

POTENCIAL DE COGENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

en la agroindustria colombiana de palma de aceite:
tres estudios de caso

ENERGY COGENERATION POTENTIAL

in the Colombian Palm Oil Industry: Three Cases
Studies

AUTORES



Electo Eduardo Silva L.

electo@unifei.edu.br

FRP, Arrieta,

FN, Teixeira,

Federal University of Itajubá/
Excellence Group in Thermal and
Distributed Generation
Av. BPS 1303, CP 50,
Itajubá-MG, Brazil

Edgar Yáñez,

Cenipalma, Colombia
edgar.yanez@cenipalma.org
Tel +55 - 35-3629-1355

EES, Castillo,

UIS, Colombia

Palabras CLAVE

Cogeneración, aceite de
palma, biomasa.

Cogeneration, palm oil,
biomass.

Traducido por Fedepalma.
Versión original en inglés
disponible en el Centro de
Documentación de Fedepalma.

RESUMEN



Las plantas de beneficio de aceite se caracterizan por la disponibilidad de considerables cantidades de subproductos de alto valor energético tales como racimos vacíos (EFB), fibra, cascarilla y efluentes líquidos con alto contenido de orgánicos llamados Pome (Palm Oil Mill Effluent). Una planta extractora produce casi tres veces más la cantidad de aceite producido por biomasa, demostrando un gran potencial para el incremento de la eficiencia eléctrica de las plantas y la energía instalada, principalmente mediante el uso de subproductos en plantas de cogeneración con altos parámetros de vapor y disponibilidad para reducir el consumo de vapor en el proceso. El objetivo de este trabajo es el de presentar los resultados del estudio acerca del potencial de cogeneración de tres plantas de beneficio representativas en dos importantes regiones productoras de aceite de palma en Colombia (Latinoamérica), el quinto país productor de aceite de palma en el mundo. El tamaño del sistema de cogeneración se realizó asumiendo su operación durante el mayor número posible de horas a través del año (basado en la disponibilidad estacional de la fruta) considerando parámetros para el vapor a 20 bar y 350°C, utilizando una turbina de condensación/extracción. El balance de masa y energía se realizó empleando el 'Gate Cycle Enter Software', versión 5.51, para el estimado del potencial de generación eléctrica. Los resultados demostraron que para capacidades de procesamiento de fruta de entre 18 y 60 tRFF/h, es posible tener excedentes de energía que oscilan entre 1 y 7 Mw, si las plantas son autosuficientes en energía eléctrica y vapor para el proceso. Con un factor de capacidad promedio (aproximadamente 0,4) es posible esperar un índice de generación de 75 y 160 Kwh/tRFF, cuando la planta de procesamiento está en operación o parada, respectivamente, tres o cuatro veces mejor que cuando se utiliza un sistema tradicional con turbinas de vapor de contrapresión. Este análisis utilizó como combustible hasta 60% de EFB producidos en la planta, considerando su valor como fertilizante para el cultivo de palma. Se tuvieron en cuenta varias condiciones económicas para estimar la factibilidad económica y técnica de sistemas de cogeneración en plantas de beneficio para el sector de la palma de aceite en Colombia.



SUMMARY

The results showed that for fruit processing capacities between 18 and 60 tRFF/h, it is possible to have surplus power ranging between 1 and 7 Mw, if the plants are self-sufficient in electric energy and steam for process. With an average Capacity Factor (approximately 0.4), it is possible to expect a generation index of 75 and 160 Kwh/tRFF when the processing plant is operating or shutdown, respectively, 3 or 4 times better than when a traditional system with a back-pressure steam turbines is used. This analysis used up to 60% of EFB produced in plant as fuel, considering its value as fertilizer for the palm crop. Several economic conditions were considered to estimate the economic and technical feasibility of cogeneration systems in palm oil mill for Colombian palm oil sector. The palm oil mills are characterized by the availability of considerable amounts of by-products of high energy value such as empty fruit bunches (EFB), fibers, shells and liquid effluents with high content of organics called POME - Palm Oil Mill Effluent. A palm oil mill produces almost three times the amount of oil produced by biomass, showing a huge potential for increasing the power efficiency of the plants and installed power, mainly by the use of by-products in cogeneration plants with high steam parameters and availability of reducing steam consumption in process. The objective of this paper is to present the results of the study about the cogeneration potential for three representative palm oil mills located in two important Palm oil producing regions in Colombia(South-America),-fifth palm oil producers of the world. The sizing of the cogeneration system was made assuming it operation during the greatest possible number of hours throughout the year (based on the seasonal availability of fruit) considering parameters for the steam at 20 bar and 350° C, using a condensing/extraction turbine. The balance of mass and energy was made by using the Gate Cycle Enter Software, version 5.51, for the estimative of the potential of electricity generation.



INTRODUCCIÓN

Los aceites de palma, frijón de soya, colza y girasol son los aceites vegetales más comúnmente utilizados en el mundo. La producción mundial de aceite de palma es de 30.45 millones de toneladas y los mayores productores son Malasia, Indonesia, Nigeria, Tailandia y Colombia. Con un área cultivada de 157.328 hectáreas Colombia produce 3.106.526 toneladas de racimos de fruta fresca (RFF), 630.388 toneladas de aceite de palma crudo, 145.740 toneladas de almendra y 60.429 toneladas de aceite de palmiste (Fedepalma, 2005). En el país hay 41 plantas de beneficio y la productividad promedio por hectárea es de 4.0 toneladas de aceite de palma crudo. Las plantas de beneficio se caracterizan por:

- Un consumo de electricidad que se ha evaluado que oscila entre 17 y 38 Kwh/tRFF en Malasia (Husain *et al.*, 2003) y 20 y 25 Kwh/tRFF en Tailandia (Prasertsan y Sajjakulnukit, 2005) y un consumo de vapor de 0,55-0,75 t/tRFF
- Una relación calor/energía promedio de 17,9 (Husain *et al.*, 2003)
- La disponibilidad de cantidades considerables de subproductos con alto valor energético como los racimos vacíos (EFB, por su sigla en inglés), fibra, cascarilla y efluentes líquidos con alto contenido orgánico llamados Pome (Palm Oil Mill Effluent). Una planta de beneficio produce casi tres veces la cantidad de aceite producido por la biomasa
- Un alto potencial para incrementar la eficiencia energética de las plantas, principalmente mediante el incremento de la energía instalada y los parámetros de vapor en las plantas de cogeneración y reducir el consumo de vapor en el proceso
- La posibilidad de generar biogás a partir del tratamiento anaeróbico de los efluentes líquidos del proceso
- La posibilidad de generar energía en regiones aisladas.

