
Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica

Luis Ernesto Arteaga-Pérez^a, Cristina Segura^a, Karel Diéguez Santana^b

^aUnidad de Desarrollo Tecnológico. Universidad de Concepción. Av. Cordillera 2634. Parque Industrial Coronel. Coronel. Concepción. Chile. ^bDepartamento de Ciencias de la Vida. Universidad Estatal Amazónica. Ecuador

Valorization of lignocellulosic residues through torrefaction. A review on technologies and future application in South America

Processos de torrefacció per a valorització de residus lignocel·lulòsics. Anàlisi de possibles tecnologies d'aplicació a Sud-amèrica

Recibido: 1 de enero de 2015; revisado: 22 de mayo de 2015; aceptado: 12 de junio de 2015

RESUMEN

La seguridad energética, el excesivo consumo de combustibles de origen fósil, el incremento continuo de las emisiones de contaminantes y el cambio climático, son los principales impulsores para la búsqueda de nuevas fuentes de energía. En este marco, la biomasa de origen lignocelulósico surge como una alternativa con alto potencial debido a su carácter renovable, abundancia y a que provee un ciclo cerrado para las emisiones de CO₂. Sin embargo, la propia naturaleza de la biomasa le imprime características particulares tales como: distribución geográfica discreta, elevado contenido de humedad, biodegradabilidad, baja friabilidad y pobre densidad energética [1-3], las cuales van en detrimento de su competitividad frente a los combustibles convencionales. Una opción viable para eliminar estas dificultades es la torrefacción. La torrefacción es un pre-tratamiento termoquímico conocido como pirólisis tenue (200°C < T < 300°C) y se desarrolla en atmósfera inerte o con vapor. El presente artículo revisa detalladamente el status actual de esta tecnología, sus potenciales aplicaciones, las experiencias comerciales y los desafíos para lograr su comercialización. Además, se agrega una sección sobre las perspectivas de utilizar la torrefacción para valorizar energéticamente los residuos lignocelulósicos en Suramérica, tomando a Chile y Ecuador como casos de estudio.

Palabras clave: Biomasa, Torrefacción, Reactores, Tecnologías, Aplicación

SUMMARY

Energy security, excessive consumption of fossil fuels, the continuous increase in pollutant emissions and climate change, are the main drivers for the development of new sources of energy. In this framework, lignocellulosic biomass is an alternative high potential due to its renewable nature, abundance as it provides a closed CO₂ cycle. However, the nature of biomass will print negative char-

acteristics such as variability, discrete distribution, high moisture content, biodegradability, low friability and poor energy density [1-3]. These intrinsic characteristics are detrimental to their competitiveness against conventional fuels. A viable option to overcome these difficulties is torrefaction. Torrefaction is a thermochemical treatment known as mild pyrolysis (200 ° C < T < 300 ° C) and takes place in an inert atmosphere or in steam. This article reviews in detail the up-to-date status of this technology, its potential applications, trade experiences and challenges to achieve their marketing. In addition, a section on the prospects of valorizing lignocellulosic wastes from forest using torrefaction is also included. Specific studied cases are focused on Chile and Ecuador.

Key Words: Torrefaction, biomass, reactors, technologies

RESUM

La seguretat energètica, l'excésiu consum de combustibles d'origen fòssil, l'increment continu de les emissions de contaminants i el canvi climàtic, són els principals impulsors per a la recerca de noves fonts d'energia. En aquest marc, la biomassa d'origen lignocel·lulòsic sorgeix com una alternativa amb alt potencial a causa del seu caràcter renovable, la seva abundància i a que proveeix un cicle tancat per a les emissions de CO₂. No obstant això, la mateixa naturalesa de la biomassa li imprimeix característiques particulars com són la distribució geogràfica discreta, l'elevat contingut d'humitat, la biodegradabilitat, la baixa friabilitat i la pobre densitat energètica [1-3], les quals van en detriment de la seva competitivitat davant dels combustibles convencionals. Una opció viable per eliminar aquestes dificultats és la torrefacció. La torrefacció és un pre-tractament termoquímico conegut com piròlisi tenue (200°C < T < 300°C) i es desenvolupa en atmosfera inerte o amb vapor. Aquest

*Autor para correspondencia: l.arteaga@udt.cl Telf: + (5641) 266 1855 Fax: + (5641) 275 1233

article revisa detalladament l'estatus actual d'aquesta tecnologia, els seus potencials aplicacions, les experiències comercials i els reptes per aconseguir la seva comercialització. A més, s'agrega una secció sobre les perspectives d'utilitzar la torrefacció per valoritzar energèticament els residus lignocel·lulòsics a Sud-amèrica, prenent Xile i Equador com a casos d'estudi.

Paraules clau: Biomassa; torrefacció; reactors; tecnologies; aplicació.

INTRODUCCIÓN

La utilización de reservas energéticas fósiles, el cambio climático, los conflictos bélicos y la corta vida proyectada para las reservas probadas y probables de combustibles han incrementado dramáticamente la inestabilidad mundial. En los últimos 40 años el consumo de energía global se ha incrementado a razón de 110 Mtep/año y en igual periodo de tiempo las emisiones de CO₂ asociadas a la energía se duplicaron, hasta alcanzar en 2012 la alarmante cifra de 31734 Mt CO₂ [4]. De estas emisiones, las que mayor variación sufrieron fueron las asociadas a la combustión de carbón (+8.9%) y el gas natural (+5.9%); mientras que la distribución en el consumo de fuentes primarias se mantuvo prácticamente invariable para el caso de residuos y biocombustibles (-0.7%). Este panorama es contradictorio, sobre todo después que, en 1992 se comenzara a hablar del desarrollo sostenible, el cambio climático y la necesidad de cambiar el status quo del mercado energético. A pesar de los programas internacionales (www.iea.org y www.un.org), estrategias regionales (<http://www.aida-america.org/>) y nacionales no se ha podido cambiar el creciente ritmo de consumo, ni el gráfico de distribución.

