

APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RESIDUOS FORESTALES PARA LA PRODUCCIÓN DE PELLETS DE BIOMASA LEÑOSA TORREFACTADA

**Rolando Vinces Guillén
Johanna Poggi Dávila
Universidad San Ignacio de Loyola**

Saber y Hacer

Revista de Ingeniería de la USIL

Vol. 1, Nº 2, Segundo semestre 2014. pp. 88-123

“Aprovechamiento sostenible de los residuos forestales para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada”¹

Rolando Vincés Guillén²

Johanna Poggi Dávila³

Universidad San Ignacio de Loyola

¹ Este artículo fue publicado en el libro *Cinco proyectos para cambiarle la cara al mundo Premio Odebrecht 2013* (junio de 2014 - primera edición).

² Alumno de la Carrera de Ing. Agroindustrial. Mención Honrosa del Premio Odebrecht para el Desarrollo Sostenible 2013.

³ Ingeniero ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Magister en Administración de Empresas de la Universidad ESAN. Candidata a Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible por la UNFV. Directora de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad San Ignacio de Loyola. jpoggi@usil.edu.pe

INTRODUCCIÓN

La torrefacción es una operación unitaria que en la actualidad la estudian el Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), el Centro Nacional de Energías Renovables - Gobierno Navarra (CENER), Andritz y Sector Project (Solid Sustainable Energy Carriers by Means of Torrefaction). Se la reconoce como un método que es técnica y económicamente viable para la conversión de biomasa leñosa en un dendrocombustible de alta densidad energética, hidrófobo, compactable, triturable y con una menor relación oxígeno-carbono (O/C). Todas estas propiedades facilitan su transporte, manipulación, almacenamiento a largo plazo y combustión orientada a suplir necesidades energéticas rurales, urbanas e industriales.

El abastecimiento energético a partir de la biomasa leñosa torrefactada se plantea desde la óptica del desarrollo tecnológico y económico como un avance para lograr el aprovechamiento sostenible de los residuos forestales, lo cual permite desarrollar nuevas fuentes energéticas capaces de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir los residuos sólidos.

El presente proyecto busca convertir los residuos forestales de transformación primaria de la industria maderera de Pucallpa en materia prima de uso valorable para la implementación de una planta productora de pellets de biomasa leñosa torrefactada.

El desarrollo del proyecto pretende generar tres impactos positivos en los aspectos ambiental, tecnológico y social. En lo concerniente al aspecto ambiental, se reducirán los residuos forestales. Estos actualmente se arrojan a las orillas del río Ucayali o se acumulan y queman, lo cual genera problemas respiratorios en los pobladores al incrementarse la emisión de gases y partículas suspendidas en el aire.

En el aspecto tecnológico, se creará una relación sinérgica entre la planta productora de pellets de biomasa leñosa torrefactada y las plantas de transformación primaria, donde la primera aprovecha los residuos forestales como biomasa de alimentación, y las segundas incrementan su competitividad integrando la operación unitaria de secado a su línea de transformación beneficiándose del calor residual producido en la planta.

En el aspecto social, se obtendrá energía rural más limpia en comparación con la leña o la bosta, se diversificarán combustibles de bajo costo para poblaciones en riesgo como la provincia de Melgar, región Puno, donde durante la temporada de friaje, debido a las precipitaciones sólidas (granizadas y nevadas), se genera un déficit de material combustible para la cocción de alimentos y calefacción.

FUNDAMENTO TEÓRICO

La densificación de biomasa leñosa por medio de la peletización se considera una tecnología probada para mejorar las propiedades del dendrocombustible empleado en la generación de energía calórica o eléctrica (Bergman, 2005a).

El alto poder calorífico de los pellets de biomasa leñosa en combinación con la alta densidad aparente permite tener pequeñas unidades de combustión para su uso industrial y doméstico (estufas y cocinas).

Sin embargo, los pellets de biomasa leñosa también presentan ciertos inconvenientes relativos a los costos de producción, la vulnerabilidad al agua y la elaboración de una estrecha gama de materias primas.

En este sentido, el ECN ha introducido una operación unitaria a la producción de pellets de biomasa leñosa con la finalidad de emplear una amplia gama de biomásas de alimentación y producir un producto superior. El proceso se basa en la combinación de la operación unitaria de torrefacción y peletización.

El proceso integra las ventajas de ambas operaciones: el aumento del poder calorífico, naturaleza hidrofóbica y buena capacidad de molienda obtenida por torrefacción, y la alta densidad a través de la peletización. Los efectos sinérgicos en la producción cuando se combinan ambas operaciones no solo mejoran la calidad del producto final; estudios iniciales realizados en la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada revelaron que los costos totales de producción no aumentan necesariamente (Bergman, 2005 a).

1. Dendrocombustible

Los dendrocombustibles son todos los tipos de biocombustibles derivados directa o indirectamente de una biomasa leñosa. En esta categoría se incluyen todos los tipos de biocombustibles derivados de los árboles y arbustos que crecen en tierras forestales y no forestales. Entre los combustibles de madera se incluye también la biomasa obtenida en actividades silvícolas (aclareos, podas y otros) y actividades de extracción y explotación (puntas, raíces, ramas, etcétera), así como subproductos industriales derivados de industrias forestales primarias y secundarias. También se incluyen los combustibles de madera derivados de plantaciones forestales con fines energéticos (FAO, 2004).

Según su fuente de suministro, los dendrocombustibles se dividen en combustibles de madera directos, combustibles de madera indirectos y combustibles de madera recuperados (FAO, 2004).

a) Combustibles de madera directos

Los combustibles de madera directos emplean madera extraída directamente de los bosques, de otros terrenos boscosos y de otras tierras destinadas al suministro de energía para cubrir la demanda, e incluyen tanto los combustibles de madera inventariados (registrados en estadísticas oficiales) como no inventariados. Este tipo de combustibles se queman directamente o se transforman en otro combustible como, por ejemplo, carbón vegetal, gases de pirolisis, pellets, etanol, metanol, entre otros (FAO, 2004).

b) Combustibles de madera indirectos

Los combustibles de madera indirectos son subproductos industriales derivados de industrias primarias de la madera (aserraderos, fábricas de tableros de partículas y plantas de fabricación de pasta de papel) y secundarias (ebanistería y carpintería), tales como residuos del aserrado, costeros, restos del canteado y el escuadrado, serrín, virutas y astillas, licor negro, etcétera. Este tipo de combustibles se queman directamente o se transforman en otro combustible como, por ejemplo, carbón vegetal, gases de pirolisis, pellets, etanol, metanol, etcétera (FAO, 2004).

c) Combustibles de madera recuperados

Los combustibles de madera recuperados están conformados por biomasa leñosa derivada de todas las actividades económicas y sociales ajenas al sector forestal; generalmente, esta biomasa leñosa proviene de desechos de la construcción, demolición

de edificios, bandejas de carga, cajas de madera y otros que se queman tal cual están o se transforman en astillas, pellets, briquetas o polvo (FAO, 2004).

2. Dendroenergía

.....

La dendroenergía hace referencia a la energía obtenida de dendrocombustibles (FAO, 2004). Los productos que se han de considerar al contabilizar la dendroenergía son los siguientes.

a) Leña

Incluye la *madera en bruto* en piezas pequeñas (leña), astillas, pellets y/o polvo derivados de los bosques y árboles aislados, así como los subproductos de la industria de la madera y los productos leñosos recuperados. Conservan la estructura original básica de la madera y se pueden utilizar directamente o después de haber sido transformados en otro combustible de madera como el carbón vegetal. Cuando es necesario, la leña se puede preparar en productos más adecuados como, por ejemplo, astillas y pellets, sin necesidad de realizar transformaciones físico-químicas importantes (FAO, 2004).

b) Astillas

Madera en bruto reducida deliberadamente a piezas de menor tamaño, o residuos adecuados para fines energéticos (FAO, 2004).

c) Pellets de madera

Pueden considerarse un combustible derivado de la autoaglomeración de material leñoso como resultado de una aplicación combinada de calor y alta presión en una máquina de extrusión (FAO, 2004).

d) Carbón vegetal

Residuo sólido derivado de la carbonización, destilación, pirolisis y torrefacción de la madera y de subproductos de la madera al utilizar sistemas continuos o discontinuos (hornos de pozo, ladrillo y metal). Incluye las briquetas de carbón vegetal (FAO, 2004).

e) Briquetas de carbón vegetal

Producidas con carbón vegetal que, una vez triturado y secado, se moldea (generalmente a alta presión) con la adición de aglutinantes para formar piezas uniformes (FAO, 2004).

f) Licor negro

Licor alcalino obtenido de los digestores empleados para producir pasta al sulfato o a la soda durante el proceso de producción de papel en el que el contenido de energía deriva principalmente del contenido de lignina extraído de la madera en el proceso de elaboración de la pasta (FAO, 2004).

g) Otros combustibles de madera

Esta categoría incluye una amplia gama de combustibles líquidos y gaseosos derivados de la leña y el carbón vegetal, en general mediante procesos pirolíticos o enzimáticos, como gases de pirólisis, etanol, metanol, productos de interés creciente, pero que por el momento no tienen la misma importancia como los productos energéticos (FAO, 2004).

3. Pellets de biomasa leñosa

.....

Los pellets de madera ofrecen mayores propiedades atractivas en comparación con los residuos leñosos sin procesar (astillas, aserrín, etcétera). El alto poder calorífico y la reducción de costos de almacenado, transporte y manipuleo hacen de los pellets de madera en muchos casos el dendrocombustible superior. Particularmente, su alta densidad energética

y uniformidad han promovido la base para un relativamente nuevo y prometedor mercado de pellets (Bergman, 2005a).

A pesar del desarrollo del mercado de pellets en la última década, las investigaciones continúan con la finalidad de mejorar las propiedades de los pellets relacionadas con la durabilidad y degradación biológica. La durabilidad de pellets puede interpretarse como la resistencia contra el agua, la humedad absorbida y la resistencia mecánica contra la compresión. Generalmente, cuando los pellets son expuestos al agua, la nieve y la humedad, tienden rápidamente a abultarse y desintegrarse en sus partículas originales (volumen y densidad original antes del pelletizado). Para prevenir esto, se deben almacenar y condicionar en un lugar seco. Adicionalmente, se deben tomar precauciones en el transporte y manipuleo. (Alakangas y Paju, 2002).

La probabilidad de degradación biológica decrece después del pelletizado, pero aún puede ocurrir. Al aumentar la humedad puede existir crecimiento de hongos, lo cual afecta las propiedades del pellet dramáticamente. La durabilidad y las variaciones en la uniformidad decrecen especialmente debido a los cambios biológicos, físicos y químicos (Lehtikangas, 1999).

Al consistir el pelletizado básicamente en una operación física, la calidad de la biomasa de alimentación es crucial para alcanzar un estándar de calidad. La uniformidad de pellets es difícil de establecer debido a la diferencia entre maderas duras y maderas suaves, entre las especies y entre las diferentes partes del árbol, sin mencionar otras variables como el clima, la estación, el período de almacenado y las condiciones de almacenado (Lehtikangas, 1999).

Bergman (2005a) menciona que el aserrín y los restos de aserrado son la biomasa de alimentación más común debido a su uniformidad. Además, la madera suave es preferida sobre la madera dura debido a que el contenido de lignina en la madera suave es mayor. La lignina actúa como agente aglutinante. A mayor cantidad de lignina, mayor será la calidad del pellet.