Husain *et al.*, 2003) realizó un estudio de eficiencia de cogeneración en siete plantas de beneficio en el estado de Perak en Malasia. La conclusión principal del estudio se refiere a la poca atención que esta industria le presta a la conservación de energía. Las

propuestas principales con respecto a esta mejora mencionan la sustitución de turbinas de vapor de contrapresión por unas de condensación/extracción (que pueden incrementar la energía eléctrica instalada en aproximadamente 60%) e incrementar la eficiencia de las calderas, que en la actualidad tienen un valor promedio de 73% basado en el valor calorífico bajo (LCV, por su sigla en inglés). Según Zairin (2003), el potencial total de cogeneración en Malasia a partir de residuos de biomasa de la industria palmera es de 1.117 Mw.

En la actualidad se implementan varios proyectos de cogeneración en plantas de beneficio en Malasia y Tailandia. Uno de ellos pertenece a la compañía Kilang Sawit United Bell Sdn Bhd de Malasia, que construyó una planta de 1.2 Mw de potencia con una turbina de contrapresión y una caldera de 35 t/h con 23 bar de presión de vapor. La inversión específica en la planta de cogeneración fue de 580 US\$/Kw con un tiempo de recuperación de la inversión de 3.7 años.

La compañía Malasia TSH Bio-Energy construyó una planta de cogeneración en el estado de Kunak con una potencia de 14 Mw y parámetros de vapor de 66.5 bar y 402 °C (Lacrosse y Shakya, 2004). El costo de la inversión fue de 9 millones de euros y el tiempo de recuperación fue de cuatro años. Thai Company Southern Power Co Ltd ha propuesto una planta de 44 Mw con parámetros de vapor de 62 bar y 482 °C, incluyendo la turbina de condensación/extracción. Las inversiones asociadas y los planes en Malasia son consecuencia de las metas del octavo plan estratégico (2001-2005) al establecer que 5% del total de la energía generada debe provenir de fuentes renovables, principalmente de biomasa (Cogen, 2003). Basados en la literatura analizada, es posible generalizar algunos indicadores para los sistemas de cogeneración de la industria de la palma de aceite:

- Un cultivo de 10.000 hectáreas puede corresponder a una potencia instalada de 5 a 11 Mw en la planta de beneficio, dependiendo del tipo y los parámetros del sistema de cogeneración y de la disponibilidad de residuos
- El potencial de generación eléctrica es de 90 a 132 Kwh./t de RFF, dependiendo de la presión de operación del sistema (Walden, 2005)

- La potencia instalada en plantas de beneficio modernas oscila de entre 5 y 15 Mw con parámetros de vapor de 42 bar y 360°C
- La incertidumbre relacionada con el uso de racimos vacíos de fruta como fertilizante y problemas aparentes durante su combustión en las calderas debido a su contenido de humedad y álcali.

La cogeneración no está muy generalizada en el sector de la palma de aceite en Colombia debido a:

- Un proceso productivo tradicional caracterizado por un consumo de vapor alto e irregular (proceso semicontinuo debido a la esterilización de RFF)
- Bajo factor de capacidad de las plantas de beneficio durante algunos meses del año y en los períodos de baja disponibilidad de RFF durante unas cuantas horas al día
- Falta de tradición en el sector con respecto a la autogeneración y comercialización de energía
- Falta de base legal, programas de incentivos y precios atractivos para la comercialización de la electricidad para los productores independientes del país.

No obstante, el aumento en el precio de la electricidad y los costos de los combustibles durante los últimos años, así como la fuerte competencia en el mercado internacional del aceite de palma, han forzado la búsqueda de una reducción en los costos de producción, la posibilidad de implantar la producción de biodiésel y la comercialización de créditos de carbono. Estas razones han llevado a la agroindustria de la palma de aceite a un renovado interés en la cogeneración. La participación del procesamiento de RFF en los costos de producción de aceite es de aproximadamente 16%, es decir, 25% mayor que el mismo índice en Malasia. Los costos más altos del procesamiento de RFF provienen de la energía, representando 33% de los costos variables del proceso (Fedepalma, 2005).

Un estudio preliminar establece la posibilidad de una reducción de 25% en los costos de producción variables con la implantación de sistemas de cogeneración en las plantas de beneficio. El objetivo de este trabajo es el de presentar los resultados del estudio acerca del potencial de cogeneración de tres plantas de beneficio representativas en dos importantes regiones productoras de aceite de palma en Colombia: una en



la Zona Oriental (planta A) y dos en la Zona Central (plantas B y C).

La recolección y el procesamiento de datos estuvo a cargo de un equipo de especialistas del Núcleo de Excelencia en Generación Termoeléctrica y Distribuida (NEST) de la Universidad Federal de Itajubá, Unifei (Brasil), el Centro de Investigaciones en Palma de Aceite (Cenipalma) de Colombia y el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales, (Ceiam) de la Universidad Industrial de Santander (UIS-Colombia).

CARACTERIZACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS (BIOMASA) EN LAS PLANTAS DE BENEFICIO

La Tabla 1 muestra los datos sobre la disponibilidad de subproductos, según diferentes autores, expresados en porcentaje por cada tonelada de racimo de fruta fresca. El valor calorífico de la biomasa es: fibra = 18,6 MJ/kg.; cascarilla = 20,8 MJ/kg.; y racimos vacíos de fruta con 50% de humedad = 8,16 MJ/kg. La cantidad de biogás generada por cada tonelada de RFF se asume en 19,6 m³ y su valor calorífico es 22,9 MJ/m³ (Youssof, 2006).

Otro aspecto que debe considerarse es la producción de biogás como resultado del tratamiento anaeróbico del Pome y su conversión en electricidad utilizando motores de combustión interna o micro-turbinas. Yeoh (2004), estableció el potencial de generación de biogás y su potencia equivalente en Malasia, dependiendo de la temperatura de digestión (Tabla 2). Según el mismo autor, la cantidad promedio de efluentes en la industria de la palma aceitera en Malasia es de 2,6 m³/ton de aceite.

METODOLOGÍA

El objetivo principal de las mediciones térmicas propuestas es la recolección de los datos necesarios para lograr los estudios de factibilidad técnicos y económicos. Se evaluaron dos etapas: en la primera se consideró la capacidad actual de las plantas de beneficio y, en la segunda, se anticiparon futuras expansiones. Se obtuvieron los siguientes datos:

1. Para los procesos: esterilización de la fruta; extracción de aceite, recuperación de nuez, clarificación del aceite y almacenamiento:
 - Presión, temperatura y flujo del vapor en cada entrada del proceso

Tabla 1. Disponibilidad de residuos de biomasa y efluentes en las plantas de beneficio

Referencias	Racimo de fruta fresca RFF, t/ha/año	Racimo vacío % RFF	Fibra % RFF	Cascarilla % RFF	Efluente líquido (Pome) % RFF
(Youssof, 2006) Malasia	20,08	22	13,5	5,5	67
(Prasertsan y Prasertsan, 1996) (Tailandia)	10,0	20-30	12-13	6,8-7,4	87
(Cenipalma, 2005; Bernal, 2001) (Colombia)	18-22*	17,7-26,1	11,6-15	5-7	70-80

* Valor promedio con un alto nivel de tecnología 28-32 t/ha para un periodo de cultivo de entre 5 a 6 años.