En este entorno de inestabilidad, la biomasa lignocelulósica (madera, residuos agrícolas, cultivos energéticos), figura entre los candidatos más prometedores para cambiar el escenario vigente hacia un futuro sostenible. Nag [5] destacó que el cambio desde el petróleo hacia la biomasa es la clave para el desarrollo de una sociedad sostenible, la independencia energética y la gerencia de las emisiones con efecto invernadero. Sin embargo, la masificación del uso eficiente de la biomasa como fuente de energía tiene como barreras su distribución geográfica discreta, elevado contenido de humedad, variabilidad de propiedades según la especie, carácter hidrofílico, y el relativo bajo contenido de energía por unidad de volumen. Para eliminar estas dificultades, se necesitan procesos de pre-tratamiento que pueden clasificarse en:

Biológicos: Utilizan microorganismos principalmente bacterias aerobias (cellulomonas y Streptomyces) y hongos basidiomicetos (Pycnoporus sanguineus, Trichoderma reesei) o enzimas celulolíticas, para producir azúcares fermentables.

Físico – Químicos: Explosión con vapor y dióxido de carbono, hidrólisis ácida, ozonólisis, hidrólisis alcalina, líquidos iónicos y organosolv.

Termoquímicos: Torrefacción, pirólisis, carbonización y carbonización hidrotermal, pretratamiento por microondas. Estos procesos se basan en utilizar la temperatura como variable para ajustar la composición y estructura de la biomasa o para descomponer la misma en fracciones más ligeras: líquidos, gases y sólidos.

Los tratamientos biológicos están dirigidos a facilitar la digestión de la biomasa a través de la eliminación o conversión de azúcares de 5 y 6 átomos de carbono presentes en la estructura celular, por lo que sus aplicaciones más importantes se encuentran en la producción de etanol y biogás. Los tratamientos físicos y químicos se aplican generalmente, para disolver la hemicelulosa y alterar la estructura de la lignina, permitiendo mayor accesibilidad de las enzimas y microorganismos [6]. Estos tratamientos pueden preceder tanto a la producción de bio-productos por fermentación y/o digestión, como a la termoconversión de la biomasa (eliminación del contenido de cenizas). Los tratamientos termoquímicos son comúnmente utilizados para mejorar las características combustibles de la biomasa. El presente trabajo se enfoca en un caso específico de tratamiento térmico, la torrefacción, la cual ha pasado vertiginosamente de la etapa de I&D a la introducción en el mercado en la última década [2,7,8].

El presente artículo ofrece una revisión crítica sobre los aspectos técnicos, las perspectivas de aplicación y el mercado potencial de las tecnologías de torrefacción existentes. Además, se incluye un análisis relacionado con el potencial de la tecnología para valorizar residuos lignocelulósicos provenientes de cultivos forestales y la actividad agrícola, en Chile y Ecuador.

TORREFACCIÓN DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS. GENERALIDADES

La biomasa lignocelulósica contiene aproximadamente 80% de material volátil y 20% de carbono fijo, es biodegradable, higroscópica, de baja densidad (200 – 250 kg/m³) y difícil de triturar. La modificación de estas características es la clave para incrementar su capacidad de sustituir los combustibles fósiles en sus actuales aplicaciones (ej. Generación eléctrica). Una ruta para obtener este resultado es torrefactar la biomasa. La torrefacción es un pretratamiento termoquímico mediante el cual la estructura original de la biomasa se destruye parcialmente por la ruptura de las moléculas de hemicelulosa, celulosa y en menor grado la lignina [2,9,10]. El material sólido que resulta de este pre-tratamiento es generalmente hidrofóbico, bio-resistente y fácil de moler [11], mientras que la fracción volátil contiene ácidos carboxílicos, agua y gases permanentes (CO, CO₂). Con, la remoción de esta fracción orgánica, se elimina gran parte del oxígeno de la biomasa, por lo que el poder calorífico del sólido se incrementa (19 – 23MJ/kg) a expensas de una reducción en el peso (densificación energética) [8,12]. A continuación se describen los aspectos generales del proceso utilizando los reportes más recientes de la literatura.

Principios físicos y químicos de la torrefacción

La torrefacción es una pirólisis tenue mediante la cual la biomasa se pone en contacto con un medio de calentamiento que eleva su temperatura gradualmente (<50°C/min) hasta 200 – 300°C. Este proceso es energéticamente controlado por diferentes etapas y regímenes térmicos, los cuales se describen a continuación. El calentamiento inicial de la biomasa (20 - 120°C) remueve la humedad ligada físicamente y, posteriormente las moléculas de agua químicamente enlazadas, a través de un proceso de termo-condensación (>160°C). En el rango de 120 - 150°C se inicia la ruptura de los enlaces –H– y –C– y la producción de polímeros de cadena corta que condensan en el interior

de los poros. Sobre los 150 – 270°C comienzan a generarse: CO₂, ácidos carboxílicos, fenol, furfural, metanol entre otros compuestos orgánicos, principalmente por la depolimerización de la hemicelulosa, la liberación de grupos carbonilos y carboxilos de la celulosa y los anillos aromáticos en la lignina [2,13–15]. A medida que transcurre el proceso, la biomasa va cambiando de color y sus propiedades se asemejan al carbón (Figura 1). El consumo de calor y la pérdida de masa más intensos ocurren en las primeras etapas del proceso (secado físico + post-secado). En la Figura 1, se muestra cómo, teóricamente, varía la masa, la temperatura y el consumo de energía durante un proceso de torrefacción convencional [3].

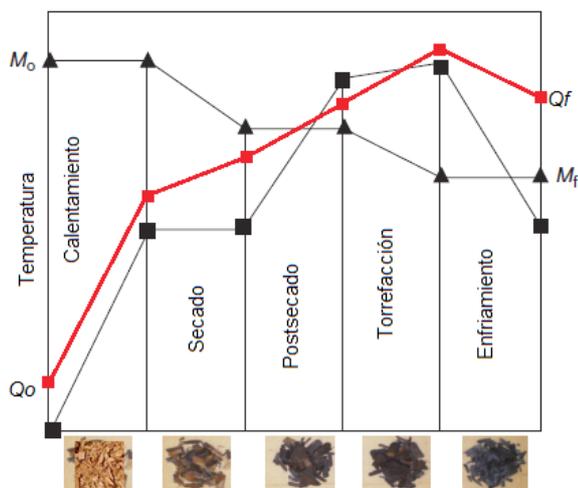


Figura 1. Evolución térmica de la torrefacción.

A continuación se describen algunas de estas etapas: **Calentamiento o Pre-secado:** Primer paso en el proceso y ocurre cuando la biomasa se calienta desde temperatura ambiente hasta aproximadamente 100 °C.

Secado: Esta es la etapa más intensiva desde el punto de vista energético, especialmente para biomásas con alto contenido de agua (>40%). El secado ocurre a temperatura constante hasta que la humedad superficial se remueve completamente, posteriormente la humedad intra-partícula comienza a eliminarse hasta alcanzar un valor crítico.

