

Estudio preliminar del aprovechamiento de sorgo fibroso como combustible para abastecer energéticamente un ingenio durante la interzafra en Tucumán

M. Carolina Cruz*, Guillermo De Boeck* y Dora Paz*

RESUMEN

Con el propósito de eliminar el consumo de gas natural de un ingenio ubicado en la localidad de Leales en el periodo de interzafra (150 días), donde solo funciona la refinera de azúcar y la destilería de alcohol; se realizó un análisis de la factibilidad técnica para reemplazar este combustible fósil por un nuevo combustible de origen renovable: sorgo fibroso. Se realizó la caracterización físico-química y energética del mismo y se expuso la situación actual de un ingenio que consume 90.000 Nm³ de gas natural por día durante la inter-zafra. Se propone un esquema energético renovable alternativo, que implica utilizar un combustible renovable compuesto por 30% de sorgo fibroso + 70% de bagazo de caña de azúcar. Los valores de las propiedades físico químicas y energéticas obtenidos resultaron adecuados para su uso como combustible. El esquema energético renovable alternativo requiere de 391,40 t/d (4,53 kg/s) de combustible mezcla para reemplazar el gas natural consumido durante la inter-zafra, que equivale a un total de 45.490 toneladas de sorgo fibroso (979 ha de superficie de cultivo) considerando el sorgo extra para reemplazar el bagazo que se usaría en la zafra.

Palabras clave: biomasa, sorgo fibroso, combustible renovable.

ABSTRACT

Study of the use of fibrous sorghum as a fuel to supply energetically an sugar mill during the off season period in Tucumán

With the purpose to eliminate the consumption of natural gas from a sugar mill located in the town of Leales in the off season period, where only the sugar refinery and the alcohol distillery works; A study was carried out to replace this fossil fuel with a new fuel of renewable origin: fibrous sorghum. For this reason, the physical-chemical and energetic characterization of same was performed. Also was exposed the current situation of a sugar mill that consumes 90,000 Nm³ of natural gas per day during off season period. And energy scheme alternative renewable, which involves the use a blend fuel consisting of 30% fibrous sorghum + 70% sugar cane bagasse was postulate. The energy scheme alternative renewable requires 391.40 t/d (4.53 kg / s) of blend fuel to replace the natural gas consumed during the off season period, which amounts to a total of 45,490 tons of fibrous sorghum (979 ha), considering the sorghum extra to supply the bagasse in season.

Key words: biomass, fibrous sorghum, renewable fuel.

Fecha de recepción: 27/10/2017 - Fecha de aceptación: 20/12/2019

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC, mccruz@eeoac.org.ar

INTRODUCCIÓN

Argentina es un país que depende fuertemente de los combustibles fósiles para sus requerimientos energéticos. El petróleo y el gas natural contabilizan casi el 90% de la energía consumida, siendo el gas natural la componente más importante de la matriz energética, ya que aporta más de la mitad (54%) de toda la energía primaria (Gil *et al.*, 2015).

En los últimos años la demanda de gas natural ha sido mayor que el gas disponible, lo que ha generado cortes en el suministro de este fluido a las industrias locales en los meses de mayor actividad, con el consiguiente perjuicio económico para la actividad agroindustrial. En Tucumán, la crisis se expresa particularmente en el período aproximado de seis meses (mayo - octubre) de la zafra azucarera y cítrica, principales actividades de la provincia.

Por otro lado, el gobierno nacional está abocado a impulsar el uso de biomasa con fines energéticos y promocionar el potencial de una energía renovable en todo el país mediante el proyecto Promoción de la Energía Derivada de Biomasa (PROBIOMASA). En este sentido, la Ley Nacional 27.191, modificatoria de la Ley 26.190, "Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica", establece como objetivo lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el dieciocho por ciento (18%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2023. Y en una segunda etapa aumentar la contribución de las fuentes renovables de energía hasta alcanzar el veinte por ciento (20%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2025.

Tucumán cuenta con 15 ingenios azucareros, de los cuales solo uno de ellos genera energía eléctrica excedente para vender a la red pública. Al finalizar la zafra, algunos ingenios continúan con ciertos procesos productivos (refinerías y destilerías) en la post zafra, debiendo utilizar gas natural para dichos procesos, puesto que el bagazo fue consumido en su totalidad durante la zafra.

Por otro lado, existe en la provincia un potencial para la siembra de sorgo de alta fibra, susceptible de ser aprovechado como fuente de energía. Si bien no existen antecedentes a nivel mundial de una producción comercial significativa de este cultivo energético, expertos lo recono-

cen como una materia prima potencial para la generación de energía (Casen *et al.*, 2015).

Entre los sorgos energéticos, se encuentra el sorgo fibroso o de alta fibra, que posee entre sus características más importantes una alta producción de biomasa y un buen nivel de fibras. Además, este cultivo requiere escasos recursos agroclimáticos para la obtención de altos rindes, permitiendo su incorporación en tierras marginales con problemas de napas freáticas y/o salinidad, ayudando así a la recuperación de suelos degradados, logrando además del beneficio agronómico ampliar la oferta energética de la región (Fernández González *et al.*, 2012).