Tabla 2. Potencial de producción de metano (biogás) y su energía equivalente para diferentes temperaturas de digestión en Malasia (basado en una producción de RFF de 63.8x10⁶ toneladas y considerando que el volumen de aguas residuales siendo 31.9 x10⁶ m³) (Yeoh, 2004)

Temperatura de digestión, °C	Producción de CH ₄ ¹ , 10 ⁶ m ³ /año	Energía térmica disponible ² , 10 ¹⁵ J/año	Equivalente de petróleo, 10 ⁶ L/año	Potencial de generación eléctrica ³ , 10 ⁶ kWh/año
35	375	12,94	365	1.240
45	479	16,53	467	1.470
50	518	17,87	505	1.580
55	734	25,32	715	2.250

1 Calculado considerando un promedio BOD de aguas de desperdicio de 25000 mg/l y una producción específica de metano de entre 0.47 a 0.92 m³ de CH₄/Kg. BOD, (dependiendo de la temperatura).

2 Considerando un valor calorífico del metano de 34.5 MJ/m³.

3 Basado en un consumo de biogás de 0.50 m³/Kwh en unidades de generación utilizando gas natural.

- Presión, temperatura, flujo condensado recuperable (que podía retornarse a la caldera), flujo no recuperable y flujo de agua de reemplazo de caldera.

2. Para la estación de cogeneración eléctrica:

- Consumo de electricidad en Kwh/t de RFF procesados
- Precio de compra y venta de electricidad \$/Kwh
- Por cada combustible. Disponibilidad y variación estacional a lo largo del año, valor calorífico bajo, análisis elemental e intermedio
- Consumo total de agua en t/h
- Precio del agua en \$/m³
- Cantidad de efluentes del proceso, Kg./tRFF

- Si ya hay una planta de biogás instalada, verificar la producción en m³/h y la composición del gas
- Resumen de los procesos con diagramas de producción y balance de masa y energía, incluyendo las instalaciones de las planas (para la producción de la energía para el proceso) y la producción de biogás (en caso que exista).

El estudio de factibilidad incluyó las siguientes secciones (Figura 1):

- Análisis de las demandas de calor y eléctricas
- Análisis del costo de la energía en la situación actual. En el caso de una planta aislada con su propia generación utilizando motores diésel, debe evaluarse el consumo de combustible

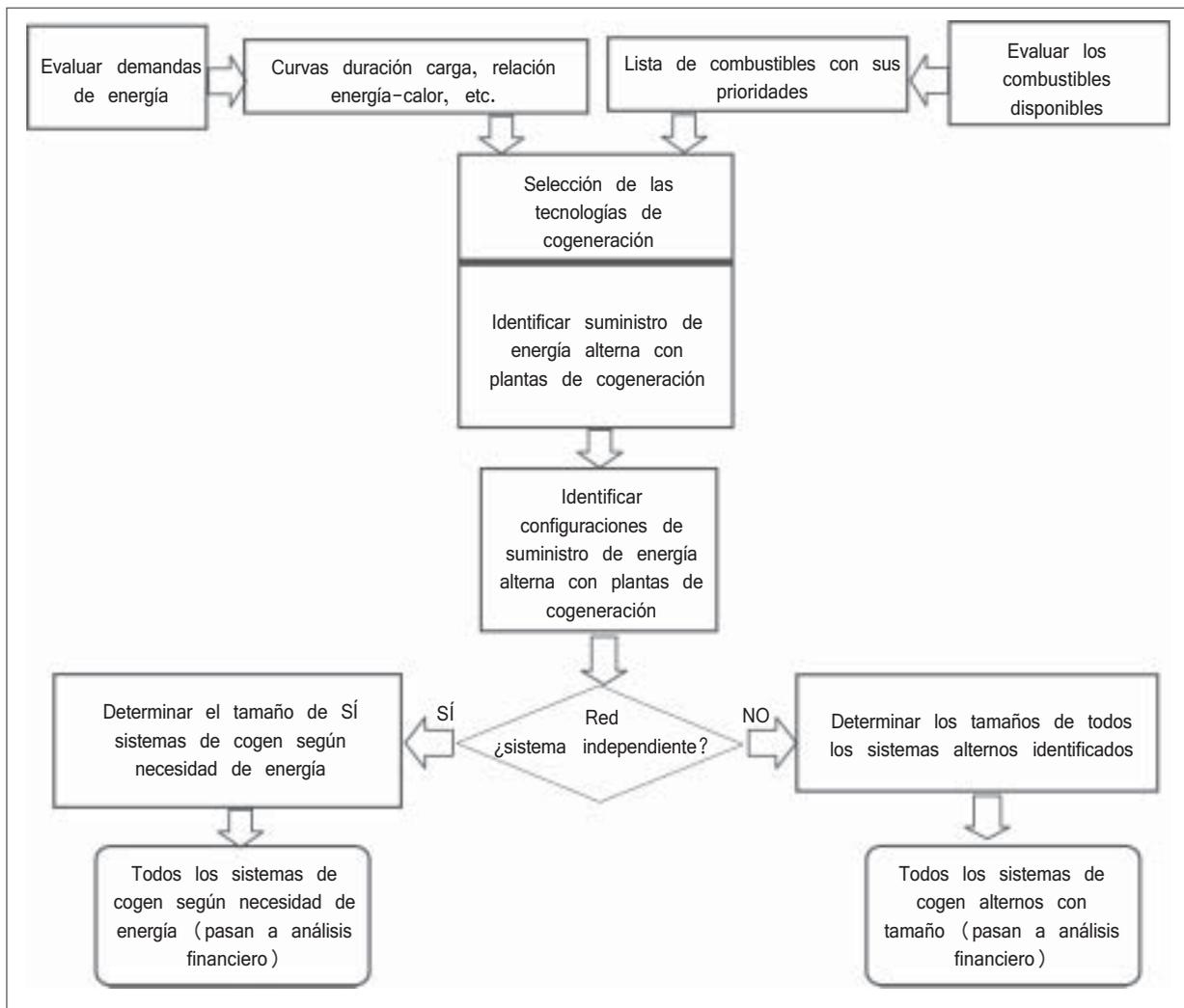


Figura 1. Etapas del análisis económico y térmico en un proyecto de cogeneración (Quang, 2004).



