

Diseño de una planta de torrefacción de marabú con fines energéticos

Design of a marabou torrefaction plant for energy purposes

*Ing. Yasmani Alba-Reyes^I, yreyes@uniss.edu.cu, Dra. C. Maylier Pérez-Gil^{II},
Néstor Ley-Chong^{II}, Dr. C. Luis Ernesto Arteaga-Pérez^{III}*

^ICentro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI), Universidad de Sancti Spíritus, Sancti Spíritus, Cuba; ^{II}Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química-Farmacología, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba; ^{III}Escuela de Ingeniería Química, Departamento de Ingeniería en Madera, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

Resumen

El uso de residuos forestales como fuente de energía es una estrategia utilizada por países desarrollados y en vías de desarrollo, debido fundamentalmente a la disminución de las reservas de combustibles fósiles. La integración de la torrefacción y la peletización, es una de las rutas más prometedoras para la densificación energética de biomasa lignocelulósica. El *Dichrostachys Cinerea* (marabú) es clasificado como una planta invasora que afecta grandes extensiones de superficie cultivable y por sus características, puede considerarse como una fuente renovable de energía. En el presente trabajo se tiene como objetivo diseñar y evaluar económicamente una planta para la torrefacción del marabú con fines energéticos. Los flujos relacionados con los procesos unitarios del esquema tecnológico propuesto son cuantificados mediante los balances de masa y energía, así como se determinan los parámetros principales de diseño del equipamiento para cada una de las etapas del proceso. Los resultados de la evaluación económica demuestran que la inversión es factible desde el punto de vista económico, al obtenerse una ganancia unitaria de 0,04 \$/kg validada por los indicadores dinámicos y el tiempo de recuperación de la inversión de 3,20 años. Se realiza un análisis de sensibilidad de diferentes parámetros, indicando que el precio de venta de los pelets torrefactados ejerce la mayor influencia en el Valor Actual Neto (\$ 4,94E+07).

Palabras clave: *marabú, energía, torrefacción, diseño, evaluación económica.*

Abstract

The use of forest residues as an energy source is a strategy used by developed and developing countries, mainly due to the decrease of fossil fuel reserves. The integration of torrefaction and pelletisation is one of the most promising routes for energy densification of lignocellulosic biomass. *Dichrostachys Cinerea* (Marabou) is classified as an invasive plant that affects large extension of arable land and because of its characteristics can be considered as a renewable source of energy. In the present work the objective is to design economically and evaluate a plant for marabou torrefaction for energy purposes. The flows related to the unit processes of the proposed technological scheme are quantified through mass and energy balances, as well as determining the main design parameters of the equipment for each of the stages of the process. The results of the economic evaluation show that the investment is feasible from the economic point of view, with a unit gain of 0, 04 \$/kg validated by the dynamic indicators and the Discounted Payback Period of 3,20 years. A sensitivity analysis of different parameters is performed, indicating that

the selling price of torrefied pellets have the greatest influence on the Net Present Value (\$ 4,94E + 07).

Keywords: *marabou, energy, torrefaction, design, economy evaluation.*

Introducción

El cambio climático, motivado en gran medida por las emisiones producidas por el elevado consumo energético, es una preocupación mundial. Entre otros factores, es precisamente el cambio climático el motor que ha impulsado la búsqueda de fuentes alternativas de energía. En este escenario, los biocombustibles cuentan con ventajas comparativas con respecto a los combustibles de origen fósil. Básicamente, la biomasa lignocelulósica es empleada de manera intensiva en Europa y Latinoamérica como combustible de uso doméstico y en calderas asociadas a las plantas peletizadoras o a la propia industria forestal. Sin embargo, el elevado costo del pelet tradicional (producido a partir de madera) hace necesario buscar alternativas de materias primas con alta calidad combustible y de bajo costo de adquisición. Dadas las características del marabú (alto poder calorífico, bajo contenido de cenizas, etcétera), este puede ser empleado como combustible en sistemas de cogeneración /1/. Sin embargo, en la actualidad este se emplea regularmente para la producción de carbón vegetal y como combustible directo para la cocción de alimentos.

El potencial energético del marabú podría incrementarse si se utilizan procesos de densificación que conlleven a la reducción del costo (\$/MJ) transportado desde las zonas donde se produce la biomasa hasta la planta de generación. La vía más expedita para hacer esto es a través de la integración de la torrefacción con la peletización, donde se incrementa hasta 7 veces la densidad energética del material de origen. Además, al mejorarse las características físicas de la biomasa se reducen los requerimientos energéticos en su molienda y favorece su gasificación/combustión /2/. Con el aumento de su potencial energético se incrementa su empleo en la matriz energética de los países con insuficientes reservas de combustibles fósiles La matriz energética cubana está basada en el consumo de energías no renovables, fundamentalmente petróleo.