Post-secado: Al finalizar el secado, la biomasa se calienta hasta la temperatura de torrefacción (200 – 300°C). Durante esta etapa, toda la humedad físicamente enlazada y algunos compuestos orgánicos ligeros se separan de la biomasa [16]. La necesidad de calor es relativamente pequeña, pues solamente se necesita proveer calor sensible al sólido.

Torrefacción: Esta es la etapa fundamental en el proceso y en la cual ocurre la depolimerización de la biomasa. El grado de depolimerización es función de la temperatura de torrefacción y el tiempo de residencia, por lo que la combinación de ambos parámetros define los rendimientos alcanzados. El requerimiento energético de la torrefacción es bajo y aunque aún no existe un consenso definido de si el proceso es exotérmico o endotérmico [17,18], sí es un hecho, que el consumo de calor es notablemente inferior a las etapas de secado [19].

Enfriamiento: La biomasa abandona el reactor a la temperatura de torrefacción, que por lo general supera su temperatura de ignición, y a menos que se enfríe el sólido, podría combustionar espontáneamente al ponerse en contacto con el aire. El enfriamiento puede hacerse

con aire (contacto indirecto) o con agua y en todo caso la energía extraída debe recuperarse en el proceso para incrementar la eficiencia.

Mecanismo y cinética de las reacciones

El mecanismo de la torrefacción y los productos derivados de la misma es función de la composición de la biomasa y los regímenes de temperatura a los que esta se expone. La Tabla 1 destaca el amplísimo rango en que varía el contenido de polímeros según el tipo de biomasa.

Tabla 1. Composición de diferentes materiales lignocelulósicos.

Material	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Madera dura	40 – 55	24 – 40	18 – 25
Madera suave	45 – 50	25 – 35	25 – 35
Cáscara de nuez	25 – 30	25 – 30	30 – 40
Papel	85 – 99	0	0 – 15
Desechos sólidos de ganado	1.6 – 4.7	1.4 – 3.3	2.7 – 5.7
Paja de trigo	25.7	32	4.7
Paja de arroz	27	34	14.2

Chen et al. [20] postularon que los componentes básicos de la biomasa, principalmente la hemicelulosa, celulosa y lignina reaccionan de forma independiente y no muestran efectos sinérgicos, lo cual se evidencia por la permanencia de los picos característicos durante un estudio de TGA (Figura 2).

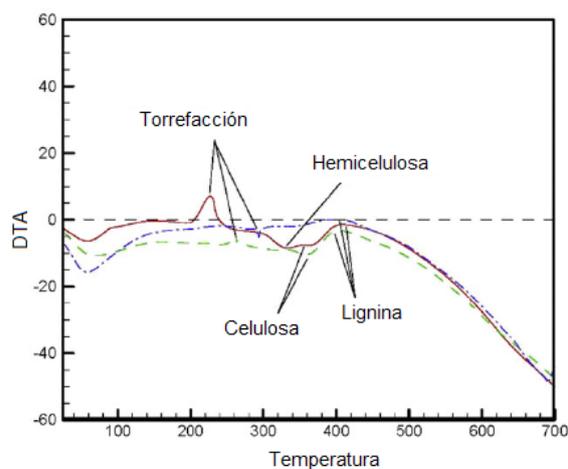
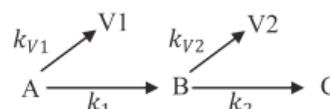


Figura 2. Picos de descomposición térmica de las fracciones de biomasa.

Estas reacciones han sido investigadas desde el punto de vista cinético por varios autores. En tal sentido Prins [9] representó la torrefacción de sauce a través de un mecanismo competitivo, similar al que anteriormente habían utilizado Di Blasi y Lanzetta [21] para describir la descomposición de la hemicelulosa:



El autor postula que el primer paso del mecanismo (devolatilización), es mucho más lento que el segundo, y por ende, controla el proceso. Resultados similares fueron encontrados por van der Stelt et al. [22] quien además,

propone estudiar el proceso a través del comportamiento de la pirólisis individual de la celulosa, hemicelulosa y lignina, suponiendo que no existen efectos sinérgicos entre estos componentes. Recientemente, *Bates et al.* [16,23] estudiaron la cinética de evolución de volátiles y la variación de la composición del sólido torrefactado, utilizando sauce como materia prima y un modelo competitivo combinado con balances elementales. Este modelo integra los principios descritos en los trabajos de Di Blasi y Lanzetta [21] y de Prins [9] y permite determinar la composición de los volátiles como una función dinámica, resultando en una herramienta fundamental para evaluar el balance energético y de masa en los procesos de torrefacción.

PROCESOS DE TORREFACCIÓN.

Los procesos de torrefacción varían según el tipo de reactor utilizado y el grado de integración energética. La mayoría de estos han sido desarrollados sobre la base de tecnologías existentes (secado) y los retos fundamentales en relación a las tecnologías están básicamente en:

- Procesar materiales de diferentes propiedades y granulometrías
- Integrar energéticamente el proceso
- Recuperar y tratar los efluentes gaseosos y líquidos generados durante la descomposición de la biomasa

Reactores y esquemas de proceso

Los reactores para torrefacción se clasifican, según el método de contacto entre el sólido y el medio de calentamiento, en reactores de contacto directo o indirecto. La fase fluida, el mecanismo de transferencia de calor y el movimiento

de la biomasa, son las características que distinguen los diferentes equipos. Nhuchen et al. [2], Koppejan et al. [8], Tumuluru et al. [12] and Kiel. [24] reportaron revisiones detalladas en cuanto a los diferentes modelos y diseños de reactores para torrefacción y las compañías que los han desarrollado (Tabla 2). En el presente artículo se amplían los datos referidos anteriormente, incluyendo una revisión de las patentes relacionadas con la tecnología de torrefacción.

Tabla 2. Modelos de reactores para torrefacción.

