

Perspectivas de negocios en el aprovechamiento energético de la tusa y la fibra de la agroindustria de palma de aceite en Colombia

Perspectivas de negocios en el aprovechamiento energético de la tusa y la fibra de la agroindustria de palma de aceite en Colombia

Publicación de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma

Cofinanciada por Fedepalma - Fondo de Fomento Palmero

Presidente Ejecutivo
Jens Mesa Dishington

Director de la Unidad de Gestión Comercial Estratégica
Mauricio Posso Vacca

Líder de Promoción de Valor Agregado
Jaime Fernando Valencia Concha

Analista de Promoción de Valor Agregado
Ivonne Cristina Briceño Álvarez

Desarrollo
Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos – BIOT. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
Regeneración Ltda.

Coordinación Editorial
Yolanda Moreno Muñoz
Esteban Mantilla

Ilustración
Garavato Estudios

Diseño y Diagramación
Fredy Johan Espitia Ballesteros

Impresión
Multi-impresos

ISBN: 978-958-8616-95-7

Fedepalma
Calle 98 # 70-91. Pisos 14 y 15
PBX: (57-1) 313 8600
Fax: (57-1) 211 3508
www.fedepalma.org

Bogotá, D.C., Colombia
Diciembre de 2017



Contenido

Presentación	4
Retos y oportunidades para la biomasa resultante de la agroindustria de palma de aceite	6
Producción de biomasa	6
Biomasa en nuevos negocios	10
Tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa	14
Torrefacción	14
Peletización	18
Peletización de material torrefacto (TOP)	20
Beneficios de implementar la peletización y torrefacción	23
Implementación de las tecnologías en las plantas de beneficio	31
Mercados para la biomasa torrefacto, peletizada y TOP	34
Mercado internacional	34
Mercado nacional	36
Estimación financiera de la implementación de las tecnologías	40
Inversión requerida	41
Ingresos	41
Gastos operacionales (OPEX)	42
Supuestos financieros	43
Conclusiones	46
Glosario	48
Siglas y acrónimos	49
Bibliografía	50

Presentación

En 2016, la agroindustria de palma de aceite en Colombia procesó más de 5'600.000 toneladas de racimos de fruto fresco, que generaron aproximadamente 1'900.000 toneladas de biomasa: tusa (raquis) y fibra. Ante tal volumen de producción, el esfuerzo por disponer y aprovechar adecuadamente la tusa y la fibra es uno de los propósitos permanentes en las plantas de beneficio de fruto de palma. En particular, los usos más frecuentes de estos dos subproductos están asociados a la quema en caldera como combustible, el compostaje y la disposición de la tusa en campo.

Sin embargo, directores de planta han expresado que enfrentan retos en el manejo de la biomasa en el campo debido a los altos costos de transporte y a la dificultad en la logística para la disposición, especialmente en los meses de alta producción.

Mientras que en planta, tanto en el área técnica como en la ambiental, se presentan una serie de desafíos como la baja eficiencia de combustión de la biomasa, la baja confiabilidad de la red eléctrica, el riesgo de no cumplimiento de la normatividad ambiental y la cada vez más controlada contaminación de la mosca del ganado, que generan serios sobrecostos adicionales y retos técnico-ambientales. Lo anterior, hace necesario plantear alternativas que solucionen la disposición final de la biomasa en el sector.

La Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma, junto con la empresa Regeneración Ltda., especializada en energías renovables y eficiencia energética y el

grupo de investigación de Biomasa y Optimización Térmica de Procesos (BIOT) de la Universidad Nacional de Colombia, desarrollaron un proyecto para el manejo de tecnologías en el tratamiento de biomasa, como lo son la torrefacción y peletización. Estas tecnologías se especializan en el tratamiento de la biomasa con el objetivo de mejorar las características físico-químicas, para convertir la tusa y la fibra en combustibles con mayor energía que contribuyen a: mejorar la eficiencia de combustión en las calderas, optimizar la logística de transporte del material y aumentar los tiempos de almacenamiento superiores a seis meses sin degradación biológica. La aplicación de estas tecnologías abre las posibilidades de conseguir ahorros en el consumo energético de la planta de beneficio de fruto de palma y la oportunidad de vender dichos productos en mercados de combustibles limpios tanto en el país como en el exterior.

El objetivo de esta cartilla es presentar alternativas para el aprovechamiento rentable y eficiente de la tusa y la fibra, aplicando las tecnologías de torrefacción y peletización en mercados potenciales para la realización de nuevos negocios.

Retos y oportunidades para la biomasa resultante de la agroindustria de palma de aceite

Producción de biomasa

Colombia, como cuarto productor mundial de aceite de palma, con 512 mil hectáreas sembradas y una capacidad instalada de 1.544 tRFF/h, produjo 1'143.000 toneladas de aceite de palma en el 2016 en las 66 plantas de beneficio en operación al 31 de diciembre de ese mismo año, ubicadas a lo largo del territorio nacional. Adicional a la producción de aceites de palma, en las plantas de beneficio se producen por cada tonelada de racimos de fruto fresco (RFF) procesados, las siguientes cantidades de biomasa (Figura 1).

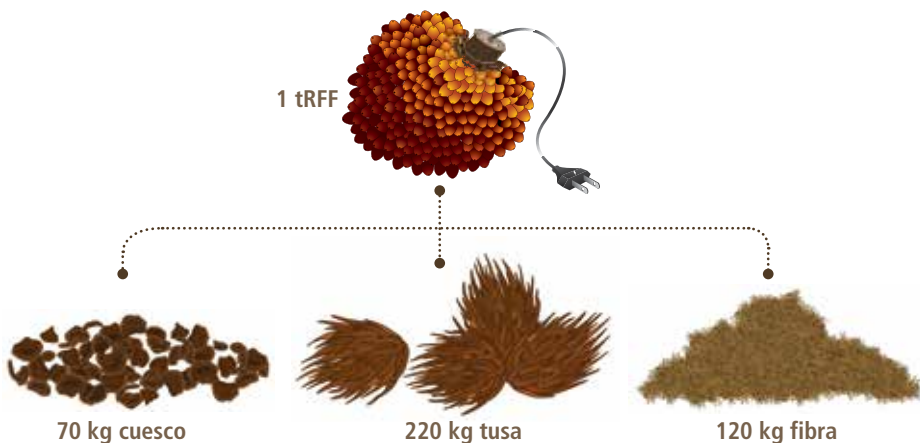


Figura 1. Producción de subproductos en el sector palmicultor por tonelada de RFF

Así, una planta de beneficio con capacidad de producción de 30 tRFF/h genera 840 toneladas de cuesco, 2.640 toneladas de tusa y 1.440 toneladas de fibra al mes.

Los resultados de encuestas realizadas a 17 directores de plantas de beneficio de fruto de palma de aceite indican que, principalmente en el periodo de alta producción de biomasa, se generan una serie de dificultades en cuanto a su manejo y disposición en las tres actividades que realizan las plantas para el uso final de la biomasa: transporte a campo, compostaje y quema en caldera (Figura 2).

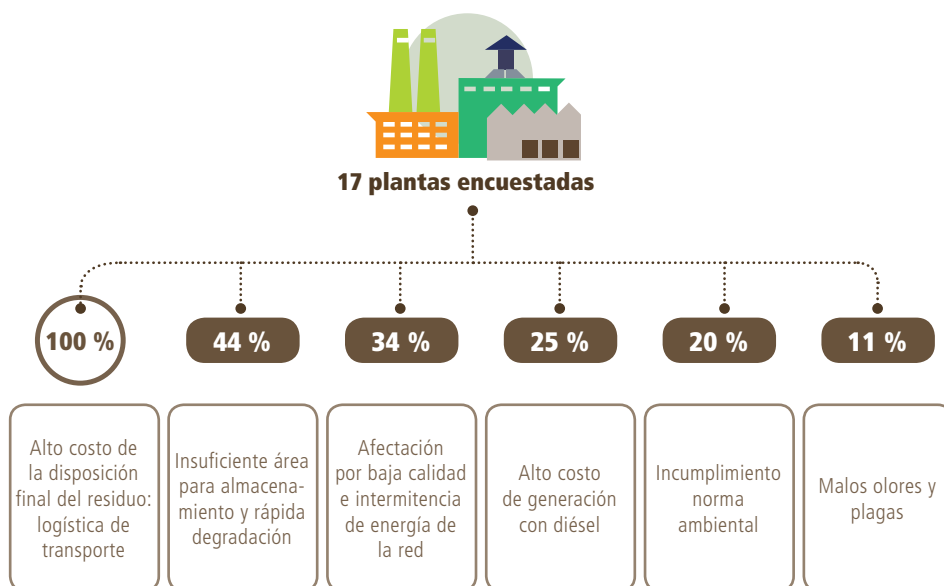


Figura 2. Retos de disposición de biomasa en plantas de beneficio (resultados de la encuesta)

El cuesco, por ser un combustible natural, se quema en caldera o se comercializa. No obstante, las condiciones físicas de la tusa y la fibra no son atractivas para el mercado, por lo que se disponen mayoritariamente en campo (tusa) y como combustible en caldera (fibra).

Las humedades superiores a 30 % en la tusa y 15 % en la fibra tal y como se obtienen del proceso, las hacen altamente degradables en el corto plazo y las convierten en combustibles con bajo poder energético comparado con los combustibles convencionales como el carbón.

El ingreso de biomasa húmeda tiene efectos negativos en la caldera tanto en su desempeño como en la baja calidad de la combustión y alto contenido de cenizas volátiles que afectan el mantenimiento y la vida útil de los equipos.

Tradicionalmente, la tusa resultante del proceso de extracción de aceite se dispone en campo; la logística de transporte de la tusa a campo es costosa y compleja, intensificándose aún más cuando hay mayor producción de racimos frescos. La Tabla 1 hace un análisis del costo de la logística de transporte de biomasa a campo.

Tabla 1. Costos de transporte de biomasa a campo

Tipo biomasa	Descripción	Cantidad
Tusa	Dosis biomasa aplicada por palma (kg)	400
	Tarifa mano de obra (\$/tonelada tusa)	1.500-4.000
	Costo transporte (\$/t)	10.000-20.000
	Promedio costo (\$/ha) cada tres años	958,1

Fuente: (Fontanilla Díaz, Mosquera Montoya, Ruíz Alvarez, Beltrán Giraldo, & Manuel Guerrero, 2015)

“ Una de mis mayores problemáticas es la evacuación de la tusa. Cuando hay un aumento de la producción, no tengo donde disponerla ni almacenarla. Suelo regalarla siempre ”

La logística de transporte de la tusa a campo es costosa y compleja, intensificándose aún más cuando hay mayor producción de racimos frescos

Así, en una planta de 30 tRFF/h los costos asociados al transporte de biomasa a campo son del orden de 760 millones de pesos anuales, cifra que motiva la búsqueda de soluciones diferentes para el óptimo aprovechamiento de la biomasa.

En la búsqueda de alternativas para dar valor agregado a la biomasa de palma de aceite con el fin de convertirla en oportunidades de ahorro y en generación de ingresos adicionales, se requieren tecnologías que optimicen el uso de la biomasa generada en el proceso de producción de aceite de palma. Las alternativas contempladas deben reducir o eliminar algunos de los costos actuales de transporte de biomasa a campo, así mismo, costos ambientales adicionales que se derivan de esta disposición de biomasa y también, que la biomasa no llevada a campo pueda ser utilizada como combustible para incrementar las horas de autogeneración de energía eléctrica durante el año en las plantas que auto-generan. Esta cartilla presenta soluciones tecnológicas que optimizan el uso de la biomasa como combustible disponible todo el año, a la vez que propone solución a los retos ambientales y de disposición de la biomasa en las plantas de beneficio de fruto de palma de aceite.