En Cuba, se reporta un total de 7,83E+09 m² de superficie cultivable cubiertos por marabú, específicamente en la provincia de Sancti Spíritus se cuenta

con $3,97E+08$ m². La propagación de esta planta invasora en la isla constituye un problema, al cubrir áreas que pueden ser destinadas a la agricultura y al desarrollo económico. Al mismo tiempo, -como ya se mencionó- es una alternativa energética para la reducción del consumo de combustibles fósiles y la contaminación asociada al ciclo de vida de estos; por lo que en este trabajo se tiene como objetivos: diseñar una planta para la torrefacción del marabú con fines energéticos y realizar su evaluación económica.

Fundamentación teórica

El marabú se encuentra catalogado como una biomasa lignocelulósica, compuesta fundamentalmente por tres polímeros: lignina, celulosa y hemicelulosa, de acuerdo a sus características se considera como un biocombustible con un rendimiento agrícola de $3,70$ kg/m² /1/. Diferentes autores reportan que el poder calórico del marabú es superior al de otros compuestos lignocelulósicos como residuos de maíz, bagazo de caña de azúcar /1/.

La torrefacción es un proceso de pretratamiento termoquímico conocido como pirólisis suave, desarrollado en una atmósfera inerte o con vapor. En este proceso se destruye parcialmente la estructura original de la biomasa por ruptura de las moléculas de hemicelulosa, celulosa y en menor grado la lignina. En este sentido tiene la capacidad de reducir la heterogeneidad de la biomasa, incrementar la densidad energética, disminuir su comportamiento higroscópico y su naturaleza fibrosa /3/. Recientemente, se han reportado varios esquemas tecnológicos para la torrefacción de biomasa, los cuales se diferencian por el grado de integración energética y la naturaleza de la biomasa.

Esta última y el tamaño de sus partículas, así como la temperatura de operación, son los principales parámetros a considerar en el proceso de torrefacción. La fracción de hemicelulosa es degradada en mayor medida durante el proceso, por tanto, las características del polímero y su estructura, definen la composición del producto torrefactado. Se ha demostrado que maderas duras y blandas con contenido de hemicelulosa similares, al ser torrefactadas en iguales condiciones, alcanzan diferentes rendimientos máxicos y energéticos. Al incrementarse el tamaño de partícula decrece la pérdida de masa durante la torrefacción. Está demostrado que el tamaño de partícula de la biomasa controla la transferencia de masa y energía durante su procesamiento. Los mecanismos de transferencia

de calor en la torrefacción son: convección desde las paredes del reactor (o el portador térmico) hacia la superficie del sólido y su conducción hacia el centro de la partícula.

La torrefacción de la biomasa se realiza a temperaturas entre 200 y 300 °C, durante un tiempo de diez minutos hasta una hora. A medida que se incrementa la temperatura y el tiempo de residencia decrece el rendimiento másico, obteniéndose un producto sólido de mayor densidad energética.

Materiales y métodos

La planta de torrefacción del marabú que se presenta en este trabajo se localizará anexa a la Unidad Empresarial de Base (UEB) Uruguay, perteneciente a la Empresa Azucarera Sancti Spíritus, en el municipio de Jatibonico. La misma aprovechará el sistema de cogeneración de esta industria azucarera empleando los pelets de marabú densificado como combustible en sustitución del bagazo para el periodo de inactividad industrial.

En la selección del esquema tecnológico para la torrefacción es necesario determinar el contenido de agua de la biomasa (la humedad). La determinación de la humedad del marabú se realizó mediante el método referido por /4/. Para esto se tomaron muestras de diferentes partes de la planta (tronco, hojas y ramas), en áreas aledañas a la ciudad de Sancti Spíritus, en periodo húmedo (mes de septiembre) y en diferentes horarios del día. Es válido resaltar que la composición de la biomasa varía según la especie, hábitat, edad, suelo y ubicación.

El análisis elemental del marabú empleado es el referido en la literatura para iguales condiciones geográficas /1/. Para la determinación del Poder Calórico Superior (PCS) e Inferior (PCI) se emplearon las ecuaciones (1) y (2), respectivamente, expresadas en MJ/kg (en base húmeda) /5/:

$$PCS = 0,3491 \times C + 1,1783 \times H - 0,1005 \times S - 0,0151 \times N - 0,1034 \times O - 0,0211 \times Ce \quad (1)$$

$$PCI = PCS \times \left(1 - \frac{W}{100}\right) - 2,444 \times \frac{W}{100} - 2,444 \times \frac{H}{100} \times 9,936 \times \left(1 - \frac{W}{100}\right) \quad (2)$$

donde

C , H , N , O y Ce es el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cenizas *respectivamente*, W es la humedad, expresadas en por ciento peso base seca.