Reactor	Ventajas	Limitaciones
Tambor rotatorio	Simple Baja caída de presión Operación en contacto directo o indirecto	Mala transferencia de calor Difícil control de temperatura Mayor tamaño/capacidad Difícil escalado
Lecho móvil	Simple operación y construcción Alta densidad de lecho Elevada transferencia de calor	Alta caída de presión Difícil control de temperatura
Tornillo	Posibilidad de flujo en pistón Tecnología madura	Calentamiento indirecto Baja capacidad de transferencia de calor Difícil escalado
Hogares Múltiples	Diseño probado Fácil escalado Facilidad para el control del tiempo de residencia y la temperatura	Reactores de gran tamaño Difícil escalado
Lecho fluidizado	Eficiencia para transferencia de calor Escalable	Requiere partículas de pequeño diámetro Requerimiento adicional de gas para fluidización

La Tabla 3 resume de forma cronológica las patentes que, a juicio de los autores, han tenido mayor relevancia e impacto sobre el desarrollo de la torrefacción.

Tabla 3. Resumen de patentes para procesos de torrefacción.

Autores/Año	Descripción Breve	Compañía/ID
Christopher Hopkins, Rucker Preston/2009	Proceso autotérmico de torrefacción por contacto indirecto en un sistema anular. Los volátiles se queman externamente. Los problemas principales están en la homogeneidad del producto y la operación con astillas.	North Carolina State University/ US9304590 B2
Vitaly Lvovich /2011	Sistema de torrefacción por microondas para obtener sólido torrefactado y L-glucosan. Proceso caro y de baja integración térmica.	University of York/ US0219679 A1
William B. Teal, Richard J. Gobel/2012	Proceso que incluye secador y reactor rotatorios. Utiliza un sistema de contacto directo gas-partículas y no concibe integración energética.	Teal Sales Inc./ US 8252966 B2
Gershon Ben-Tovim/2012	La invención incluye un reactor tipo tambor rotatorio con calentamiento externo. Se utiliza un gas inerte para crear atmósfera libre de oxígeno en el interior del reactor.	US0261246
Andrew Eyer/2013	Reactor multi-etapas donde la biomasa lignocelulósica fluye entre estados (bandejas) desde el tope al fondo. El medio de torrefacción es un gas inerte a 3 bar, 200 °C y tiempo entre 15 - 60 minutos.	Andritz Inc/ US0098751A1
Ingemar Olofsson/2014	Sistema de torrefacción para biomasa previamente seca. Los gases fluyen a contracorriente con la biomasa y se inyecta oxígeno para quemar la fracción combustible de los volátiles. La invención considera la gasificación del material torrefactado para producir gas de síntesis.	BIOENDEV AV/ US0208995A1
Rautalinen, Erkki /2014	Proceso para producir biomasa torrefactada compacta. El proceso implica pretratamiento y el uso de combustibles externos. No tiene integración energética ni recuperación térmica de los volátiles.	Diacarbon Technologies Inc/ WO165995A1
Duane Morris/2010	Reporta métodos y sistemas para la torrefacción de biomasa lignocelulósica utilizando vapor sobrecalentado a 482°C. Destaca la posibilidad de desarrollar integración energética y no reporta dificultades con la producción de alquitranes.	Terra green energy/ US0242351A1
Clinton Amper/2013	Proceso de torrefacción en lecho fluidizado integrado a la peletización. Esta última se desarrolla a 90<T<177°C y se logra una densificación de hasta tres veces la biomasa torrefactada.	River Basin Energy, Inc/ EP 2589648A1

Esquemas de proceso

Se han reportado varios esquemas para la torrefacción de biomasa, la mayoría de estos varían en función del grado de integración energética y del tipo de materia prima que procesan. En la Figura 3 se representa un diagrama general basado en los reportes de Bergmann [13]:

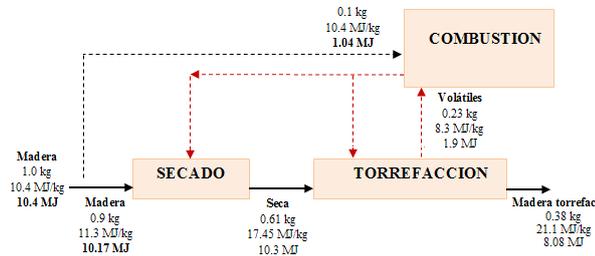


Figura 3. Balance de energía en un proceso de torrefacción.

Los parámetros operacionales que controlan el proceso son: **Temperatura:** La temperatura es el principal parámetro de diseño en la torrefacción pues define la degradación térmica alcanzada. En la medida que se incrementa la temperatura, el rendimiento en masa y energético decrecen (Figura 4), y se obtienen mayores densidades energéticas en el producto sólido.

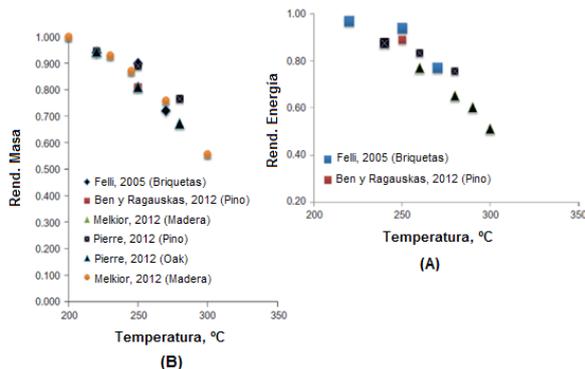


Figura 4. Efecto de la temperatura en los rendimientos máxicos y energéticos de la torrefacción. Extraído de Basu [3].

En la medida que se liberan los volátiles, la fracción de carbón en el sólido aumenta, mientras que las de hidrógeno y oxígeno disminuyen, haciendo que la biomasa se mueva a la región del carbón mineral cuando se representa en un diagrama Van Krevelen (Figura 5).

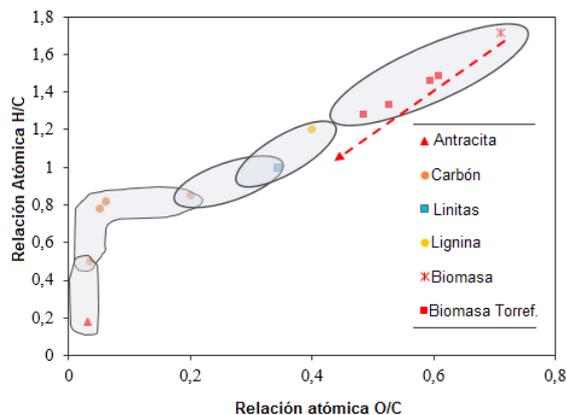


Figura 5. Diagrama Van Krevelen de la torrefacción de biomasa.