Antes de iniciar cualquier proyecto de aprovechamiento energético de una biomasa, debe estudiarse sus características físico-químicas y energéticas para poder utilizar la mejor tecnología aplicable. Asimismo, se debe asegurar el suministro de energía y evaluar el comportamiento de la nueva biomasa en las calderas bagaceras diseñadas para quemar bagazo, a fin de no alterar las condiciones de trabajo. Principalmente interesa conocer la humedad de la biomasa y la temperatura límite de fusión de cenizas.

El presente estudio analiza la factibilidad técnica del reemplazo del consumo de gas natural por un combustible renovable alternativo, sorgo fibroso, para el período de interzafra abasteciendo una refinería de azúcar y una destilería de alcohol.

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinaciones físicoquímicas y energéticas de sorgo fibroso para su uso como combustible.

Para cada tipo de análisis se destinaron 15 muestras, de aproximadamente 100 gr. cada una, provenientes del predio de la EEAO, ubicado en Las Talitas, Tucumán, Argentina (26° 47' 22" latitud Sur y 65° 11' 47" longitud Oeste).

Los estudios físicoquímicos que se realizaron son: humedad (W), cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV), carbono fijo (CF); contenido de fibra; composición elemental y temperatura de fusión de cenizas. Como estudio energético se determinó: poder calorífico superior (PCS).

En la Tabla 1 se puede ver el tipo de determinación, el equipo y el procedimiento empleado para los análisis físicoquímicos y energéticos del sorgo fibroso.

Tabla 1. Detalle de las determinaciones físicoquímicas y energéticas del sorgo fibroso.

	Determinación	Equipo	Procedimiento
Caracterización físicoquímica	Humedad (W)	Estufa marca ORL	Según norma ASTM D 5142 modificada
	Cenizas (CZ)	Analizador termogravimétrico (TGA), marca LECO	Según norma ASTM D 5102 modificada
	Sólidos Volátiles (SV)		
	Carbono fijo (CF)		
	Análisis elemental (C,O,H,N,S)	Analizador elemental, marca Perkin Elmer	Manual del usuario de Perkin Elmer
Contenido de fibra (%)	Lavarropas automatico y estufa	Técnica puesta a punto por el Laboratorio de Química de Productos Agroindustriales de la EEAO	
Caracterización energética	Poder calorífico superior (PCS)	Bomba calorimétrica automatizada, marca IKA	Según norma ASTM D 2015-96 modificada
	Temperatura de fusión de cenizas (C°)	Equipo AF 700	Según norma ASTM D1857

Los procedimientos de cómo se preparó la muestra para la realización de los análisis propuestos, se encuentran descritos en el artículo de Cruz *et al.*, (2016) y Diez *et al.*, (2000).

Los equipos utilizados para las determinaciones pertenecen al Laboratorio de Evaluación y Mediciones Industriales (LEMI) y al Laboratorio de Química de Productos Agroindustriales, con excepción del equipo analizador elemental que corresponde al Núcleo de Excelencia en Sistemas Térmicos (NEST), perteneciente a la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI).

Refinación de azúcar y producción de etanol durante el período de interzafra. Situación actual.

El ingenio que se propone para el estudio está situado en el departamento Leales, Tucumán. Limita al norte con el departamento Cruz Alta, al este con la provincia de Santiago del Estero, al sur con el departamento Simoca y parte del departamento Monteros, y al oeste con los departamentos Famallá y Lules. Sus coordenadas geográficas son: 27° 15' de latitud sur (LS) y 65° de longitud oeste (LO). Forma parte de la Llanura deprimida, Subregión Salina.

La molienda de este ingenio ronda en 7500 toneladas de caña por día (TCD). El proceso de evaluación de la refinería de azúcar y la producción de etanol durante la interzafra consistió en, como primera medida, la toma de datos de los valores normales de consumo para ambos procesos; seguidamente se elaboró el esquema energético actual que permitió plantear y resolver los balances de masa y energía (Figura 1), que se explican en el ítem siguiente.

El vapor se genera, por combustión exclusiva de gas natural, en calderas de baja presión, de rendimiento térmico promedio de 67%. Se generan aproximadamente 34,34 toneladas por hora de vapor vivo con una presión y

temperatura de 20 bar y 330°C. Cabe aclarar que el uso de gas natural es debido a que el bagazo fue consumido durante la zafra.

El consumo promedio de gas natural que tiene la caldera es de aproximadamente 90.000 Nm³ por día.

El turbogenerador de contrapresión existente tiene una eficiencia de 85%. El vapor escape resultante tiene una presión y temperatura de 2 bar y 125°C.

La refinería procesa 500 toneladas por día de azúcar crudo y para ello requiere aproximadamente de 550 toneladas de vapor escape por día.

La destilería produce 65 metros cúbicos por día de alcohol, con un consumo de vapor escape de 4,2 kg/l, lo que equivale a aproximadamente 275 toneladas de vapor escape por día.

El consumo de energía eléctrica del proceso completo es de aproximadamente 1570 kW.

Se definió el esquema que representa la situación actual con los valores de consumo y generación normales capturados durante el período de inter-zafra que se detallan a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de entrada de la situación actual.