Proceso de torrefacción de marabú

Para la torrefacción de marabú se proponen tres operaciones fundamentales: la torrefacción, el enfriamiento y la densificación. Los requerimientos energéticos de la primera etapa se satisfacen con la combustión del marabú. En la figura 1 se representa el esquema tecnológico para obtener $9,05E+03$ kg de pelets torrefactados de marabú, con el objetivo de suplir la demanda de combustible en la industria en función de los 16 MWh de potencia instalada.

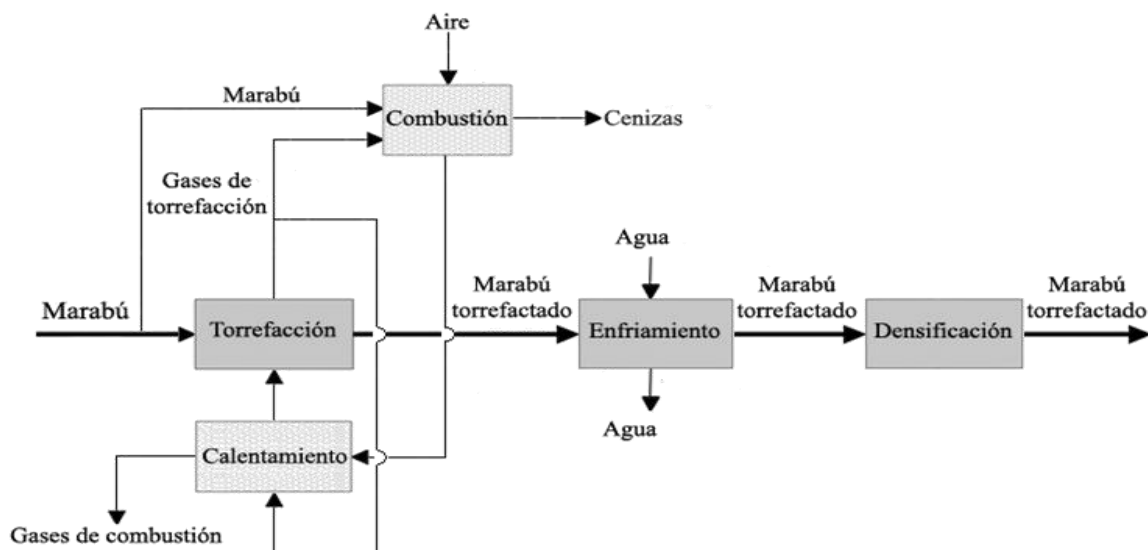


Fig 1. Proceso de torrefacción de marabú.

El marabú (11 % de humedad) procedente de la fuente de abasto es alimentado a un reactor de lecho fluidizado tipo torrefactor, donde se produce la descomposición y depolimerización de la lignina, celulosa y hemicelulosa. El torrefactor debe operar en ausencia de oxígeno a una temperatura de 250 °C, durante 1 h. El aumento de la temperatura del marabú se alcanza por contacto directo con una corriente de gases calientes efluentes de la propia etapa, los cuales se llevan a la temperatura deseada por intercambio con los gases provenientes de la combustión de marabú. Esta es un sistema auxiliar que contribuye a elevar la eficiencia energética del proceso.

El marabú con una humedad de 3,50 % y 250 °C es enfriado a temperaturas inferiores a 100 °C en un sistema a contracorriente usando agua como medio de enfriamiento. Finalmente, es densificado mediante presión el marabú torrefactado hasta obtener un producto compactado.

Cuantificación de flujos y propiedades

Los flujos relacionados con los procesos unitarios del sistema en estudio, se cuantifican mediante los modelos fenomenológicos. Los principios de formulación de estos modelos son las ecuaciones de conservación de masa y energía.

A partir de las composiciones de las corrientes gaseosas reportadas en la literatura se determinaron propiedades físicas de las mismas como: PCI, viscosidad (μ), conductividad térmica (k) y calor específico (c), mediante el software Aspen-HYSYS V8.8.