4. La biomasa leñosa

El término *biomasa leñosa* hace referencia a la biomasa que se obtiene de árboles, arbustos y matorrales (FAO, 2004). La composición química de la biomasa leñosa está conformada principalmente por tres grupos de polímeros orgánicos: celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales en conjunto se conocen como la fracción de lignocelulosa. La distribución de estos tres componentes se aprecia en el Cuadro 1.

Cuadro 1
Componentes de la biomasa leñosa

Componente	Biomasa leñosa (%)
Celulosa	55 - 65
Hemicelulosa	10 - 20
Lignina	20 - 30
Extractivos y otros	10 - 20
Cenizas	0,1 - 0,5

Fuente: Fernández (2006: 14).

Bergman (2005c) mencionan lo descrito por Wagenführ (1974) brindando una información más detallada de los polímeros que componen la biomasa leñosa, ya que estos variarán entre tipo y tipo de madera. Los porcentajes se establecieron dividiendo la biomasa leñosa en madera caducifolia (madera dura) y madera conífera (madera blanda).

Cuadro 2
Polímeros de madera caducifolia y conífera

Polímero	Caducifolia	Conífera
Celulosa (wt %)	18 - 25	25 - 35
Hemicelulosa (wt %)	40 - 44	40 - 44
Lignina (wt %)	15 - 35	20 - 32
Composición hemicelulosa	Caducifolia	Conífera
4-O methyl glucuronoxylan (wt %)	80 - 90	5 - 15
4-O methyl glucuronoarabinoxylan (wt %)	< 1	15 - 30
Glucomannan (wt %)	1 - 5	60 - 70
Galactoglucomannan (wt %)	< 1	1 - 5
Arabinogalactan (wt %)	< 1	15 - 30
Otros polisacáridos de galactosa (wt %)	< 1	< 1
Pectina (wt %)	1 - 5	1 - 5

Fuente: Bergman (2005c: 15).

En el Cuadro 2 se puede observar que la madera procedente de coníferas presenta un mayor contenido de lignina en comparación con la madera procedente de caducifolias. Otra diferencia entre ambas es la composición de la fracción de hemicelulosa, ya que en la caducifolia predomina la xilosa; mientras que en la conífera predomina la manosa. Cabe añadir que todas estas diferencias tendrán un impacto en procesos como la torrefacción (Bergman, 2005c).

5. Torrefacción

La torrefacción es una operación termoquímica a la que se somete a la biomasa a temperaturas variables entre 200 °C y 300 °C en condiciones atmosféricas y en un ambiente ausente de oxígeno. Adicionalmente, se caracteriza por bajas velocidades de calentamiento para alcanzar la temperatura de torrefacción (menores a 50 °C/min) (Bergman, 2005a).

El producto resultante de la torrefacción presenta mejores propiedades como dendrocombustible: mayor poder calorífico, más hidrófobo en comparación con la biomasa sin torrefactar, menos resistencia a la molienda y ausencia de desarrollo de actividad microbiana capaz de degradarlo (Bergman, 2005a). El Gráfico 1 muestra el balance de masa y energía en la torrefacción realizado por Bioenergía (2000) y descrito por Bergman (2005a). Se observa que la biomasa torrefactada puede llegar a contener el 90 % de la energía inicial en el 70 % de la masa inicial. El 30 % de masa restante la conforman compuestos volátiles y gases que contienen el 10 % de energía inicial. Como resultado de lo observado, se aprecia una densificación energética en el dendrocombustible obtenido.

Gráfico 1
Balance de masa y energía en torrefacción



Leyenda: E: unidad de energía; M: unidad de masa.

Fuente: Bergman (2005a: 12).

5.1. Rendimiento de masa y energía

Considerando la composición macro de la biomasa, podemos expresarla en función de agua, materia orgánica y cenizas. La parte orgánica de la biomasa contiene toda la energía química, y durante la torrefacción parte de la energía se retira como productos de reacción. Por lo tanto, la definición de rendimiento de masa (Ecuación 1) y rendimiento energético (Ecuación 2) se expresan sobre la base orgánica en base seca y libre de cenizas (dry and ash-free basis) (daf) (Bergman, 2005b).

Ecuación 1

$$n_M = \left(\frac{m_{\text{char}}}{m_{\text{feed}}} \right)_{\text{daf}}$$

Ecuación 2

$$n_E = \left(\frac{\text{LHV}_{\text{char}}}{\text{LHV}_{\text{feed}}} \right)_{\text{daf}}$$

En la primera ecuación, m_{char} es la masa del producto torrefactado en base seca y libre de cenizas; m_{feed} es la masa en base seca y libre de cenizas del producto de alimentación; LHV_{char} es el poder calorífico inferior del producto torrefactado en base seca y libre de cenizas; y LHV_{feed} es el poder calorífico inferior del producto de alimentación en base seca y libre de cenizas (Bergman, 2005b).

En la segunda ecuación se hace uso del poder calorífico inferior (LHV), aunque también puede emplearse el poder calorífico superior (HHV). Sin embargo, el valor LHV representa la cantidad de energía utilizable efectivamente a partir de la biomasa, y se utiliza generalmente en la evaluación de muchas aplicaciones (Bergman, 2005b).

En este punto, la diferencia entre LHV y HHV se definirá en breve para que no haya

malentendidos posibles durante la lectura de este proyecto. La biomasa leñosa en base seca contiene hidrogeno, por lo cual se formará agua como uno de los productos de la combustión. El poder calorífico inferior (LHV) considera que el vapor de agua contenido en los gases de la combustión no condensa; por lo tanto, no hay aporte energético adicional de calor por condensación del vapor de agua. Por otro lado, el poder calorífico superior (HHV) considera la condensación de agua contenida en los gases de combustión, por lo cual existe un aporte energético adicional.

El poder calorífico de un combustible puede medirse mediante un análisis químico de acuerdo con la fórmula de Dulong o con la ayuda de calorímetros en laboratorio (Schorr y otros, 2012).

$$\text{LHV} = 8.140 \times C + 29.000 \times (H - O/8) + 2.220 \times S$$

Fórmula de Dulong: Poder calorífico inferior (LHV) de un combustible seco

Dónde:

C: Cantidad centesimal de carbono en peso por kilogramo combustible

H: Cantidad centesimal de hidrógeno total en peso por kilogramo de combustible

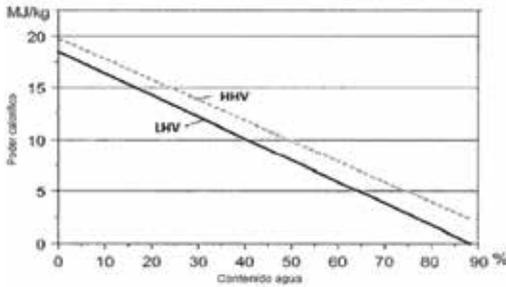
O: Cantidad centesimal de oxígeno en peso por kilogramo combustible

S: Cantidad centesimal de azufre en peso por kilogramo combustible

El contenido de agua de la biomasa leñosa influirá en el poder calorífico en mayor medida que el tipo mismo de biomasa leñosa (madera caducifolia o madera conífera). Como consecuencia de ello, una comparación significativa de los diferentes tipos de madera

como biocombustible requiere valores de poder calorífico en base seca (Schorr y otros, 2012). Existe una correlación lineal entre el poder calorífico y el contenido de agua como se muestra a continuación en el Gráfico 2.

Gráfico 2
Correlación lineal entre el valor calórico y el contenido de agua en base húmeda

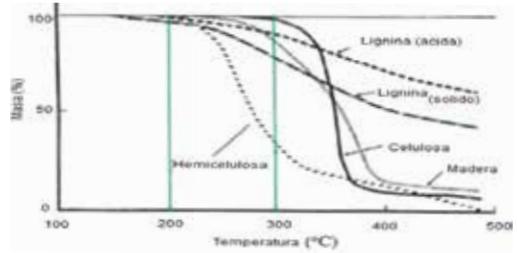


Fuente: Schorr y otros (2012: 13).

5.2. Mecanismo de reacción

Podemos describir la reacción termoquímica de la biomasa durante el proceso de torrefacción como la suma de descomposiciones de los tres polímeros de la lignocelulosa por influencia del calor en ausencia de oxígeno (Bergman, 2005c). Como se observa en el Gráfico 3, la descomposición de la celulosa no es relevante en el rango de temperatura de torrefacción (200 °C - 300 °C). Durante la torrefacción, en gran medida, la pérdida de la masa se debe a la degradación de la hemicelulosa y, en menor medida, a la de la lignina. La hemicelulosa generalmente alcanza una máxima velocidad de descomposición entre 225 °C a 325 °C. La lignina se descompone gradualmente en el rango de temperaturas de 250 °C a 500 °C. Hay que señalar que el comportamiento de descomposición térmica de los polímeros individualmente (hemicelulosa, lignina acida y celulosa) es diferente durante su interacción en una matriz compleja como la madera (véase madera y lignina en sólido).

Gráfico 3
Termogravimetría de la madera de algodón y sus polímeros

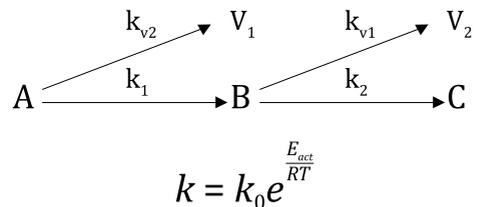


Leyenda: Las Líneas verdes indican el rango de temperaturas del proceso de torrefacción.

Fuente: Bergman (2005c: 16)

Di Blasi y Lanzeta (1997) propusieron un modelo cinético de descomposición de la hemicelulosa como una reacción basada en dos etapas. En el Gráfico 4 se puede observar el mecanismo de descomposición, donde A representa la hemicelulosa; B, el producto intermedio que resulta de la modificación estructural de azúcares como resultado de la despolimerización, buscando que se forme a temperaturas por debajo de los 250 °C; y C, el producto torrefactado. V1 y V2 son los gases y volátiles que se forman a partir de A y a partir de B, respectivamente. Las energías de activación k_{v1} y k_{v2} son mayores que k_1 y k_2 , respectivamente, lo que significa que a mayor temperatura de torrefacción se favorece la formación de los compuestos gaseosos (Bergman, 2005c).

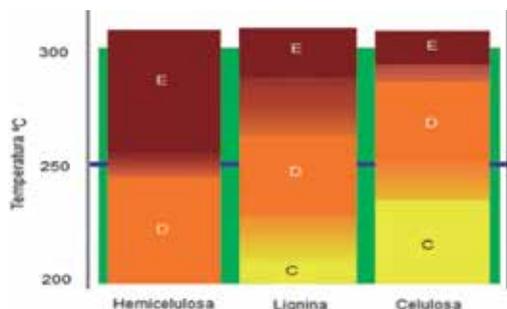
Gráfico 4
Modelo descomposición hemicelulosa empleando la ecuación de Arrhenius



Fuente: Bergman (2005c: 29).

Koukios y otros (1982) también describieron el régimen de descomposición de los tres componentes principales de la lignocelulosa en función de la temperatura, el cual se muestra en el Gráfico 5.

Gráfico 5
Régimen de descomposición lignocelulosa en función de la temperatura



Leyenda:

- Región E: Carbonización y extensa desgasificación
- Región D: Despolimerización, volatilización limitada y carbonización
- Región C: Inicio de despolimerización

Fuente: Bergman (2005b: 14).