- Análisis de alternativas. Se evaluaron diferentes niveles de energía y también distintas tecnologías según los casos
- Simulación de cada alternativa. Determinación de los ahorros netos obtenidos
- Estimación de las inversiones requeridas en cada alternativa
- Análisis de la factibilidad económica y financiera
- Análisis de sensibilidad.

La cogeneración es muy interesante desde un punto de vista termodinámico y es técnicamente factible. En muchos casos, también es atractiva económicamente y es una forma interesante de obtener importantes reducciones en la compra anual de energía y, por tanto, en los costos de producción.

Las características y los principales parámetros de las tres plantas de beneficio estudiadas aparecen en la Tabla 3.

En general, los sistemas de cogeneración propuestos para las tres plantas de beneficio tienen las siguientes características comunes:

- El sistema está diseñado para operar en paridad térmica, lo que significa que seguirá la curva de demanda de calor
- El tamaño del sistema se realizó asumiendo su operación durante el mayor número posible de

horas a través del año (basado en la disponibilidad estacional de la fruta) incluyendo el almacenamiento de biomasa para los meses con baja producción de fruta. Es posible, entonces, asumir una capacidad de producción promedio, que corresponde al indicador de la Tabla 3, “procesamiento equivalente” expresado en tRFF/hr

- Como tecnología de cogeneración se escogió el ciclo de vapor. Esto se debió al uso de combustibles sólidos (residuos de biomasa), al uso de energía térmica como vapor y, finalmente, debido a la amplia diseminación de la tecnología de generación de vapor en las plantas de beneficio
- Los parámetros de vapor considerados fueron 20 bar y 350 °C. La eficiencia de diseño propuesta para las calderas fue de 85%. La Figura 2 se refiere a un esquema de la caldera estudiada empleando el SBC ‘Steam Boiler Calculations’ (cálculos para calderas a vapor) descrito en (Lora, *et al.* 2004). Para utilizar parámetros de vapor más altos, se requieren modificaciones considerables en el proceso tales como la reducción del consumo específico de vapor y su variabilidad según el tiempo, aumento del factor de capacidad de la planta, etcétera

Tabla 3. Características y parámetros de las tres plantas evaluadas

Beneficio	A	B	C
Capacidad de procesamiento actual, tRFF/hr	18	20	60
Capacidad de procesamiento futura, tRFF/hr	30	25	60
Procesamiento equivalente, tRFF/año	11,90	13,79	29,73
Balance másico de biomasa, %RFF			
Fibra	13,75	13,50	13,28
Cascarilla	5,00	3,50	3,23
Raquis	20,26	24,00	23,40
Porcentaje de utilización biomasa disponible, % Fibra			
Cascarilla	100	100	100
Raquis	50	50	70
Biogás	100	100	100
Planta de cogeneración ya en operación	No	No	Si
Conexión a la red eléctrica	No	Si	Si

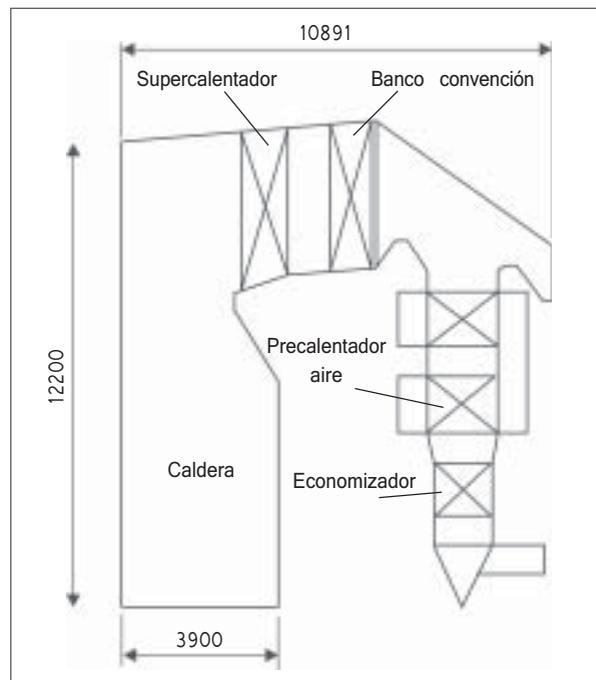


Figura 2. Esquema de la caldera propuesta.

- Se decidió utilizar una turbina de condensación/extracción y un sistema para la generación de vapor del proceso, incluyendo una bomba, una válvula para reducir la presión y un intercambiador de calor
- El empleo de un condensador enfriado por aire
- La existencia de un sistema auxiliar de generación de vapor
- Se asume que solo se está consumiendo 5 % de los racimos vacíos en las plantas A y B y 70% en la planta C, según la Tabla 3. Durante el análisis económico se consideró el costo de sustituir los racimos vacíos por fertilizantes. Esta consideración se basó en los límites establecidos por el cultivo debido al uso de racimos vacíos como complemento de fertilización y para mejoramiento del suelo. Sin embargo, Ravi (2004), demostró que el uso de racimos vacíos como combustible para la generación de energía eléctrica ofrece un retorno superior, casi 3,5 veces, en comparación con su uso en el campo.

RESULTADOS

Evaluación de la energía en cada uno de los casos estudiados

Caso A

Tiene un sistema aislado con generación eléctrica utilizando diésel y biogás en los motores. En este caso la ventaja económica de la cogeneración radica en la sustitución del diésel y la posibilidad de vender la electricidad. La variación en la disponibilidad de fruta durante el año en relación con esta planta, aparece en la Figura 3. El esquema térmico para la planta de cogeneración se expone en la Figura 4. El ciclo térmico consiste en una caldera que permite la generación de vapor a 20 bar y 350°C a partir de la quema de biogás y una mezcla de residuos de biomasa (fibra, cascarilla y tusa). Esta caldera tiene un supercalentador conector, un economizador y ventiladores de tiro forzado. El vapor generado pasa a través de una turbina de condensación/extracción para generar electricidad. El vapor de la

extracción se utiliza para la desaireación del agua de alimentación y el suministro de vapor que se requiere para la producción de aceite. La generación de vapor para el proceso se produce a través de un intercambiador de calor en un sistema cerrado para evitar la contaminación y pérdidas de vapor en el ciclo térmico, lo que sucede hoy en día en el ciclo abierto utilizado, lo cual reduce los costos de tratamiento del agua. El condensador y las bombas de la caldera complementan la planta de cogeneración. Debido a la baja disponibilidad de agua en la planta, se decidió utilizar un condensador enfriado por aire. El balance de masa y energía se realizó utilizando el 'Gate Cycle Enter Software', versión 5.51 (Gate Cycle, 2003).