Para cuantificar los flujos en el torrefactor se realizaron las siguientes consideraciones:

- La torrefacción es exotérmica y ocurre a presión atmosférica constante.
- Los gases a la salida del torrefactor tienen una temperatura de 180 °C, debe ser superior a 100 °C para evitar la condensación en la zona de secado.
- Se emplean los gases de la combustión del marabú como medio de calentamiento de los gases del torrefactor que son recirculados al mismo.
- Los gases recirculados al torrefactor alcanzan una temperatura de 280 °C, debe ser inferior a 300 °C para evitar la combustión del marabú torrefactado.
- Se estima el valor calórico superior de los compuestos volátiles igual a 1,29 MJ/kg en base seca.

Diseño de la planta de torrefacción

En el diseño de la planta se emplearon los métodos reportados en la literatura como se relacionan a continuación:

Torrefacción: en el diseño del torrefactor se siguió la metodología planteada por /6/. Para un mejor estudio de los fenómenos que ocurren en la etapa de torrefacción se divide el reactor en cuatro sectores: pre-secado, evaporación, post-secado y torrefacción, como se muestra en la figura 2.

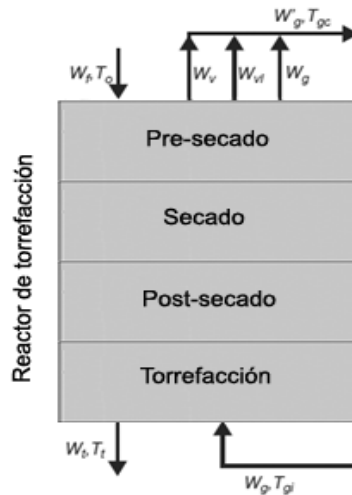


Fig. 2 Torrefactor.

Enfriamiento: en el diseño del tornillo sinfín se aplica la ecuación de Fourier.

Calentamiento: en el diseño del intercambiador de tubo y coraza se utiliza el método referido por /7/.

Combustión: se determina la eficiencia térmica y de la combustión empelando la metodología propuesta por /5/.

Resultados y discusión

Propiedades y flujos

En la tabla 1 se muestran los resultados del PCS y PCI del marabú tanto a la entrada como a la salida de la planta de torrefacción. Son incluidos para la discusión los reportados en la literatura para iguales condiciones geográficas /1/.

Tabla 1
PCS y PCI del marabú

	Marabú		Marabú torrefactado	
	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Calculado	20,20	16,24	21,23	19,14
/1/		14,43	-	18,76

El valor obtenido para el PCS del marabú antes de ser torrefactado está en correspondencia con los valores reportados en la literatura para la biomasa forestal (entre 18 y 22 MJ/kg en base seca) /1, 6/. En cuanto al PCI se obtienen

resultados similares a los reportados por /1/; la diferencia viene dada por el contenido de humedad del marabú (19%) referenciada, lo cual se traduce en un menor valor del PCI.

Los resultados de los balances de masa y energía por proceso unitario se presentan en la tabla 2.

Tabla 2
Resultados de los balances de masa y energía

	Masa (kg)	Energía (MJ)	PCI (MJ/kg)
<i>Marabú</i>	1	16,24	16,24
Marabú a la torrefacción	0,95	15,38	16,24
Gases de la torrefacción	0,29	0,17	0,68
Marabú torrefactado	0,68	13,01	19,04
Agua de enfriamiento	0,50	-	-
Marabú densificado	0,68	13,01	19,14
Gases para torrefacción	0,28	0,24	0,68
Gases de la torrefacción	0,28	0,17	0,68
Gases de la combustión	0,37	0,15	0,21
Gases fríos de la combustión	0,37	0,08	0,21
Marabú a la combustión	0,05	0,86	16,24
Aire para la combustión	0,32	-	-
Cenizas	0,002	-	-

Diseño del Torrefactor

Se realiza un diseño general de un reactor simple integrado de lecho móvil, el cual es calentado directamente por gases de combustión sin la presencia de oxígeno. El medio de calentamiento se mueve a través de las partículas de marabú mientras que, el calor penetra al interior de las partículas por convección. El marabú desciende lentamente a contracorriente desde el tope del reactor vertical y recibe diferentes transformaciones. El volumen, área y longitud total del reactor son los parámetros de diseño del torrefactor y se presenta su cuantificación en la tabla 3.

Tabla 3
Parámetros de diseño del Torrefactor

Parámetro	Valor
Volumen total ($V_{r,total}$)	71,24 m ³
Área total ($A_{r,total}$)	17,41 m ²
Longitud total (L_{total})	4,10 m

En correspondencia a la capacidad nominal de la planta (1,34E+04 kg/h), se hace necesario disponer de tres reactores operando en paralelo con una alimentación aproximada de 4,46E+03 kg/h para suplir la demanda de pelets torrefactados (9,05E+03 kg) por la industria para la cogeneración de energía.