En una planta de 30 tRFF/h, el costo por disposición final de subproductos asciende a 760 millones de pesos al año



Biomasa en nuevos negocios

El mercado de combustibles renovables y eficientes obtenidos a partir de biomasa agroindustriales está creciendo. La demanda de combustibles a base de biomasa se ha incrementado en los últimos años a nivel mundial y se espera un crecimiento de al menos el 30 % al 2020 (Figura 3).

Los combustibles pueden clasificarse dependiendo de su estado: sólido, líquido o gaseoso; o de su origen: fósil o renovable. El carbón mineral se clasifica como un combustible sólido "fósil", mientras la biomasa es un combustible sólido "renovable" que ya reemplaza en diferentes países algunos usos del carbón mineral.

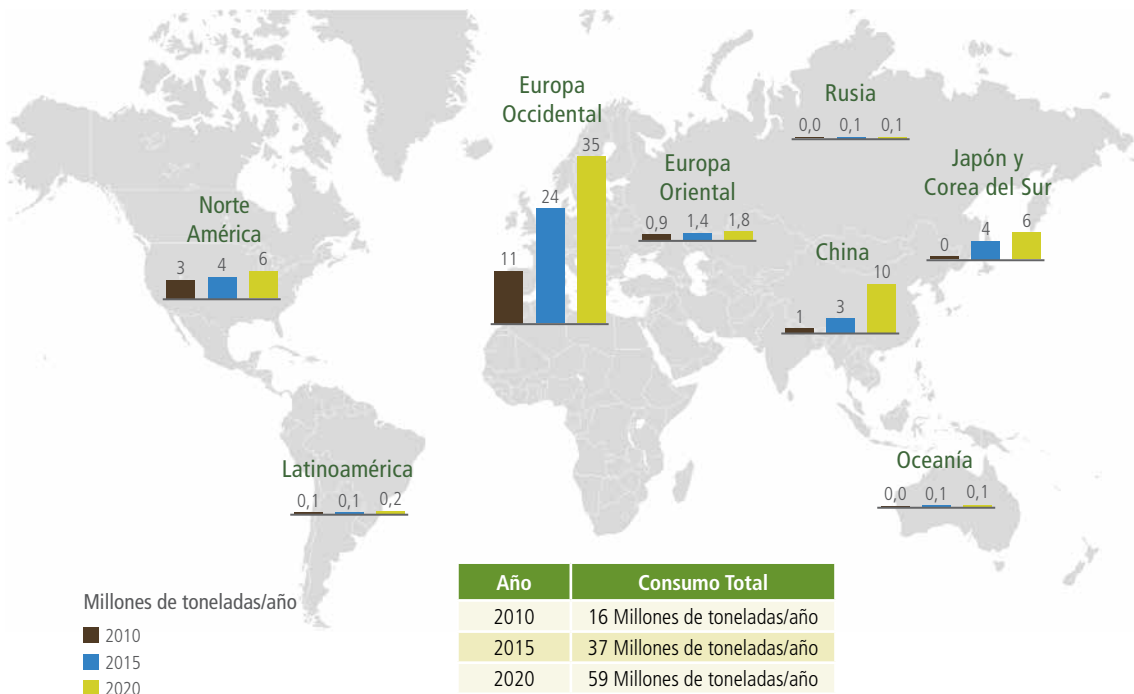


Figura 3. Demanda de biomasa peletizada. Fuente: (Poyry Management Consulting, 2016)

Desde la década de los setenta las preocupaciones mundiales sobre el cambio climático, el incremento de costos de los combustibles fósiles y los aspectos de seguridad energética, promovieron que diferentes sectores buscaran biomásas como alternativas de sustitución de combustibles para generar energía térmica y eléctrica. En Colombia, la Ley 1715 define estas biomásas que serán usadas como combustible en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER).

En la demanda de recursos energéticos primarios del país (Figura 4), los combustibles fósiles en el 2012 (carbón mineral, petróleo y gas natural) suman el 78 %, mientras que la producción de recursos energéticos a partir de fuentes renovables (hidroeléctricas, leña, bagazo, residuos de biomasa y otros) corresponde al 22 %.

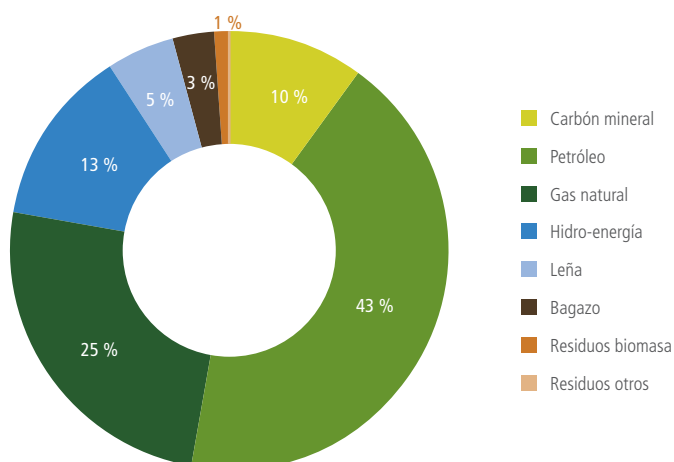


Figura 4. Demanda interna de recursos energéticos primarios en el año 2012. Fuente: (UPME, 2015)

Estas cifras indican que Colombia es un país altamente dependiente de los combustibles fósiles para cubrir sus necesidades energéticas. Sin embargo, en la diversificación de la canasta energética del país se muestra el desarrollo del sector

de los biocombustibles líquidos como el biodiésel de palma y el etanol de caña y la generación de energía a partir de biomasa.

Por otra parte, de acuerdo al Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2014-2028 (UPME-2015), los recursos de carbón mineral, petróleo y gas natural cuentan con reservas suficientes para 170, 7 y 15 años, respectivamente. El agotamiento de recursos fósiles sumado a los objetivos ambientales para reducir los gases efecto invernadero (GEI) en el país, han abierto el interés de diferentes sectores productivos a diversificar el uso de combustibles y a considerar el uso de las energías renovables no convencionales como una fuente de energía.

Por esta razón, la UPME propone un aumento en el uso y producción de energías renovables no convencionales para los próximos 13 años (Figura 5), que proyecte gran interés en el uso de biomasa, energía eólica y geotérmica para el año 2030.

En este sentido, el consumo de energía de los próximos años estará marcado por la generación de energía a partir de nuevos combustibles sólidos sustituyendo el carbón y otros combustibles fósiles por biomasa residual, proveniente de procesos industriales. Las plantas de beneficio tienen la oportunidad de desarrollar combustibles sólidos renovables a partir de los excedentes de biomasa como la fibra y tusa. Con el tiempo, en Colombia se empezarán a comercializar combustibles de FNCER en un mercado desarrollado (donde existe demanda, oferta y precio) como ahora lo tienen Europa y Asia.

En este escenario toma gran relevancia el uso de nuevas tecnologías especializadas en el procesamiento de la biomasa para potencializar sus propiedades y hacer más eficiente la combustión, el almacenamiento para largos periodos de tiempo y el transporte. De esta manera, tecnologías innova-

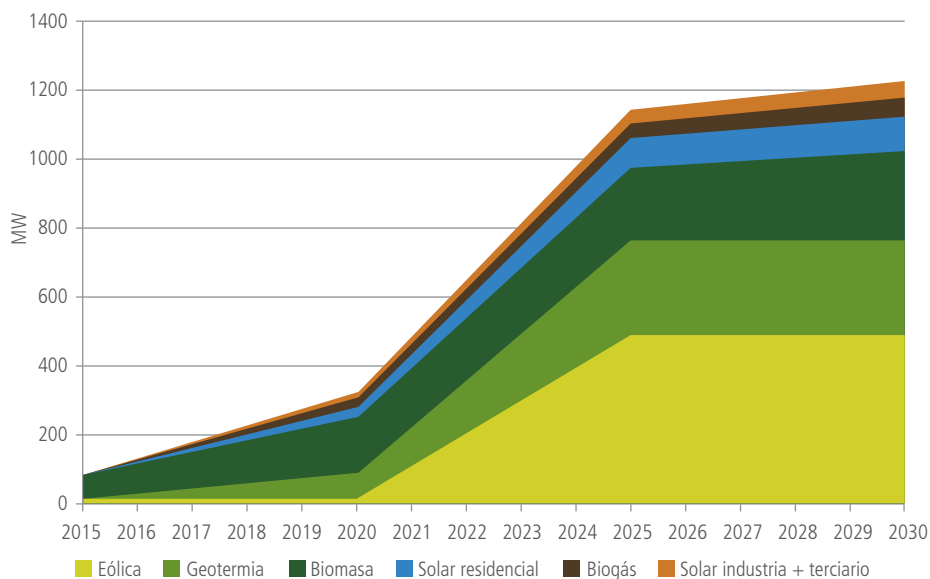


Figura 5. Escenarios de desarrollo de FNCER hasta 2030. Fuente: (UPME, 2015)

doras como la torrefacción y la peletización se han posicionado como grandes referentes para la conversión de la biomasa residual en combustibles renovables, con características energéticas cercanas a las del carbón mineral. A continuación, se hace una introducción de estas tecnologías.

Los recursos de carbón mineral, petróleo y gas natural cuentan con reservas suficientes para 170, 7 y 15 años respectivamente

La UPME propone un aumento en el uso de biomasa, energía eólica, y geotérmica para el año 2030

Tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa

Las tecnologías propuestas son la peletización y la torrefacción, que al aplicarlas a la tusa y la fibra generan un combustible sólido altamente comercializable y con propiedades fisicoquímicas aptas para su disposición, almacenamiento y transporte, para aprovechar al máximo y durante todo el año la energía disponible de esa biomasa.

Torrefacción

Es un proceso industrial en el cual se calienta la biomasa hasta 300 °C sin oxígeno para generar un material sólido ligeramente carbonizado (material torrefacto). Al calentar la biomasa con estas condiciones aumenta el contenido de carbono en el material torrefacto. El carbono puro tiene un poder calorífico superior cercano a los 33 MJ/kg. Por esta razón, al tener un mayor contenido de carbono el material torrefacto aumenta su poder calorífico.