La Tabla 4 presenta los resultados de la evaluación de la energía de la planta de cogeneración con respecto a la capacidad de procesamiento presente y futura. En cada caso se analizan dos etapas: la primera, con un régimen de operación con cogeneración y la segunda, con generación con electricidad únicamente.

Caso B

La planta compra toda la electricidad para el proceso y durante emergencias se instala un motor diésel. Por tanto, la ventaja del sistema de cogeneración radica en la comercialización del excedente de electricidad y la cantidad de electricidad que la planta no necesita comprar. En este caso y en el caso C, se observan picos de producción de fruta en los primeros cuatro meses del año debido, entre otros aspectos, al manejo del material genético procesado y la condiciones de los cultivos, tal como lo muestra la

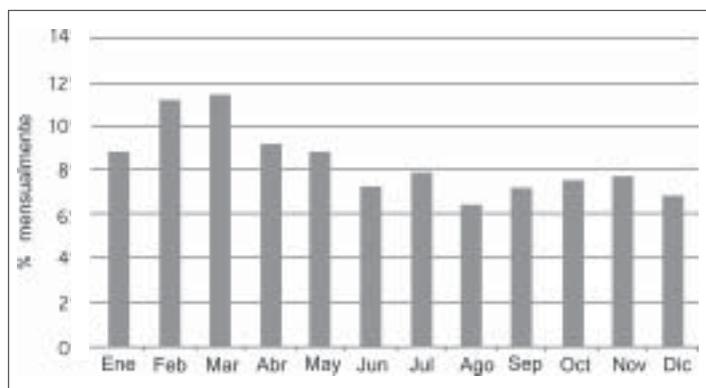


Figura 3. Disponibilidad de fruta en la planta A.

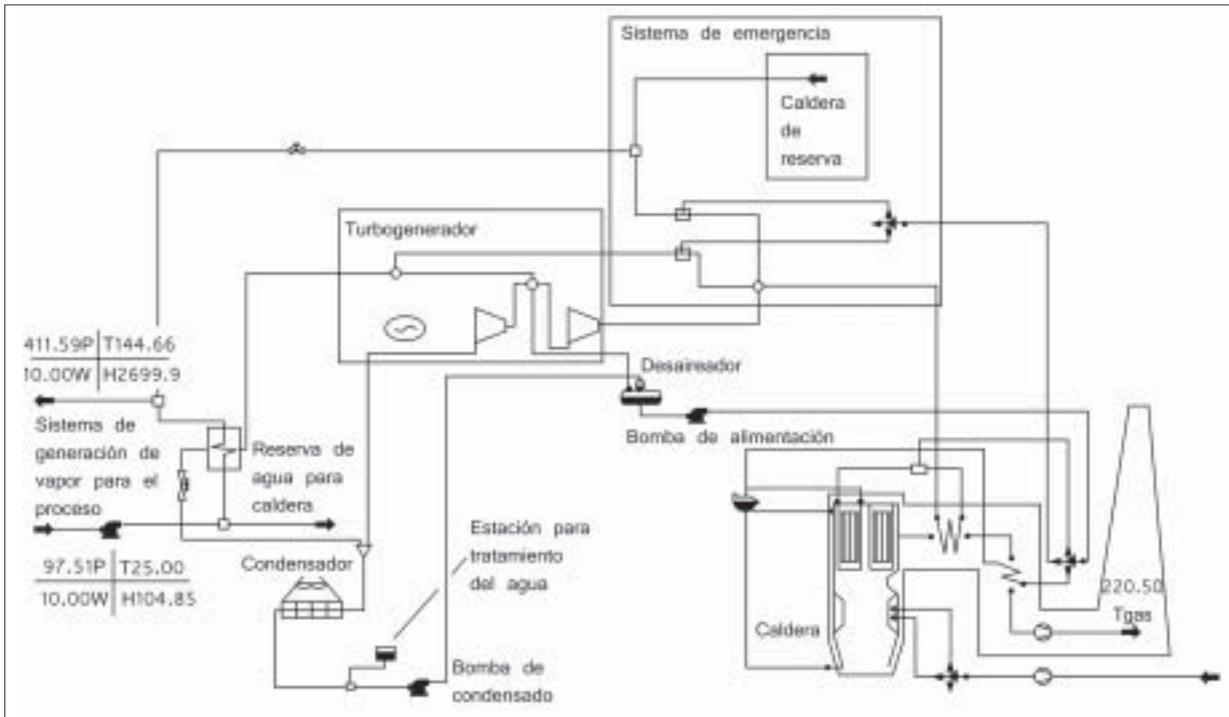


Figura 4. Esquema técnico de la estación de cogeneración en la planta A.

Tabla 4. Resultados de la evaluación de la energía de cogeneración de la planta A

Ítem	-	I	II		
Procesamiento de RFF	tRFF	18	30		
Energía eléctrica bruto	KW	1530	3012	2936	5114
Energía eléctrica neta	KW	1484	2966	2858	5035
Equipos auxiliares	KW	46	46	78	78
Calor cogenerado	KW	7207	0	10811	0
Eficiencia cogeneración de electricidad (Base PCI)	%	12,13	24,25	14,02	24,70
Flujo de calor generación de electricidad (Base LCV)	kJ/Kwh.	29673	14847	25677	14574
Eficiencia generación de calor (Base LCV)	%	58,92	0,00	53,03	0,00
Eficiencia de la cogeneración calor y electricidad (Base LCV)	%	71,06	24,25	67,05	24,70
Tiempo procesamiento por año - Planta de cogeneración	h/año	6449	6449	6450	6450
Factor utilización - planta de cogeneración	%	74	74	74	74

Figura 5. El esquema técnico de la planta de cogeneración en los casos B y C es prácticamente el mismo que en el caso A, variando únicamente la energía instalada. De acuerdo con la Tabla 5 se encuentran los resultados de la estación de cogeneración para el caso B y también las variantes, con y sin, cogeneración.

Caso C

A pesar de tener un sistema de cogeneración, la planta compra la mayoría de la electricidad de la red debido a su baja eficiencia. Por tanto,

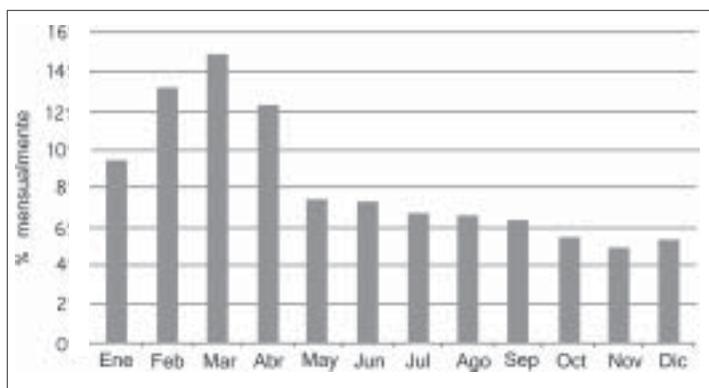


Figura 5. Disponibilidad de fruta en la planta B.

