.1.2. Ahorro en el consumo de energía fósil

El uso de un combustible renovable alternativo supone el ahorro del uso de una fuente fósil. Para calcular la energía fósil evitada cuando se utiliza biomasa como combustible alternativo, se debe restar la energía fósil utilizada en la producción y transporte de los chips de madera, de la energía fósil remplazada (gas natural). En este estudio, esta energía involucrada en la producción y transporte de los chips se denomina energía indirecta.

3.2. Análisis Ambiental

El análisis ambiental se refiere a las emisiones de GEI provenientes del uso de biomasa forestal en comparación de aquellas provenientes del uso de gas natural

3.2.1. Emisiones de GEI

Cada etapa del proceso tiene sus correspondientes emisiones de GEI.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

La recopilación de los datos utilizados en el análisis de las emisiones de GEI fue obtenida de la literatura disponible y data base de análisis de ciclo de vida. (tablas 3 y 4).

Tabla 3: Comparación de las emisiones de GEI asociadas del proceso de combustión en los dos sistemas energéticos (emisiones directas).

Sistema Energético	Combustible usado	GEI (Kg CO ₂ eq/MWh)		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
1	Gas Natural ^a	233,9	0,13	0,36
2	Chips Madera ^b	0	0	0

^a Emisiones de GEI tomadas de database de Análisis Ciclo de Vida GEMIS 4.5 (gas heating -D E-2010), Uasuf (2010)

^b Emisiones directas de GEI a partir de la combustión de la biomasa se consideran iguales a cero Uasuf (2010).

Las emisiones de GEI provenientes de la combustión de la biomasa son consideradas cero ya que el gas emitido o liberado será absorbido por los árboles en el próximo ciclo de crecimiento, ciclo del carbono (Uasuf, 2010).

La unidad para expresar las emisiones contaminantes de GEI es Kg CO₂eq/MWh. Para llegar a esta unidad, se multiplica el valor de las emisiones de cada uno de los tres gases en Kg/UF por el correspondiente factor de conversión (Potencial de Calentamiento Global: PCG). Por definición, el PCG del CO₂ es 1, mientras que para CH₄ es 28 y para NO₂ es 298. Se asumió un tiempo horizonte de 100 años. (IPCC, 2007).

Tabla 4: Comparación de las emisiones indirectas de GEI en los dos sistemas energéticos.

Combustible usado	GEI (Kg CO ₂ eq/MWh)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Gas Natural ^a	11,46	6,44	0,14
Chips Madera ^b	239,84	0,42	2,47

^a Emisiones de GEI tomadas de database de Análisis Ciclo de Vida GEMIS 4.5 (distribución del gas-US-2010), Uasuf (2010).

^b Emisiones de GEI tomadas de Uasuf (2010)

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

3.2.2. Emisiones fósiles evitadas

Las emisiones GEI evitadas se calculan restando las emisiones provenientes del sistema bioenergético y aquellas provenientes del sistema fósil. Estas emisiones evitadas representan las emisiones netas beneficiosas que se espera tener cuando se pasa de un sistema fósil a uno renovable. La unidad usada para determinar las emisiones evitadas es Kg CO₂eq/MWh.

3.3. Análisis económico

El análisis económico se refiere a los costos involucrados en la incorporación de biomasa forestal al proceso de un ingenio azucarero en comparación a los costos generados por el actual uso de gas natural.

En este estudio, la unidad funcional es el MWh de electricidad producido a partir de un sistema de bioenergía y el de combustible fósil.

La recopilación de los datos para el análisis económico se realizó a partir de entrevistas personales y bibliografía disponible (tabla 5).

Tabla 5. Parámetros involucrados en los cálculos económicos.