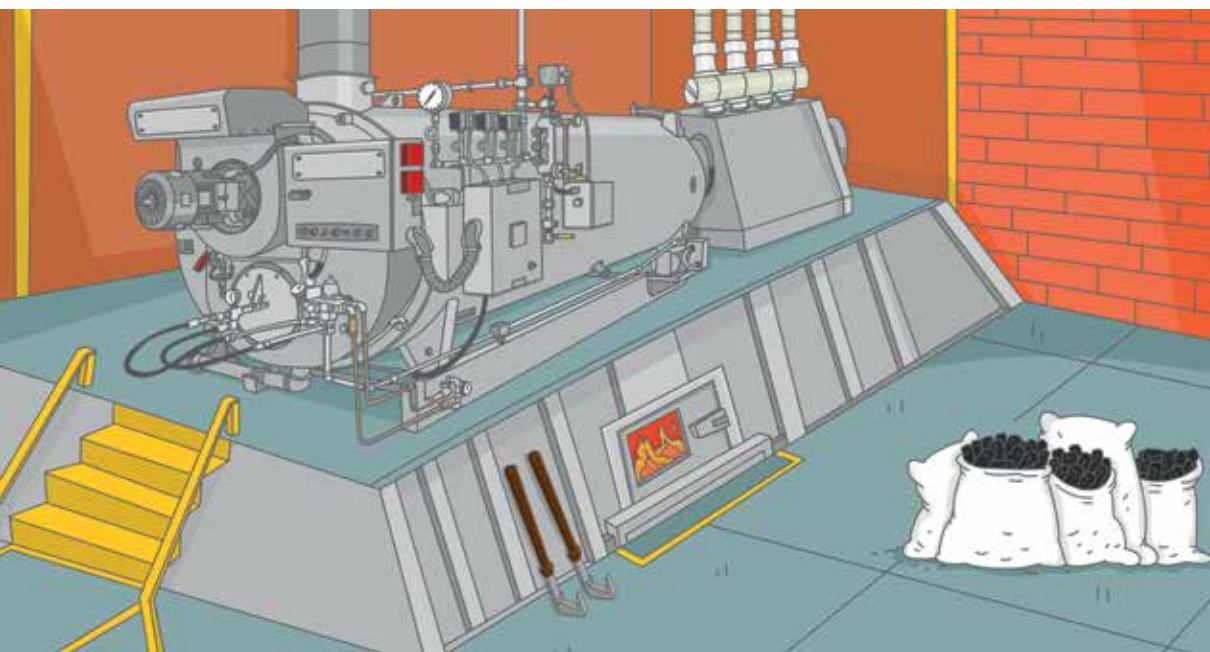


Figura 6. Ilustración de café torrefacto

El término torrefacción proviene del café torrado o torrefacto (Figura 6), proceso en el que se calientan los granos de café con algo de azúcar para caramelizarlos y acentuar sus aceites como bebida

Al igual que con el café, el material torrefacto es más fácil de moler y permite su almacenamiento por tiempo prolongado. Por esta razón, esta tecnología ha tenido un amplio desarrollo en la última década, especialmente en proyectos de co-combustión y sustitución de combustibles fósiles como el carbón. Adicional al aumento del poder calorífico y facilitar la molienda, la torrefacción permite mejorar otras propiedades fisicoquímicas de la biomasa:

- Disminuye súbitamente su humedad
- Reduce la cantidad de volátiles y humos en la combustión, sustancias contaminantes y nocivas para la salud
- Pierde la capacidad de absorber agua del ambiente en almacenamiento
- Puede ser almacenado durante largos periodos de tiempo
- Baja tasa de descomposición biológica



Un proceso de torrefacción de biomasa a escala industrial posee cinco etapas principales: secado, molienda gruesa, torrefacción, enfriamiento de material sólido y disposición de gases de torrefacción (Figura 7).

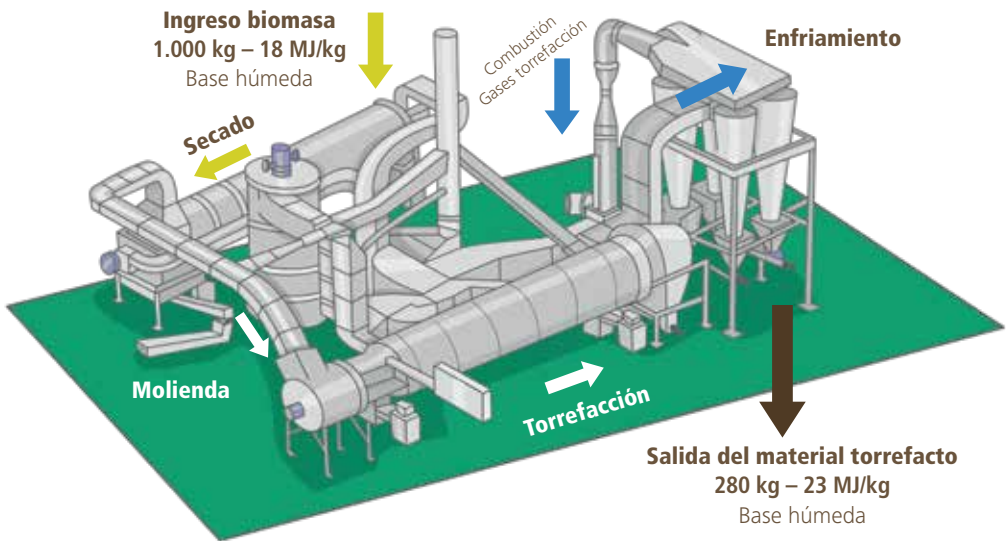


Figura 7. Proceso de torrefacción a escala industrial. Fuente: (Biomass Magazine, 2015)

Los reactores de torrefacción a escala industrial más frecuentes son los hornos rotatorios y tornillos sinfín. En el horno de torrefacción se aumenta la temperatura hasta 300 °C y se realiza la torrefacción del producto. El material torrefacto es enfriado hasta temperatura ambiente para su almacenamiento o despacho. La torrefacción es una tecnología en crecimiento a nivel mundial y en países como Holanda, Suecia y Estados Unidos se encuentran las mayores plantas de torrefacción (Figura 8).

La Figura 9 muestra los productos torrefactos obtenidos en las pruebas de este estudio a partir de la tusa y la fibra molidas.



Figura 8. Planta industrial de torrefacción. Fuente: Thompson Dryers

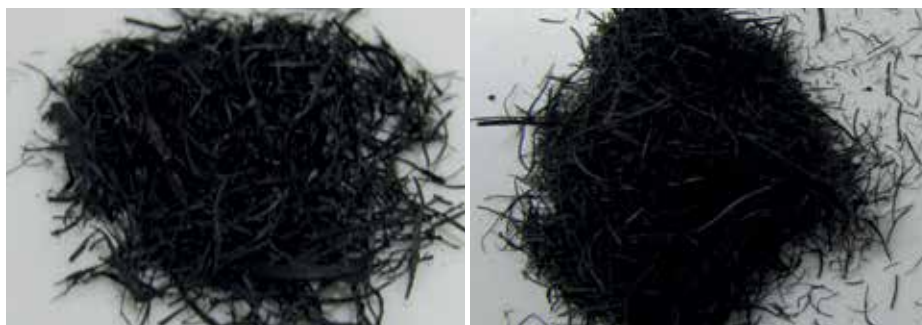


Figura 9. Tusa torrefacta (Izq.) y fibra torrefacta (Der.) obtenidas en este estudio

La torrefacción de tusa aumenta el poder calorífico en base húmeda de 9 MJ/kg a 23 MJ/kg

Peletización




Es un proceso industrial de densificación en el cual la biomasa molida se calienta y compacta a alta presión para generar partículas homogéneas altamente densas conocidas como pellets. La Figura 10 muestra los pellets de tusa y de fibra de palma de aceite obtenidos en las pruebas de este estudio.



Figura 10. Pellets de tusa (Izq.) y fibra (Der.) de palma de aceite

La peletización aumenta la densidad de la tusa y fibra de 50 kg/m^3 a 500 kg/m^3

Al realizar esta compactación se mejoran muchas de las características mecánicas de la biomasa para ser utilizada como combustible:

-  Incrementa su densidad
-  Aumenta su homogeneidad
-  Disminuye su humedad



Facilita su almacenamiento y manipulación de forma segura, ya que la durabilidad medida a los pellets obtenidos es del 85 %

La mayoría de procesos industrializados tienen en cuenta tres máquinas principales (Figura 11) para la generación de pellets: secador, molino y peletizadora.

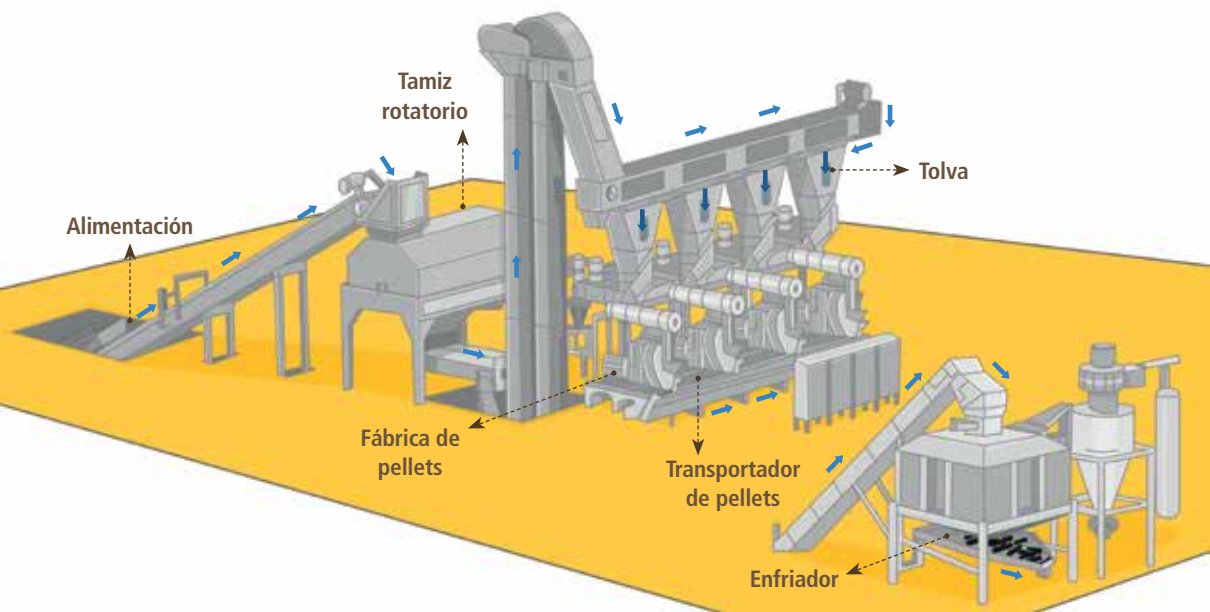


Figura 11. Proceso de peletización a escala industrial. Fuente: (Pellet Mill Solution, 2015)

La peletización es una tecnología madura a nivel mundial y en países como Estados Unidos, Alemania y Suecia se encuentran las mayores plantas de producción de pellets. Por ejemplo, en Georgia, Estados Unidos, la RWE INNOGY – Biomass Pellet Factory es la mayor planta de producción de pellets de biomasa, en la actualidad cuenta con una capacidad instalada de 750.000 toneladas de biomasa por año (Figura 12).



Figura 12. Ejemplo de biomasa en su estado natural Vs. biomasa torrefacto. Fuente: Thompson Dryers

Peletización de material torrefacto (TOP)

Otro posible escenario de integración de tecnologías consiste en combinar la peletización y la torrefacción como procesos. El material torrefacto cuenta con un poder calorífico mayor al de la biomasa virgen, pero su densidad a granel es baja. Al peletizar material torrefacto se aumenta tanto el poder calorífico de la biomasa como su densidad a granel.

Al peletizar el material torrefacto se evita el proceso de secado y el de molienda, de acuerdo con las condiciones iniciales de molienda del material que ingresa al proceso de torrefacción.

La Figura 13 muestra el material torrefacto y peletizado que se obtuvo en el estudio. Estos pellets torrefactos combinan los beneficios de cada tecnología entre los que se destacan:





-  Mayor densidad energética
-  Mayor poder calorífico
-  Hidrofóbicos
-  Fácil almacenamiento y transporte



Figura 13. Tusa torrefacta peletizada

La Figura 14 resume el proceso combinado de peletización y torrefacción (Torrefaction of Pellets, TOP, por sus siglas en inglés).