	Presión [bar]	Temperatura [°C]	Potencia [kW]	Otros
Sala de calderas	-	-	-	η = 67%
Vapor vivo	20	330	-	-
Vapor escape	2	125	-	-
Turbogenerador	-	-	1570	η = 85%
Consumo de gas natural	-	-	-	90.000 m ³ /d
Consumo de vapor de refinería	-	-	-	550 t/d
Consumo de vapor de destilería	-	-	-	275 t/d

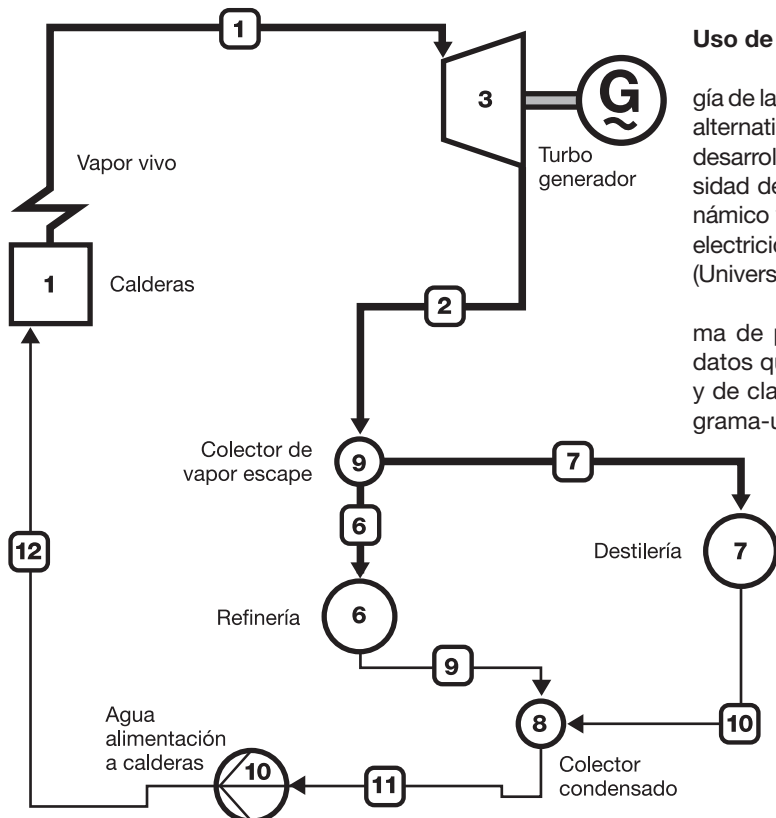


Figura 1. Esquema energético realizado en Cycle Tempo 5.0 que representa la situación actual en el período de interzafra.

Uso de Cycle Tempo 5.0 para cálculos energéticos.

Para la resolución de los balances de masa y energía de la situación actual y del esquema energético renovable alternativo, se utilizó un software de simulación energético desarrollado por el departamento de Energía de la Universidad de Delft, Holanda, el cual permite el análisis termodinámico y la optimización de sistemas para la producción de electricidad, calor y refrigeración, llamado Cycle Tempo 5.0 (Universidad Tecnológica de Delft, Holanda, 2010).

Este simulador presenta como ventaja un esquema de programación avanzado con una amplia base de datos que lo convierte en un programa altamente sensible y de clara estructuración que facilita la interactividad programa-usuario. Como desventaja, puede mencionarse que los resultados se muestran en unidades internacionales y con sistema de numeración inglés, los cuales no pueden ser modificados por el usuario (De Boeck *et al.*, 2011).

El software para cada equipo realiza el siguiente balance energético como se indica en la Figura 2 y Ecuación 1.

Para los equipos con corrientes que intercambian calor, se calcula también la transferencia térmica.

Planteo del esquema energético renovable alternativo.

El esquema alternativo corresponde al análisis del mismo esquema energético que la

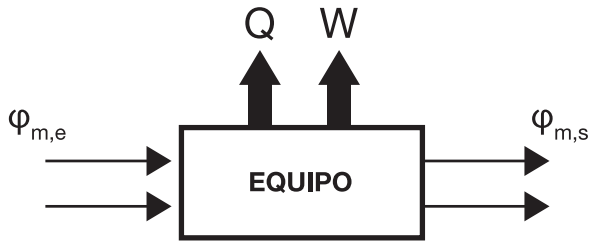


Figura 2. Corriente de entrada y salida para cada equipo.

Ecuación 1

$$\sum_j^n 1 \phi_{m,e}(j) * h_e(j) - \sum_i^n 1 \phi_{m,s}(i) * h_s(i) = Q + W$$

Donde:

- $\phi_{m,e}(j)$: Flujo másico de entrada del componente j, en [kg/s].
- $h_e(j)$: Entalpia de entrada del componente j, en [kJ/kg]
- $\phi_{m,s}(i)$: Flujo másico de salida del componente i, en [kg/s].
- $h_s(i)$: Entalpia de salida del componente i, en [kJ/kg]
- Q: Calor en, [kW].
- W: Trabajo en, [kW].

situación actual, con la diferencia que el combustible utilizado en calderas es un combustible de origen renovable (sorgo fibroso).

De los balances de materia y energía que se resuelven con el simulador, se determina la energía del combustible necesaria para el sistema, a partir de la expresión siguiente:

Ecuación 2

$$Energía\ comb. = Gc * PCIc$$

Donde:

- Energía comb. = Energía del combustible, en kW.
- Gc = Caudal del combustible, en kg/s.
- PCIc = Poder calorífico inferior del combustible, en kJ/kg.