Diseño del Intercambiador de tubo y coraza

Para el diseño del intercambiador de calor se determina la cantidad de calor transferida en la etapa para elevar la temperatura de los gases de la torrefacción desde 180 a 280 °C. Se dispone que el flujo proveniente de la torrefacción de marabú se hace circular por el interior de los tubos y los de la combustión por la coraza. En la tabla 4 y 5 se relacionan las temperaturas de ambos flujos con su diferencia de temperatura (ΔT) y los parámetros de diseño del intercambiador de calor, respectivamente.

Tabla 4
Temperaturas de los fluidos

Fluido	Temperatura (°C)		ΔT (°C)
	Entrada	Salida	
Gases de combustión	400	300	100
Gases de torrefacción	180	280	100

Tabla 5
Parámetros de diseño del Intercambiador de Calor

Parámetro	Unidad	Valor	
Área (A)	m ²	7,59	
Número de tubos (Nt)	-	29	
Coeficiente de transferencia de calor limpio (U_c)	kJ/ h m ² °C	5,00E+03	
Coeficiente de transferencia de calor (U_D)	kJ/ h m ² °C	8,92E+02	
Factor de obstrucción (R_d)	h m ² °C /kJ	1,89E-05	
		Tubos	Coraza
Caída de presión (ΔP)	kPa	4,70E+03	0,38
Coeficiente $h_{exterior}$	kJ/ h m ² °C	9,13E+03	1,10E+04

Tornillo Sinfín

Con el objetivo de disminuir la temperatura de los pelets torrefactados (inferior a los 100 °C) para evitar la autocombustión, se deben acoplar dos tornillos sinfín en serie. El flujo de agua necesario para el enfriamiento es determinado en correspondencia, los cuales se muestran en la tabla 6.

Tabla 6
Parámetros de diseño del Tornillo Sinfín

Datos	Unidades		Valores
Longitud (L)	m		9
Área de intercambio (A)	m ²		27,20
Coeficiente de transferencia de calor (U)	W/m ² °C		50
	Tornillo 1	Tornillo 2	
Flujo de agua	4,33	1,57	kg/s

Horno

Los requerimientos energéticos (en forma de calor) del proceso son proporcionados por la etapa de combustión del marabú. De acuerdo a la humedad del marabú (11 %), la cual está en correspondencia a los valores reportados en la literatura (10-20 % de humedad) para un sistema convencional de combustión de biomasa, se determina la eficiencia térmica (94 %) y de la combustión del marabú (49 %).

La eficiencia de la combustión del marabú obtenida, está en correspondencia con los valores reportados en la literatura para diferentes biomásas. Se refiere un 55% de eficiencia en la combustión de la madera (20 % de humedad) en un horno convencional y un 82 % para un horno de pelets con una humedad de 7,40%. Este último valor de eficiencia se justifica por el bajo contenido de humedad.

Evaluación económica de la planta de torrefacción de marabú

Para la evaluación económica de la planta se estimó el Capital Total Invertido (CTI) aplicando el método propuesto por /8/. En la tabla 7 se muestran los costos de adquisición actualizados del equipamiento empleados para estimar el Costo Total Directo (CTD) e Indirecto (CT_{ind}).

Tabla 7
Costo de equipamiento principal de la planta

Equipo	Costo de adquisición \$MM	Referencia
Torrefactor 1, 2 y 3	3,843	/9/
Bomba centrífuga 1	0,009	/10/
Bomba centrífuga 2	0,008	/10/
Horno	0,228	/10/
Tornillo sinfín 1 y 2	0,138	/10/
Intercambiador de calor	0,028	/10/
Peletizadora 1 y 2	0,672	/11/
Total	4,928	

Los elementos de costo considerados para determinar el CTD y el CTI que tributan al Costo Fijo de Inversión (CFI) se desglosan en la tabla 8, ascendiendo este a \$ 2,10E+07.