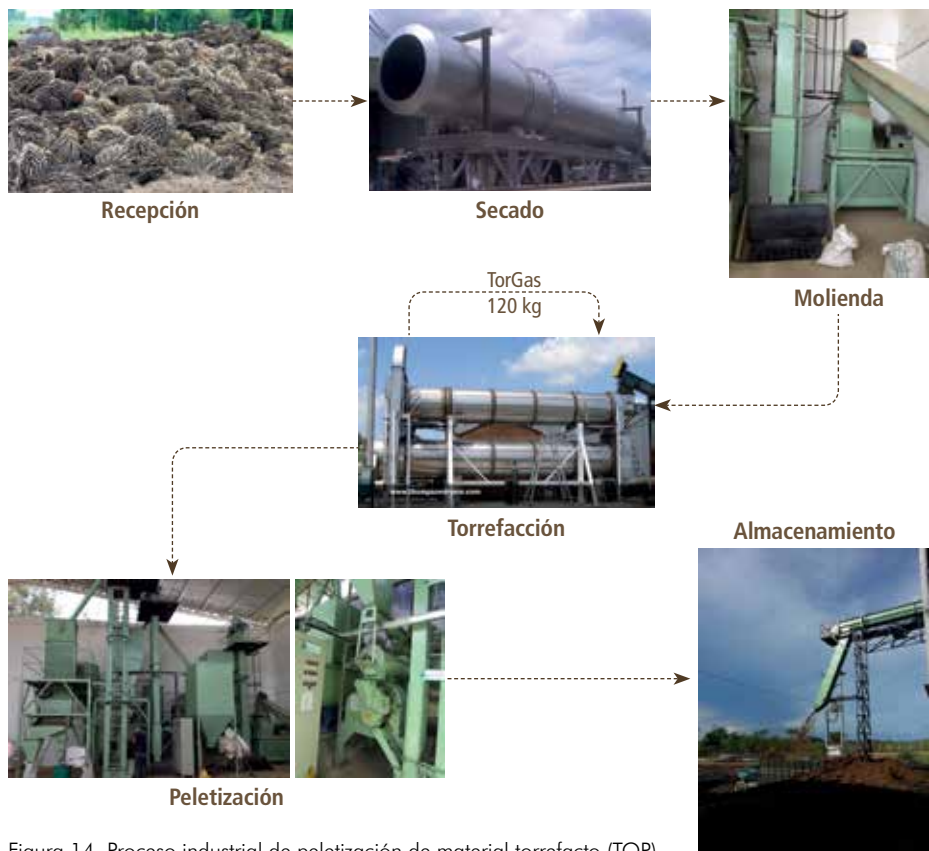


Figura 14. Proceso industrial de peletización de material torrefacto (TOP)

Topell energy es la planta de torrefacción de biomasa más grande del mundo; está ubicada en los Países Bajos y cuenta con una capacidad instalada de 60.000 toneladas de material torrefacto por año (Figura 15).



Figura 15. Material torrefacto y pelletizado. Fuente: Thompson Dryers

Los pellets torrefactos (TOP) obtenidos fueron sometidos a todas las pruebas básicas requeridas y se confirma que poseen características y propiedades comparables con los estándares internacionales. El material TOP obtenido tiene tiempos de almacenamiento superiores a seis meses, ventajas en el transporte, en el manejo y la disposición, y representa una alternativa eficiente para el mejoramiento en la combustión de las calderas contribuyendo a la disminución en las emisiones de GEI.

El material torrefacto–pelletizado se constituye como una alternativa eficiente para la sustitución de combustibles sólidos, como el carbón, para dar respuestas a los desafíos globales de cambio climático y ayudando a reducir las emisiones

Beneficios de implementar la peletización y torrefacción

Más energía disponible por unidad de masa

Los procesos de torrefacción y peletización de residuos de palma de aceite permiten optimizar las propiedades de la biomasa para uso energético. Aplicar estos procesos a la biomasa sólida de la agroindustria de palma de aceite lleva a la tusa y a la fibra a ser utilizadas eficientemente como combustibles sólidos renovables, cuyos beneficios como el aumento de la eficiencia en combustión, mayor tiempo y facilidad de almacenamiento, mejoran las condiciones de utilización de estos materiales en la planta.

La cantidad de tusa y fibra que se dispone en campo y de la fibra que se quema en caldera son las principales fuentes aprovechables para convertirse en biomasa torrefacta peletizada (TOP).

Una planta de 30 tRFF/h, genera 49.000 toneladas de biomasa (tusa y fibra) al año, la cual está disponible para ser transformada en combustibles sólidos renovables

Con el estudio realizado, aplicando las tecnologías de torrefacción, peletización y TOP a la biomasa virgen se obtienen las cantidades de material y la cantidad de energía máxima aprovechable (Poder calorífico en base seca) en el que se evidencia que la torrefacción aumenta en 25 % la energía contenida en la biomasa (Figura 16).



Biomasa	Cantidad (kg)	Poder calorífico superior base húmeda (MJ/kg)
Fibra	120	17,77
Tusa	220	17,94

Torrefacción

Biomasa	Cantidad (kg)	Poder calorífico superior base húmeda (MJ/kg)
Fibra torrefacta	34	21,83
Tusa torrefacta	62	23,07

Peletización

Biomasa	Cantidad (kg)	Poder calorífico superior base húmeda (MJ/kg)
Fibra peletizada	54	17,46
Tusa peletizada	99	17,94

Torrefacción - Peletización

Biomasa	Cantidad (kg)	Poder calorífico superior base húmeda (MJ/kg)
Fibra torrefacta – peletizada	34	21,83
Tusa torrefacta – peletizada	62	23,07

Figura 16. Rendimiento y poder calorífico superior –base húmeda– de biomasa torrefacta, peletizada y TOP por tonelada de RFF

Cuando se realiza combustión de biomasa virgen o peletizada se obtiene la misma cantidad de energía, no obstante, como los pellets son más densos la cantidad de energía por el aumento de densidad será mayor (y la combustión más fácil) que la del material virgen. Respecto al material torrefacto y el torrefacto-peletizado, se aumenta la energía con respecto a la biomasa virgen en igual proporción, sin embargo, hay más energía disponible en el material torrefacto-peletizado por el aumento en la densidad.

A continuación se presenta el análisis de las posibilidades de ahorro y de negocios potenciales a los que dan lugar las mejoras de las propiedades de la biomasa torrefacta y/o peletizada (Figura 17).

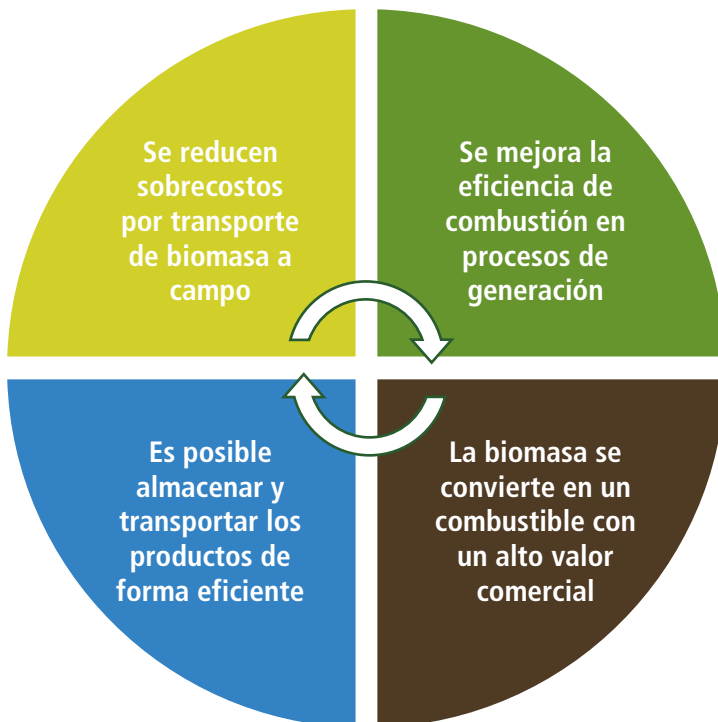


Figura 17. Beneficios técnicos de la torrefacción y peletización

Reducción en costos de transporte de biomasa a campo

Con los procesos de torrefacción y peletización de fibra y tusa se generan ahorros al reducir o eliminar el transporte de estos subproductos de vuelta a campo; en cambio, es posible procesarlos en una planta de torrefacción y peletización instalada cerca de la planta de beneficio.

Mejora en la eficiencia de combustión

El material combustible producto de la torrefacción o la peletización mejora la eficiencia de combustión en procesos de generación de vapor o energía debido a factores como:

1. Contiene mayor cantidad de carbono fijo que garantiza una mejor combustión en calderas u otros equipos de quema.
2. La forma cilíndrica homogénea de los pellets producidos facilita la dosificación en calderas y su combustión, así como también, el material torrefacto por sus características físicas de tipo polvo permite la quema a mayor velocidad comparado con la materia virgen.

Combustible con alto valor comercial

Si bien la biomasa virgen se utiliza hoy en día en las plantas de extracción, su valor comercial es bajo debido a las propiedades fisicoquímicas que presenta: alta humedad, bajo contenido de carbono fijo, forma y tamaño inadecuado para la combustión. Transformar estos subproductos en pellets o material torrefacto optimiza sus propiedades fisicoquímicas, lo que agrega valor al producto y facilita su comercialización.

Eficiencia en almacenamiento y transporte

En el proceso de extracción de aceite de los racimos de palma la fibra y la tusa generadas se degradan fácilmente y en corto tiempo, perdiendo sus propiedades debido a los contenidos de agua que facilitan la formación de colonias de hongos del orden de 1×10^8 en un periodo de seis semanas. Los procesos de peletización y torrefacción reducen la humedad de la biomasa de manera que limitan la formación de colonias de hongos por debajo de 1×10^2 , esta condición permite el almacenamiento de la biomasa para ser usada como combustible durante todo el año o ser transportada para comercialización como combustible renovable sustituto de otros energéticos.

El transporte de biomasa virgen es ineficiente a causa de su baja densidad, lo que implica mayores costos al momento de su transporte. Al aplicar los procesos de torrefacción y peletización se aumentan las densidades (Figura 18), lo que conduce a la reducción en los costos de transporte por unidad de masa y de energía transportada, facilitando su comercialización.

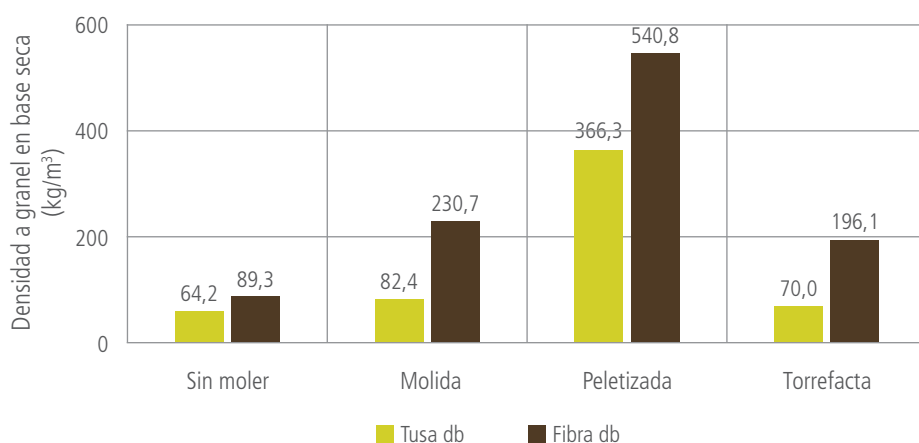
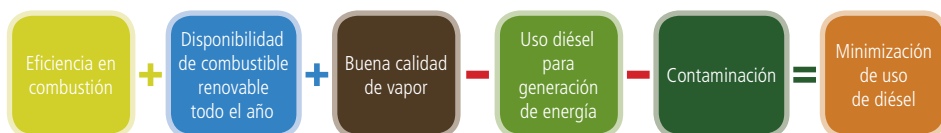


Figura 18. Variación de densidad a granel de tusa y fibra con diferentes tratamientos

Ahorros en planta de beneficio

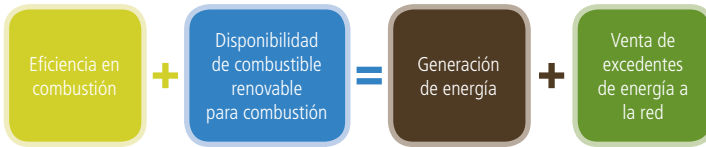
Se han identificado tres escenarios de ahorro en planta:

1. Reducción del uso de diésel: Durante la temporada de baja producción de fruto, la demanda de vapor cae a niveles donde la turbina de contrapresión no es capaz de operar, lo que obliga a la planta a operar motores diésel para el suministro eléctrico en plantas típicas donde no se tiene conexión a la red. El costo de generación puede alcanzar niveles de entre 900 y 1.500 pesos por KW/h. La energía generada por la turbina de vapor difícilmente supera los 100 pesos por KW/h. Cuando se dispone de material torrefacto y/o peletizado constante que puede ser usado en cualquier época del año, la turbina puede operar normalmente generando ahorros en planta.