Bergman (2005c) realizó un análisis termogravimétrico (TGA) con el que pudo representar la pérdida de masa versus la temperatura en gráficas TGA, y la variación de la masa por unidad de tiempo versus la temperatura en gráficas DTG (análisis termogravimétrico diferencial). En función a este análisis TGA y basándose en la reacción de dos etapas desarrolladas por Di Blasi y Lanzeta (1997), obtuvo valores determinados para las constantes de reacción k_0 y E_{ACT} determinando que la primera etapa de descomposición es más explosiva. Dentro de este período, a 230 °C más del 45 % de la parte reactiva de la biomasa A se convierte en productos de reacción intermedios (B). A 250 °C, la conversión es aproximadamente el 75 %; y a 270 °C, incluso superior al 90 %. En contraste con esto, después de un tiempo de reacción de 30 minutos a 270 °C, apenas

1 % de A se convierte en C, lo que nos lleva a determinar que después de 30 minutos el proceso se vuelve ineficiente.

5.3. Productos de reacción

Como resultado del proceso de torrefacción se obtienen productos gaseosos, vapores y un producto sólido (dendrocombustible). De los vapores que se generan durante la torrefacción, el principal es el agua, y se produce en dos etapas diferentes: la primera durante el secado, y la segunda durante la despolimerización de los polímeros. Además del agua, también se obtienen una serie de compuestos condensables, tales como: formaldehído, ácido acético, ácido fórmico, acetona, metanol y trazas de fenol, furfural y amoníaco. Asimismo, se producen gases como el dióxido de carbono y el monóxido de carbono (Bergman, 2005b).

La diferencia entre la composición de hemicelulosa de maderas caducifolias y coníferas tendrá un impacto en la formación de vapores de torrefacción. En maderas caducifolias predominará la formación de ácido acético y metanol; y en maderas coníferas, la formación de ácido fórmico (Bergman, 2005c).

5.4. Etapas de la torrefacción

Para Bergman (2005b) las dificultades al interpretar el proceso de torrefacción se basan en determinar el tiempo de torrefacción. El tiempo de residencia ha sido empleado frecuentemente; sin embargo, este solo expresa el tiempo que la biomasa permanece en el reactor de torrefacción. Es decir, este tiempo no indica en qué momento el proceso de torrefacción está tomando lugar en sí mismo, teniendo en cuenta que parte del tiempo de residencia se está perdiendo en

el calentamiento de la biomasa junto con el secado. Para evitar este inconveniente, se ha abandonado el término *tiempo de residencia* y se ha introducido el término *tiempo de reacción*. De este modo, Bergman (2005b) define cinco etapas a través de las cuales la biomasa se procesa durante la torrefacción. La ventaja de definir estas etapas es que se ofrece la posibilidad de comprender mejor lo que ocurre con las partículas de biomasa a través del proceso.

a) Calentamiento inicial

Se define como la fase en donde la biomasa se calienta inicialmente, el calor se utiliza únicamente para aumentar la temperatura, por lo cual el fin de esta fase se alcanza cuando se produce una evaporación acelerada.

b) Secado I

Durante esta etapa, la temperatura de la biomasa y la velocidad de evaporación son constantes. Por lo tanto, la energía térmica de entrada al sistema se emplea por completo en la entalpía de vaporización. El final de esta etapa está marcado por el contenido crítico de agua en base seca. Como se puede ver en el Gráfico 6, el contenido de agua en base seca disminuye linealmente en la fase de secado I, pero al final de la fase la función pasa por un punto de inflexión que marca el contenido crítico de agua en base seca.

c) Secado II y calentamiento intermedio

Cuando se evapora toda el agua superficial, la temperatura comienza a aumentar mientras el agua restante debe difundirse a través de los poros de la biomasa necesitando más energía y tiempo para superar las fuerzas capilares.

Finalmente, toda el agua unida físicamente se libera poco a poco hasta que la biomasa está prácticamente libre de humedad. En esta etapa, también los compuestos volátiles como terpenos pueden volatilizarse; es decir, los primeros compuestos se someten a una transición de fase al estado gaseoso, lo que afecta el rendimiento de masa. Se llega al final de esta etapa cuando el nivel de la temperatura alcanza los 200 °C.

d) Torrefacción

Siendo el núcleo de todo el proceso, esta etapa consiste en una fase de calentamiento, un período de temperatura relativamente constante y una fase de enfriamiento. Con un aumento de la temperatura de hasta 300 °C se produce la descomposición termoquímica de la biomasa, lo que da como resultado una reducción significativa de la masa y una densificación energética.

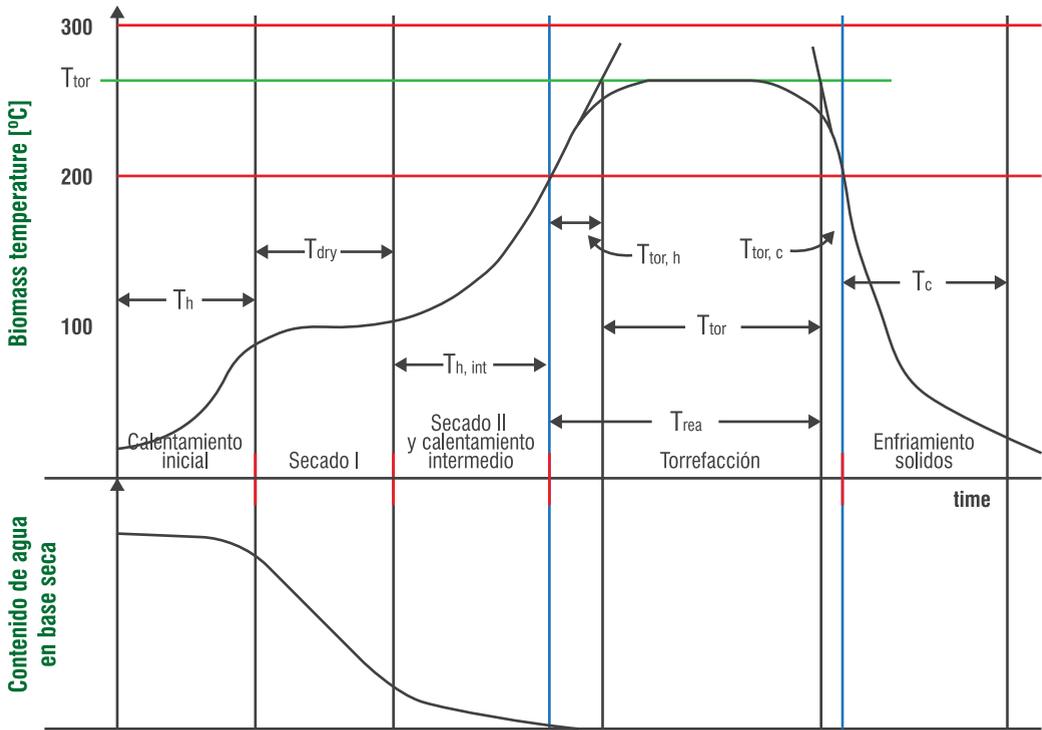
El Gráfico 6 muestra el tiempo de reacción (*trea*), que ha sido definido como la suma del tiempo de torrefacción desde 200 °C hasta la temperatura de torrefacción establecida (*ttor*, h) más el tiempo que se mantiene en la temperatura de torrefacción (*ttor*), dejando fuera el tiempo de enfriamiento en torrefacción (*ttor*, c) a pesar de que pertenece al proceso mismo de torrefacción (Bergman, 2005^b).

e) El enfriamiento de sólidos

Durante este período se ha completado el enfriamiento a la temperatura final deseada. En cualquier caso, esto debe ejecutarse en ausencia de oxígeno debido a los peligros de ignición o incluso de explosión del polvo de alta reactiva que puede ocurrir durante el proceso.

Gráfico 6

Perfil temperatura - tiempo para un proceso de torrefacción batch



Leyenda:

- La biomasa de alimentación a temperatura ambiental ingresa al reactor pasando las etapas de calentamiento inicial, secado I, secado II y calentamiento intermedio, torrefacción y enfriamiento de sólidos.
- La línea verde horizontal representa la temperatura límite de torrefacción.
- Las líneas verticales marcan la división de cada etapa.
- Las líneas azules verticales marcan la incidencia en el proceso mismo de torrefacción.
- También se muestra la reducción del contenido de agua.

Fuente: Schorr y otros (2012: 18).

5.5. Tamaño de partícula

Además de la temperatura y el tiempo de reacción, el tamaño de partícula es un parámetro esencial en la torrefacción de biomasa a nivel industrial. Por ende, para asegurarse el mínimo tiempo de reacción es importante cerciorarse de que la etapa que controla la cinética del proceso es la reacción química y no la conducción o convección de calor. Dos números adimensionales cobran importancia para el adecuado control cinético de la operación: el número de *Biot* (Ecuación

3) y el número designado como *pirólisis externa* (Ecuación 4).

Ecuación 3

$$Bi = \left(\frac{\alpha r_p}{\lambda} \right) \ll 1$$

Ecuación 4

$$By' = \frac{\alpha}{K_{1p} c_p r_p} \gg 1$$

Donde:

α : Coeficiente de transferencia de calor [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]

r_p : Radio de la partícula, considerándola esférica [m]

λ : Conductividad térmica [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

k_1 : Constante cinética

p : Densidad [kgm^{-3}]

C_p : Capacidad calorífica [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]

El control cinético óptimo se obtiene con un valor de Biot significativamente menor que la unidad y con un valor de pirólisis externa significativamente mayor que la unidad (Prins, 2005).

Belderok (2007) menciona que para una partícula menor a 1,5 mm, el número de Biot es menor de 0,1. Adicionalmente, a temperaturas de torrefacción se puede alcanzar un número de pirólisis externa mayor a la unidad con tamaños de partícula iguales o menores a 12 mm.

5.6. Propiedades de la biomasa torrefactada

a) *Análisis elemental*

El producto torrefactado muestra incrementos en la cantidad de carbono, un descenso en el contenido de oxígeno e hidrógeno, y la cantidad de nitrógeno se mantiene constante. El incremento de carbono generara un aumento de la capacidad calorífica del producto torrefactado. Estos cambios se observan en el Cuadro 3, donde se muestra el porcentaje de cada elemento y cenizas para diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción.

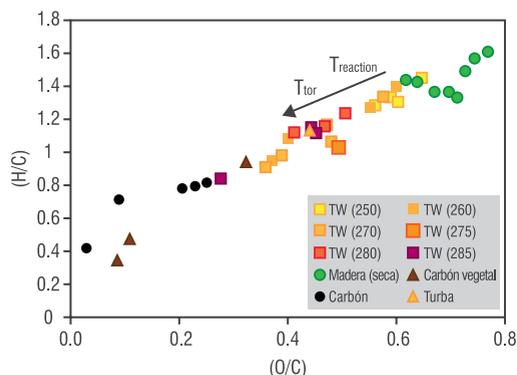
Cuadro 3
Análisis elemental y cenizas para diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción del sauce

Sauce	Sin tratamiento	Torrefacción	
Temperatura (K)	-	250 °C	300 °C
Tiempo (minutos)		30	10
C (%)	47,2	51,3	51,3
H (%)	6,1	5,9	5,9
N (%)	45,1	40,9	40,9
O (%)	0,3	0,4	0,4
Cenizas (%)	1,3	1,5	1,5

Fuente: Prins (2005: 123).

Para comprender lo que sucede durante la torrefacción, el diagrama de Van Krevelen es una herramienta útil que permite una evaluación de mezclas orgánicas complejas como el petróleo, el carbón o la biomasa. Se muestra la cantidad relativa de los tres elementos más importantes de combustibles, que son C, H y O, en forma de la relación H / C en el eje de ordenadas y la relación O / C en el eje de abscisas. Se toma carbón como la cifra objetivo, que tiene la relación más baja de los dos H / C - y O / C -; mientras que la biomasa de la madera no tratada tiene valores mucho más altos. Bergman (2005b) presentó los datos de varios experimentos para ver cómo reacciona la composición elemental de la madera durante la torrefacción y hacer una comparación con otros combustibles. El resultado fue que un aumento de la temperatura y/o tiempo de residencia trae las dos relaciones más cerca de las de carbón.