Poder calorífico inferior del combustible renovable.

Para los cálculos del poder calorífico inferior (PCI) del sorgo fibroso, se sigue el método propuesto por Hugot (1986):

Ecuación 3

$$PCI = PCS * (1 - w) - 2442 * E$$

Donde:

- PCS = Poder calorífico superior en base seca, en [kJ/kg de combustible seco]
- PCI = Poder calorífico inferior en base húmeda, en [kJ/kg de combustible].
- E = Cantidad de agua en los gases de combustión, en [kg de agua/kg de combustible]

Ecuación 4

$$E = 9 * H * (1 - Cz) * (1 - w) + w$$

Donde:

- w= Contenido de agua del combustible, en [kg de agua/kg de combustible]
- H= Contenido de hidrógeno en la materia seca libre de ceniza, en [kg H2/kg de combustible seco libre de ceniza]
- Cz= Contenido de ceniza de la materia seca, en [kg de ceniza/kg de combustible seco]

Entonces reemplazando:

Ecuación 5

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

Para realizar el cálculo del PCI de sorgo fibroso, se tomó los valores de PCS, contenidos de Hidrógeno y ceniza, determinadas en la caracterización realizada. Se considera que el sorgo fibroso, en el momento de la combustión, tiene una humedad del 30%.

Para lograr una humedad de la biomasa del 30%, en primer lugar se realizaría la cosecha del sorgo fibroso a una humedad del 50% según recomienda May *et al.*, (2013). Luego, una vez transportado al ingenio se dejaría en un playón en las inmediaciones del mismo, para su secado natural a cielo abierto donde, según AVEBION, (2012), luego de dos meses cualquier biomasa se seca hasta el 30% en contenido de agua, lo cual dependerá también del clima de la zona. Con esto se lograría la humedad deseada para su combustión en la caldera.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Determinaciones físicoquímicas de sorgo fibroso.

En la Tabla 3 se muestran los resultados promedio de las determinaciones realizadas de humedad (W), de los parámetros termogravimétricos: cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV) y carbono fijo (CF), como así también el promedio del contenido de fibra.

Tabla 3. Resultados promedio del análisis de humedad, análisis inmediato y contenido de fibra de muestras de sorgo fibroso.

Biomasa	Parámetro	Unidad	n	Valor promedio	Desviación estándar
Sorgo fibroso	W	% b.h.	15	72,25	3,97
	CZ	% b.s.	15	9,29	0,74
	SV	% b.s.	15	72,23	0,55
	CF	% b.s.	15	18,33	0,56
	Fibra	%b.h.	15	18,49	3,41

n: tamaño de muestra

Los resultados se encuentran en el rango reportado por por Fernández González *et al.* (2012) y Castagnaro *et al.* (2011).

En la Tabla 4 se observan los resultados del análisis elemental de carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Azufre (S) y Nitrógeno (N), realizado en el NEST, Brasil.

Tabla 4. Resultados del análisis de composición elemental de sorgo realizadas en el NEST, Brasil.

Biomasa	n	C(%) b.s.	H (%) b.s.	O(%) b.s.	S(%) b.s.	N (%) b.s.
Sorgo fibroso	5	39,49	5,2	53,78	0,18	1,34

n: tamaño de muestra.

Los resultados obtenidos del análisis elemental concuerdan con diversos autores como Povse y Bogo (2008); Hugot (1986); Jenkins *et al.* (1998), etc.

En la Tabla 5 se pueden ver los resultados del análisis de fusión de cenizas para el sorgo fibroso.

Tabla 5. Resultados de la temperatura de fusión de cenizas para sorgo fibroso. Donde: DT= Initial Deformation Temperature, ST= Sintering Temperature, HT= Hemispherical Temperature, FT= Flow Temperature.

Sorgo fibroso	Temperatura de fusibilidad de cenizas							
	Atmósfera oxidante				Atmósfera reductora			
Muestras	DT[°C]	ST[°C]	HT[°C]	FT[°C]	DT[°C]	ST[°C]	HT[°C]	FT[°C]
1	865	975	1060	1220	870	985	1150	1210
2	850	965	1080	1195	875	975	1100	1290
3	830	945	1055	1185	910	1010	1130	1205
4	795	865	1005	1065	915	1005	1125	1250
5	870	925	1065	1230	830	970	1175	1230
6	785	965	1075	1220	840	980	1095	1235
7	835	900	1040	1120	880	950	1100	1270
8	820	920	1080	1135	895	965	1085	1250
9	825	900	1035	1135	870	895	1055	1210
10	875	915	1065	1245	825	880	1040	1250
11	855	900	1045	1170	875	955	1070	1235
12	865	925	1030	1285	840	1010	1130	1290
13	840	890	1055	1300	820	905	1130	1240
14	835	905	1040	1300	820	855	1230	1300
15	810	870	1040	1220	795	970	1110	1240
Promedio	837,00	917,67	1051,33	1201,67	857,33	954,00	1115,00	1247,00
CV	27,11	33,32	20,66	68,42	35,90	48,37	47,70	29,57

Del análisis de fusibilidad de cenizas del sorgo fibroso se puede observar que la mínima temperatura inicial de deformación (DT) registrada fue de 837 °C en atmósfera oxidante y de 857,33°C en atmósfera reductora, mientras que la máxima temperatura de fluidización promedio registrada (FT), fue de 1201,67°C para atmósfera oxidante y 1247°C para atmósfera reductora. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Fernández *et al.*, 2008.