Tabla 8
Fraciones de costo utilizadas en la evaluación del CTI

Elemento	Fracción	Valor \$MM
Costo Total de Adquisición	1,00	4,928
Entrega	0,10	0,492
Costo de Instalación	0,35	1,897
Instrumentación y control	0,15	0,813
Tuberías	0,10	0,542
Sistema Eléctrico	0,10	0,542
Edificios	0,20	1,084
Ambiente	0,15	0,813
Facilidades	0,30	1,626
Costo Total Directo + interés	1,35	12,740
Ingeniería y Supervisión	0,25	1,355
Gastos Legales	0,04	0,216
Contrataciones	0,15	0,813
Contingencias	0,30	1,626
Gastos por construcción	0,30	1,626
Costo Total Indirecto	1,04	5,638
Costos Fijos de Inversión (CFI)		18,379
Capital de Trabajo (15% del CFI)	0,50	2,710
Capital Total Invertido		21,090

En la estimación del Costo Total de Producción (CTP) se consideraron para el cálculo del Costo Directo (CD) los gastos por consumo de combustible en la

cosecha y la transportación del marabú desde las zonas de abasto hasta la planta, donde se asumió un costo de $1,88E-02$ \$/kg. Además, se comprende el salario promedio de los trabajadores, los gastos por concepto de electricidad e insumos (agua y aire). El costo por concepto de adquisición de la materia prima no es incluido, al ser el marabú una planta invasora. Se asumió que la planta opera 24 h/d durante 235 d/a, que cuenta con un período de vida útil de 10 años y que la distancia promedio desde las zonas de abasto hasta la planta es de 70 km. Al presentar una disponibilidad de $1,47E+09$ kg de materia prima en la provincia de Sancti Spíritus, al consumo de la planta propuesta anual, se estima un abastecimiento en un plazo de 19,50 años, sin considerar el período de regeneración del marabú de siete años. En la tabla 9 se relacionan aspectos considerados para la evaluación del CTP.

Tabla 9
Aspectos considerados para el CTP

Datos	Valor	UM
Precio del agua	0,08	\$/kg
Flujo de agua	$3,78E+04$	m^3/a
Precio del aire	$4,50E-03$	\$/ m^3
Flujo de aire	$2,34E+07$	m^3/a
Tiempo de operación	5 640	h
Días de trabajo al año	235	d
Número de operarios	5	-
Salario básico del operario	15	\$/8h
Capacidad de la planta	$9,05E+03$	kg/h
Producción anual	$5,10E+07$	kg/a

Los costos de electricidad del proceso por diferentes conceptos se resumen en la tabla 10 y fueron determinados a partir de índices de consumo reportados en la literatura, obteniéndose un consumo total de $6,88E-02$ kWh/kg de pellets torrefactados y un costo total de $1,75E+05$ \$/a, considerando el valor reportado por /8/ para el precio de la electricidad autogenerada ($0,05$ \$/kWh).

Tabla 10
Costo por concepto de electricidad

Concepto	Valor (kWh/kg)	Costo (\$/a)
Torrefacción	6,20E-02	1,58E+05
Enfriamiento	2,64E-03	6,70E+03
Peletización	6,00E-05	1,53E+02
Combustión	4,10E-03	1,04E+04
Total	6,88E-02	1,75E+05

En la tabla 11 se relaciona la contribución al CTP de los elementos considerados en la determinación de los Costos Directos e Indirectos (CI), así como en los Gastos Generales (GG).

Tabla 11
Costo Total de Producción

COSTOS DIRECTOS (CD)	4,264 \$MM/a	
Aspecto	%	Costo(\$MM/a)
Combustible-Salario	---	1,418
Electricidad	---	1,750
Insumos (Agua y Aire)	---	0,109
Mantenimiento (M)	2% CTI	0,367
Supervisión de operación	10% Salario	0,067
Laboratorio	20% MO	0,135
Materiales de consumo	10% M	0,036
Regalías	3% CTP	0,380
Costos Variables	4,264	
Aspecto	%	Costo(\$MM/a)
Impuestos	5% CFI	0,918
Financiamiento	5% CFI	0,918
Seguro	1% CFI	0,183
Renta	12% CFI	2,205
Depreciación	TCI/10	2,109
Cargos Fijos (CF)	6,336	
Aspecto	%	Costo(\$MM/a)
Administración	15 % CTP	0,101
Distribución y venta	10 % CTP	1,267
Investigación y desarrollo	5 % CTP	0,633
Gastos Generales (GG)	2,002	
Costo Total de Producción	-	12,670

Factibilidad económica

Actualmente, no existe en el mundo un mercado establecido de pelets torrefactados de biomasa y Cuba no es la excepción, siendo referenciados por autores variantes de posibles precios los cuales se encuentran alrededor de los 0,49\$/kg. Debido a esto es necesario la estimación para la realidad cubana un precio de venta (PV), estimándose por la ecuación 3 /12/ que puede ser vendido a 0,52 \$/kg:

$$PV = \frac{CFI \times R}{P} + CU \quad (3)$$

donde

R- es el porcentaje de retorno mínimo aceptable de la inversión (0,12-0,15, fijándose 0,13),

CU- es el costo unitario del producto y

P- los kilogramos de pelets torrefactados.