Tiempo de residencia: El tiempo de residencia en el reactor también afecta la descomposición térmica de la biomasa. La velocidad de calentamiento es por lo general inferior a 50°C/min [17]. Este parámetro es la característica que distingue la torrefacción de la pirólisis. Mayores tiempos de residencia dan menores rendimientos en masa y energía. Sin embargo, su efecto es notablemente inferior al que produce la temperatura y se ve incluso disminuido cuando el tratamiento se extiende por más de una hora.

Tipo de biomasa: Como la fracción de hemicelulosa es la que se degrada en mayor medida durante la torrefacción, las características del polímero y su estructura, definen la composición de los productos. Es incluso interesante apreciar cómo, maderas duras y blandas con contenido de hemicelulosa similares que se someten a torrefacción en condiciones similares, tienen diferentes rendimientos máxicos y energéticos. El rendimiento en masa de maderas duras es inferior al de las blandas. Este efecto se relaciona con el contenido de xilanos que en las duras constituye entre 80 - 90% peso de la hemicelulosa, mientras que en las blandas es solo de 15 - 30%. El xilano o 4-O-metilglucoronoxilano es el componente más activo de la hemicelulosa en el rango de temperaturas de la torrefacción y por tanto se degrada con mayor facilidad. Además, las maderas duras en su descomposición producen fundamentalmente ácido acético y agua, por lo que su contenido energético es mayor, por consiguiente su rendimiento energético supera a las maderas blandas [3].

Tamaño de partícula: Las resistencias a la transferencia de calor y masa son funciones del tamaño y forma de las partículas de madera, por lo que el control de esta variable es fundamental para controlar los procesos de secado y torrefacción. Este parámetro tiene mayor influencia a diámetros de partículas grandes. Es recomendable realizar análisis considerando el factor de forma y cuantificando el número de *Biot* para lograr reducir las resistencias a la transferencia de calor, fundamentalmente en la partícula del sólido. Los mecanismos de transmisión de calor en la torrefacción son: convección desde las paredes del reactor (o el portador térmico) hacia la superficie del sólido y posteriormente, la conducción hacia el centro de la partícula [15].

CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE LA BIOMASA TORREFACTADA

La torrefacción cambia significativamente las propiedades físicas y la composición química de la biomasa, como consecuencia, el producto sólido obtenido es compatible con el carbón mineral, por lo que tiene potenciales aplicaciones en el sector energético. A continuación se resume el efecto del proceso de torrefacción sobre algunas de las propiedades más importantes:

Densidad: La pérdida de fracciones oxigenadas durante la torrefacción, convierte a la biomasa en un material poroso y por consiguiente su densidad máxica disminuye considerablemente. Se puede estimar una variación de 13%/50°C en el rango de 220°C - 280°C.

Contenido de humedad: La biomasa cruda contiene entre 25 - 30% de humedad, por lo que antes de desarrollar la torrefacción se seca hasta que la humedad sea como máximo de 15%. Posteriormente, mediante los procesos de secado y post-secado y la liberación de grupos OH-

por descomposición de hemicelulosa, se obtiene un sólido torrefactado cuya humedad no excede el 5% [2].

Friabilidad: La friabilidad mide la facilidad para triturar un material sólido. La biomasa sin tratar es resistente a la molienda, pues sus fibras son resistentes, elásticas y largas. Durante la torrefacción, la celulosa se despolimeriza y la hemicelulosa se descompone, dando lugar a cadenas poliméricas cortas y a la ruptura de la fibra original en fracciones de menor tamaño. El producto de este proceso es un sólido considerablemente más frágil que el que le dio origen, fácil de transportar en sistemas convencionales y que consume hasta 90% menos energía por concepto de molienda que la biomasa natural [2].

Calidad de pellets: La torrefacción previa a la peletización permite homogeneizar la materia prima. Teóricamente, la lignina es responsable del grado de aglomeración de los pellets de biomasa lignocelulósica, durante la torrefacción la estructura de la hemicelulosa se rompe y permite mejor acceso a los sitios activos de la lignina, por lo que mejora las características de los pellets en referencias a los de biomasa sin tratar. La densidad máxima de los pellets torrefactados oscila entre 750 – 850 kg/m³ y la energética puede llegar a ser 8 veces superior a la de la biomasa sin tratar.

Composición química: El cambio en la composición química de la biomasa torrefactada se representa por la variación en su composición elemental (C, O, N, H) en un diagrama de Van Krevelen. Poco se ha discutido sobre el efecto de los inorgánicos en el sólido torrefactado, sin embargo es de esperar que su presencia por encima de los niveles normados para combustibles sólidos convencionales, implique dificultades operacionales por la condensación de álcalis sobre los equipos.

Aplicaciones de la biomasa torrefactada

La biomasa energéticamente densificada por procesos térmicos (torrefacción), mecánicos (peletización o briquetado) y la combinación de estos, tiene aplicaciones en la mayoría de las instalaciones de combustión existentes. Entre las alternativas que más se están estudiando, figuran:

Procesos de co-combustión: En este proceso, una parte del combustible sólido, por lo general carbón mineral, se sustituye por biomasa, garantizando de esta forma una reducción en las emisiones de gases con efecto invernadero, sobre el supuesto que el CO₂ producido a partir de biomasa es absorbido durante el crecimiento de la misma. La co-combustión puede hacerse de tres formas: (i) directa, (ii) indirecta y (iii) paralela. La primera opción es la más simple y de menor costo, en este caso la biomasa se tritura junto al carbón y se alimentan directamente a la caldera en una mezcla 95% carbón y 5% biomasa en base energética [25]. La segunda alternativa es mucho menos común y considera la gasificación previa de la biomasa y la combustión del gas generado en la caldera a carbón. La tercera opción combina dos generadores, uno a carbón y otro a biomasa para alimentar el mismo ciclo de vapor [26]. Cuando se utiliza biomasa torrefactada, los porcentajes de sustitución en co-combustión directa pueden alcanzar hasta el 50% en energía. Además, la biomasa es altamente compatible con el carbón en cuanto a facilidad para triturarse, contenido energético e hidrofobicidad por lo que los problemas relacionados con la alimentación al reactor se reducen al mínimo, incluso para sistemas que operan con carbón pulverizado.

Como pre-tratamiento para la gasificación/pirólisis: La gasificación de biomasa torrefactada tiene potencial para la producción de gas de síntesis y el posterior uso de este

en la producción de combustibles líquidos (Fischer-Trops) o gaseosos (gas natural sintético). Aunque se han hecho algunos ensayos experimentales, este es un campo muy poco estudiado [27]. En cuanto a la pirólisis, el bio-aceite obtenido de biomasa torrefactada es de mayor calidad en referencia al de biomasa sin tratamiento preliminar, debido a que la relación C/O de la primera es superior.