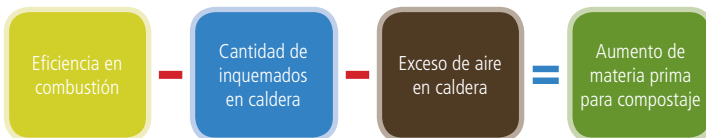


2. Excedentes de energía en la red: Las plantas de beneficio que están actualmente conectadas a la red eléctrica pagan tarifas de energía del orden de \$ 350–385 KW/h. Es posible generar ahorros al dejar de consumir energía de la red y autogenerar con la biomasa disponible en planta. Además, dado que el consumo energético de las plantas de beneficio es bajo, es posible generar excedentes de energía para la venta a la red, los cuales serán mayores cuando se utiliza material torrefacto al hacer más eficiente el uso del poder calorífico de

las biomasas, y disponer del material torrefacto y peletizado en cualquier época del año.



3. Aumento de materia prima para compostaje: Las plantas de beneficio han demostrado un creciente interés en la implementación del compostaje gracias a los beneficios ambientales que trae devolver nutrientes al suelo, por la reducción de la proliferación de plagas y los costos asociados a los abonos y fertilizantes, además de la posibilidad de comercializar el compostaje. El aumento en la eficiencia de combustión al usar los materiales torrefacto y peletizado producirá excedentes de biomasa disponibles para compostaje.



Beneficios ambientales

Las tecnologías propuestas son amigables con el medio ambiente ya que el combustible empleado es la biomasa, que es un material renovable y la producción de CO_2 en la combustión se puede considerar como carbono neutro; es decir, que las emisiones netas de gases efecto invernadero expedidas al ambiente equivalen a cero. La combustión de biomasa virgen genera más CO_2 por unidad de energía producida que la combustión de material torrefacto (Figura 19).

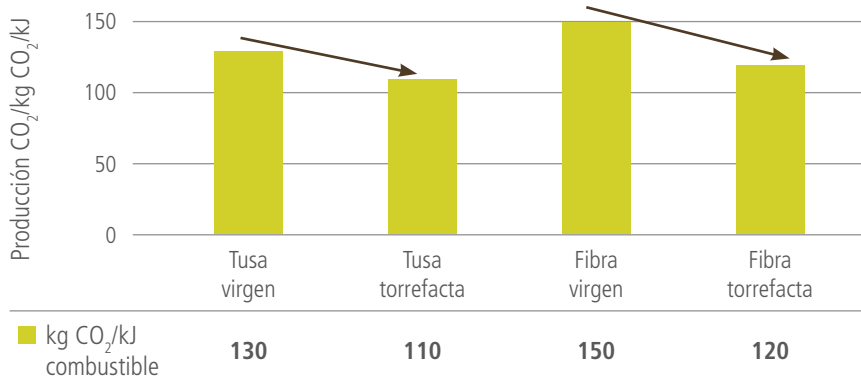


Figura 19. Reducción de producción de CO₂ al utilizar biomasa torrefacta a partir de cálculos estequiométricos de combustión

La Figura 20 compara la emisión actual de gases efecto invernadero con la propuesta de peletizar y torrefactar la biomasa, donde se demuestra una reducción del 25 % en GEI.

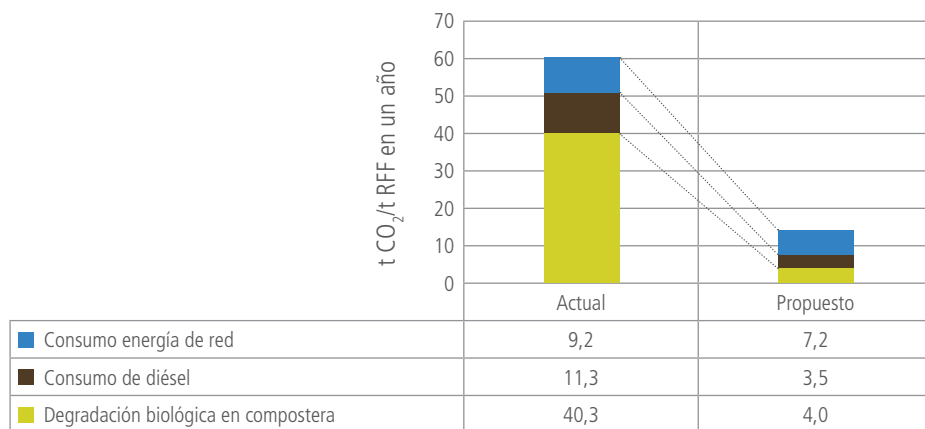


Figura 20. Emisiones de gases efecto invernadero: condiciones actuales Vs. condiciones de propuesta de torrefacción y peletización

Los beneficios ambientales anteriormente expuestos hacen atractiva la comercialización de estos combustibles renovables y representan una solución a la reducción de emisiones en sectores que actualmente utilizan combustibles fósiles.

Implementación de las tecnologías en las plantas de beneficio

Una planta de torrefacción o de peletización a escala industrial demanda principalmente recursos térmicos y eléctricos para su funcionamiento (Tabla 2). La siguiente tabla presenta estimados de los consumos térmicos y eléctricos para los equipos y procesos en una planta. Estos valores pueden ser variables de acuerdo a la capacidad instalada de proceso y a la tecnología usada.

Tabla 2. Demanda de potencia térmica y eléctrica para las tecnologías propuestas por tonelada de RFF*

Energía	Equipo	Tecnología			Unidades
		Peletización	Torrefacción	TOP	
Térmicos	Horno de secado	1,11	1,36	1,36	MW térmicos / tRFF
	Torrefactor	NA	0,24	0,24	MW térmicos / tRFF
	Total térmico	1,11	1,60	1,60	MW térmicos / tRFF
Eléctricos	Picadora de tusa	1,61	1,61	1,61	kW / tRFF
	Molino	1,26	NA	1,26	kW / tRFF
	Peletizadora	2,52	NA	2,52	kW / tRFF
	Total eléctrico	5,39	1,61	5,39	kW / tRFF

*Valores estimados a partir de revisión bibliográfica y cotizaciones. Este factor puede variar dependiendo del tamaño de la tecnología

La demanda de potencia térmica y eléctrica para la implementación de estas tecnologías en una planta de beneficio puede ser suplida usando quemadores para las biomásas disponibles (tusa o fibra virgen, pellets o material torrefacto). Sin embargo, el consumo térmico de los procesos de

torrefacción y secado también puede suplirse mediante el aprovechamiento del exceso de energía que actualmente se disipa en las calderas o de la energía residual de los gases de combustión en los generadores de biogás. Se calcula que el uso de estas fuentes de energía reduce hasta en 80 % los costos operativos de las plantas de torrefacción y peletización, lo que impacta favorablemente la rentabilidad del proyecto.

La demanda eléctrica se centra en los equipos de peletización y de reducción de tamaño de partículas. Esta demanda puede suplirse con el consumo de energía eléctrica excedentaria disponible en plantas que cuentan con un sistema de cogeneración o con consumo adicional de energía eléctrica de la red para plantas sin cogeneración.

La molienda de tusa es el proceso que mayor energía eléctrica consume en las tecnologías propuestas. La reducción de costos operativos de este proceso se puede conseguir al implementar dos técnicas: 1. Reducir el tamaño de partícula de la tusa por etapas al utilizar un molino grueso o desfibrador de tusa y, posteriormente, un molino de martillos; 2. Moler la tusa con una humedad inferior a 25 %, lo cual permite reducir considerablemente el consumo de energía eléctrica (Figura 21).

La implementación de una planta de torrefacción o peletización requiere de 52 m² por tonelada de RFF, aproximadamente; así, para una planta de 30 tRFF/h se estima un tamaño de planta de peletización y torrefacción de 1 t/h de material torrefacto, la cual requiere un espacio de 1.550 m².

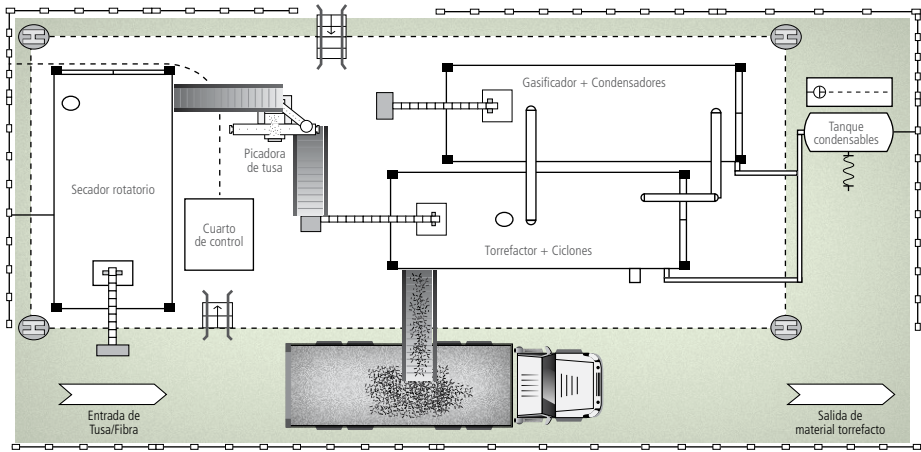
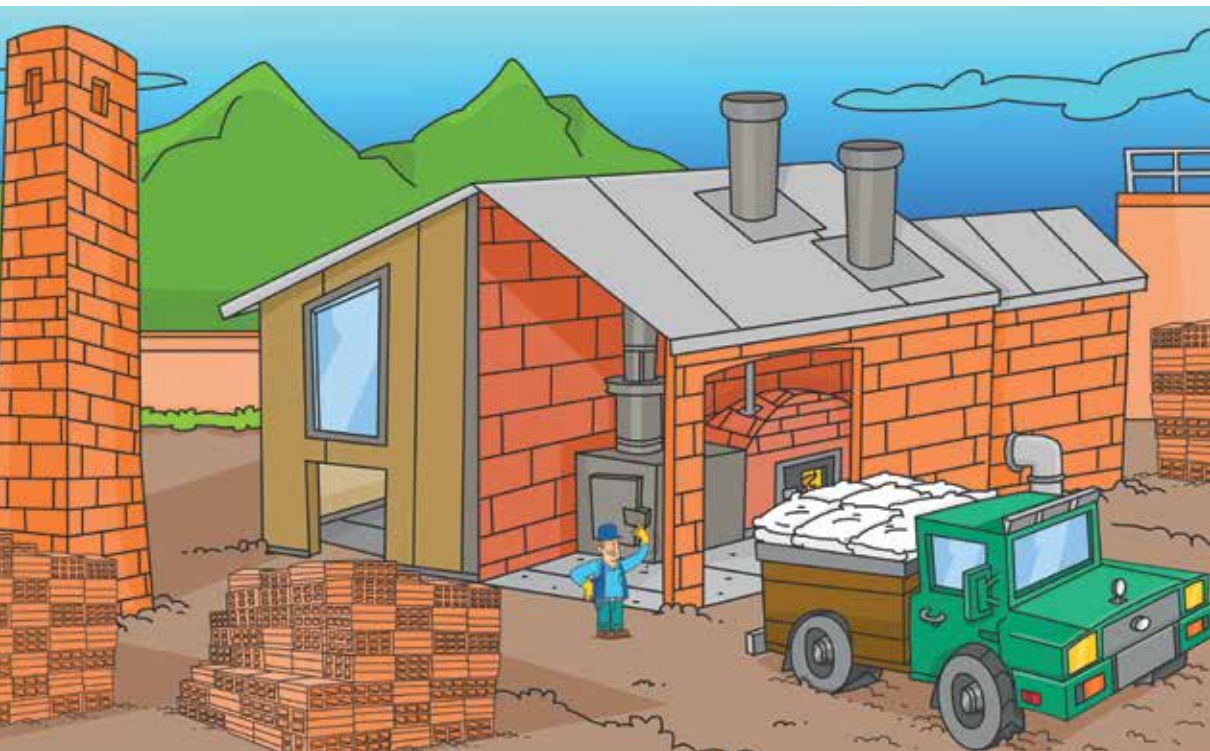


Figura 21. Distribución de planta de torrefacción

El almacenamiento en bodega para el material torrefacto, peletizado o TOP puede hacerse a granel para el consumo interno de los materiales o en sacos para ser comercializados.