Gráfico 7
Diagrama de Van Krevelen de carbón mineral, carbón vegetal, turba, madera torrefactada y madera sin tratar



Leyenda: TW = Madera torrefactada a temperatura determinada

Fuente: Bergman (2005b: 20).

b) Propiedades mecánicas

La biomasa leñosa tiene un carácter fibroso y tenaz en su estado natural, pero durante la operación de torrefacción la degradación de la matriz de hemicelulosa y la despolimerización de la celulosa disminuyen su tenacidad y consiguen mejorar la capacidad de molienda (Bergman, 2005a). Bergman (2005a) llevó a cabo estudios sobre las necesidades de energía para la molienda de biomasa en estado natural y biomasa torrefactada, y llegó a la conclusión de que el consumo de energía se reduce drásticamente cuando la biomasa es primero torrefactada. Basándose en los parámetros tiempo-temperatura a los cuales la biomasa es torrefactada, la reducción en los rangos de consumo de energía varía entre 70 % y 90 %.

c) Reducción humedad

La biomasa es completamente secada durante la torrefacción. Después del proceso, la humedad absorbida es bastante limitada; varía entre 1 % a 6 % dependiendo de la condiciones de torrefacción y el tratamiento

posterior del producto. La explicación del comportamiento hidrofóbico de la biomasa después de la torrefacción es la destrucción de los grupos OH, con los que la biomasa pierde la capacidad de formar puentes de hidrógeno (Bergman, 2005b).

5.7. Impacto ambiental de la torrefacción: caso Tor-Coal

La compañía holandesa Tor-Coal tiene una planta de torrefacción en funcionamiento que cuenta con una producción de 2 t/h. La biomasa de alimentación son astillas de madera caducifolia y conífera. La torrefacción se realiza a temperatura de 290 °C en un horno rotatorio de calentamiento indirecto (Nurminen, 2012).

Los impactos ambientales de la planta son casi exclusivamente las emisiones al aire. El gas producido durante la torrefacción se filtra para eliminar el polvo y luego es quemado en un incinerador. Después de la incineración, los gases de combustión están a una temperatura de 1000 °C, y el calor generado se utiliza para mantener la temperatura en el horno rotatorio de torrefacción. Los gases de combustión empleados en el calentamiento indirecto a una temperatura de aproximadamente 200 °C se utilizan para el secado de las virutas de madera no tratadas en un secador de cinta. El contenido de polvo es aproximadamente < 20 mg / Nm³, y las concentraciones de sustancias en el gas de combustión son bajas; por lo tanto, la carga para el medio ambiente es baja (Nurminen, 2012). Los datos de concentración de los gases de combustión se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4

Emisiones de la planta de torrefacción Tor-Coal

	Medición 1: 19 de mayo de 2011		Medición 2: 4 de noviembre de 2011	
	[mg/Nm ³ seco]	kg /h	[mg/Nm ³ seco]	kg /h
Polvo	1,2	0,01	2,6	0,02
CO	6,1	0,03	15	0,13
NOx	255	1,44	156	1,35
SO2	56	0,32	24	0,21
Dioxinas / furanos	0,011*	-	-	-
TOC**	3	0,02	3	0,03
HF	0,5	0,003	0,2	0,001
HCl	14,7	0,08	17,4	0,15

Donde:

*ng TEQ/Nm³ seco

**Carbón orgánico total

Fuente: Nurminen (2012: 19).

5.8. Pellets de biomasa leñosa torrefactada

Los pellets de biomasa leñosa torrefactada tienen un alto poder calorífico de 20-22 MJ/kg y una alta densidad energética de > 15 GJ/m³, en comparación con el pellet de biomasa leñosa que tiene una densidad energética entre 8 y 12 GJ/m³ (Pöyry Management Consulting, 2011). El pellet de biomasa torrefactada tiene bajo contenido de azufre y cenizas en comparación con el carbón, y un mejor comportamiento de combustión en comparación con la biomasa no torrefactada. También debido a su bajo contenido de agua y su comportamiento hidrofóbico, los costos de transporte y manejo son más bajos que los pellets de madera, al igual que su manipulación y almacenamiento a largo plazo. Las características químicas y físicas de los pellets de biomasa leñosa torrefactada están cerca a las propiedades del carbón. Por lo tanto, los pellets de biomasa torrefactada pueden emplearse como dendrocombustible

junto a carbón en plantas de energía y, en consecuencia, las inversiones adicionales en tecnología se pueden evitar (Wolfgang, 2012).

Cuadro 5 Comparación pellets biomasa leñosa sin torrefactar y torrefactada

	Pellets biomasa leñosa	Pellets biomasa leñosa torrefactada
Contenido de humedad	8 - 10 %	1 - 5 %
Poder calorífico (GJ/t)	17,7	20 - 22
Densidad aparente (kg/m ³)	500 - 600	750 - 850
Densidad energética (GJ/m ³)	8 - 10	15 - 18

Fuente: Nurminen (2012: 17).

Según Pöyry Management Consulting (2011), los costes de producción y distribución de pellets de biomasa leñosa torrefactada se dividen en tres secciones: materia prima (63 %), torrefacción y peletización (27 %), y almacenamiento y transporte (10 %). Se estima que los costos de producción son aproximadamente 50 euros/t; además de esto, se añaden los costos de la compra de materia prima y logística (Pöyry Management Consulting 2011). Según la investigación de mercado de los pellets de biomasa leñosa torrefactada, los mercados potenciales se encuentran en Europa (Karhunen y otros, 2011).

Debido a que la torrefacción a escala comercial es incipiente, el nivel de precios de los pellets de biomasa leñosa torrefactada no es seguro.

Con el aumento del uso de la dendroenergía, también es probable que aumente la volatilidad de su precio. Índices de precios y otros sistemas de predicción de precios que se utilizan comúnmente en el sector de la energía tradicional pueden extenderse también a los dendrocombustibles (Teräs, 2012).

5.9. Cadena de producción de pellets de biomasa torrefactada

La cadena de producción de los pellets de biomasa leñosa torrefactada normalmente parte del bosque y termina en el transporte del dendrocombustible torrefactado para el usuario final. Sin embargo, además de las etapas mencionadas, pueden haber varias operaciones adicionales que dependerán del operador (véase el Gráfico 8).

Gráfico 8

Cadena de producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada



Fuente: Nurminen (2012: 20).

5.10. Energía potencial de madera en la región Ucayali

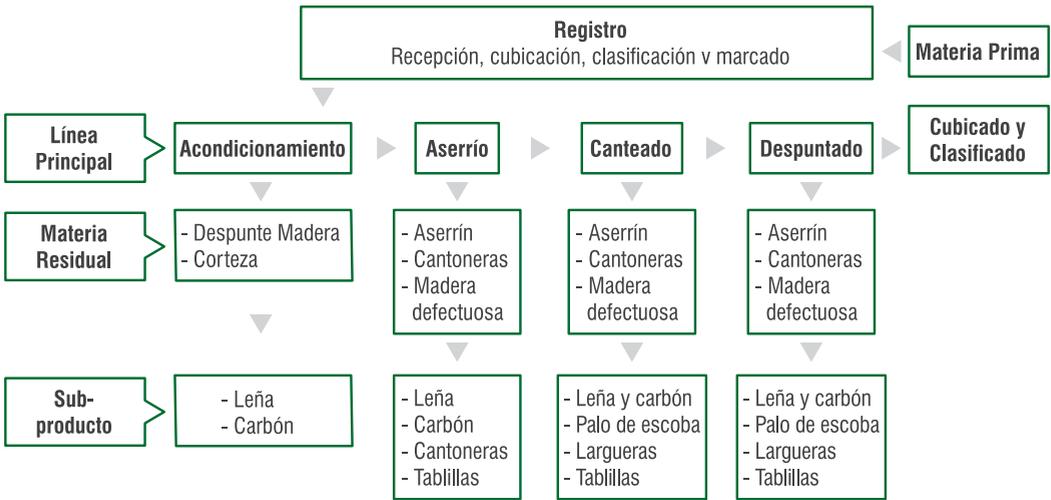
La actividad forestal en Ucayali emplea un aproximado de 58 especies madereras de diferentes características tecnológicas y valores comerciales. La producción de madera en rollo extraída tiene un promedio histórico de 350 000 m³/año, lo cual representa alrededor del 25 % de la producción en el Perú. En la región Ucayali, la cadena de valor en la industria forestal comienza con la extracción y el transporte de la madera en rollo de los bosques productivos. El Instituto Nacional de Recursos Naturales ha establecido un área de

4 089 926 ha como bosques de producción permanente, disponibles para la producción maderera, en ciclos de veinte a treinta años (Riesco y otros, 2003).

La mayor cantidad de residuos en la cadena de valor de la actividad forestal en Ucayali se generan en los bosques de extracción y en las plantas de transformación primaria (Riesco y otros, 2003).

Gráfico 9

Línea de transformación primaria, materia residual y subproducto



Fuente: Adaptado de Riesco y otros (2003: 58).

En general, se aprecia un uso y reciclaje mínimos de residuos en toda la cadena de valor de la madera en la región Ucayali; aunque existe tecnología disponible para

la fabricación de productos a partir de los residuos de la madera, así como un mercado para la venta de estos.

PROBLEMÁTICA

El presente proyecto busca abordar dos problemáticas en la ciudad de Pucallpa, región Ucayali, y una problemática en la provincia de Melgar, región Puno.

a) *Acumulación y quema de residuos forestales en la ciudad de Pucallpa, región Ucayali*

La producción de carbón, la acumulación del polvillo de madera y la quema de aserrín son un problema permanente en la zona de Manantay, San Fernando, y en el eje de la carretera Federico Basadre (Ministerio de Energía y Minas y Gobierno Regional de Ucayali 2007).

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2005) describe la acumulación de aserrín en las orillas del río Ucayali como un pasivo ambiental que afecta la calidad del agua superficial de la zona.

La Oficina Regional de Defensa Nacional, Seguridad Ciudadana y Defensa Civil del Gobierno regional de Ucayali (2010) describe que dentro de la ciudad de Pucallpa, sobre todo en el sector Manantay, se identificaron montículos de aserrín en pleno proceso de quema y suspensión de partículas de aserrín en el aire. Calvo (2007) menciona que según el inventario nacional de producción de dioxinas y furanos, la incineración de desechos de madera contribuye con el 3 %.

Hay estudios que revelan que en zonas de la ciudad de Pucallpa, en temporadas de alta actividad, en los centros de transformación se supera el estándar de calidad ambiental (ECA) para partículas menores a 10 micras (Yomona, 2008).

Dávila (2007) menciona que el 31,08 % de todas las enfermedades de la región Ucayali corresponden al sistema respiratorio.

El aserrín acumulado en los centros de transformación primaria constituye un serio problema de contaminación en los suelos en donde se deposita, y es un foco para la propagación de hongos que provocan la podredumbre de árboles moribundos o muertos con un contenido de humedad relativamente alto (Starbuck, 1997). El aserrín puede causar enfermedades como asma, bronquitis crónica y otros problemas respiratorios asociados con alergias (Malström y otros, 1999).