Otras: Después de torrefactada, la biomasa, puede usarse como adsorbente de sustancias orgánicas y/o inorgánicas en forma de carbón activado, como sustituto de combustibles en la generación de calor para las industrias metalúrgica y del cemento e incluso como enmendador de suelos [2].

PERSPECTIVAS EN AMÉRICA DEL SUR. CHILE Y ECUADOR

En esta sección se da una breve descripción sobre el potencial que tiene la torrefacción como alternativa para el aprovechamiento de residuos de origen forestal en Chile y Ecuador. El análisis considera el consumo de combustibles primarios en ambas naciones, la estructura básica de su matriz energética y estima el impacto potencial de sustituir parte de los combustibles, utilizados en la generación eléctrica, por biomasa torrefactada.

Chile

El panorama energético de Chile es coherente con el comportamiento de los principales indicadores a nivel global. En la última década, la nación ha experimentado un sostenido crecimiento en la demanda de energía primaria, la cual alcanzó en 2013 los 339 millones de Tcal [28]. Los principales portadores energéticos en Chile son: el petróleo, la biomasa, el carbón y el gas natural. La Figura 6 presenta el consumo de los mismos en 2013 y hace énfasis en el comportamiento del carbón en los últimos cinco años:

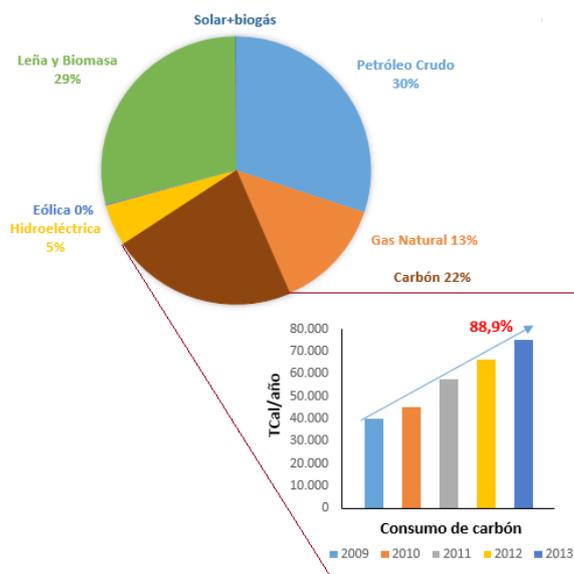


Figura 6. Consumo de portadores primarios. Balance energético nacional 2013. [28]

Es evidente que la presencia del carbón en la matriz energética chilena ha ido creciendo de manera impresionante, sobre todo después de la reducción en el suministro del gas natural. El 92,7% de este recurso se utiliza para la generación de electricidad en sistemas de combustión que,

solamente en 2012, emitieron un promedio de 7.18 MMt-CO₂ (CDIAC- <http://cdiac.ornl.gov/>). El 86% del carbón es importado, por lo que está a expensas de la volatilidad del mercado internacional y el efecto ambiental de la cadena logística se refleja en la huella ecológica de los bienes y servicios. Una de las alternativas más prometedoras para elevar la seguridad e independencia energética de la nación, es el aprovechamiento de la biomasa forestal como portador para el sector eléctrico.

Biomasa con fines energéticos en Chile

Chile tiene una superficie forestal de aproximadamente 13.2 Millones de hectáreas de bosque nativo y 2.9 de plantaciones forestales [29], fundamentalmente de Pino radiata y Eucaliptus globulus, cuyos rendimientos oscilan entre 25 – 35 m³/ha/año. La actividad silvícola y el procesamiento de los recursos forestales generan más de 4 MMt métricas de residuos energéticamente aprovechables, de los cuales en la actualidad, solamente el 5.6% se utiliza para producir energía de calidad (electricidad) en el sector público, el resto se distribuye en calefacción, autogeneración y otras aplicaciones industriales [28]. En octubre de 2014, la generación eléctrica a partir de energías renovables no convencionales en Chile alcanzó el 9.25% de todos los sistemas interconectados y la biomasa representó el 36% de esta inyección, o sea un 3.33% del total nacional [30]. La potencia instalada es 461 MW (<4% del potencial bruto) y está distribuida en 12 centrales de generación, que pertenecen a 7 empresas asociadas al Sistema Interconectado Central (SIC).

Este inmenso potencial no ha escapado del interés de los investigadores, y actualmente hay varios proyectos en ejecución relacionados con la torrefacción y co-combustión de biomasa. La Unidad de Desarrollo Tecnológico, el grupo GDZ Suez y la Universidad de Concepción llevan la vanguardia en estas investigaciones.

Balance potencial

Según el balance energético nacional de 2013 [28] Chile tuvo un consumo bruto de 10.78 millones de toneladas de carbón, equivalentes a 75 493 TCal de las cuales el 98% son utilizadas en la generación de electricidad en plantas de combustión. A continuación se hace una previsión de la capacidad de sustitución y la reducción de emisiones netas de CO₂ que implica incluir la tecnología de torrefacción para el aprovechamiento de residuos forestales como sustitutos del carbón mineral.

Suposiciones: Para el siguiente análisis se asume que en Chile se generan anualmente 4 millones de toneladas de residuos forestales provenientes de manejo y explotación de bosques nativos y plantaciones. Estos residuos comprenden el potencial bruto para ser pre-tratados por torrefacción y posteriormente sustituir el carbón mineral de sus aplicaciones actuales. Además, partiendo de los resultados experimentales reportados por la Unidad de Desarrollo Tecnológico, se supone que después del proceso de torrefacción (280 °C y 30 min) se obtiene un 65% de rendimiento en masa y un sólido torrefactado cuyo poder calorífico promedio es de 21.5 MJ/kg.

Como se puede apreciar en la Figura 7, si se aprovecha el 100 % de los residuos disponibles, podría sustituirse hasta el 25 % de la energía importada, con la consiguiente reducción en las emisiones de GEI, específicamente de CO₂. Sin embargo, en ocasiones resulta impráctico acarrear y transportar gran parte de estos residuos y a grosso modo se puede estimar que del total, un 30-50% es utilizable con fines energéticos. Sobre la base de estos resultados

podría concluirse en que, entre el 8 y el 12% de la energía importada por el país para la generación de electricidad en centrales a carbón, puede sustituirse por residuos forestales. Considerando estos análisis y la capacidad de producción en el sector forestal chileno, puede inferirse que la matriz energética, es perfectamente ajustable para facilitar la entrada de la biomasa forestal como vector en el sector eléctrico.