Debido a la baja temperatura de fusibilidad de cenizas del sorgo fibroso, en comparación al bagazo (1110°C para atmósfera oxidante y 1081°C para atmósfera reductora, Peralta *et al.*, 2014), se decide que, el combustible renovable que ingresa a la caldera, para reemplazar el gas natural, esté compuesto por una mezcla de sorgo fibroso y bagazo de caña de azúcar.

Para determinar en qué proporción deben mezclarse ambos combustibles, se toma como referencia un artículo de Golato *et al.*, (2017) realizado en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI), donde la mezcla de sorgo fibroso de composición 30% y bagazo de composición 70%, arrojó una mínima temperatura inicial de deformación (DT) de 1200°C para atmósfera oxidante y 1125 °C para atmósfera reductora. Estos valores se encuentran dentro de las temperaturas que tiene el bagazo cuando se quema solo, como se puede observar en la Tabla 6, según los autores Peralta *et al.* (2014) y Magasiner *et al.* (2001).

Determinación energética del sorgo fibroso

En la Tabla 7 se observa el resultado promedio del PCS.

Se puede observar que el poder calorífico superior del sorgo fibroso se encuentra en el rango reportado por Castagnaro *et al.*, (2011), quién obtiene un valor de PCS del bagazo de 17.847 [kJ/kg].

Tabla 6. Valores de DT para atmósfera oxidante y reductora, para bagazo de caña de azúcar y la mezcla sorgo fibroso + bagazo.

	DT [°C] atmósfera oxidante	DT [°C] atmósfera reductora	Autor
Bagazo	1110	1081	Peralta <i>et al.</i> (2014)
Bagazo	1380	1310	Magasiner <i>et al.</i> (2001)
70% Bagazo + 30% sorgo	1200	1125	Golato <i>et al.</i> (2017)

Tabla 7. Valor promedio del PCS.

Biomasa	Parámetro	Unidad	n	Valor promedio	Desviación estándar
Sorgo fibroso	PCS	kJ/kg	15	16.930,71	189,3

n: tamaño de muestra.

Cálculo del poder calorífico inferior del combustible renovable.

El PCI del sorgo fibroso con una W de 30 %, PCS de 16930,71 kJ/kg; H de 5,2 % y CZ de 9,30 %; resultó de 10.393,30 kJ/kg, determinado mediante la Ecuación 5.

$$PCIs = 16.930,71 \left(\frac{kJ}{kg} \right) * (1 - 0,3) - 2.442 * [9 * 0,052 * (1 - 0,093) * (1 - 0,3) + 0,3]$$

$$PCIs = 10.393,30 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

Como lo que ingresa a la caldera es un combustible renovable compuesto por sorgo fibroso y bagazo de caña de azúcar en una proporción de 30% y 70% respectivamente, se calcula un PCI de combustible mezcla compuesto por sorgo fibroso y bagazo (PCIcm). Asimismo se calcula el PCI del bagazo considerando una W de 50%; el

PCS de 17.847 kJ/kg, el contenido de H y CZ de 6,20 % y 6,12 % respectivamente, tomando estos valores de Castagnaro *et al.* (2011).

El PCI del bagazo resultó de 7.062,82 kJ/kg, determinado mediante la Ecuación 5.

$$PClb = 17.847 \left(\frac{kJ}{kg} \right) * (1 - 0,5) - 2.442 * [9 * 0,062 * (1 - 0,0612) * (1 - 0,5) + 0,5]$$

$$PClb = 7.062,88 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

Luego se calcula el PCIcm, mediante la Ecuación 6.

Ecuación 6

$$PCIcm = xs * PCIs + xb * PClb$$

Donde:

xs = Fracción másica de sorgo fibroso, en porcentaje.

xb = Fracción másica de bagazo, en porcentaje.

PCIs = Poder calorífico inferior del sorgo fibroso, en kJ/kg

PClb = Poder calorífico inferior del bagazo, en kJ/kg

$$PCIcm = 0,3 * 10.393,30 \left(\frac{kJ}{kg} \right) + 0,7 * 7.062,88 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$PCIcm = 8.062,00 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

Por lo tanto el PCI del combustible renovable (PCIcm, 30% sorgo y 70% bagazo,) resultó de 8.060,54 kJ/kg.

Cálculo del consumo de combustible mezcla (30% sorgo fibroso + 70% bagazo).

La simulación del esquema energético muestra que debe suministrarse a la caldera 36.529,32 kW para la generación del vapor requerida por el sistema. Esta cantidad de energía necesaria corresponde a un consumo de combustible renovable o combustible mezcla (*Gcm*) de

$$Gcm = 36.529,32 \text{ (kW)} / 8.062,00 \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

$$Gcm = 4,53 \left(\frac{kg}{s} \right) = 100 \% \text{ de combustible mezcla (cm)}$$

4,53 kg/s, calculado mediante la Ecuación 2.