Tradicionalmente se ha usado la combustión como alternativa para reducir la acumulación, pero su quema contribuye a la emisión atmosférica de más de doscientos compuestos orgánicos potencialmente peligrosos (Wolfgang y otros, 1998), tales como hidrocarburos aromáticos policíclicos, que son potencialmente mutagénicos y carcinogénicos (Ramdahl y Becher, 1982; Claessens y otros, 1987).

b) Deficiente implementación de la operación secado en las plantas de transformación primaria de madera en la ciudad de Pucallpa, Ucayali

En las plantas de transformación primaria de Pucallpa solo el 15 % de los aserraderos cuenta con hornos de secado; en consecuencia, más del 90 % de la madera que se lleva a Lima es transportada sin

secar (Riesco y otros, 2003; Santiago y otros, 2012).

Riesco y otros (2003) mencionan que el factor más importante en el diferencial de precio en una misma especie de madera es la calidad. En este sentido, el secado constituye una variable de la calidad, considerando que bajo las condiciones de humedad y temperatura amazónica bastan tres días de mal almacenaje de tablas salidas del proceso de aserrío sin pasar al proceso de secado para que el intemperismo y agentes biológicos (hongos e insectos xilófagos y hongos cromógenos) comiencen a afectar su calidad. Durante sus visitas, Riesco y otros (2003) cuantificaron las pérdidas acumuladas por intemperismo y agentes biológicos, y estimaron que en promedio corresponden a un rango entre 16 % y 18% del volumen total de madera que pasan por el patio de transformación primaria a lo largo del año.

En la operación de transporte a Lima, los costos están en función al peso de la madera (soles/ kg); por ende, el contenido de humedad estará fuertemente relacionado con el costo de transporte. Una empresa que transporta al año dos millones de pies tablares de madera tornillo estaría incurriendo en un sobrecosto de S/. 244 000 transportando la madera con una humedad de 66 % en lugar de transportarla con una humedad de 16 % (Riesco y otros, 2003).

La participación del costo de transporte de Pucallpa a Lima en el precio de madera aserrada puede estar variando en un 4 % por pie tablar en especies de alto valor como la caoba; 16,3 % en especie de valor intermedio como el tornillo; o 29 % en especies de menor valor como la catahua (Riesco y otros, 2003).

c) Déficit de combustibles en la temporada de heladas para la cocción de alimentos y calefacción en la provincia de Melgar, región Puno

Entre mayo y septiembre, el enfriamiento por radiación, típico de las regiones que se encuentran a más de 3800 m s. n. m, y la incursión de masas de aire frío y seco procedentes de la región polar, canalizadas por la cordillera de los Andes, ocasionan las heladas que se registran en gran parte de la sierra peruana.

En la provincia de Melgar, región Puno, las temperaturas descienden por debajo de los 0 °C, lo cual muchas veces está asociado con precipitaciones sólidas (granizadas y nevadas). Es así que esta es una de las zonas más afectada y que ha sido priorizada junto a otras provincias del Perú por el Plan de Intervención por Heladas (Presidencia de Consejo de Ministros 2012).

La estrategia del Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social (MIDIS) enmarcada en el Plan de Intervención para Enfrentar los Efectos de la Temporada de Heladas y Frijaje (Presidencia de Consejo de Ministros 2012) consiste en planificar, ejecutar, monitorear y supervisar,

a través de la Unidad Ejecutora, el Programa Nacional de Asistencia Alimentaria (PRONAA), la provisión de alimentos adecuados y de calidad a la población damnificada (5 miembros/familia) en las áreas geográficas afectadas con el fin de brindar ayuda alimentaria que permita el incremento del suministro calórico en la dieta. Los alimentos que se ha planificado entregar son en su mayoría cereales y menestras, los cuales requieren cocción para su consumo (Presidencia de Consejo de Ministros 2012). Sin embargo, este plan también menciona que la capacidad de cocción de alimentos y la oferta de material combustible (leña, bosta, otros) se ven mayormente afectados en el caso de nevadas, situación en la que podría presentarse déficit de material combustible por el período que dura el evento. Hay que tener en cuenta que, en las áreas rurales del país, la leña y la bosta son las principales fuentes de energía que utilizan las familias campesinas para cocinar diariamente sus alimentos y calentarse cuando hace frío. En la región Puno, el 47,0 % de los hogares utiliza bosta/estiércol para cocinar. Esta es la región peruana donde más se emplea bosta/estiércol ante la escasez de leña y carbón, y los elevados precios del kerosene (Muñoz, 2008; MINAM - INEI - PNUMA, 2009; Bedon, 2009).

METODOLOGÍA

El proyecto pertenece al sector de energías renovables y analiza la síntesis del proceso de producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada en la ciudad de Pucallpa, desde la obtención de los residuos forestales de las plantas de transformación primaria de la madera hasta los consumidores finales.

1. Producción pellets de biomasa leñosa torrefactada

La cadena de producción de los pellets de biomasa leñosa torrefactada consta de una serie de operaciones unitarias necesarias y por las que deben pasar los residuos forestales para la obtención del producto final. En el Gráfico 10 se muestra el flujo de las principales operaciones representadas por cajas y las conexiones existentes entre ellas.

Gráfico 10

Principales operaciones unitarias para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada



Fuente: Adaptado de Bergman (2005a: 14).

a) Residuos forestales disponibles

Los principales residuos forestales disponibles en la región Ucayali son los derivados de los bosques de extracción y los derivados de las plantas de transformación primaria.

Para el desarrollo del proyecto, se desestima el uso de los residuos forestales derivados de los bosques de extracción debido a la dispersión geográfica, la complejidad logística y el costo beneficio; considerándose únicamente los residuos derivados de las plantas de transformación primaria.

Las plantas de transformación primaria de la región Ucayali se concentran mayoritariamente en la ciudad de Pucallpa; y en el 2012 aserraron un volumen de 126 619,85 m³ de madera, considerando 73 especies de explotación (Santiago y otros 2012). Riesco y otros (2003) concluyeron que los residuos forestales del aserrado (merma) en las plantas de transformación primaria fueron de 20 %, y que estuvieron conformados por 7 % de aserrín procedente del trozado inicial, y por 13 % de aserrín, viruta, madera defectuosa y otros procedentes del canteado y despuntado. La concentración geográfica de las plantas de transformación primaria en las zonas Manantay, La Hoyada y entre el kilómetro uno y doce de la carretera Federico Basadre (Santiago y otros, 2012) otorga una ventaja logística para el acopio de los residuos forestales en un radio aproximado

de 7 kilómetros, considerando como centro el cruce de la avenida Playwood y la carretera Federico Basadre en la ciudad de Pucallpa.

b) Plantas de transformación primarias

El informe técnico *Diagnóstico de la industria de primera y segunda transformación y de la cadena productiva en Pucallpa* (Santiago y otros, 2012) consideró que la población de primera transformación está constituida por las empresas de transformación mecánica de la madera formalmente inscritas en los registros de la Dirección Regional Sectorial de Industrias (PRODUCE), por los socios registrados en la Asociación de Productores de Ucayali (APROFU) y por los socios registrados en la Asociación de Pequeños Empresarios de la Madera (APEMED). Sin embargo, Santiago y otros (2012) mencionan que los registros no estaban actualizados, por lo cual durante el trabajo de campo se eliminaron algunas empresas no operativas y se añadieron en registros otras empresas inexistentes que se encontraban trabajando informalmente.

En la toma de datos realizada por Santiago y otros (2012) se contabilizaron veinte aserraderos de transformación primaria: trece se concentran en la zona Manantay; cuatro, en la zona de la Carretera Federico Basadre; y tres, en la zona de la Hoyada (véase el Gráfico 11).

Gráfico 11

Número de aserraderos por zona en Pucallpa



Fuente: Santiago y otros (2012: 12).

De los veinte aserraderos de transformación primaria mencionados en el informe técnico de Santiago y otros (2012), solo tres cuentan con hornos de secado. Para el desarrollo del proyecto, se plantea formar una alianza estratégica con las diecisiete plantas de transformación primaria (aserraderos) que no tienen integrada la operación de secado; sin embargo, no se descarta poder trabajar con las veinte plantas de transformación en un escenario optimista. La finalidad es crear una cadena de valor combinando recursos, donde nosotros aprovechemos su merma como

biomasa de alimentación para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada, y ellos incrementen su competitividad integrando la operación de secado a su línea de transformación y aprovechando el calor residual producido en la planta de torrefacción.

c) Biomasa alimentación

El aserrín procedente de los plantas de transformación primaria (aserraderos) se empleará como biomasa de alimentación para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada.

Inicialmente se procedió a seleccionar las especies madereras de la región Ucayali con el mayor volumen aserrado en el 2010, 2011 y 2012 (véase el Cuadro 6); y el índice de versatilidad más alto (véase el Cuadro 8). Estas dos variables en conjunto han permitido seleccionar ocho especies que se estima seguirán explotándose en altos volúmenes anuales, las cuales son: el tornillo, la panguana, el cachimbo, la copaiba, el huayruro, la catahua, la cumala y el shihuahuaco.

Cuadro 6

Especies seleccionadas: volumen de explotación en la región Ucayali (2010, 2011 y 2012) y participación porcentual sobre el volumen total de madera aserrada para cada año, respectivamente

Nombre común	Madera aserrada 2010 (m³)	(%) 2010	Madera aserrada 2011 (m³)	(%) 2011	Madera aserrada 2012 (m³)	(%) 2012
Tornillo	23 379,43	16,10	23 616,30	12,81	16 707,27	13,19
Panguana	11 871,45	8,17	10 886,41	5,91	16 595,94	13,11
Cachimbo	22 159,15	15,26	31 860,65	17,28	14 323,10	11,31
Copaiba	12 031,80	8,28	15 083,65	8,18	11 444,73	9,04
Huayruro	9727,25	6,70	11 205,02	6,08	8 657,50	6,84
Catahua	6501,52	4,48	11 654,35	6,32	7 053,14	5,57
Cumala	9087,95	6,26	25 909,42	14,05	6 341,75	5,01
Shihuahuaco	3791,81	2,61	6023,99	3,27	3 264,75	2,58
Total	98 550,36	67,85	136 239,79	73,90	84 388,18	66,65

Fuente: Adaptado de MINAG - DGFFS (2012).
Elaboración propia

Cuadro 7 Especies seleccionadas e índice de versatilidad

Especie	Índice de versatilidad
Tornillo	1
Panguana	0,3
Cachimbo	0,6
Copaiba	0,53
Huayruro	0,47
Catahua	0,47
Cumala	-*
Shihuahuaco	0,67

Donde:

1 es el máximo valor de versatilidad.

*No existe información.

Fuente: Adaptado de Riesco y otros (2003).

Elaboración propia

Debido a la alianza estratégica establecida con las plantas de transformación primaria (aserraderos), se estima que se tendrá acceso al aserrín derivado del 80 % de la madera aserrada anual. Para los cálculos se consideró el volumen aserrado de madera del 2012, el cual presentó el escenario más pesimista de volumen de madera aserrado en la última década (MINAG - DFFS 2012).

El Cuadro 8 muestra el 80 % de madera aserrada seleccionada del 2012; incluye a las especies del Cuadro 6, Cuadro 7 y otras especies.

Cuadro 8 Especies y 80 % de volumen aserrado seleccionado del 2012

Nombre común	Madera aserrada 2012 (m ³)	(%)
Tornillo	16 707,27	13,19
Panguana	16 595,94	13,11
Cachimbo	14 323,10	11,31
Copaiba	11 444,73	9,04
Huayruro	8657,50	6,84
Catahua	7053,14	5,57
Cumala	6341,75	5,01
Shihuahuaco	3264,75	2,58
Otras especies	16 902,96	13,35
Total	101 291,14	80,00

Fuente: Adaptado de MINAG - DGFFS (2012).