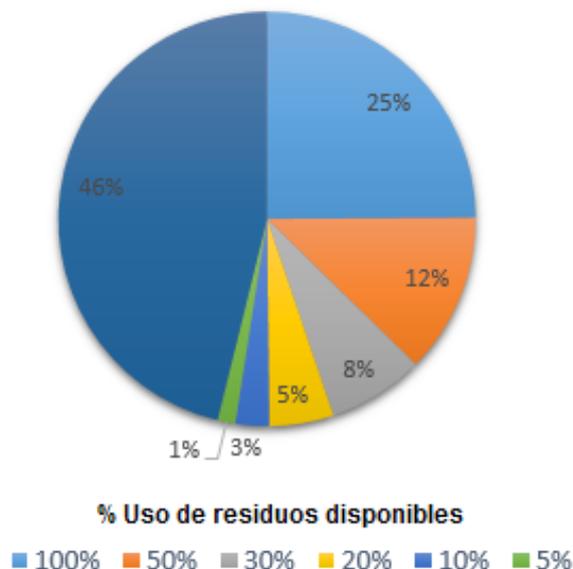


Figura 7. Efecto de sustituir carbón por biomasa forestal residual torrefactada.

Ecuador

El panorama energético del Ecuador es diferente a Chile. El país cuenta con recursos fósiles tales como petróleo y gas natural, además posee capacidades instaladas para el aprovechamiento de fuentes no convencionales, principalmente, hidráulica y biomasa. Los portadores primarios de origen fósil, representan el 94% del total de la producción que se distribuye en: petróleo (90%) -fracción para exportación (63%) y carga a refinerías nacionales (27%) y gas natural (4%). El 6% restante corresponde a hidroeléctricas (4%), cogeneración con residuos de la industria azucarera (1%) y leña < 1%. La Figura 8 representa la distribución por fuente, de la generación de electricidad en Ecuador.

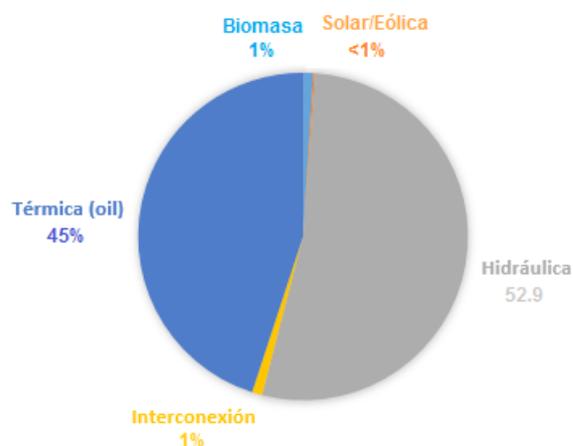


Figura 8. Generación de energía por fuente en Ecuador.

Como se puede apreciar, el escenario es sumamente positivo pues involucra un 44 % de fuentes renovables (hidráulica y biomasa).

lica). Sin embargo, el uso de biomasa de origen forestal no juega un papel cuantificable dentro de la matriz energética. Paradójicamente la superficie forestal de Ecuador abarca alrededor del 52% de su territorio (aproximadamente 11 millones hectáreas). <http://www.proecuador.gob.ec/sector3/>. Según el Ministerio del Ambiente, en Ecuador existe una superficie de 163.000 hectáreas de plantaciones, de las cuales las plantaciones de la Sierra representan el 50% y el restante 50% se localiza en la Costa y Amazonía. Aproximadamente el 48% corresponden en su mayoría a especies de Pino y Eucalipto, mientras que en la costa existen 20.000 ha de Teca, 10.000 ha de Balsa y 20.000 ha de otras plantaciones tropicales. Los residuos generados por el manejo del recurso forestal, se usan en el consumo local y/o se aprovechan en hornos artesanales de baja eficiencia. Actualmente, no se han reportado iniciativas para aprovechar biomasa forestal o agrícola residual, para la generación de electricidad o calor.

BARRERAS TECNOLÓGICAS Y PROYECTOS

La mayoría de los reactores de torrefacción son equipos diseñados para otras aplicaciones y están siendo modificados e integrados para tratar recursos lignocelulósicos de diferente origen [2,8]. Todos los especialistas coinciden en que la selección de la tecnología debe hacerse sobre la base de las características de la biomasa, fundamentalmente en función de su densidad y granulometría (desde polvo hasta chips de gran tamaño). Aunque se tiene referencia de más de 50 compañías que trabajan sobre el tema, debido al interés comercial que se cierne sobre la torrefacción, hay muy poca información detallada sobre los proyectos en ejecución [8,12]. Se han registrado varias patentes relacionadas con la torrefacción de biomasa, sin embargo aún no hay instalaciones a escala comercial que integren torrefacción y peletización. En la Tabla 2 se resumieron las patentes más relevantes en orden cronológico. Este análisis evidencia que la torrefacción es un tema vigente y con muchas oportunidades para el mercado de la energía.

Según, la experiencia previa de nuestro grupo, los empresarios y la literatura consultada, los desafíos tecnológicos que aún persisten son:

- *Flexibilidad de materia prima:* Las tecnologías actuales solo pueden manejar sólidos entre 5 – 20 mm y con humedad inferior al 15% en masa. La operación con biomasa de baja densidad necesita reactores de mayor volumen.
- *Tratamiento a los gases:* El material particulado en los gases debe eliminarse en un sistema de ciclones, los alquitranes podrían condensar en las líneas de tuberías por lo que estas deben estar perfectamente aisladas. Además, los gases de torrefacción requieren temperaturas de llama >900°C y suficiente tiempo de mezclado con el aire en el combustor.
- *Escalado del proceso:* El escalado es sumamente difícil, sobre todo para reactores rotatorios, (la relación área/volumen disminuye), pues requieren de múltiples líneas de producción.
- *Controlabilidad y calidad del producto:* Se prefiere calentamiento directo para reducir la carbonización y dar homogeneidad al producto. Los parámetros críti-

cos son: El tamaño de partícula y la composición de la biomasa.