PARAMETRO	CARACTERISTICAS	REFERENCIA
CHIPS		
Precio	USD 14,2/t	(Uasuf, A., 2019)
PCI	12 MJ/Kg	(Andrade, C., 2019)
GAS NATURAL		
Precio	USD 0,18/m ³	(Di Bacco, G., 2019)
PCI	34,75 MJ/m ³	(Di Bacco, G., 2019)

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Análisis Energético

4.1.1. Energías producidas

El balance de energías para un sistema a base de gas natural y a base de astillas de madera permitirá definir finalmente cuales son las energías involucradas, invertidas y producidas, en cada caso y poder comparar energéticamente ambas fuentes. La tabla 6 muestra un resumen de tales energías expresadas según la nomenclatura de la ecuación 2 y en MWh/Kg de combustible para los sistemas comparados.

Tabla 6. Energías involucradas en ambos sistemas energéticos.

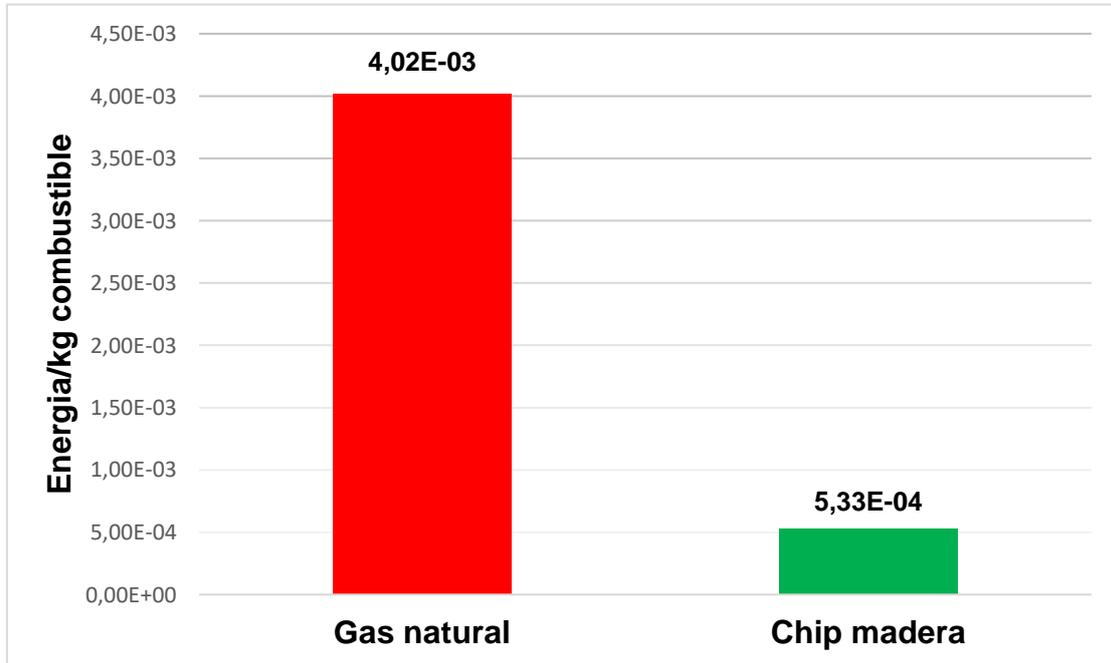
(MWh/Kg)	GAS NATURAL	ASTILLAS DE MADERA
A	1,35E-02	3,36E-03
B	6,76E-04	6,38E-04
C	5,95E-03	1,47E-03
D	2,88E-03	7,18E-04
E	4,02E-03	5,33E-04

Cuando se parte de un combustible fósil, la energía final producida en forma de vapor (término E de la ecuación 2) en un ingenio tipo de la provincia de Tucumán es de 4,02E-03 MWh/Kg_{gas natural}. Mientras que, si se usa biomasa como alternativa, el balance es de 5,33E-04 MWh/Kg_{chip}. Es decir, se obtiene 86% menos de energía por kg de combustible si esa fuente es el chip de madera (figura 3). Por lo tanto, desde el punto de vista energético, la incorporación del chip de madera no resolvería el problema de la producción de energía en los ingenios de la provincia de Tucumán.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

Figura 3: Energía en forma de vapor producida por Kg de combustible para sistema fósil y bioenergético.