Este valor de 4,53 kg/s se considera un caudal igual a 100% de combustible mezcla (cm).

Los resultados obtenidos de los balances de masa y energía para el esquema energético renovable alternativo representados por Cycle Tempo 5.0 se muestran en la Figura 4.

Dentro de los resultados que nos brinda el software, están las variables presión (bar), temperatura (°C), entalpía (kJ/kg) y masa (kg/s), cuya información está ordenada como se muestra en la Figura 5. Cabe aclarar que el software utiliza el punto para indicar la notación decimal.

El caudal másico de vapor vivo representa el 210% del caudal de combustible mezcla, calculado mediante la Ecuación 7:

Ecuación 7

$$\% Gcm = \frac{G \text{ vapor}}{Gcm} * 100$$

$$Gcm = \frac{9,539}{4,53} = 210\% \text{ cm}$$

Cálculo de sorgo fibroso necesario para el esquema energético renovable alternativo.

Para aplicar el esquema renovable alternativo, se debe disponer de bagazo en la interzafra. Por tanto, se deberá compensar este bagazo con una cantidad energéticamente equivalente de sorgo fibroso para los requerimientos de la fábrica durante el periodo de zafra (150 días). Mediante la ecuación 8 se calcula la cantidad de sorgo fibroso (*Gs*) comprendida entre sorgo para esquema energético renovable alternativo (150 días de interzafra), y sorgo fibroso equivalente al bagazo para 150 días de zafra (Ecuación 8):

Ecuación 8

$$Gs = Gcm * 0,3 + Gcm * 0,7 * \frac{PClb}{PCIs}$$

Sorgo fibroso para esquema renovable para 150 días de inter-zafra.

Sorgo fibroso equivalente al bagazo para 150 días de zafra.

$$Gs = 4,53 * 0,3 + 4,53 * 0,7 * \frac{7.062,88}{10.393,30} = 1,36 + 2,15$$

$$Gs = 3,51 \left(\frac{kg}{s} \right)$$

La cantidad de sorgo fibroso comprendida entre sorgo fibroso para el combustible mezcla, y sorgo fibroso equivalente al bagazo resultó de 3,51 kg/s.

Con el tiempo de operación del esquema energético renovable alternativo de 150 días de interzafra, se determinan las toneladas de sorgo fibroso necesarias, resultando un valor de 45.490 toneladas, calculadas mediante la Ecuación 9.

Ecuación 9

$$\text{Toneladas de sorgo fibroso} = \frac{Gs \left(\frac{kg}{s} \right) * 3600 \text{ (s)} * 24 \text{ (h)} * 150 \text{ (d)}}{1000 \text{ (kg)}}$$

$$\text{Toneladas de sorgo fibroso} = \frac{3,51 \left(\frac{kg}{s} \right) * 3600 \text{ (s/h)} * 24 \text{ (h/d)} * 150 \text{ (d)}}{1000 \text{ (kg/t)}}$$