Mercados para la biomasa torrefacta, peletizada y TOP

Mercado internacional

La biomasa producto de residuos agroindustriales atiende el mercado de generación eléctrica, producción de calor y plantas de cogeneración de CHP (*cooling, heat and power*) de gran escala a nivel internacional.

El suministro para el mercado de los procesos de combustión a gran escala es constante durante el año, lo que garantiza una estabilidad de precio y demanda. Los mercados a atender por los volúmenes de pellets de biomasa que demandan son Europa, Japón y Chile (Figura 22).

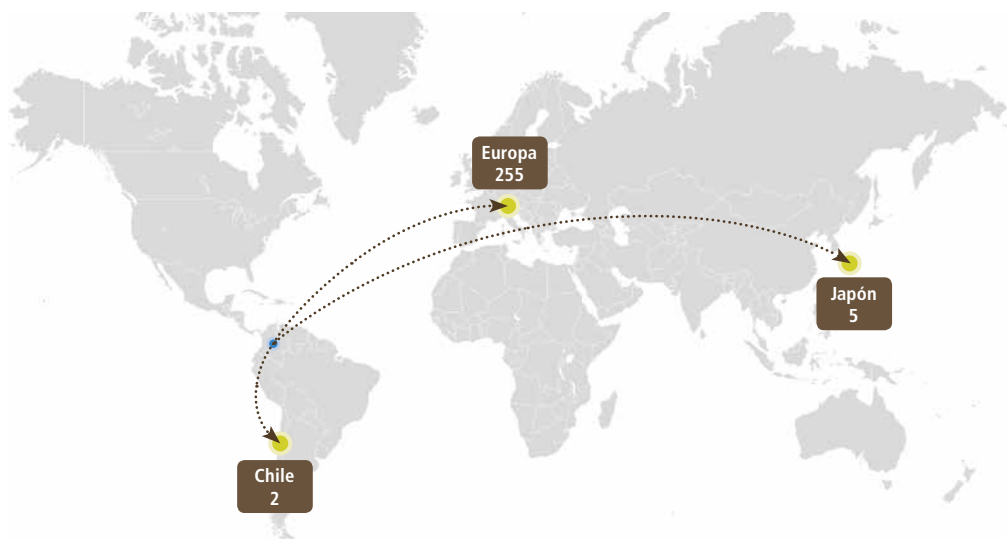


Figura 22. Demanda de pellets de biomasa durante 2015 en millones de toneladas al año. Fuente: (Argus Biomass Market, 2016)

La Tabla 3 describe las características particulares de cada uno de los mercados de combustible a partir de biomasa.

Tabla 3. Mercados internacionales identificados

Europa
Mercado completamente desarrollado, con importaciones crecientes y oferta local deficitaria.
Las directivas europeas promueven la diversificación de la matriz energética para cada estado y definen objetivos de integración de energías renovables. Estas directivas han promovido la implementación de pellets en co-combustión con carbón y plantas dedicadas de biomasa.
Japón
Mercado emergente
La crisis energética por el incidente de Fukushima incentivó el mercado y promovió la entrada de nuevas plantas de generación a base de biomasa (260 MW el año 2016)
Chile
Mercado emergente
La dependencia energética del carbón, 25 % de la demanda eléctrica y con tendencia a crecer, ha puesto sobre la mira las posibilidades de co-combustión en las plantas existentes y en las nuevas plantas de carbón. La ERNC obliga a tener un despacho de 10 % de renovables a las plantas mayores. La co-combustión no está regulada aún dentro de la ley de ERNC, pero se espera que pronto se regule al respecto. La potencia eléctrica instalada que usa carbón es cercana a los 2000 MW eléctricos.

Fuente: (Meli, 2012), (O' Carroll & Vidgren, 2013)

La Tabla 4 muestra los precios CIF y el valor del mercado en cada uno de los países de interés para exportación de biomasa torrefacta.

Tabla 4. Precios CIF y tamaño de los mercados objetivo

Destino	Precio CIF [USD/t]	Millones toneladas pellets consumidas 2015	Tamaño de mercado [Millones USD]
Europa	145,5	25	3.638
Japón	210	5	1.050
Chile	64,06	2	128

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que si bien el mercado europeo es el de mayor tamaño, este es un mercado ya desarrollado, mientras que en Japón las políticas de reemplazo de la energía nuclear abren la posibilidad de comercialización a precios competitivos y con incentivos por parte del gobierno japonés.

Adicionalmente a los costos del producto para exportación se incluyen los de transporte al puerto de salida. En este caso el puerto natural es el de Buenaventura y el flete calculado oscila alrededor de \$ 131.000 por tonelada, ya que varía de acuerdo a la localización de la planta en donde se produzca el material para exportación.

Mercado nacional









Con base en los reportes del Registro Único Ambiental (RUA) (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014), cuya muestra es de más de 1.100 industrias a lo largo de Colombia, se identificaron los mercados potenciales para la venta de la biomasa torrefacta-peletizada, depurándola de acuerdo a tres consideraciones generales:

1. Tipo de combustible usado
2. Proceso térmico existente (quema en horno o caldera)
3. Ubicación geográfica próxima a las áreas de producción de palma de aceite

En este sentido se busca que diferentes sectores industriales sustituyan eventualmente los combustibles sólidos de mayor uso. Realizada la depuración se identificaron los criterios que cumplen estos sectores industriales (Tabla 5). Estos sectores son:

-  Carbón coque
-  Carbón mineral
-  Carbón vegetal
-  Cascarilla de arroz
-  Cascarilla de café
-  Leña
-  Madera

Tabla 5. Sectores seleccionados como mercado potencial para la biomasa torrefacta-peletizada

	Combustible sólido	Demanda cuantiosa	Intervenciones tecnológicas	Intervenciones logísticas
Fabricación de ladrillo				
Producción de cemento Clinker				
Procesos industriales con caldera de carbón				

Los sectores de producción de cemento Clinker y de fabricación de ladrillo utilizan carbón como combustible para la operación de hornos y calderas, esto los convierte en excelentes opciones para la sustitución de carbón por biomasa. Se estableció como mercado objetivo las plantas que pertenecen a estos sectores y están cerca de plantas de beneficio de fruto de palma de aceite. Así se selecciona como zona de interés la Zona Oriental palmera de Colombia para atender la demanda de las plantas ubicadas en las ciudades de Yopal, Villavicencio, Bogotá y el municipio de Soacha. La Tabla 6 describe el potencial de demanda de biomasa y energía en la Zona Oriental según los datos del RUA.

Tabla 6. Demanda de biomasa sólida y de energía en los sectores identificados de la Zona Oriental

	Combustible	Demanda de biomasa	Demanda de energía
		t/año	GJ/año
Caldera	Tusa virgen	81.209	1.422.264
	Fibra virgen	79.138	
Hornos	Tusa virgen	11.524.835	672.808.437
	Fibra virgen	11.230.982	
Total demanda	Tusa	11.606.044	674.230.701
	Fibra	11.310.120	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del RUA

Se evidencia que para los sectores industriales de fabricación de ladrillo y producción de Clinker en la Zona Oriental, la demanda de biomasa como combustible renovable en hornos supere ampliamente la demanda en calderas.

Esta demanda puede ser superior debido a que los datos reportados en el RUA (2014), corresponden al 10 % de las industrias en Colombia. Un gran número de estas industrias están interesadas en sustituir sus combustibles actuales por combustibles renovables con el objeto de disminuir el impacto ambiental actual y cumplir la normatividad ambiental vigente.

En particular, el sector de fabricación de ladrillos usa carbón mineral en grandes cantidades como fuente de energía y presenta dificultades para cumplir con la normatividad ambiental. Este sector se define como el mercado objetivo potencial ya que la sustitución del carbón mineral por biomasa renovable puede ser realizada sin cambios a los equipos que ya están en capacidad de manejar indistintamente ambos combustibles.

Existen alrededor de 210 empresas ladrilleras en Cundinamarca, de las cuales aproximadamente 91 se encuentran en Bogotá y Soacha (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014). Se estima que la demanda energética del sector de fabricación de ladrillos en Bogotá y Soacha asciende a 9.289.098 GJ/año. Se propone sustituir el 30 % de esta demanda energética, aproximadamente 2'786.729 GJ/año; es decir, sustituir 78.278 t/año de carbón Checua con biomasa de la agroindustria de palma de aceite para suplir esa demanda energética.

Las 17 plantas de beneficio de fruto de palma de aceite de la Zona Oriental encuestadas, tienen la capacidad de proveer la suficiente biomasa para atender la demanda energética de la sustitución que se propone (Tabla 7).

Tabla 7. Oferta de biomasa para sustituir el 30 % de la demanda energética en 91 hornos de empresas ladrilleras

	Combustible [t/año]	Disponibilidad energética [GJ/año]
Oferta de biomasa	180.755	3.315.871
Demanda de carbón Checua en hornos	78.278	2.786.729

La oferta de material de estas plantas permitiría suplir el combustible necesario por año para cada una de las 91 ladrilleras, con una tolerancia del 15 % para casos en donde las ladrilleras requieran mayores consumos energéticos.

Estimación financiera de la implementación de las tecnologías



La implementación de las tecnologías propuestas para el escenario de aprovechamiento de uso interno considera que la totalidad de la tusa producida en la planta de beneficio sea torrefactada y utilizada para consumo interno, complementando la generación de energía en los periodos de baja cosecha y produciendo excedentes de energía para entregar a la red.

Para el escenario de aprovechamiento en comercialización se calcula que la totalidad de la tusa producida en la planta de beneficio sea torrefactada y peletizada, obteniendo material TOP comercializable en empresas de fabricación de ladrillos.

De igual forma, para ambos escenarios se considera una planta de beneficio de 30 tRFF/h, operando 4.800 horas al año.

Inversión requerida

La capacidad de los equipos de torrefacción y peletización requeridos para procesar la tusa disponible en una planta de beneficio de 30 tRFF/h es de 1.3 t/h. Se considera eficiencia de los equipos del 85 %. La inversión de capital (CAPEX) requerida para adquirir los equipos se calculó a TRM 3.000.

Ingresos

En el caso del uso del material torrefacto para uso interno en la planta, los ingresos al modelo corresponden a: 1. Ahorros por dejar de comprar energía eléctrica a la red y autogenerar la energía requerida para suplir las necesidades del proceso; 2. La venta de energía eléctrica a la red. El precio de venta del kWh empleado es de: \$ 186.