Tabla 5. Resultados de la evaluación de la energía de la planta de cogeneración para la planta B

Ítem	-	I	
Procesamiento de RFF	tRFF	25	
Energía eléctrica bruta	KW	1834	3986
Energía eléctrica neta	KW	1768	3920
Equipos auxiliares	KW	66	66
Calor cogenerado	KW	9008	0
Eficiencia generación de electricidad (basada en LCV)	%	10,32	22,87
Flujo de calor de generación de electricidad (basada en LCV)	kJ/Kwh.	34896	15740
Eficiencia generación de calor (basada en LCV)	%	52,55	0,00
Eficiencia de la cogeneración de calor y electricidad (basada en LCV)	%	62,87	22,87
Tiempo de procesamiento por año - Planta de cogeneración	h/año	5394	5394
Factor de utilización - Planta de cogeneración	%	62	62

1 Cogeneración; 2 Sólo energía eléctrica.

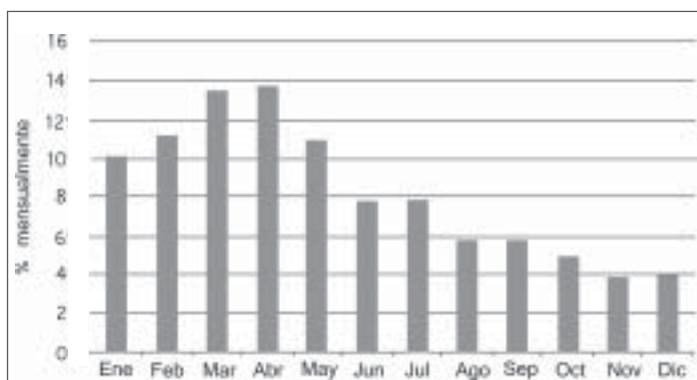
la ventaja de la cogeneración se calcularía con base en la electricidad que no se compraría y en la comercialización del excedente de electricidad. En este caso se observan picos de producción de fruta según se muestran en la Figura 6. Los datos de la evaluación de la energía aparecen en la Tabla 6. En el variante I, se considera la sustitución de la planta de energía actual por una nueva. En la variante II sólo se considera la sustitución de las actuales turbinas de vapor debido a su degradación.

Análisis económico

Primero es necesario enfatizar que en todos los casos los costos de inversión incluyeron, no solo el costo de los equipos para la generación de vapor y electricidad, sino también los costos relacionados con los sistemas de control, montaje y supervisión eléctrica de la planta y las subestaciones, obras civiles y conexión a la red, todos bajo estándares de precios internacionales.

Caso A

A pesar de ser la planta de beneficio que presenta la menor capacidad de procesamiento entre los casos estudiados, mostró los mejores indicadores económicos para el tiempo de recuperación y tasa interna de retorno (TR y TIR), con cinco años y 30% respectivamente. También es importante mencionar que

**Figura 6.** Disponibilidad de fruta en la planta C.**Tabla 6.** Resultados de la evaluación de la energía de la planta de cogeneración para la planta C

Ítem	-	I		II	
Procesamiento RFF	tRFF	60	60		
Energía eléctrica bruta	KW	1974	7818	959	2445
Energía eléctrica neta	KW	1853	7698	913	2421
Equipos auxiliares	KW	120	120	46	24
Calor de cogeneración	KW	21621	0	21625	0
Eficiencia en generación de electricidad (basada en LCV)	%	5,76	23,90	3,03	20,07
Flujo de calor de generación de electricidad (basada en LCV)	kJ/Kwh.	62548	15060	56139	21177
Eficiencia generación de calor (basada en LCV)	%	67,14	0,00	71,73	0,00
Eficiencia de la cogeneración de calor y electricidad (basada en LCV)	%	72,89	23,90	74,76	20,07
Tiempo de procesamiento por año - Planta de cogeneración	h/año	5385	5385	3895	3895
Factor de utilización - Planta de cogeneración	%	61	61	44	44



estas cifras pueden mejorarse a 3,5 años y 42% cuando su capacidad aumenta hasta 30 t RFF/h. Las figuras 7 y 8 se refieren a la sensibilidad del proyecto con relación a los costos de inversión y la variación en los precios de venta de la electricidad. Estos resultados se obtienen principalmente de acuerdo con el factor de capacidad de la planta, la distribución regular de producción de fruta durante el año y los altos costos de generación utilizando el motor diésel.

Caso B

En cuanto al Caso B, a pesar de tener una capacidad ligeramente superior a la planta A, los indicadores no son muy favorables y se ven afectados en forma negativa por la distribución irregular de la producción de fruta y principalmente por el bajo factor de capacidad. La TR estableció una reducción del 10% en

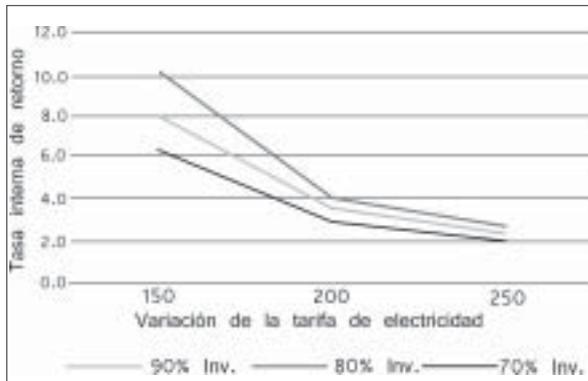


Figura 7. Sensibilidad del costo de inversión y el precio de venta de la electricidad con respecto a la TR para el Caso A (capacidad de procesamiento de 18 tRFF/hr).

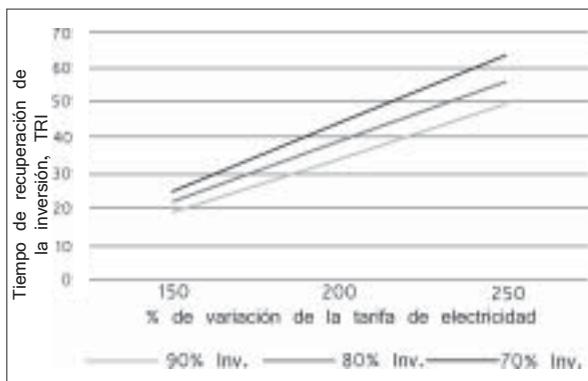


Figura 8. Sensibilidad del costo de inversión y el precio de venta de la electricidad con respecto a la TIR para el Caso A (capacidad de procesamiento de 18 tRFF/hr).

los costos de inversión y un aumento en el precio de venta de la electricidad que oscila alrededor de 50% de oferta de TR de 10 años con una TIR del 20%.