$$\text{Toneladas de sorgo} = 45.490 \text{ (t)}$$

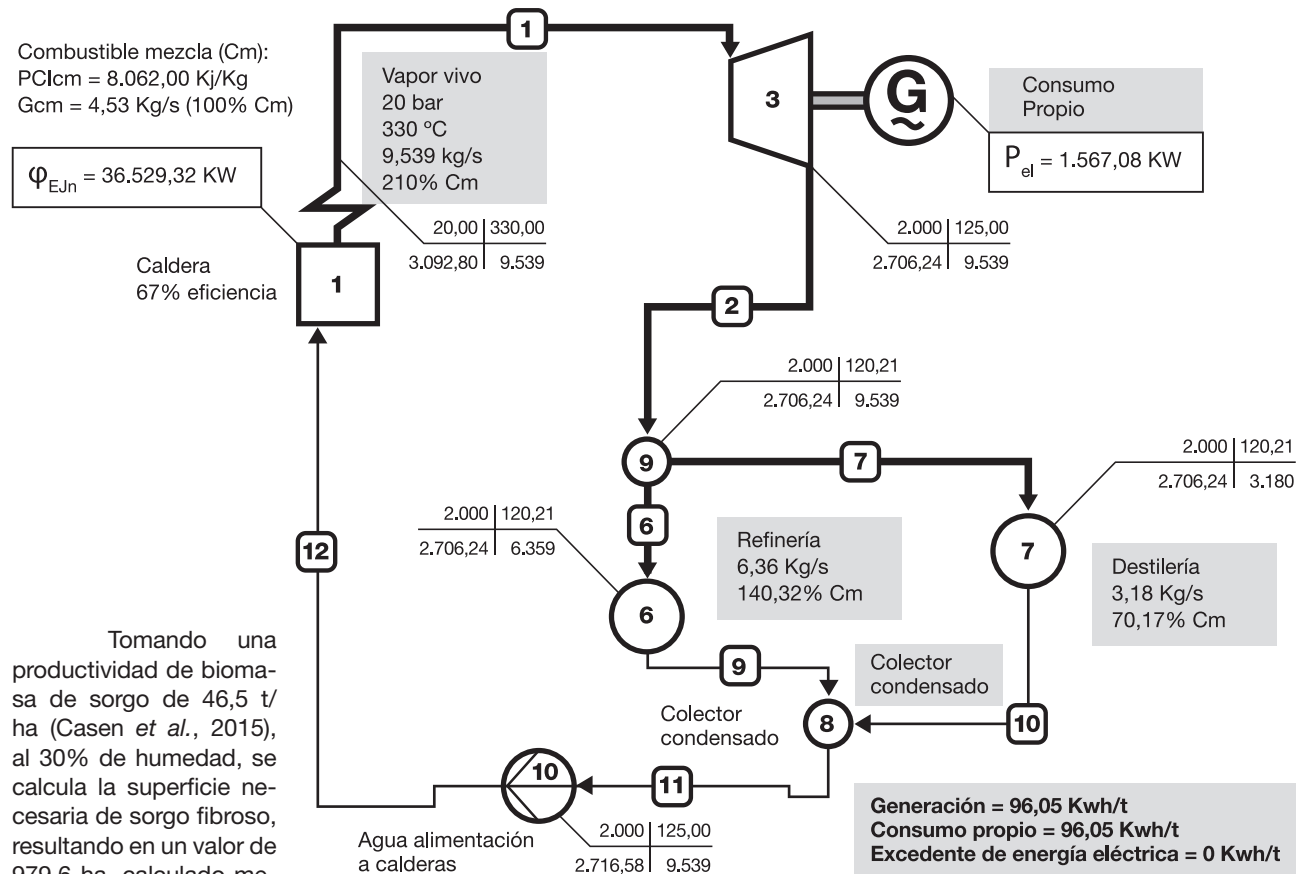


Figura 4. Esquema energético renovable alternativo resuelto.

Ecuación 10

$$\text{Superficie de sorgo fibroso} = \frac{\text{Toneladas de sorgo (t)}}{\text{Productividad de sorgo } \left(\frac{t}{ha}\right)}$$

$$\text{Superficie de sorgo fibroso} = \frac{45.490 (t)}{46,5 \left(\frac{t}{ha}\right)}$$

Superficie de sorgo fibroso = 979 (ha)

Los principales resultados para el esquema energético renovable alternativo, se muestran en la Tabla 8.

La energía aportada por el combustible renovable alternativo de 36.529 kW, genera en las calderas 34,34 t/h de vapor vivo necesarios para satisfacer las demandas de calefacción del proceso de producción de azúcar refinado y la destilería de alcohol, y producir 1.567 kW de energía eléctrica para consumo propio de la planta. Asimismo con el uso del combustible mezcla se ahorran 90.000 Nm³ de gas natural. Los índices de generación de vapor en [kg/vapor/kg de biomasa] e índice de generación de energía eléctrica en [kWh/t de biomasa] resultaron de 2,10 y 96,05 respectivamente.

Estudios posteriores serán necesarios para determinar el espacio de almacenamiento requerido para

20,00	330,00	Presión = 20.00 bar
3.092,80	9.539	Temperatura = 330.00 °C
		Entalpía = 3092.80 kJ/kg
		Caudal másico = 9.539 kg/s = 210% cm

Figura 5. Resultados de la corriente de vapor vivo del software Cycle Tempo 5.0.

Tabla 8. Resultados del esquema renovable alternativo.

Esquema energético renovable alternativo	
Tiempo de operación en inter-zafra [días]	150
Composición del combustible mezcla	30% sorgo fibroso + 70% bagazo
Energía entregada por el combustible por unidad de tiempo [kJ/s]	36.529,32
Combustible mezcla (G _{cm})[kg/s] - [t/d]	4,53 - 391,4
Sorgo fibroso para interzafra [kg/s]	1,36
Sorgo fibroso para zafra equivalente a bagazo [kg/s]	2,15
Sorgo fibroso total [t]	45.490
Superficie de sorgo fibroso [ha]	979
Presión y temperatura del vapor [bar]-[°C]	20-330
Vapor producido [t/h]	34,34
Eficiencia energética de la caldera [%]	67
Índice de generación [kgvapor/kg de G _{cm}]	2,10
Eficiencia del turbo [%]	85,00
Energía producida [kW]	1.567
Índice de generación de EE [kWh/t de G _{cm}]	96,05

la biomasa en este sistema propuesto, logística de recolección, ensayos de tiempo y velocidad de secado del material, adecuación de calderas, un estudio económico financiero y por último los aspectos ambientales del proyecto.

CONCLUSIONES

Debido a los resultados obtenidos de fusibilidad de cenizas del sorgo fibroso, la combustión directa de éste en calderas bagaceras convencionales no sería conveniente debido a la baja temperatura de fusibilidad de las cenizas, con respecto al bagazo. Esto provocaría la formación de escorias y sinterizados en la parrilla y los tubos de la caldera bagacera. Por ello se postula el empleo de un combustible mezcla formado por sorgo fibroso y bagazo de caña de azúcar.

La utilización del simulador Cycle Tempo 5.0 para la resolución de los balances de masa y energía ha demostrado ser una potente herramienta en estudios de pre-factibilidad de sistemas de cogeneración, gracias a la flexibilidad que este presenta para la producción, modificaciones y cálculo de los balances, como así también para la presentación de los valores obtenidos.