Elaboración propia

Para el desarrollo del proyecto se consideró una merma –aserrín de 12 % sobre el volumen aserrado seleccionado del 2012–. Este 12 % contempla el 7 % de aserrín del trozado inicial mencionado por Riesco y otros (2003), y se asumió un 5 % adicional de aserrín procedente del canteado y despuntado también mencionado por Riesco y otros (2003). En el Cuadro 9 se muestra el volumen anual de aserrín proyectado según el volumen aserrado seleccionado del Cuadro 8.

Cuadro 9 Especies: volumen aserrado seleccionado del 2012 y aserrín proyectado

Especie	Madera aserrada (m ³)	Aserrín (m ³ /año)
Tornillo	16 707,27	2 004,87
Panguana	16 595,94	1 991,51
Cachimbo	14 323,10	1 718,77
Copaiba	11 444,73	1 373,37
Huayruro	8 657,50	1 038,90
Catahua	7 053,14	846,38
Cumala	6 341,75	761,01
Shihuahuaco	3 264,75	391,77
Otras especies	16 902,96	2028,36
Total	101 291,14	12 154,94

Fuente: Adaptado de MINAG - DGFFS (2012).

Elaboración propia

Para poder realizar los balances de masas en las diferentes operaciones unitarias en el proceso de producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada, debemos determinar la masa de aserrín de alimentación. Por ello, se debe multiplicar el volumen de aserrín de cada especie por su densidad en verde (densidad que posee la madera en la planta viva). Esto se debe fundamentalmente a que la madera que llega a los aserraderos es madera recién talada y su volumen corresponde al de madera en planta viva (volumen verde). Sin embargo, la industria forestal no suele emplear la densidad en verde, por lo que no existe información detallada sobre densidad

en verde de las especies del Cuadro 10. A pesar de ello, la industria forestal emplea comúnmente la densidad básica (relación entre el peso seco en estufa a 105-110 °C, y su volumen verde) ya que permite conocer la cantidad de masa en base seca del volumen

verde. En el Cuadro 11 se observa la masa de aserrín en base seca de cada especie y la masa de aserrín total en base seca que asciende a 6 720 116,18 kg/año.

Cuadro 10

Especies: volumen de aserrín anual proyectado, densidad básica y masa de aserrín anual proyectado en base seca

Especie	Aserrín proyectado (m ³ /año)	Densidad básica* (kg/m ³)	Masa aserrín base seca (kg/año)
Tornillo	2004,87	540	1 082 631,10
Panguana	1991,51	490	975 841,27
Cachimbo	1718,77	590	1 014 075,48
Copaiba	1373,37	610	837 754,24
Huayruro	1038,90	600	623 340,00
Catahua	846,38	410	347 014,49
Cumala	761,01	450	342 454,50
Shihuahuaco	391,77	870	340 839,90
Otras especies	2028,36	570**	1 156 165,20
Total	12 154,94	-	6 720 116,18

Donde:

*Densidad básica relación entre el peso seco en estufa a 105-110 °C, y su volumen verde.

** Densidad básica promedio de las ocho especies.

Elaboración propia

d) Operación de secado

En la operación de secado se procederá a reducir el contenido de humedad en base seca del aserrín a 12 %. Esta humedad es recomendada por el CENER para continuar con el proceso de torrefacción.

Anteriormente se determinó que la masa total de aserrín en base seca proyectada anualmente era igual a 6 720 116,18 kg, y asumiendo que se operara 300 días del año a 24 horas día, obtenemos un flujo másico de aserrín en base seca de 933,35 kg/h.

Se estima que las maderas seleccionadas tienen un promedio de humedad en base

seca de 62,5 %; por tanto, el aserrín de alimentación presentará el mismo contenido de humedad inicial.

Multiplicar la masa de aserrín en base seca obtenida por el porcentaje de humedad en base seca, nos permite calcular la masa de agua contenida en el aserrín de alimentación. Por lo tanto, la masa de agua contenida en el aserrín de alimentación es 538,34 kg, y la masa total será igual a 1516,69 kg (véase el Cuadro 11).

Cuadro 11

Flujo masa aserrín, masa de agua y masa base seca

Aserrín: biomasa de alimentación	
Flujo masa total	1516,69 kg/h
Masa de agua	538.34,9 kg
Masa base seca	933,35 kg

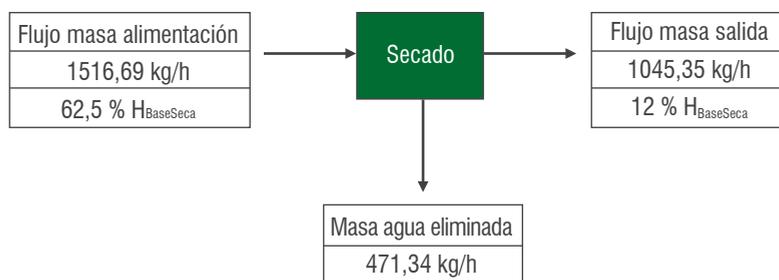
→ Secado

Elaboración propia

Considerando que el secador reducirá el porcentaje humedad de 62,5 % a 12 %, el flujo másico de salida en la operación de secado será igual a 1045,35 Kg/h; y la masa de agua eliminada, 471,33 kg/h (véase el Gráfico 12).

Gráfico 12

Balance de masa operación de secado



Elaboración propia

Para la operación de secado, los equipos más utilizados para biomasa son el secador rotatorio y el secador neumático. Para el desarrollo del proyecto, se seleccionó el secador neumático debido a su bajo costo comparado con el secador rotatorio, y considerando que el aserrín fluidizará sin problema.

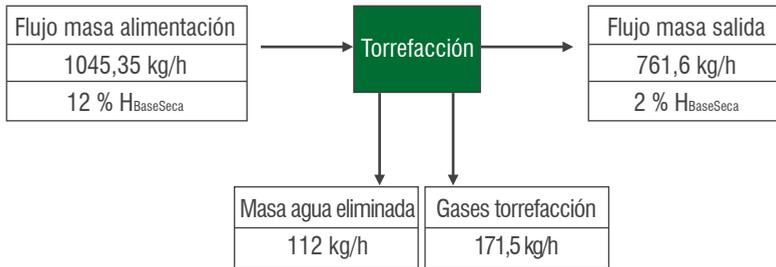
La capacidad del secador neumático deber ser de 2 toneladas por hora.

e) Operación de torrefacción

En función a las investigaciones y datos experimentales a nivel de laboratorio y planta

piloto de ECN, CENER, Andritz y Sector Project, el tiempo de reacción será de cuarenta minutos, comenzando desde 200 °C a una tasa de incremento de temperatura de 10 °C/min hasta llegar a la temperatura constante de reacción de 275 °C. Adicionalmente, luego de que la biomasa pierda todo el contenido de agua, se estima que un 20 % de la masa de materia seca se perderá en gases de torrefacción, y el 80 % restante será el producto torrefactado (véase el Gráfico 13)

Gráfico 13 Balance de masa operación de torrefacción



Elaboración propia

El flujo másico de salida de la biomasa es de 761,6 kg/h con un contenido de humedad en base seca de 2 % adquirido como resultado del proceso de despolimerización. Los otros dos flujos de salida son los correspondientes al vapor de agua (112 kg/h) y a los gases de torrefacción (171,75 kg/h).

Para la operación de torrefacción se requiere un reactor continuo de calentamiento directo con una capacidad de 1,5 toneladas por hora, con sistema de recirculación de gases de torrefacción para mantener las condiciones de ausencia de oxígeno.

f) Operación de enfriado

De acuerdo con la información revisada, el equipo más usado para el enfriado de la biomasa leñosa torrefactada es el tornillo con chaqueta de agua, el cual enfriará el producto al mismo tiempo que lo transporta a la tolva de alimentación para el pelletizado.

La capacidad del equipo debe ser de 1 tonelada por hora, ya que la masa de entrada a la operación de enfriado será aproximadamente de 760 kg (véase el Gráfico 12).

g) Operación de pelletizado

El aserrín torrefactado ingresa a la operación de pelletizado a una temperatura de 130 °C, y mediante el proceso de rozamiento y compresión

la lignina de la biomasa actúa como un excelente aglutinante y favorece la cohesión de toda la masa. Al salir el producto por los orificios, será cortado por una cuchilla para obtener cilindros de 6 mm, el cual es el tamaño comercial.

De acuerdo con la información revisada, el sistema más eficiente para el pelletizado es el de anillo cilíndrico. El sistema de pelletizado debe tener una capacidad de 1 tonelada por hora (considerando masa de salida de la operación de enfriado). De acuerdo con Thrän y otros (2013), el sistema debe ser capaz de generar una densificación de 1,18 a 1,2 g/cm³.

h) Operación enfriado y empackado

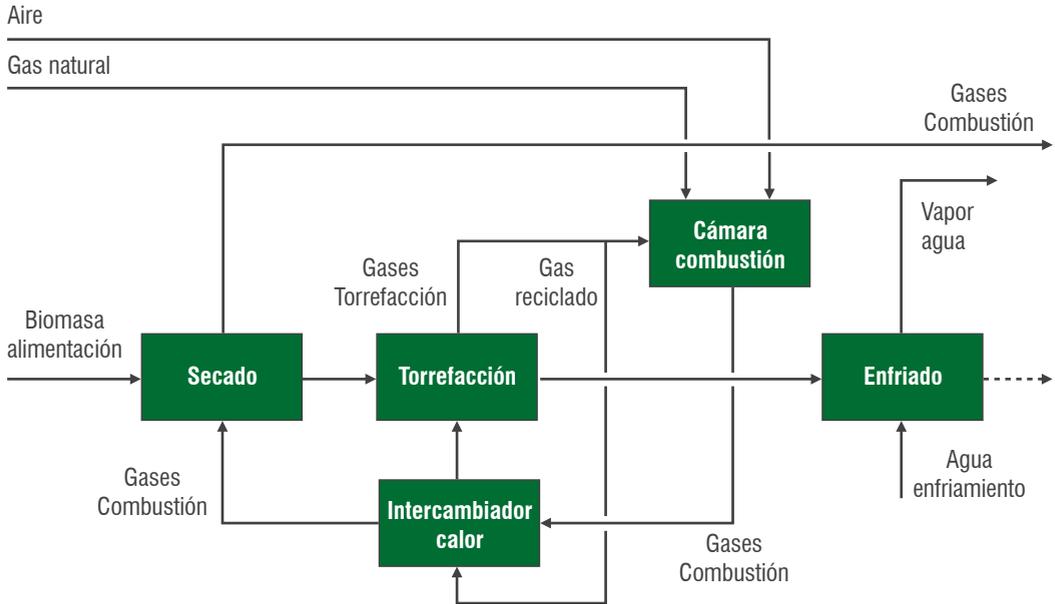
Los pellets de biomasa leñosa torrefactada se enfriarán en una cámara de extractores de aire hasta estar cercanos a la temperatura ambiente para, finalmente, ser empackados en bolsas de polipropileno de 25 kg para el consumo doméstico y en bolsas de 1000 kg para el consumo industrial.

2. Análisis del flujo de proceso: operaciones de torrefacción, secado y enfriado

.....
A continuación se explicará el flujo de proceso relacionado con las operaciones de torrefacción, secado y enfriado en la planta productora de pellets de biomasa leñosa torrefactada (véase el Gráfico 14).

Gráfico 14

Flujo de proceso en las operaciones de secado, torrefacción y enfriado



Fuente: Bergman (2005b: 28)

De acuerdo con la teoría revisada, el gas natural quemado en la cámara de combustión empleando aire como comburente genera gases de combustión. Los gases de combustión pasan por un intercambiador de calor donde calientan los gases de torrefacción reciclados a una temperatura de 275 °C. Los gases de torrefacción reciclados ingresarán al reactor de torrefacción para torrefactar la biomasa por contacto directo y generar la ausencia de oxígeno en esta fase del sistema.