Para determinar las cantidades necesarias de cada combustible para generar 1 MWh de energía eléctrica, se utilizan los valores de PCI de ambas fuentes en MWh/Kg. Para ello, en el caso del gas natural, se convierten los m³ en Kg usando su densidad (0,720 Kg/m³, tabla 7).

Tabla 7. Comparación de la cantidad necesaria de cada combustible para la obtención de 1 MWh de electricidad en el ingenio.

	PCI	PCI (MWh/Kg)	Combustible necesario (Kg) para producir 1 MWh electricidad
GAS NATURAL	34,75 MJ/m ³	1,35E-2	74,6
ASTILLAS MADERA	12 MJ/Kg	3,33E-03	299,76

Es decir, se necesita 4 veces más de biomasa en forma de chip de madera que de gas natural para producir la misma cantidad de energía.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

En este estudio, se tomó una humedad del 50% para el chip de madera. Si se removiera esta humedad a través de un pre tratamiento térmico de secado del chip o astilla de madera, se incrementaría el poder calorífico de este material ya que su valor está directamente relacionado al contenido de humedad. Una baja humedad aseguraría que los chips se quemaran completa y uniformemente dando como resultado un flujo constante de energía térmica con un contenido mínimo de cenizas (Bergman, 2005).

4.1.2. Ahorro en el consumo de energía fósil:

En este estudio, el total de energía indirecta consumida en el sistema bioenergético (carga, transporte y descarga de chips de madera) fue de 0,25 MWh_{chip}/MWh_{electricidad} y equivale a la energía fósil utilizada o invertida para la producción de este combustible. Este número es sensiblemente menor a la energía total de gas natural consumida por el sistema fósil (1,31 MWh_{gas natural}/MWh_{electricidad} producida). Es decir, que si se utiliza biomasa como combustible alternativo se evita el consumo de energía de 1,06 MWh_{chip}/MWh_{electricidad} (tabla 8).

Tabla 8. Energía fósil evitada cuando se utiliza chips de madera como combustible alternativo.

	Energía MWh _{combustible} /MWh _{electricidad}
Total de energía consumida de gas natural	1,31
Energía fósil usada para la producción y el transporte de chips de madera (energía indirecta)	0,25
Energía fósil evitada	1,06

4.1.3. Tasa de retorno energético (TRE)

Una vez calculadas las energías invertidas y obtenidas queda relacionar estos valores para obtener el valor de TRE de cada sistema de producción propuesto en este estudio.

En este estudio, la obtención de la TRE de cada sistema se realizó empleando la ecuación 4. Los resultados obtenidos se encuentran expresados en la tabla 9.

$$\text{TRE} = \frac{\text{E obtenida}}{\text{E invertida}} = \frac{\text{D+E}}{\text{B}} \quad (\text{ecuación 4})$$

Tabla 9. Valores de TRE obtenidos para los sistemas de producción propuestos.

	GAS NATURAL	CHIPS DE MADERA
TRE [MWh/MWh]	10,2	1,96

La TRE representa una medida útil para comparar a todas las tecnologías de extracción/conversión de energía, o para comparar el proceso de extracción/conversión de un determinado recurso en el tiempo.

Un cociente menor o igual que 1 en la TRE indica que la energía obtenida de la fuente es menor o igual a la energía invertida. Por el contrario, un cociente mayor que 1 indica que la energía obtenida es mayor que la energía invertida y queda, en consecuencia, un saldo neto positivo para ser aprovechado. Lo importante es que este valor sea lo más grande posible, pues su magnitud determinará la viabilidad del combustible evaluado.

En este caso, la tasa calculada para el gas natural fue de 10,2; mientras que para las astillas o chips de madera fue de 1,96. Esto se debe a que por lo general las energías renovables tienen valores bajos de TRE si se las compara con los combustibles fósiles.