Para el escenario de comercialización se contempla la venta de material TOP a la industria de fabricación de ladrillos. Ya que se busca reemplazar el 30 % del carbón que actualmente utiliza esta industria, el cual compra de acuerdo al poder calorífico, con variación del precio entre 4 y 5 pesos por MJ/kg. La Tabla 8 establece precios para la venta de biomasa torrefacto, peletizada y torrefacto-peletizada en función de su poder calorífico.

Tabla 8. Precio de venta de biomasa en función del poder calorífico (puesto en planta)

Precio de venta (\$/t)				
Biomasa	Tusa		Fibra	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Torrefacto	90.155	116.450	79.253	102.368
Peletizada	69.356	89.584	67.500	87.188
Torrefacto-peletizada	90.300	116.600	77.800	100.500



La tabla anterior evidencia que el material peletizado es el de menor precio; sin embargo, es el material con menor poder calorífico, lo que implica que se requiere más biomasa para suplir las demandas energéticas en hornos ladrilleros. Por otro lado, aunque el material torrefacto es de menor precio que el torrefacto-peletizado, su baja densidad implica que la cantidad a transportar es menor y requiere más viajes y logística para llevar el material a las plantas ladrilleras.

En conclusión, el material torrefacto-peletizado es la mejor alternativa de transporte y de cantidad de energía contenida por unidad de masa, lo que facilita su comercialización en Colombia como sustituto válido del carbón.




Así el modelo contempla la venta del 100 % de la tusa torrefacta, es decir 5.304 kg/año a 69.356 pesos.

Gastos operacionales (OPEX)

Escenario uso interno

-  La mano de obra contempla el supervisor de producción de material torrefacto y tres operarios.
-  El mantenimiento anual de la planta de torrefacción corresponde al 3 % de la inversión.





Escenario comercialización

-  La mano de obra contempla el supervisor de producción de material torrefacto y tres operarios.
-  El mantenimiento anual de la planta de torrefacción corresponde al 3 % de la inversión.
-  El mantenimiento anual de la planta de peletización corresponde al 5 % de la inversión.

Supuestos financieros

La estimación financiera empleó el flujo de caja incremental, con vida útil del proyecto de 15 años y tasa de oportunidad del inversionista de 12 %.

Se aplicaron los incentivos tributarios de la Ley 1715 ya que son nuevas inversiones que se realizan directamente en investigación y desarrollo en el ámbito de la producción y utilización de energía a partir de Fuentes no Convencionales de Energía. Los incentivos aplicados son:

-  Deducción especial del impuesto sobre la renta
-  Depreciación acelerada
-  Exclusión del IVA
-  Exclusión del gravamen arancelario

A continuación se exponen los resultados del modelo financiero para los dos escenarios evaluados a nivel de prefactibilidad, se presentan los indicadores tasa interna de retorno (TIR), valor presente neto (VPN), periodo de retorno de la inversión (*Pay back period*) e ingresos anuales promedio. Se evalúan tres alternativas de apalancamiento del proyecto, inversión completa por parte del inversionista y préstamos por el 30 y 70 % del CAPEX.

Estimación financiera

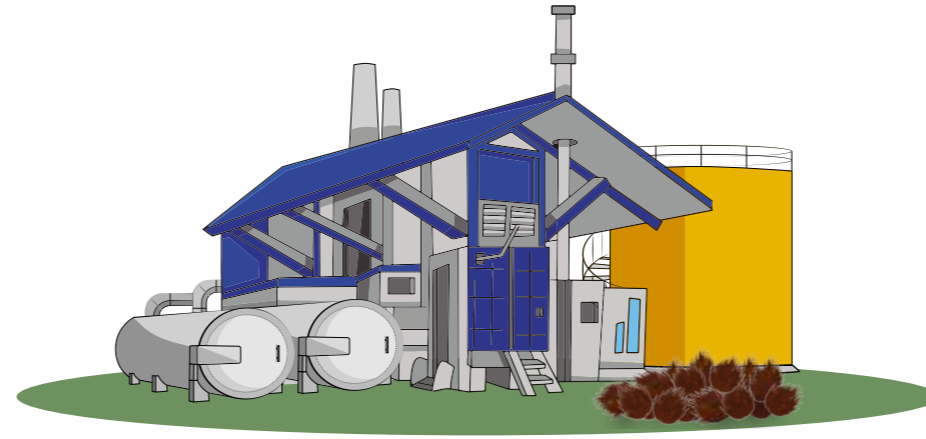
Escenario uso interno

Molino de 5 t/h*	\$ 140.000.000
Peletizadoras de anillo (1 t/h y 500 kg/h)	\$ 360.000.000
Torrefactor**	\$ 7.067.200.000
Dos secadores (4 t/h)	\$ 472.000.000
Total CAPEX (con Exención de arancel e IVA)	\$ 8.039.200.000

* Molino, peletizadora y secador Sandherz
** Torrefactor Blackwood Technology

Flujo de caja incremental	15 años
Vida útil del proyecto:	186 COP/kWh
Precio de venta de energía:	Incremento anual del precio de venta de energía: 3 %

Mantenimiento de molino	\$ 57.886.400
Mantenimiento de torrefactor	\$ 73.498.880
Mantenimiento de peletizadoras	\$ 11.232.000
Mano de obra	\$ 46.448.043
Total OPEX	\$ 189.065.323



Escenario comercialización

Molino de 5 t/h	\$ 140.000.000
Peletizadoras de anillo (1 t/h y 500 kg/h)	\$ 360.000.000
Secador (4 t/h)	\$ 236.000.000
Total CAPEX (con Exención de arancel e IVA)	\$ 736.000.000

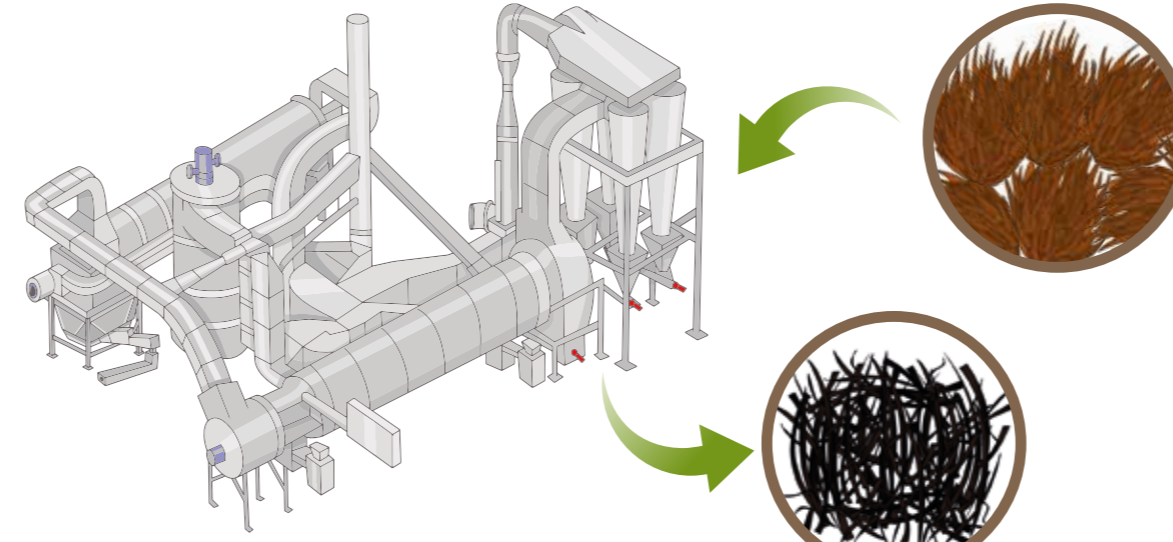
Flujo de caja incremental	15 años
Vida útil del proyecto:	\$ 69.356
Precio de venta de pellets:	Incremento anual del precio de venta de pellets: 3,1%

Mantenimiento de molino	\$ 55.660.000
Mantenimiento de peletizadoras	\$ 10.800.000
Mano de obra	\$ 46.448.043
Total OPEX	\$ 112.908.043

Planta de beneficio de fruto de palma de aceite con capacidad de 30 tRFF/h	
Conectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN)	
Horas de operación anual:	4.800
Excedentes de potencia para la venta:	3,69 MW
Poder calorífico de la tusa torrefacta (MJ/t)	23.000

Tasa de interés del préstamo	10,10 %
Plazo del préstamo	10 años
Tiempo de gracia	2 años