De los resultados del esquema energético renovable alternativo, se confirma que se puede reemplazar el combustible usado actualmente en el ingenio (gas natural) por un combustible renovable alternativo compuesto por sorgo fibroso y bagazo de caña en una proporción de 30% y 70% respectivamente. La superficie necesaria para llevar a cabo este proceso resultó de 979 ha de sorgo fibroso.

Asimismo esta propuesta del uso de un combustible renovable alternativo confiere al sistema un impacto ambiental positivo y reduciría el costo de producción de azúcar y alcohol para interzafra, logrando un ahorro de 90.000 Nm³ de gas natural.

Los resultados de este análisis son la base para la realización a posterior de estudios acerca de utilizar una caldera de biomasa diseñada exclusivamente para sorgo fibroso, la determinación de la productividad energética del sorgo fibroso para su uso como combustible y la factibilidad económica de llevar a cabo esta propuesta.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

AVEBIOM. (Mayo de 2012). BiomassTrade Centre2 - EU. Recuperado el 05 de Marzo de 2015, de Manual de Combustibles de Madera: www.biomasstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf.

Casen, S.D., Fernandez Gonzalez, P., De Boeck, G., Tonatto, J., Medina, M. & Romero, E.R. (2015). Estudio del comportamiento de híbridos de alta fibra de sorgo para su utilización en la cogeneración de energía. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. scasen@eeaoc.org.ar.

Castagnaro A., Golato M.A., Paz D. & Feijóo E.A. (2011). Caracterización energética de biomásas residuales de origen agroindustrial de Tucumán. Revista Avance Agroindustrial 32 (2): 32-37.

Cruz, M. C., Zamora Rueda, G. d. H., Golato, M. A. Paz D. (2016). "Experiencias entre laboratorio. Caracterización de biomásas regionales. Argentina (Tucumán) y Brasil (Itajubá). Avance Agroindustrial. Vol. 37-4 dic.-34-39.

De Boeck, G., Garolera De Nucci, P., FranckColombres, F.J., Paz, D. & Octaviano, M. (2011). Simulación de sistemas de cogeneración en la industria azucarera de Tucumán. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. Tomo 88 (1): p: 29-36. ISSN 0370-5404.

Diez, O., Zossi, S., Chavanne, E. & Cárdenas, G. Calidad industrial de las variedades de caña de azúcar de maduración temprana LCP 85-384 y LCP 85-376 en Tucumán. Análisis de sus principales constituyentes físico-químicos. (2000). Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. Tomo 77 (2): p: 39-48.

Fernández González, P., SanchezDucca, A. (2012). Análisis del sorgo fibroso como cultivo alternativo para la obtención bioenergía. II Simposio Nacional de sorgo realizado por AIAMBA en Pergamino, Bs. As.

Fernández, M. J., Borjabad, E., Barro, R., Losada J., Bados, R., Ramos, R., & J. E. Carrasco (CIEMAT, 2008). "Desarrollo, demostración y evaluación de la producción de energía en España a partir de la biomasa de cultivos energéticos" (PSE On Cultivos). Julio, 2008.

Gil, S., Givogri, P., & Codesiera L. El Gas Natural en Argentina. Propuestas Periodo 2016-2025. Agosto 2015. Recuperado el 15 de enero de 2017 de: [file:///C:/Documents%20and%20Settings/mccruz/Mis%20documentos/Downloads/EI%20Gas%20Natural%20en%20Argentina%20\(5\).pdf](file:///C:/Documents%20and%20Settings/mccruz/Mis%20documentos/Downloads/EI%20Gas%20Natural%20en%20Argentina%20(5).pdf)

Golato, M., Mistretta G., Paz, D., Ruiz, M., y Cárdenas, G. (2017). Caracterización físico química y energética del sorgo fibroso para generación de energía eléctrica en Tucumán-Argentina. Comparación con el bagazo y residuos agrícolas de cosecha (RAC). Presentado para su publicación en Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 2017.

Hugot, E. 1986. Manual para Ingenieros Azucareros. Compañía Editorial Continental, S. A. México D. F.

Jenkins B. M., Baxter, L.L., Miles Jr., T.R. & Miles, L.L. (1998). Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology 54 Ed. Elsevier: 17-46.

Magasiner, N., Van Alphen, C., Inkson, M.B. & Misplon. (2001). Characterising Fuels for Biomass-coal fired co-generation. Proc S Afr Sug Technol Ass. p: 282-291.

May, A., da Silva, D.D. & dos Santos, F.C. Embrapa. (2013). Cultivo do sorgo biomassa para cogecacao de energía eléctrica. ISSN 1518-4277.

Peralta, F.L., Zamora Rueda, G., Mistretta, G., Zalazar, H., Bravo, M.V., Feijóo, E., Golato, M., Paz, D., & Cárdenas, G. (2014). Determinación del punto de fusión de cenizas de bagazo y RAC de Tucumán. XXa Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar (SATCA). 6, 7 y 8 de abril de 2014. Tucumán.

Povse, V., Bogo, H. (2008). Análisis de C, H, N, S, y O sobre muestras sólidas. Informe Inédito (MA-100409-022/034). Inquimae, FCE y N, UBA, Buenos Aires, Argentina.

Universidad Tecnológica de Delft, Holanda. 2010. Cycle Tempo 5.0. Autor y responsable de la gáginaTeus van der Stelt (T.P: vanderStelt@tudelft.nl).