Como aspecto positivo a destacar de la mayoría de las energías renovables, es que generan directamente electricidad. Asimismo, no debe dejar de tenerse en cuenta que una diferencia significativa entre las TRE calculadas para los

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

combustibles fósiles y para las tecnologías renovables está en la naturaleza intermitente de las estas últimas, aunque en el caso de la biomasa se ha logrado en los últimos tiempos una generación continua de energía, tanto térmica como eléctrica.

Otro aspecto fundamental que no debe dejar de tenerse en cuenta es el impacto ambiental que involucra todo el proceso de obtención de energía.

4.2. Análisis Ambiental:

4.2.1. Emisiones de GEI:

El total de emisiones de GEI fueron determinadas por la sumatoria de las emisiones directas e indirectas. Estos datos totales se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Emisiones GEI totales para ambos sistemas energéticos.

	EMISIONES GEI (Kg CO₂eq/MWh)			TOTAL EMISIONES GEI (Kg CO₂eq/MWh)
	CO₂	CH₄	N₂O	
GAS NATURAL	245,36	6,57	0,5	252,61
ASTILLAS DE MADERA	239,84	0,42	2,41	242,71

De la tabla 10 se observa que el sistema fósil, suma 252,61 Kg CO₂eq/MWh_{electricidad} mientras que, el uso de astillas/chip de madera suma un total de 242,71 Kg CO₂eq/MWh_{electricidad}. Es decir que, si hay una ventaja desde el punto de vista ambiental si se reemplaza el uso de gas natural por el de chip de madera. Aunque esta diferencia parezca ser poco significativa, se debe tener en cuenta que la diferencia en la disminución de emisiones será notable si se tiene en cuenta cada uno de los camiones que transportan esta biomasa a destino.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

En la combustión de la biomasa se considera que las emisiones tienen el balance neutro de CO₂. Realmente sí que se produce CO₂ como resultado de la combustión de la biomasa, pero esto se considera así porque se plantea que la combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero ya el CO₂ que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el CO₂ que absorben y liberan continuamente las plantas y árboles para su crecimiento a través del ciclo del carbono). De manera que podemos considerar que en la etapa de combustión el balance de emisiones es favorable.

La tabla 11 muestra las emisiones de GEI involucradas en las etapas de transporte, carga y descarga en destino del chip. La etapa que más emisiones genera es el transporte de los chips de madera desde la región NEA a 900 km de Tucumán con 220,74; 0,36 y 2,26 KgCO₂eq/MWh para los tres gases respectivamente.

Tabla 11. Emisiones de GEI indirectas para astillas o chip de madera.

ETAPA	EMISIONES GEI (Kg CO ₂ eq/MWh)			TOTAL EMISIONES GEI (Kg CO ₂ eq/MWh)
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Transporte	220,74	0,36	2,26	223,36
Carga y descarga	19,1	0,05	0,21	19,3
Total	239,84	0,42	2,41	242,7

Si se redujeran las distancias entre origen de las cargas de las astillas de madera y el lugar de destino, se reduciría el transporte y por ende las emisiones involucradas. De esta manera se disminuirá significativamente el total de las emisiones para el uso de biomasa. Esto podría conseguirse con plantaciones de biomasa energética en Tucumán cercanas a los ingenios.

Si consideramos la naturaleza húmeda de la biomasa, las emisiones de GEI involucradas en el transporte y manipulación de los chips de madera desde el

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

origen al destino se pueden disminuir con su pelletización. Los pellets poseen mayor densidad energética, ocupan menos volumen y por lo tanto se cargarían mayores cantidades por camión. Otra alternativa importante que no debe dejar de tenerse en cuenta es el transporte ferroviario en vez del uso de camiones.

4.2.2. Emisiones fósiles evitadas

Las emisiones evitadas si se usa astillas o chips de madera en lugar de gas natural son de 10 KgCO₂eq/MWh_{electricidad} (figura 4), implicando un potencial de reducción del 4% (tabla 12).