Venta de energía	\$ 1.340.396.368
------------------	-------------------------



Venta de pellets	\$ 379.104.315
------------------	-----------------------

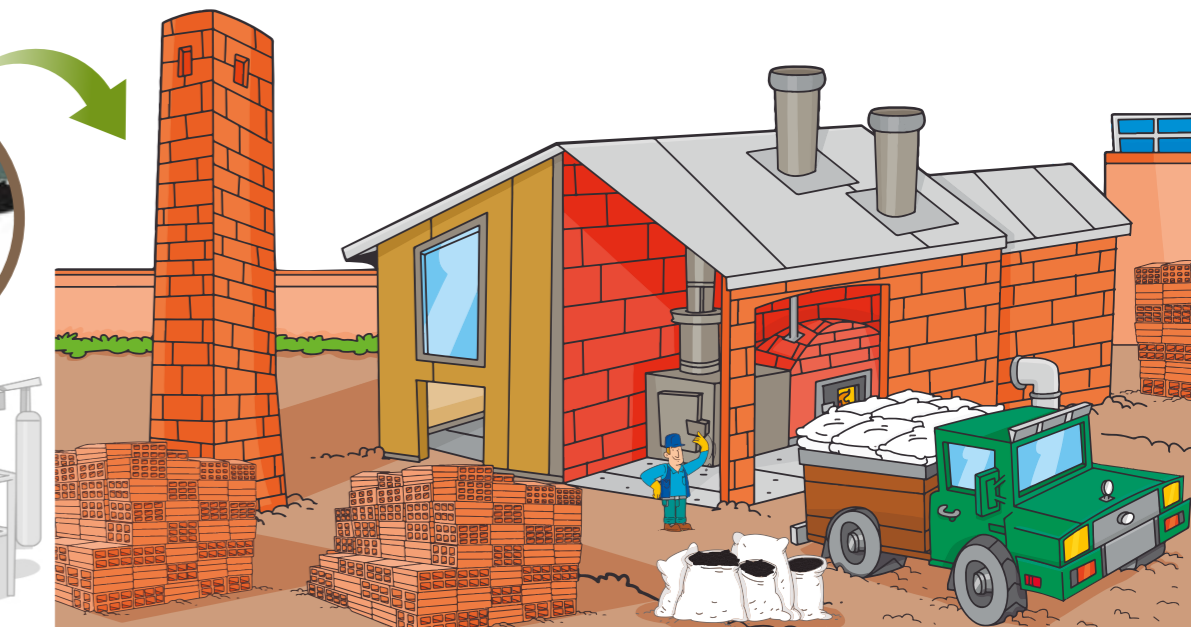
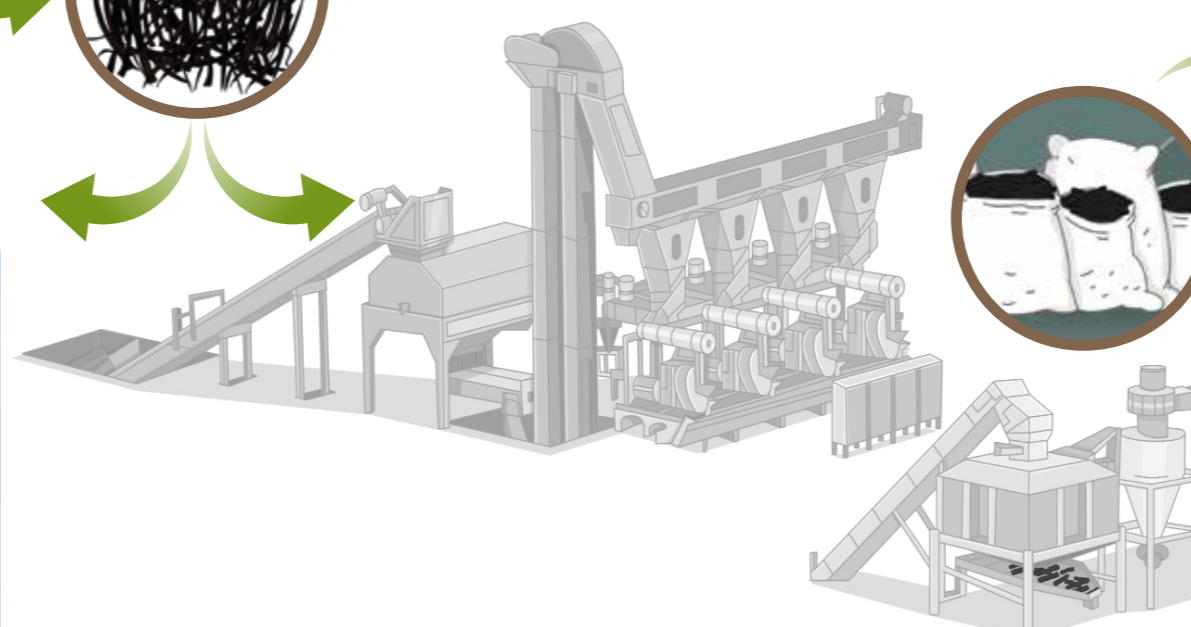
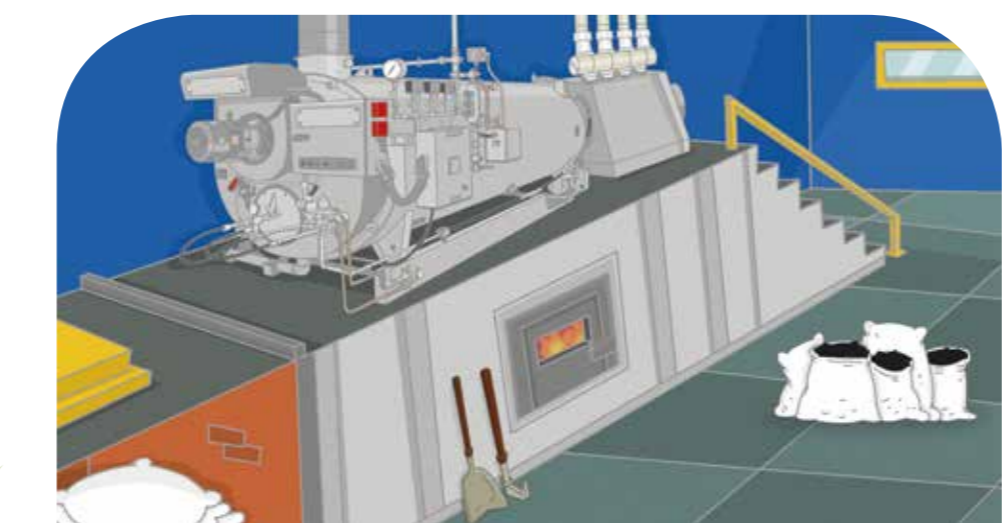
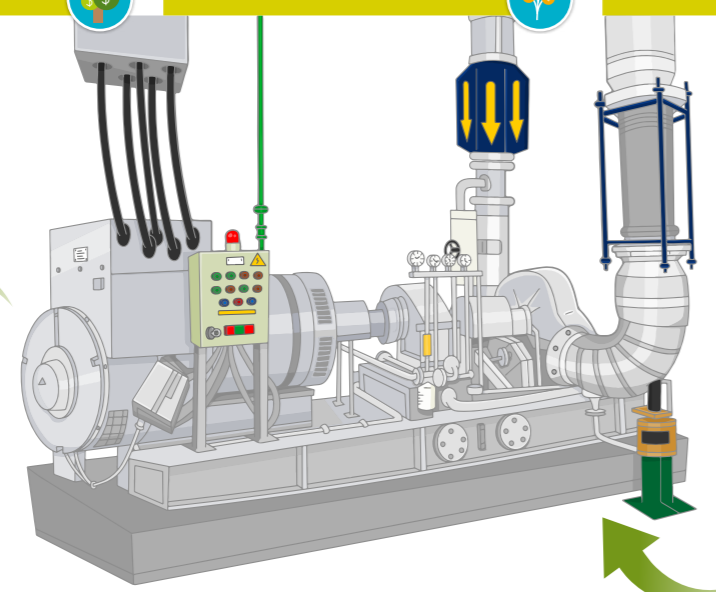
TIR	38 %
VPN (COP)	\$ 1.331.351.170
Pay Back Period (años)	3
Ingresos anuales promedio	\$ 325.756.543

Planta de beneficio de fruto de palma de aceite con capacidad de 30 tRFF/h	
Conectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN)	
Horas de operación anual:	4.800
Poder calorífico de la tusa peletizada (MJ/t)	17.940






TIR	14 %
VPN (COP)	\$ 1.434.617.564
Pay Back Period (años)	7
Ingresos anuales promedio	\$ 1.416.128.528

TIR	15 %
VPN (COP)	\$ 1.469.017.720
Pay Back Period (años)	7
Ingresos anuales promedio	\$ 1.144.082.000

TIR	18 %
VPN (COP)	\$ 1.514.884.594
Pay Back Period (años)	9
Ingresos anuales promedio	\$ 781.353.296



Conclusiones

-  La torrefacción es un proceso industrial que aumenta cantidad de energía por kilogramo de biomasa.
-  La peletización es un proceso industrial de densificación de la biomasa.
-  Las tecnologías de torrefacción y peletización potencializan la biomasa para su uso en generación de energía tanto en la agroindustria de la palma de aceite como en otras industrias interesadas en utilizar combustibles renovables.
-  El proceso combinado de peletización y torrefacción es conocido como Torrefaction of Pellets (TOP, por sus siglas en inglés) aumenta la densidad energética de la biomasa.
-  La implementación de las tecnologías de torrefacción y peletización en las plantas de beneficio de fruto de palma:
 - Minimiza el uso de diésel y/o consumo de energía eléctrica tomado de la red
 - Mejora la eficiencia de combustión de la biomasa en el hogar de las calderas
 - Facilita la logística y disposición de la biomasa
 - Aumenta la cantidad de biomasa disponible para compostaje

- Permite obtener excedentes de energía eléctrica que se pueden comercializar
- Acondiciona la biomasa para su comercialización nacional e internacional.



La biomasa torrefactada y peletizada es la mejor alternativa para la comercialización como sustituto válido del carbón, gracias a la cantidad de energía disponible y su facilidad de transporte.



La industria de fabricación de ladrillos es un nicho atractivo para la venta de biomasa torrefactada y peletizada, como combustible alternativo que reduzca las altas tasas de contaminación que presenta en la actualidad.



El retorno de inversión en la implementación de las tecnologías de torrefacción y peletización en las condiciones del caso de estudio se da en siete años con TIR de 14 % sin financiación.

Glosario

Base seca	Ingreso de la biomasa al proceso sin humedad
Base húmeda	Ingreso de la biomasa al proceso con la humedad ambiente
Biomasa	Materia orgánica o industrial formada en algún proceso biológico o mecánico
Co-combustión	Mezcla de dos combustibles, en este caso biomasa y carbón, para la generación de energía térmica
Cogeneración	Producción combinada de las energías térmica y eléctrica
Peletización	Proceso de compactación y/o densificación de material
Poder calorífico superior	Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa del combustible cuando el vapor de agua originado en el proceso es condensado, lo que permite contabilizar el calor desprendido en este cambio de fase
Poder calorífico inferior	Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa del combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase sino que se expulsa en forma de vapor
Torrefacción	Proceso de secado a alta temperatura con el fin de modificar las propiedades fisicoquímicas de la biomasa
Volátiles	Material gaseoso desprendido en una combustión

Siglas y acrónimos

BIOT	Grupo de Investigación de Biomasa y Optimización Térmica de la Universidad Nacional de Colombia
db	Base seca
TOP	Material torrefacto peletizado
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
CHP	Equipos de producción combinada de frío, calor y electricidad
CIF	Siglas en inglés de <i>Cost, Insurance and Freight</i> = Costo, seguro y flete
FOB	Siglas en inglés de <i>Free on Board</i> = Precio libre en Puerto
PBT	Siglas en inglés de <i>Pay Back Time</i> = Tiempo de retribución
TIR	Tasa Interna de Retorno
VPN	Valor Presente Neto
TRM	Tasa de cambio
MJ	Megajulios
Kcal	Kilocalorias
GJ	Gigajulios
RFF	Racimos de fruto fresco
tRFF/h	Tonelada de racimos de fruto fresco por hora
RUA	Registro Único Ambiental

Bibliografía

- Airex Energy (2014). *Airex Energy: Carbon Fx*. Recuperado en septiembre de 2016 de <https://goo.gl/5nKNVb>
- Argus Biomass Market (2016). *Weekly biomass markets news and analysis*. Londo: Argus Media Group.
- Biomass Magazine (6 de Octubre de 2015). *Biomass Magazine*. Recuperado en marzo de 2017 de <https://goo.gl/tNLHPH>
- Fontanilla Díaz, C. A., Mosquera Montoya, M., Ruíz Alvarez, E., Beltrán Giraldo, J. A., & Manuel Guerrero, J. (2015). Beneficio económico de la implementación de buenas prácticas en cultivos de palma de aceite de productores de pequeña escala en Colombia. *Palmas*, Vol 36, 31.
- Heyl & Patterson (2011). *Heyl & Patterson: Equipos de torrefacción*. Recuperado en febrero de 2017, de <https://goo.gl/lbvKTm>
- Pellet Mill Solution (2015). *Pellet Mill Solution*. Recuperado en febrero de 2017 de <https://goo.gl/hNdU4D>
- Poyry Management Consulting (2016). *abc Machinery*. Recuperado en noviembre de 2016 de <https://goo.gl/gy4Z0O>
- REW Innogy (2011). *Conbio: Biomass pellet Factory*. Recuperado en febrero de 2017 de <https://goo.gl/XG4qEO>
- Topell Energy (2013). *Torrefaction plant*. Recuperado en febrero de 2017 de <https://goo.gl/ODcNG1>
- UPME (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. En UPME. Bogotá.
- UPME (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Bogotá.



Esta publicación es propiedad de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma, por tanto, ninguna parte del material ni su contenido, ni ninguna copia del mismo puede ser alterada en forma alguna, transmitida, copiada o distribuida a terceros sin el consentimiento expreso de la Federación. Al realizar la presente publicación, la Federación ha confiado en la información proveniente de fuentes públicas o fuentes debidamente publicadas. Contiene recomendaciones o sugerencias que profesionalmente resultan adecuadas e idóneas con base en el estado actual de la técnica, los estudios científicos, así como las investigaciones propias adelantadas. A menos que esté expresamente indicado, no se ha utilizado en esta publicación información sujeta a confidencialidad ni información privilegiada o aquella que pueda significar incumplimiento a la legislación sobre derechos de autor. La información contenida en esta publicación es de carácter estrictamente referencial y así debe ser tomada y está ajustada a las normas nacionales de competencia, Código de Ética y Buen Gobierno de la Federación, respetando en todo momento la libre participación de las empresas en el mercado, el bienestar de los consumidores y la eficiencia económica.

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite - Fedepalma
Cl. 98 # 70-91. Pisos 14 y 15
Bogotá D.C., Colombia
www.fedepalma.org