Tomando en cuenta los gastos que se incurrirían para una posible importación de este producto por concepto de transportación, impuestos y almacenaje, los costos se incrementarían alcanzando 0,55 \$/kg, justificándose económicamente la propuesta. Como se muestra en la tabla 12 se obtiene una ganancia unitaria de 0,04 \$/kg para un total de 2,04E+06 \$/a, lo cual evidencia la factibilidad económica.

Tabla 12
Estimación de la ganancia

Aspecto	Valor	Unidad
Costo unitario	0,48	\$/kg
Precio de venta	0,52	\$/kg
Valor de la producción	26,27	\$MM/a
Ganancia unitaria	0,04	\$/kg

Con el cálculo de los indicadores dinámicos se valida la factibilidad económica de la propuesta en estudio. El Valor Actual Neto (VAN) es de \$ 4,94E+07 con una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 58 % y un Plazo de Recuperación al Descuento (PRD) de 3,20 años, como se muestra en la figura 3.

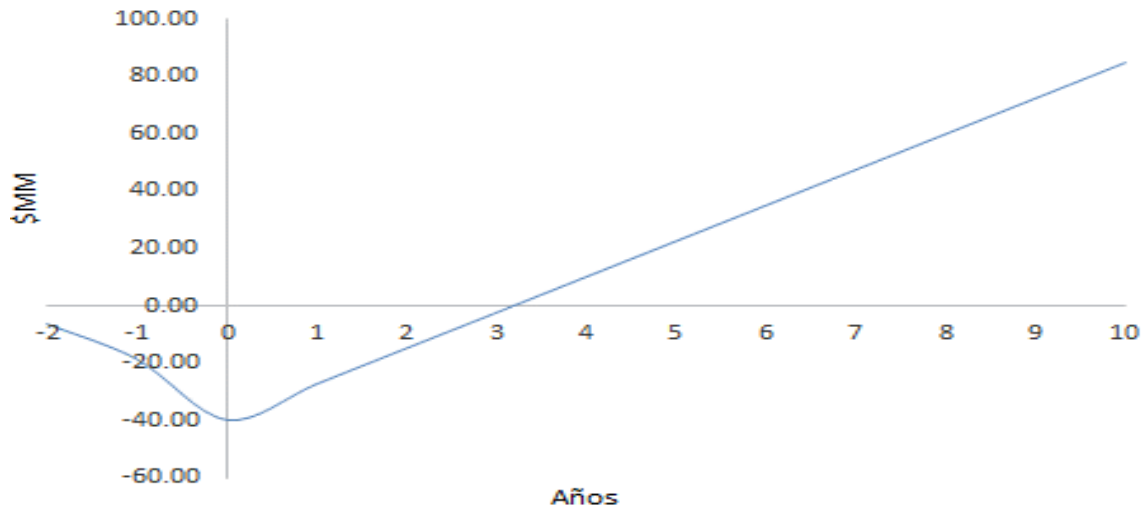


Fig. 3 Perfil del VAN.

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad del VAN se realiza considerando: costo del combustible, salario de los trabajadores y precio de venta del producto. La selección de los parámetros se justifica por la variabilidad de los precios del diésel en el mercado internacional, la política económica actual del pago por resultados (en función de la productividad), así como la novedad del producto en el mercado cubano, lo cual condiciona el precio de venta en correspondencia a la asimilación de la tecnología y su demanda. Se determinaron los valores extremos de estos parámetros en correspondencia con las tasas reportadas en la tabla 13, /10/.

Tabla 13
Tasas de variación

Parámetros	Tasas de variación
Precio de venta	± 20% del caso base
Salario de los trabajadores	-10% a +30% del caso base
Precio del combustible	-50% a +100% del caso base

En la figura 4 se evidencia que el costo del combustible y el salario de los trabajadores no presentan una influencia significativa en el resultado del VAN para las condiciones evaluadas; no siendo así para el precio de venta del producto. El comportamiento del Periodo de Recuperación al Descontado (PRD) de los primeros dos parámetros presenta una pequeña desviación con respecto al caso base, no siendo así para el precio de venta del producto que cuenta con

una variación de entre 2,30 y 5,20 años, demostrándose sensibilidad significativa para estas las tasas de variación analizadas.