Caso C

El Caso C solo pudo mostrar resultados similares a los presentados por el Caso A si se implantaba un sistema de cogeneración completamente nuevo para poder lograr una eficiencia global en la generación de energía eléctrica mucho más alta que la actual. La planta C se ve favorecida por la alta cantidad de fruta procesada y por los precios de venta de la energía eléctrica.

Indicadores de energía

Los indicadores que se muestran a continuación son producto del análisis de los resultados obtenidos de los tres diferentes estudios de casos. No fue posible establecer una relación coherente entre el índice de generación (Kwh/tRFF) y la capacidad de procesamiento de las plantas de beneficio analizadas, debido a las diferencias entre disponibilidad de fruta y su distribución a lo largo del año. Por esta razón el factor de capacidad (FC) de cada una de las plantas se determinó, lo cual indica el porcentaje de utilización (o fracción de tiempo) de la capacidad de procesamiento instalada (Figura 9). La Figura 9 expone la relación entre el factor de capacidad y el índice de generación. La Figura 10 contiene un resumen de los indicadores promedio de ingreso y productos que se esperan de la planta de beneficio con cogeneración y venta de la energía eléctrica excedente.

El índice de generación de 31 Kwh/tRFF de la Figura 9 para la planta C, se explica por el hecho de que tiene una alta demanda de calor y la planta de coge-

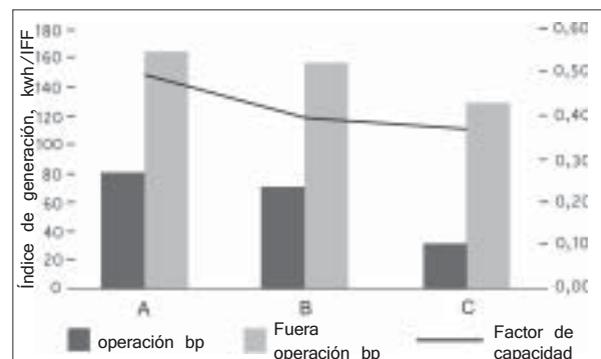


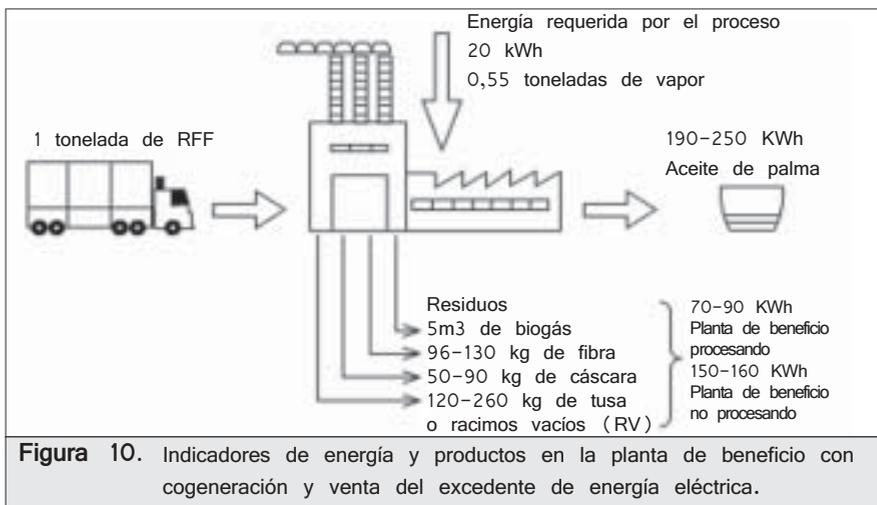
Figura 9. Relación entre el índice de generación y el factor de capacidad.

neración fue diseñada con base en una disponibilidad de combustible que no corresponde con la capacidad de procesamiento instalada de 60 tRFF/hr. Puede concluirse, entonces, que este valor del índice de generación no es el característico para la planta C, que tendrá un valor mayor cuando la distribución anual de fruta satisfaga la demanda de la capacidad nominal de la planta.

Con un factor de capacidad promedio (aproximadamente 0,4) es posible esperar un índice de generación de 75 y 160 Kwh/tRFF cuando la planta procesadora está operando y parada, respectivamente. Según estudios anteriores realizados por Cenipalma, el índice de generación promedio en las plantas de beneficio en Colombia, oscila alrededor de los 20 Kwh/tRFF.

Las evaluaciones realizadas con respecto a las tres plantas estudiadas muestran que el índice de generación puede llegar a valores de hasta 70-80 Kwh/tRFF cuando se instala una planta de cogeneración con turbinas de vapor de condensación/extracción y parámetros de vapor de 2,0 MPa. Este desempeño es tres o cuatro veces mejor que cuando se utiliza un sistema tradicional con turbinas de contrapresión.

Si se tienen en cuenta todas las variantes analizadas, se observa que las condiciones actuales no presentan una factibilidad económica. No obstante, fue posible observar que con una inversión específica de aproximadamente 900 US\$/Kw (valor promedio considerado para los tres casos) es factible desarrollar el proyecto de cogeneración si los precios de comer-



cialización de la electricidad oscilan alrededor de US\$ 0,11/Kwh., teniendo en cuenta la tasa de cambio (US\$ 2.200) y tasas de interés (15%) existentes en el momento de la realización de este estudio.

Es importante mencionar que la ventaja de las plantas de beneficio que tienen mayor capacidad de procesamiento de fruta es la posibilidad de instalar sistemas de cogeneración con parámetros de vapor más altos, lo que incrementará en forma considerable la generación de electricidad.

Oportunidades y limitaciones de cogeneración en el sector de la palma de aceite en Colombia

Las oportunidades de cogeneración en el sector de la palma de aceite en Colombia están dadas por:

- Disponibilidad de combustible residual del proceso de extracción del aceite
- Ubicación de algunas plantas de beneficio en regiones aisladas, permitiendo la electrificación de esas áreas

Beneficio	Capacidad tRFF/h	Factor de capacidad -	Índice de generación, Kwh./tRFF		Capacidad instalada específica KW instalado/ (tRFF/h)		Costo específico US\$/KW
			Procesamiento de RFF de la beneficio	No procesamiento de RFF de la beneficio	Nominal ¹	Real ²	
A	18	0,49	82	165	165	333	1018
B	25	0,40	71	157	157	396	688
C	60	0,37	31	128	128	350	849

Notas: 1. Basado en la capacidad de procesamiento nominal; 2. Basado en la capacidad de procesamiento real.