El gas de torrefacción saldrá del reactor, donde una porción se reciclará mientras la otra es dirigida a la cámara de combustión para degradar todos los compuestos orgánicos en vapor de agua y dióxido de carbono sumándolos a los gases de combustión (véase el Gráfico 14).

Los gases de combustión al salir del intercambiador de calor, se dirigen al secador

y luego del secado salen con una temperatura aproximada de 110 °C.

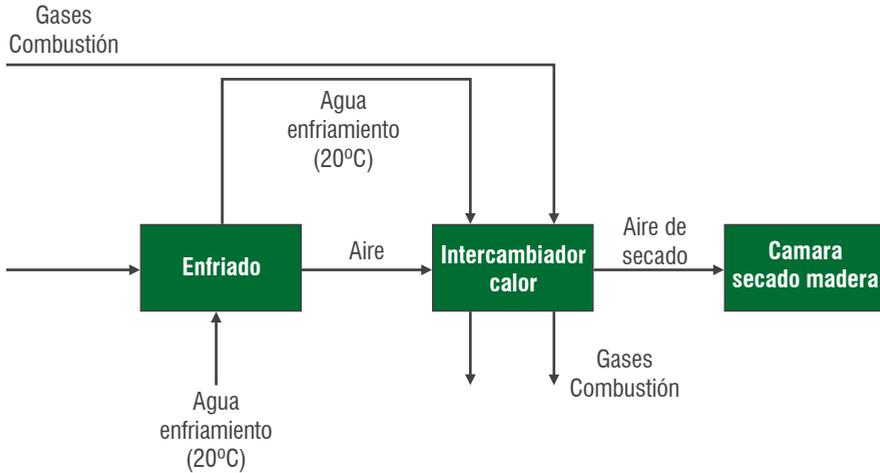
La biomasa torrefactada sale del reactor para dirigirse a la operación de enfriado donde reduce su temperatura de 270 °C a 130 °C con agua de enfriamiento, la cual sale de la operación como vapor de agua (véase el Gráfico 14).

3. Aprovechamiento del calor residual

Los flujos másico de agua y gases de combustión derivados de las operaciones de secado y enfriado, respectivamente, pueden emplearse en un intercambiador de calor como fuente energética para cámaras de secado de madera (véase el Gráfico 15).

Gráfico 15

Flujo de energía en las operaciones de secado, torrefacción y enfriado



Elaboración propia

En la operación de enfriado, el flujo másico (\dot{m}) de biomasa torrefactada (761,6 kg/h) deberá reducir su temperatura de 275 °C a 130 °C.

Por lo tanto, para determinar la cantidad de calor removido se consideró el calor específico de la biomasa torrefactada = 1,6 kJ/kg* K, $\Delta T = 145$ K y $\dot{m} = 761,6$ kg/h.

El calor removido por el agua en la operación de enfriado será aproximado a 176 691,2 KJ/h. El agua de enfriamiento ingresa a una temperatura de 20 °C y sale a una temperatura de 90 °C con flujo másico aproximado de másico de 602,5 kg/h.

El flujo de gases de combustión, con una temperatura aproximada de 110 °C, resultante de la operación de secado, se sumará al agua de la operación de enfriado e ingresarán a un intercambiador de calor con la finalidad de calentar el aire de la cámara de secado de madera.

4. Distribución de pellet de biomasa leñosa torrefactada en la provincia de Melgar, región Puno

El dendrocombustible producido, pellets de biomasa leñosa torrefactada, beneficiará a las 936 familias (4682 pobladores) priorizadas en la zona de intervención nivel uno en la provincia de Melgar, región Puno, por el Plan de Intervención para Enfrentar los Efectos de la Temporada de Heladas y Frijaje (Presidencia de Consejo de Ministros, 2012).

El Gobierno, mediante la campaña nacional «Medio millón de cocinas mejoradas. Por un Perú sin humo», iniciada en el 2009, benefició a 100 000 familias. Entre las zonas beneficiadas se encontró la provincia de Melgar, región Puno, por lo cual se asume que las 936 familias que intervendrán cuentan con cocinas mejoradas instaladas en sus viviendas.

Muñoz (2008) estima que una familia necesita 0,0081 m³ de leña al día para la cocción de alimentos en una cocina mejorada. Ese

volumen de leña equivale a una masa de 6 kg por día. La energía suministrada por 6 kg de leña es equivalente a la energía suministrada por 4,3 kg de pellets de biomasa leñosa torrefactada.

Se proporcionará a las 936 familias de la provincia de Melgar, región Puno, el 50 % de energía requerida diaria para la cocción de alimentos, es decir, 2,2 kg de pellets de biomasa leñosa por familia. El abastecimiento se realizará durante junio y julio, meses en los que se presentan las olas de heladas más intensas.

La masa total de dendrocombustible (123,5 toneladas) se transportará hasta los Centros

de Apoyo del Hábitat Rural en la provincia de Melgar, región Puno, los que ejecutarán su distribución a las 936 familias priorizadas en la zona de intervención nivel uno.

Cabe mencionar que los Centros de Apoyo del Hábitat Rural, también conocidos como tambos, son una estrategia implementada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Estos servirán como almacén y centro de distribución de frazadas, prendas de abrigo, medicinas, forraje, agua segura, y como centros de capacitación para poblaciones vulnerables en programas de buenas prácticas de prevención en salud.

SOLUCIONES PROPUESTAS

Las soluciones propuestas tienen repercusión en torno al ámbito ambiental, tecnológico y social.

En lo concerniente al aspecto ambiental, se reducirán los residuos forestales. Estos actualmente se arrojan a las orillas del río Ucayali o se acumulan y queman, lo cual genera contaminación y afecta a la salud de la población de Pucallpa, además de producir otros impactos ambientales.

Con respecto al enfoque tecnológico, se creará una relación sinérgica entre la planta productora de pellets de biomasa leñosa torrefactada y las plantas de transformación primaria, donde la primera aprovecha los residuos forestales como biomasa de alimentación, y las segundas incrementan su competitividad integrando la operación de secado a su línea de transformación. De esta forma, las plantas de transformación primaria reducirán sus pérdidas por intemperismo y agentes biológicos (hongos e insectos xilófagos y hongos cromógenos),

y reducirán los costos de transporte de Pucallpa a Lima.

En cuanto al aspecto social, se obtendrá energía rural más limpia en comparación con la leña o la bosta, se diversificarán combustibles de bajo costo para poblaciones en riesgo como la provincia de Melgar, región Puno, donde debido a las precipitaciones sólidas (granizadas y nevadas) durante la temporada de friaje se genera un déficit de material combustible para la cocción de alimentos y calefacción.

SOSTENIBILIDAD

Se ha establecido la sostenibilidad del proyecto basándonos en los pilares del desarrollo sostenible: ambiental, social y económico.

a) Viabilidad ambiental

Se optimizará el aprovechamiento de los recursos forestales logrando transformar los residuos de las plantas de transformación primaria de la madera en una materia prima de uso valorable para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada.

Se aprovechará el calor residual proveniente de las operaciones de secado, torrefacción y enfriado como fuente energética para integrar las cámaras de secado.

Los gases de torrefacción se dividen en dos fracciones: los recirculados y los que pasarán a la cámara de combustión para degradar los compuestos orgánicos en vapor de agua y dióxido de carbono, reduciendo los efectos de contaminación por emisiones.

Se desea lograr lo siguiente:

- La disminución del desperdicio energético, con lo que disminuirá la huella de carbono de la actividad de aprovechamiento de la madera.
- La reducción de emisión de gases de invernadero, así como otros gases nocivos para el ambiente y la salud.
- La reducción de residuos sólidos generados por la actividad forestal. Mediante este proyecto se convertiría un problema en oportunidad, ya que se haría más eficiente la industria forestal al generar energía para sectores rurales e industriales.

b) Viabilidad social

Al reducir las emisiones contaminantes por la acumulación y quema de residuos forestales, se mejorará la calidad del aire y se generará un decrecimiento en la tasa de afecciones respiratorias y otros problemas de salud relacionados con la abaja calidad del aire en la población de Pucallpa.

La población rural tendrá acceso a un dendrocombustible menos contaminante en comparación con la leña o la bosta. El uso de este combustible disminuirá los problemas de salud de la población de Melgar, así como los distintos problemas generados en las épocas de mucho frío.

La población de la provincia de Melgar, región Puno, tendrá acceso a material combustible –pellets de biomasa leñosa torrefacta– durante la temporada de friaje para la cocción de alimentos y calefacción.

Los Centros de Apoyo del Habitat Rural en la provincia de Melgar, región Puno, serán una herramienta gubernamental imprescindible para ejecutar la distribución de la biomasa leñosa torrefactada a las 936 familias priorizadas en la zona de intervención nivel uno.

c) Viabilidad económica

En el Perú, los pellets de biomasa leñosa torrefactada pueden usarse principalmente para satisfacer necesidades energéticas de las zonas rurales donde no hay acceso al gas natural u otros combustibles. A nivel industrial, el gas natural resulta ser un combustible más económico en términos de energía/costo.

Sin embargo, para mantener la sostenibilidad del proyecto, parte de la producción se

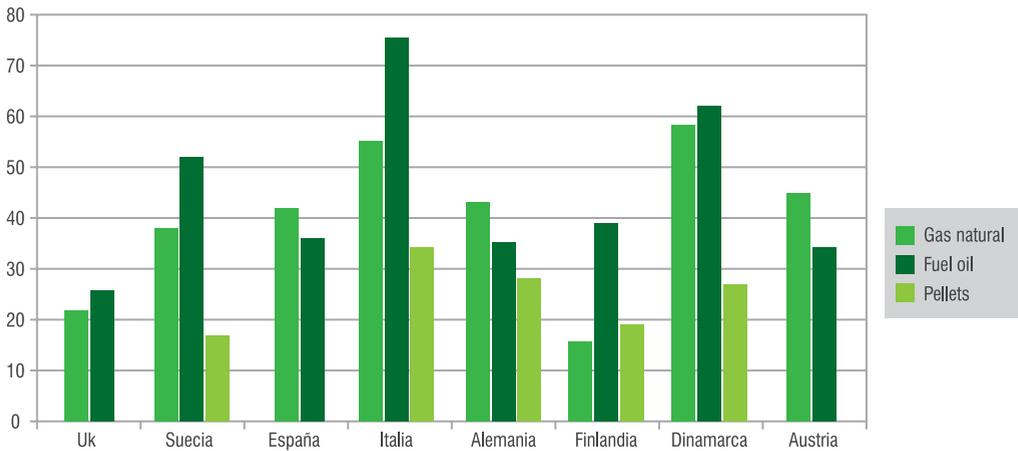
orientará a la exportación de pellets al mercado europeo a fin de poder solventar el componente social.

El consumo de pellets en Europa se está incrementando rápidamente a nivel industrial. En países como Suecia, Dinamarca, Alemania o Italia, el consumo es mayor a su producción; es decir, existe una demanda latente. Al

comparar energías alternativas para un grupo de países europeos, puede observarse que el costo de generación de energía en euros por MW/h es menor para pellets de biomasa leñosa, con la excepción Finlandia. Así, los mercados potenciales son Suecia, Italia y Dinamarca (Maslatón y otros 2006).

Gráfico 16

Costos domésticos de energías competitivas en Europa en euros/MWh



Fuente: Maslatón y otros (2006: 4)

El costo de la materia prima se estima que será nulo, pues forma parte de la relación sinérgica establecida entre la planta productora de pellets de biomasa leñosa torrefactada y las plantas de transformación primaria.