Figura 4. Emisiones de GEI netas evitadas cuando se utiliza chips de madera como combustible alternativo.

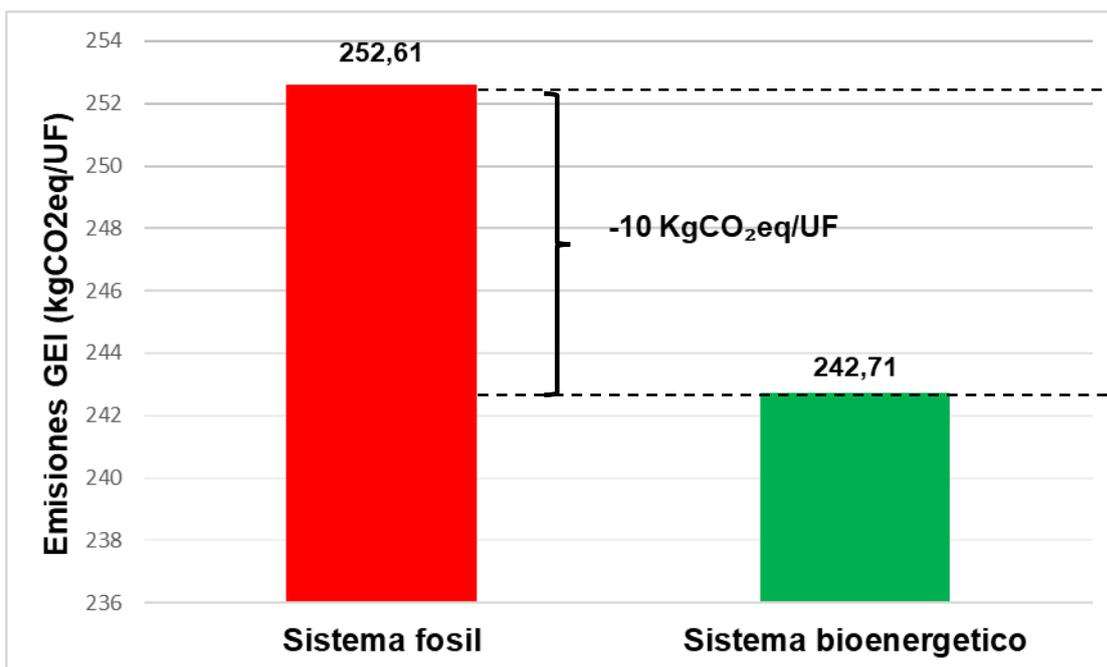


Tabla 12. Potencial de reducción de emisiones GEI cuando se utiliza biomasa como combustible.

Sistema Energético	Emisiones Netas Evitadas (KgCO ₂ eq/MWh)	Potencial reducción%
Sistema bioenergético vs. sistema fósil	10	4

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

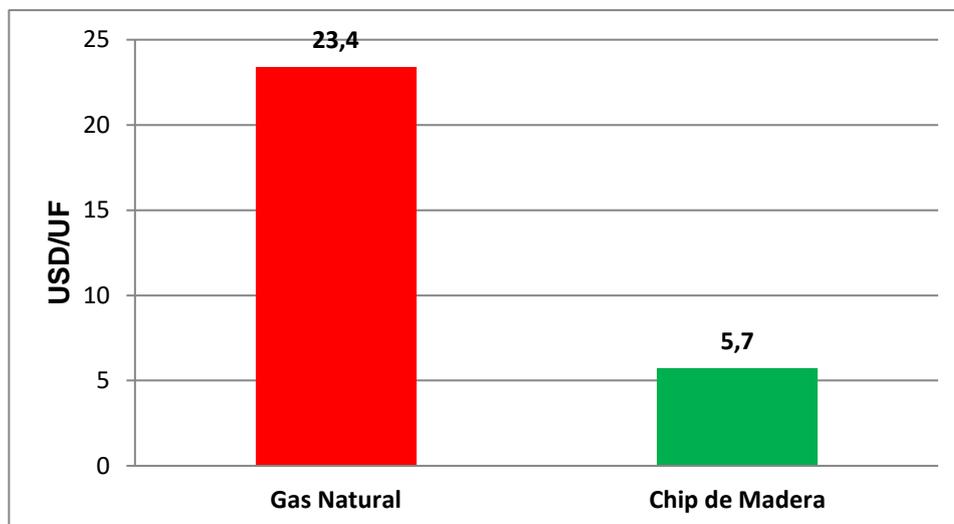
Con la pelletización de la biomasa se podría conseguir bajar la humedad de 50% a 25%, de manera que el potencial de reducción de emisiones puede duplicarse a 10% aproximadamente.