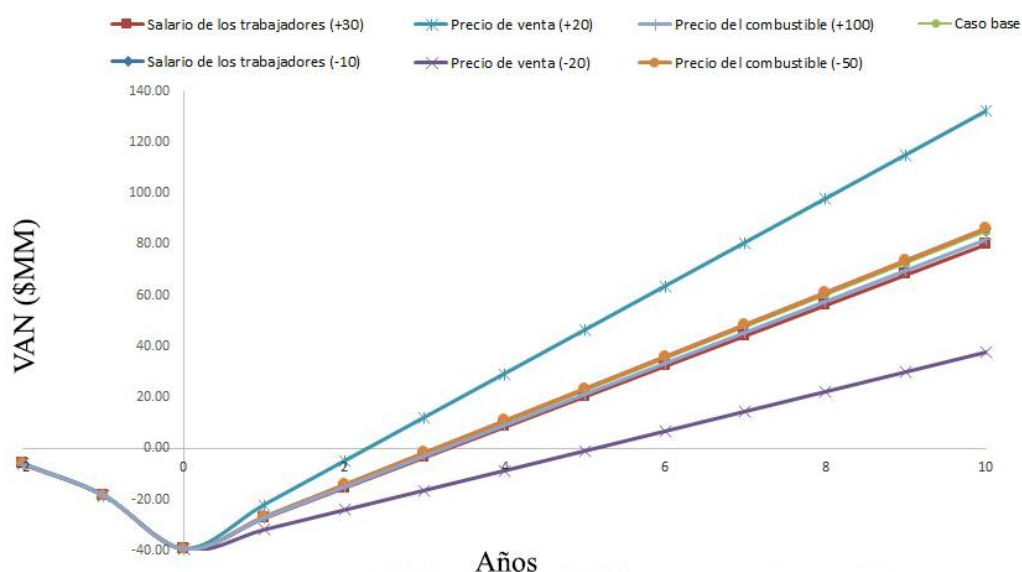


Fig. 4 Análisis de sensibilidad.

Conclusiones

- 1. Como resultado de esta investigación se demostró que el marabú presenta excelentes características para ser utilizado como fuente energética dado a su poder calórico inferior (19,14 MJ/kg), bajo contenido de humedad (11%) y alta disponibilidad.**
- 2. La planta propuesta cuenta con tres etapas principales: torrefacción, enfriamiento y peletización, además de la combustión y calentamiento de los gases. Se establece un diseño de un torrefactor simple integrado de lecho móvil, que en dependencia de la alimentación, son necesarios tres torrefactores.**
- 3. De la evaluación económica se determinó la factibilidad de la propuesta estimándose el precio de venta (0,52 \$/kg) del pelet torrefactado. Se obtuvo un VAN de \$4,94E+07 y una TIR de 58%, con un periodo de recuperación de la inversión de 3,20 años. El análisis de sensibilidad demostró que el precio de venta del marabú presentaba la mayor influencia en los resultados del VAN.**

Agradecimientos

Agradecemos a los proyectos FONDECYT 11150148 y BASAL PFB27 por el apoyo financiero.

Bibliografía

1. ABREU, R. "Utilización energética de la biomasa ligno-celulósica obtenida del *Dichrostachys cinerea* mediante procesos de termodescomposición". Tesis doctoral. Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali. Università Politecnica delle Marche, 2012.
2. BATIDZIRAI, B. M et al., "Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects". *Energy*. 2013, 62, 196-214.
3. ARTEAGA, L.E., VEGA, M., RODRÍGUEZ, L.C., FLORES, M. ZAROR, C.A. LEDÓN, Y.C. "Life-cycle assessment of coal-biomass based electricity in Chile: focus on using raw vs torrefied wood". *Energy for sustainable development*. 2015. Vol. 29, p. 81-90.
4. RICE, E. W, *et al.* "Standard methods for the examination of water and wastewater". American Public Health Association Washington, DC, 2012.
5. VAN LOO, S. KOPPEJAN, J. The handbook of biomass combustion & co-firing. Earthscan. London. 2008. ISBN: 978-1-84407-249-1.
6. BASU, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical design and Theory. New York. Elsevier Ltd. 2013.
7. KERN, D. Q. Procesos de transferencia de calor. México. Continental.1999.
8. PETERS, M. S. T., KLAUS, D., WEST, RONALD E. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. 2003. ISBN-13: 978-0072392661.
9. SVANBERG, M., *et al.* "Analyzing biomass torrefaction supply chain costs". *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 142, pp. 287-296.
10. SINNOT, R. TOWLER, G. Chemical Engineering Design. Principles and Practice and Economics of Plant and Process Design. Elsevier. Second Edition, 2013. ISBN-0080966608.
11. MANI, S., *et al.* "Economics of producing fuel pellets from biomass". Applied Engineering in Agriculture, 2006. Vol. 22, pp. 421-426.
12. ARIES, R.S., NEWTON, R.D. Chemical engineering cost estimation. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC. 1955.