- Aumento constante en el costo de la electricidad y del combustible diésel
- Diversificación de los negocios
- Posibilidad de reducir los costos variables de la producción de aceite en 25%
- Posibilidad de comercializar los créditos de carbono
- Posibilidad de emplear incentivos gubernamentales para cofinanciar la inversión en la planta de cogeneración
- Posibilidad de incrementar la eficiencia de la energía del proceso.
- Para capacidades de procesamiento de fruta de entre 18 y 60 tRFF/h, es posible tener excedentes de energía que oscilan entre 1 y 7 Mw, si las plantas son autosuficientes en energía eléctrica y vapor para el proceso. Esto para parámetros de vapor de 20 bar y 350°C
- Estas cantidades de energía eléctrica cogenerada están disponibles entre 60 y 70% del tiempo anual, representando un aumento en la disponibilidad de energía que es 50% más alto que los sistemas actuales
- Este análisis utiliza hasta 60% de racimos vacíos (EFB) producidos en la planta como combustible, considerando su valor como fertilizante para el cultivo de palma

Los obstáculos para la cogeneración en el sector de la palma de aceite en Colombia están dados por:

- Actual bajo precio de venta de la electricidad
- Falta de legislación regulatoria para la comercialización de energía
- Alto costo de interconexión a la red
- Uso agrícola de los racimos vacíos (los que técnicamente pueden reemplazarse por fertilizantes)
- Poca disponibilidad de agua para enfriamiento del condensador
- Inversión relativamente alta en el proyecto de cogeneración, lo que implica la necesidad de incentivos económicos tales como precios especiales para la compra de electricidad por parte de las compañías eléctricas o reducción de impuestos (considerando el costo evitado con el incremento en la capacidad de generación).
- El sistema que se propone utiliza turbinas de vapor de condensación/extracción, así que tiene mayor flexibilidad operacional y a la vez garantiza las demandas térmicas y eléctricas del proceso. También da como resultado el logro de considerables cantidades de excedente de electricidad
- Las variables de mayor impacto en la factibilidad de los proyectos de cogeneración son: costos de inversión, tarifas de la electricidad, variabilidad en la cantidad de biomasa disponible, tasas de cambio y tasas de interés
- En las condiciones actuales no se logró la factibilidad económica en todos los casos analizados. No obstante, se observó que con costos de inversión específicos de entre 690 y 850 dólares/Kw (según la capacidad) es posible desarrollar el proyecto de cogeneración, si la tarifa de la electricidad y el precio de comercialización del excedente de la misma oscila entre dólares 0,11 y 0,16/Kwh, conforme a la tasa de cambio y las tasas de interés vigentes en la fecha de realización de este estudio (mayo de 2005)
- En Colombia se observa una tendencia hacia el incremento constante de las tarifas de energía. Sin embargo, dentro de un periodo de tres años se podrán lograr los niveles de tarifas y precios mencionados, y eso permitiría alcanzar la factibilidad económica de la cogeneración en el sector palmero

CONCLUSIONES

Las conclusiones principales que se derivan del estudio técnico-económico de las oportunidades de cogeneración en el sector de la palma de aceite en Colombia, basado en los tres estudios de caso analizados son:

- En todos los casos analizados la biomasa disponible en las plantas no solo garantiza las demandas de energía del proceso, sino que también genera excedentes de electricidad

- Conforme a las anteriores condiciones se pueden lograr valores de tiempo de recuperación de aproximadamente cuatro años
- Se hace imperativa la implementación de programas de incentivos con respecto a la cogeneración en el sector palmero. Estos deben incluir: contratos a largo plazo que garanticen la compra de tarifas diferenciales con respecto a la comer-

cialización del excedente de energía, y reducción de los impuestos de importación para los equipos de cogeneración.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Cenipalma y a las plantas de beneficio por suministrar la información para la realización de este trabajo.



BIBLIOGRAFÍA

- Bernal, FN. 2001. El cultivo de la palma de aceite y su beneficio: Guía general para el nuevo palmicultor.
- Cenipalma, 2005. Statistical data collected for benchmarking in oil mills by Cenipalma. www.cenipalma.org.
- Cogen 3, 2003. National energy policy review. (Malasia). www.cogen3.net
- Fedepalma. 2005. *Anuario Estadístico*. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo 2000-2004.
- Gate Cycle, 2003. Gate Cycle for Windows, version 5.51.01, copyright 1989-2003. The General Electric company all rights reserved.
- Husain, A; Zainal, ZA; Abdullah, MZ. 2003. Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in oil mills. *Biomass & Bioenergy*. 24: 117-124.
- Lacrosse, L; Shakya, SK. 2004. Clean and efficient biomass cogeneration in Asean. Power-Gen Asia Conference and Exhibition, 5-7 October. Bangkok (Thailand). <http://cogen3.net/doc/articles/cleanandefficientbiomasscogeneration.pdf>
- Lora, ES; Paramonov, AP; Teixeira, FN. 2004. Thermal and environmental performance of a modern bagasse cogeneration boiler, Zucker lindustrie/Sugar Industry. Berlin. (Germany) 129: 881-887.
- Prasertsan, S; Sajjakulnukit, B. 2005. Biomass and biogas energy in Thailand: potential, opportunities and barriers. *Renewable Energy*. Articles in Press, available online at www.sciencedirect.com.
- Prasertsan, S., Prasertsan, P. 1996. Biomass residues from mills in Thailand: an overview on quantity and potential usage. *Biomass and Bioenergy*. 11 (5): 387-395..
- Quang, TC. 2004. Technical analysis of cogeneration projects, Cogeneration Week in Indonesia, 19 May. Available online at <http://cogen3.net/presentations/asean/cogenweek2004brunei/Technicalanalysisofcogenprojects.pdf>
- Ravi, N. 2004. Empty fruit bunches evaluation. Mulch in plantation vs fuel for electricity generation. Proceeding of international palm oil conference. MPOB.
- Walden, D. 2005. Production of electricity and heat from biomass and agricultural by-products, Bronzeoak Limited www.resourcesaver.com/file/toolmanager/O105UF1139.pdf, downloaded in December
- Yeoh, BG. 2004. A Technical and Economic Analysis of Heat and Power Generation from Biomethanation of Palm Oil Mill Effluent, Electricity Supply Industry in Transition: Issues and Prospect for Asia 14-16 January. Available online at http://www.cogen3.net/doc/countryinfo/malasia/TechnicalEconomicAnalysisCHPPalmEffluent_BG.pdf
- Youssof, S. 2006. Renewable energy from Palm oil - innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production*. 14: 87-93.
- Zairin, Al. 2003. Renewable Energy Case Study in Malasia: Oil palm biomass for power generation, Paper presented at the Conference Renewable Energy on the Market 17-19 September. Available online at www.mem.dk/reconference/dias/Ahmad%20Zairin%20lsmail.ppt.