4.3. Análisis económico

La comparación de costos para ambos sistemas energéticos se realizó en base a la eficiencia de conversión de cada combustible y se expresa en USD/MWh de electricidad producida.

Producir 1 MWh de electricidad en un ingenio a partir de gas natural cuesta USD 23,4; mientras que, si se utiliza chips de madera, USD 5,7. La figura 5 muestra los costos involucrados para obtener 1 MWh de electricidad utilizando gas natural y chips de madera como combustibles.

Figura 5. Costos involucrados para la producción de energía eléctrica a partir de gas natural y chips de madera.



Se espera que el uso creciente de biomasa para la generación de energía cree una demanda de mercado de recursos bioenergéticos. Como consecuencia, el transporte de biomasa será una condición para el desarrollo de una cadena de suministro de bioenergía. Sin embargo, el transporte y la producción de biomasa

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

significan tanto un mayor nivel de emisiones como un mayor aporte neto de energía que podría reducir en cierta medida los beneficios. Por lo tanto, una cuestión clave a evaluar es si los sistemas de suministro de bioenergía a larga distancia son ambientalmente viables y ecológicamente sostenibles (Forsberg, 2000). El balance general de energía y GEI de la biomasa comercializada debe ser positivo (Junginger et al., 2008).

5. CONCLUSIONES

- Los sistemas de bioenergéticos, mucho más limpios que los combustibles fósiles, no poseen tasas de energía inferiores a la de los combustibles fósiles. En otras palabras, requieren para su funcionamiento de un volumen significativo de entradas de energía que hacen que las salidas o egresos de energía lleguen a un nivel muy modesto.
- El reemplazo del gas natural por astillas de madera para la producción de energía eléctrica en un ingenio azucarero no resulta ser energéticamente conveniente. La TRE para el gas natural (10,2) es 5 veces mayor que la de las astillas de madera (1,96).
- Sin embargo, ambientalmente, si existe una ventaja del uso de una fuente renovable frente a la fósil para obtener energía. Esta diferencia en la disminución de emisiones a favor del reemplazo de gas natural por biomasa forestal será notable si se tiene en cuenta la sumatoria en las distancias recorridas.
- Financieramente, el uso de astillas o chips de madera para la producción de energía eléctrica es menos costoso que si se utiliza un combustible fósil como el gas natural. Producir 1 MWh de electricidad en un ingenio a partir de gas natural cuesta USD 23,4; mientras que, si se utiliza chips de madera, USD 5,7.
- El pretratamiento de la biomasa por pelletización puede ser una solución viable para optimizar el consumo energético del sistema y una reducción considerable de sus emisiones asociadas. De acuerdo a este estudio, se puede alcanzar una reducción del 50% de la humedad de los chips.
- Se debe mejorar la logística del chip. El transporte tiene un alto impacto en el consumo de energía. Tanto los consumos de energía involucrados como sus emisiones respectivas pueden reducirse drásticamente y aumentar el potencial de reducción si el transporte de la biomasa pretratada es realizado mediante trenes.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

- Tucumán no cuenta con un flujo continuo de materia prima biomásica para ser incorporada a los ingenios. Una alternativa al traslado de chips desde la región del NEA es la instalación de cultivos energéticos de pino y eucalipto en la provincia de Tucumán.