De acuerdo con el balance de masa realizado, la planta ubicada en la ciudad de Pucallpa producirá 761,6 kg/hora de pellets de biomasa leñosa torrefactada. Considerando un funcionamiento corrido durante 7200 horas anuales (300 días) para optimizar la eficiencia energética, la producción anual de pellets de biomasa leñosa torrefactada será igual a 5 483,52 toneladas.

Según Pöyry Management Consulting (2011), los costos de producción de pellets de biomasa

leñosa torrefactada son aproximadamente 50 euro/tonelada, y Bergman (2005a) estima un costo de producción de 45 euro/tonelada. Considerando el dato de Pöyry Management Consulting (2011), se estimarían costos anuales de producción por 1 041 868,8 soles.

El precio “EX Works” para la venta de pellets de biomasa masa leñosa según Bergman (2005a) oscila entre 150 euros/tonelada para las plantas de cogeneración, y 185 euros/tonelada para el mercado doméstico.

A la producción anual total se debe restar la cantidad anual distribuida en la provincia de Melgar, región Puno, que asciende a 123,5 toneladas, obteniendo un neto para

la comercialización de 5360,02 toneladas anuales.

Se asume que se exportara el 70 % de la producción a las plantas de cogeneración a un precio de 150 euros/tonelada, y el 30 % restante se exportara para el uso doméstico a 185 euros/ tonelada, obteniendo ingresos por el monto de 860 283,21 euros. Considerando el tipo de cambio 3,85 soles/euros, se obtiene un ingreso por ventas en soles por 3 312 090,36.

La utilidad bruta anual aproximada ascendería a S/.2 270 221,2.

Según la bibliografía revisada, una inversión aproximada para una planta de torrefacción con la capacidad de entre 0,5 tn/h - 1 tn/h estaría alrededor de 2,5 y 3 millones de euros.

El proyecto tendrá una duración de diez años al igual que la vida útil del activo tecnológico de mayor valor: reactor de torrefacción. El TIR aproximado se encontraría entre 14 % y 19 %.

CONCLUSIONES

- El abastecimiento energético a partir de la biomasa leñosa torrefactada se plantea desde la óptica del desarrollo tecnológico y económico como un avance para lograr el aprovechamiento sostenible de los residuos forestales, lo cual permite desarrollar nuevas fuentes energéticas capaces de reducir la dependencia de los combustibles fósiles.
- La concentración geográfica de las plantas de transformación primaria en las zonas Manantay, La Hoyada y entre el kilómetro uno y doce de la carretera Federico Basadre (Santiago y otros, 2012) otorgaran una ventaja logística para el acopio de los residuos forestales en un radio aproximado de 7 kilómetros, considerando como centro el cruce de la avenida Playwood y la carretera Federico Basadre en la ciudad de Pucallpa.
- El presente proyecto sería un esfuerzo por establecer una concertación de distintos sectores a fin de generar eficiencia.
- La relación sinérgica entre la planta productora de pellets de biomasa leñosa torrefactada y las plantas de transformación primaria permitirá aprovechar los residuos forestales a costo cero como biomasa de alimentación y beneficiar a los aserraderos con secadores de madera integrado en nuestra planta mediante el aprovechamiento del calor residual.
- Se proporcionara a las 936 familias de la provincia de Melgar, región Puno, el 50 % de energía requerida diaria para la cocción de alimentos, es decir, 2,2 kg de pellets de biomasa leñosa por familia. El abastecimiento se realizará durante junio y julio, meses en los que se presentan las olas de heladas más intensas.
- En el Perú, los pellets de biomasa leñosa torrefactada pueden usarse principalmente para satisfacer necesidades energéticas de las zonas rurales donde no hay acceso al gas natural.
- La sostenibilidad económica del proyecto se orienta a la exportación de los pellets de biomasa leñosa torrefactada al mercado europeo, donde se emplean como dendrocombustible junto al carbón en las plantas térmicas de electricidad por cogeneración y para la calefacción doméstica mediante el uso de estufas de doble combustión.
- Los Centros de Apoyo del Hábitat Rural en la provincia de Melgar, región Puno, serán una herramienta gubernamental imprescindible para ejecutar la distribución de la biomasa leñosa torrefactada a las 936 familias priorizadas en la zona de intervención nivel uno.

CONSIDERACIONES FINALES

- La instalación de una planta productora de pellets de biomasa leñosa torrefactada se puede plantear como una solución de desarrollo tecnológico y económico en cualquier otra región del Perú donde no exista un aprovechamiento sostenible de los residuos forestales.
- El desarrollo del proyecto solo consideró el aserrín como biomasa de alimentación; sin embargo, se puede evaluar el uso de virutas, corteza y restos de madera de menor tamaño. La inclusión de estos otros residuos se vio imposibilitada por no encontrarse cuantificados por un autor. Cabe añadir que al incluir tamaños de residuos mayores a 12 mm se deben considerar otras operaciones unitarias relacionadas con la reducción de tamaño antes del secado y después de la torrefacción.
- Los costos analizados en el presente proyecto corresponden a plantas piloto ubicadas en Europa y que poseen una capacidad de producción similar a la planteada. Sin embargo, localmente, los costos de mano de obra y transporte podrían ser más bajos, lo cual incrementaría la rentabilidad del proyecto.
- La operación de torrefacción puede considerarse un tratamiento previo para el estudio experimental de nuevas tecnologías como la gasificación.
- Si bien esta propuesta no plantea solucionar los problemas energéticos y de salud en la zona de Melgar durante todo el año, sería una tarea adicional encontrar soluciones eficientes y creativas a fin de incrementar la calidad de vida en la zona permanentemente.

REFERENCIAS

- Alakangas, E. y P. Paju. (2002). *Wood Pellets in Finland - Technology, Economy and Market OPET*. Report 5. Jyväskylä, VTT Processes.
- Belderok, H. J. M. (2007). *Experimental investigation and modeling of the pyrolysis of biomass*. Master Thesis. Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering.
- Bergman, P.C.A. (2005^a). *Combined Torrefaction and Pelletisation*, ECN report, ECNC- C —05-073, Petten.
- Bergman, P.C.A. (2005^b). *Development of torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations*, ECN report, ECN-C—05-013, Petten.
- Bergman, P.C.A. (2005^c). *Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass*, ECN report, ECN-C—05-067, Petten.
- Calvo, E. (2007). *Impactos ambientales de la quema de biomasa* [diapositivas]. Lima: IPCC / UNMSM.
- Claessens H. A. y L. G. D. Lammerts van Bueren. (1987). *An off-line two-dimensional analytical procedure for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in smoke aerosol*. J. High Res. Chromatog. 10, pp. 342-347.
- Dávila, M. (2007). *Situación actual ambiental y social de la industria maderera en Ucayali* [diapositivas]. Pucallpa: Congreso Internacional sobre Residuos de Madera/Biomasa.
- Di Blasi, C. y M. Lanzeta. (1997). Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Vol. 40– 41, pp.287–303.
- FAO. (2004). *Terminología unificada sobre bioenergía*. Departamento Forestal de la FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/009/j6439s/j6439s00.htm>
- Fernández, J. (2006). Materias primas para la producción de biocombustibles sólidos. V Jornadas abulenses de Energías renovables. Agencia Provincial de la Energía de Ávila (APEA).
- Karhunen, A., Laihanen, M., Ranta T. (2011). *TOP-pelletti mMrkkinaselvitys*. Lappeenranta University of Technology - Institute of Energy Technology. Lappeenranta, Finland.
- Koukios, E. G. (1993). *Progress in thermochemical, solid state refining of biofuels-from research to commercialization. Advances in Thermochemical Biomass Conversion*. Edited by A.V. Bridgwater, Blackie Academic & Professional, London, Vol. 2, pp. 1678-1693.

- Lehtikangas, P. (1999). *Quality properties of fuel pellets from forest biomass*, Licentiate thesis, Department of Forest Management and Products, Report nr 4, Uppsala University. Uppsala.
- Maslatón, C.; Ladron, G.; Mino, A. (2006). *Pellets de madera para usos energéticos. INTI madera y muebles*. Centro de investigación y desarrollo de la industria de la madera y afines. Buenos Aires. Disponible en: www.inti.gob.ar/maderaymuebles/pdf/pellets_madera.pdf
- Malström, K.; Savolainen, J.; Terho E. O. (1999). «Allergic Alveolitis from Pine Sawdust». *Allergy*, número 54, pp. 526-533.
- MINAG - DGFFS. (2012). *Perú forestal en números año 2012*. Lima: Ministerio de Agricultura.
- MINAM - INEI - PNUMA. (2009). *Perú 2008. Indicadores. Iniciativa latinoamericana y caribeña para el desarrollo sostenible: Indicadores de seguimiento*. Lima: MINAM.
- Muñoz, M. (2008). *Promoviendo cambios sostenibles para la equidad de género y el desarrollo social a través de las cocinas mejoradas. Sistematización de experiencias*. Documento de Trabajo número 5. Edición Nro 1. Heifer International Perú.
- Nurminen, F. (2012). *Environmental impacts of torrefied wood pellet production*. Miktech, Centre of expertise programme. Disponible en: www.miktech.fi/media/getfile.php?file=271
- Pöyry Management Consulting. (2011). *Ristiinaan perustettavan biologistiikkakeskuk-sen liiketoimintasuunnitelma - Liiketoimintasuunnitelman taustamateriaali*. Finland.
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2012). *Plan Nacional de Intervención para Enfrentar los Efectos de la Temporada de Heladas y Frijaje 2012*. Lima: PCM.
- Prins, M. J. (2005). *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction*. Eindhoven, The Netherlands, Ph. D. thesis.
- Ramdahl, T. y G. Becher. (1982). Characterization of Polynuclear Aromatic Hydrocarbon Derivatives in Emissions from Wood and Cereal Straw Combustion. *Analytica Chimica Acta* 144, pp. 83-91.
- Riesco, A., Quevedo, M., Sanchez, J. (2003). *Análisis económico de alternativas para optimizar la cadena de valor forestal en la región Ucayali*. Pucallpa: CONDESU.
- Santiago, P.; Guevara, S.; Espinoza, L. (2012). *Diagnóstico de la industria de primera y segunda transformación y de la cadena productiva en Pucallpa*. Lima: ITTO-Ministerio de Agricultura-AIDER.
- Schorr, C.; Muinonen, M.; Nurminen, F. (2012). *Torrefaction of Biomass*. Miktech, Mikkeli. Disponible en: <http://www.miktech.fi/getfile.php?file=161>

- Starbuck, C. (1997). «Producción y uso de composta de aserrín de avena y estiércol». III Simposium Internacional y IV Reunión Nacional de Agricultura Sostenible. Universidad de Guadalajara, 16-19 de noviembre.
- Teräs, T. (2012). «Solutions for Wood-Based Bioenergy Price Discovery». World Bioenergy 2012 Conference. Jöngköping, Suecia. 29-31 de mayo.
- Thrän, D.; Schaubach, K.; Kiel, J.; Carbo, M.; Wojcik, M. (2013). «First Results of the SECTOR - Project: Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of Torrefaction». 21st European Biomass Conference and Exhibition. SECTOR - Project. Copenhagen.
- Wolfgang, J. (2012). «Torrefaction of Biomass». World Bioenergy 2012 Conference. Jöngköping, Suecia. 29-31 de mayo.
- Yomona, J. (2008). «Respiramos partículas 500 % más de lo permitido». *Ahora*. Pucallpa, 7 de marzo.