CONCLUSIONES

A pesar de existir un enorme potencial para utilizar la biomasa lignocelulósica como fuente de energía, combustibles y compuestos químicos, aun este recurso no es explotado de manera eficiente. Los principales problemas logísticos e inherentes a las propiedades del material deben eliminarse, para lograr que este sea competitivo frente a los combustibles convencionales. La torrefacción es un pretratamiento que brinda todas las posibilidades para densificar energéticamente la biomasa sólida y convertirla en un combustible con características similares a los carbones minerales comerciales y por tanto en su sustituto natural. La tecnología está en una fase de desarrollo inicial y se han identificado los problemas que suponen ser las barreras fundamentales para su inclusión en el mercado. Este artículo ofrece una revisión detallada sobre aspectos fenomenológicos y tecnológicos y brinda, además, una visión general de su potencial en países que importan gran parte de su energía primaria, en forma de carbón.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unidad de Desarrollo Tecnológico, Universidad de Concepción, Proyecto Basal PFB-27, por el financiamiento a esta investigación.

REFERENCIAS

1. [J.J. Chew, V. Doshi, Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 4212–4222. doi:10.1016/j.rser.2011.09.017.
2. D. Nhuchhen, P. Basu, B. Acharya, A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction, *Int. J. Renew. Energy Biofuels.* 2014 (2014) 1–56. doi:10.5171/2014.506376.
3. P. Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical design and Theory, Second, Elsevier Ltd, New York, 2013.
4. I. Energy, Key World Energy STATISTICS, (2014).
5. A. Nag, Biofuels refining and performance, 1st ed., San Francisco, 2008.
6. S. Behera, R. Arora, N. Nandhagopal, S. Kumar, Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 36 (2014) 91–106. doi:10.1016/j.rser.2014.04.047.
7. A. Pirraglia, R. Gonzalez, J. Denig, D. Saloni, J. Wright, Assessment of the most adequate pre-treatments and woody biomass sources intended for direct co-firing in the u.s., 7 (2012) 4817–4842.
8. J. Koppejan, S. Sokhansanj, M. Staffan, M. Sebnem, Status overview of torrefaction technologies, *Enschede*, 2012.
9. M.J. Prins, K.J. Ptasinski, F.J.J.G. Janssen, Torrefaction of wood, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 77 (2006) 28–34. doi:10.1016/j.jaap.2006.01.002.
10. [L. Shang, J. Ahrenfeldt, J.K. Holm, S. Barsberg, R. Zhang, Y. Luo, et al., Intrinsic kinetics and devolatilization of wheat straw during torrefaction, *J. Anal.*

- Appl. Pyrolysis. 100 (2013) 145–152. doi:10.1016/j.jaap.2012.12.010.
11. M. Phanphanich, S. Mani, Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass, *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 1246–1253. doi:10.1016/j.biortech.2010.08.028.
 12. J. Tumuluru, S. Sokhansanj, C.T. Wright, R.D. Boardman, J.R. Hess, Review on Biomass Torrefaction Process and Product properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development, 2011 Louisville, Kentucky, August 7 - August 10, 2011. (2011). doi:10.13031/2013.37192.
 13. [P.C.A. Bergman, Combined torrefaction and pelletisation The TOP process, Netherlands, 2005.
 14. P. Giudicianni, G. Cardone, R. Ragucci, Cellulose, hemicellulose and lignin slow steam pyrolysis: Thermal decomposition of biomass components mixtures, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 100 (2013) 213–222. doi:10.1016/j.jaap.2012.12.026.
 15. P. Basu, A.K. Sadhukhan, P. Gupta, S. Rao, A. Dhungana, B. Acharya, An experimental and theoretical investigation on torrefaction of a large wet wood particle., *Bioresour. Technol.* 159 (2014) 215–22. doi:10.1016/j.biortech.2014.02.105.
 16. R.B. Bates, A.F. Ghoniem, Biomass torrefaction: modeling of volatile and solid product evolution kinetics., *Bioresour. Technol.* 124 (2012) 460–9. doi:10.1016/j.biortech.2012.07.018.
 17. P.C.A. Bergman, Combined torrefaction and pelletisation The TOP process, (2005).
 18. B. Zakri, J. Saari, E. Sermyagina, E. Vakkilainen, Integration of Torrefaction with Steam Power Plant, 2013. http://www.doria.fi/xmlui/bitstream/handle/10024/94111/Biotuli_torrefiointi_tutkimusraportti.pdf?sequence=2.
 19. E. Peduzzi, G. Boissonnet, G. Haarlemmer, C. Dupont, F. Maréchal, Torrefaction modelling for lignocellulosic biomass conversion processes, *Energy.* 70 (2014) 58–67. doi:10.1016/j.energy.2014.03.086.
 20. [W.-H. Chen, P.-C. Kuo, Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass, *Energy.* 36 (2011) 803–811. doi:10.1016/j.energy.2010.12.036.
 21. C. Di Blasi, M. Lanzetta, No Title, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 40 - 41 (1997) 287 – 303.
 22. C.M. van der Meijden, H.J. Veringa, L.P.L.M. Rabou, The production of synthetic natural gas (SNG): A comparison of three wood gasification systems for energy balance and overall efficiency, *Biomass and Bioenergy.* 34 (2010) 302–311. doi:10.1016/j.biombioe.2009.11.001.
 23. R.B. Bates, A.F. Ghoniem, Biomass torrefaction: modeling of reaction thermochemistry., *Bioresour. Technol.* 134 (2013) 331–40. doi:10.1016/j.biortech.2013.01.158.
 24. J. Kiel, Torrefaction Energy research Centre of the Netherlands (ECN), (2012).
 25. M. Cremers, IEA Bioenergy Task 32 Deliverable 4 Technical status of biomass co-firing, (2009).
 26. P. Lempp, Biomass Co- firing. Technology brief, United States, 2013. doi:IEA-ETSAP.
 27. A.M. Eriksson, Torrefaction and gasification of biomass. The potential of torrefaction combined with entrained flow gasification, KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden, 2012.
 28. M. Energ, Ministerio de Energía, Balanc. Energético Nac. (2014). <http://www.minenergia.cl/documentos/balance-energetico.html> (accessed October 01, 2014).
 29. INFOR, Forestry Institute. Forest statistics, (2014). <http://wef.infor.cl/>.
 30. P. Goyeneche, Ernc en chile, 2014. http://www.cer.gob.cl/mailling/2014/octubre/REPORTE_Oct_2014.pdf.