6. BIBLIOGRAFIA

- **Andrade C., 2019.** Jefe Sección Calderas Ingenio tucumano. Entrevista personal.
- **Basis Project, 2015.** Report of conversion efficiency of biomass. Basis-Biomass Availability and Sustainability Information System. Version #2, July 2015.
- **Bergman, P.C.A, Boersma, A.R., Kiel, J.H.A., Zwart, R.W.H., 2005.** Development of torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. BIOCOAL concept version, ECN report.
- **Cárdenas, G.J., 2018.** Caminos de la biomasa (3era nota). La mirada de la EEAOC. Avance Agroindustrial 39-2. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres EEAOC.
- **Cárdenas, G.J., 2017.** Clases Especialización Ingeniería Bioenergética, Seminario Biorrefinerías.
- **Di Bacco, G., 2019.** Oficina Técnica ingenio tucumano. Entrevista personal.
- **EPA, 2019.** United States Environmental Protection Agency. www.epa.gov.
- **Forsberg, G., 2000.** Biomass energy transport. Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method. Biomass and Bioenergy, 19, 17-30.
- **Franck Colombres F. J., Golato M.A., Morales W.D., Cruz, C., Paz, D., 2011.** Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. Tomo 88 (2).
- **Gemis, 2010.** Global Emission Model of Integrated Systems (GEMIS) Version 4.5. Available at: www.oeko.de.
- **Gustavsson, L., Karlsson, A., 2002.** A system perspective on the heating of detached houses. Energy policy, 30, 552-574.
- **Hamelinck, C.N., Suurs, R.A.A., Faaij A.P.C., 2005.** International bioenergy transport costs and energy balance. Biomass and Bioenergy, 29, 114-124.

“Análisis energético, ambiental y económico del uso de astillas de madera para la producción de energía eléctrica en la industria azucarera de Tucumán”

Alumno: María Julieta Loi

- **IPCC, 2007. IPCC, 2007.** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York.
- **Junginger, M. de Wit, M., Sikkema, R., Faaij, A., 2008.** International bioenergy trade in the Netherlands. Biomass and Bioenergy, 32, 8, 672-687.
- **Menéndez, J.E., Hilbert, J. A., 2013.** Cuantificación y uso de la biomasa de residuos de cultivos en Argentina para bioenergía. INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Informes Técnicos bioenergía 2013. Año 2 N°4.
- **Ministerio de Agroindustria de la Nación, 2015.** Informe Nacional de relevamiento censal de aserraderos, Región NEA. Año 2015.
- **Ministerio de Hacienda y Energía de la Nación.** ¿Qué son las energías renovables? Disponible en: www.argentina.gob.ar.
- **REN 21, 2019.** Renewables 2019, Global Status Report. Renewable energy policy network for the 21 st century. Disponible en: https://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf
- **Schlamadinger, B., Apps, M., Bohlin, F., Gustavsson, L., Jungmeier, G., Marland, G., Pingoud, K., Savolainen, I., 1997.** Towards a Standard Methodology for Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems in Comparison with Fossil Energy Systems. Biomass and Bioenergy 13, 359- 375.
- **Télam, 2018.** Claves para entender el panorama de las energías renovables en la Argentina. Disponible en: <https://www.telam.com.ar/notas/201801/236757-energias-renovables-proyectos-renovar.html>.
- **Uasuf, A., 2010.** Economic and environmental assessment of an international wood pellets supply chain: a case study of wood pellets export from northeast Argentina to Europe. Chapter 4: Energy consumption and greenhouse gas emissions of different bioenergy systems in comparison with fossil fuel energy systems.
- **Uasuf, A., Hilbert, J. A., 2012.** Uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en Argentina. INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Informes Técnicos bioenergía 2012. Año 1 N°3.