



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MODELO DE GENERACIÓN DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASA FORESTAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MITZI ANDREA LOAIZA NAVARRO

PROFESOR GUÍA:
WILLIAM WRAGG LARCO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANDRÉS POCH PIRETTA
GONZÁLO BADAL ZEISLER

SANTIAGO DE CHILE
2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR : MITZI LOAIZA NAVARRO
FECHA : 26 DE ENERO DE 2015
PROFESOR GUÍA : WILLIAM WRAGG LARCO

MODELO DE GENERACIÓN DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASA FORESTAL

La biomasa forestal, es atractiva por su bajo costo y alta disponibilidad en diversos climas y localidades del país, sin embargo, el principal impedimento para su utilización es la falta de una tecnología de bajo costo para una adecuada conversión energética, que de valor agregado adicional a la simple combustión que se utiliza hoy, mediante mayores niveles de eficiencia en el aprovechamiento del recurso.

Para el análisis de estas tecnologías, se consideran como materia prima los residuos forestales por región del manejo del bosque nativo y el potencial de áreas para plantaciones dendroenergéticas. Se calcula para indicadores económicos recomendados por la CNE en proyectos energéticos, los valores mínimos de venta por unidad energética, con el fin de evaluar los requerimientos de financiamiento de proyectos

De acuerdo a los resultados obtenidos, los potenciales de generación eléctrica superan la capacidad instalada de 1896 MWe, entre las regiones IV a XII, mientras que la generación de combustible se estimó en 746 millones de galones al año. Las plantaciones dendroenergéticas en cambio, resultaron ser poco productivas, con estimaciones de hasta 5 MWe de capacidad instalada eléctrica y producciones de hasta 200 mil galones/año, con altos costos de inversiones.

La rentabilidad de proyectos de emprendimiento privado con respecto a ésta alternativa es muy baja y los precios obtenidos superan largamente los precios de combustibles alternativos, por lo que es recomendable la planificación operacional de actividades silvícolas con fines energéticos y la promoción de desarrollo regional de proyectos en aplicaciones de consideraciones que interactúan en las decisiones de políticas públicas como de índole social, de manejo de superficies de bosques y de factibilidad de transacción de la biomasa que es difícil valorizar en un análisis puramente económico.

En este contexto, los modelos de negocio propuestos, se enfocan en mejorar la situación actual de abastecimiento y desarrollo de proyectos de innovación con nuevas tecnologías, los que requieren promoción de inversiones en producción de biomasa, implementación de centros logísticos y comercialización de biocombustibles forestales, fomento de la contratación de la bioenergía y desarrollo de normas para establecer estándares de calidad y criterios de sostenibilidad en el uso de ella.

A ganador.

Me adelanto algunos pasos, y a riesgo de perder, apuesto por todo a comenzar un nuevo sendero, las apuestas van a ganador, y la efervescencia de los días y las horas, con cada estímulo minúsculo alimentan mi hambre del mundo.

Es difícil no adorar estos días en que el sol calienta, y el aire empuja el avance, esos días donde la sensación de grandeza se apodera de mi minúscula mente y me lleva a abrazar el mundo, y es tan difícil mantener esta alerta de éxito, sin embargo, da el empuje suficiente para aquellos días en que respirar se dificulte.

Intento no fallar, pero parece difícil errar, a cada minuto las cosas mejoran, y no puedo evitar desear que algo de mi fortuna chorreé a mis colegas, no quiero esto para mi sola, y si mi mente no explota antes, espero acceder a la curvatura soñada, ver todo desde el fondo o desde arriba, a la cima que parece inminente, dónde podré conocer el mundo como los dioses.

*Nirvana en mi pecho, y un brindis perpetuo por mi éxito eterno...
si es que la eternidad dura por hoy.*

NB.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Javier González, decano de la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, de la Universidad de Chile por el apoyo en la investigación y el acceso a valiosa información, y a Poch Ambiental por la información y ayuda prestada en los meses de desarrollo del presente trabajo. Un especial agradecimiento a los profesores de la comisión por su guía, apoyo y consejo a lo largo de la elaboración de este trabajo.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	- 1 -
1.1. Justificación	- 2 -
1.2. Objetivos	- 3 -
1.2.1 Objetivo General.....	- 3 -
1.2.2 Objetivos Específicos	- 4 -
1.3. Metodología	- 4 -
2. Características del mercado energético en Chile	- 6 -
2.1. Marco Legal; Normas y Estatutos.....	- 6 -
i. Sobre Energía eléctrica	- 6 -
ii. Biocombustibles.....	- 8 -
iii. Sobre el Medioambiente	- 8 -
2.2. Políticas Públicas y Subsidios a ERNC	- 9 -
i. Financiamientos CORFO:	- 9 -
ii. Financiamientos Internacionales.....	- 10 -
2.3. Experiencias en Materia de Bioenergía en Chile.....	- 12 -
2.4. Experiencia Internacional	- 15 -
i. El caso de Dinamarca	- 16 -
ii. Biocombustibles en Brasil.....	- 17 -
3. Cuantificación de los recursos lignocelulósicos.....	- 19 -
3.1. Estimación de Biomasa Aprovechable en Bosques Nativos.....	- 23 -
3.1.1. Superficies a considerar	- 23 -
3.1.2. Volumen de Biomasa aprovechable	- 24 -
3.1.3. Planificación de Ciclos de corta.....	- 24 -
3.2. Estimación de Biomasa Aprovechable en Plantaciones.....	- 25 -
3.3. Resultados	- 26 -
3.4. Caracterización de la biomasa	- 36 -
4. Alternativas tecnológicas de conversión	- 40 -
4.1. Recolección.....	- 42 -
4.1.1. Consideraciones de Costos de obtención de biomasa.....	- 43 -
4.1.2. Costos de Compensación por obtención de materia prima	- 44 -
4.1.3. Costos por Plantación.....	- 45 -
4.2. Preparación de la biomasa sólida	- 47 -
4.2.1. Sistema de recepción	- 48 -

4.2.2.	Procesamiento	- 48 -
4.2.3.	Áreas de Almacenamiento	- 51 -
4.2.4.	Transporte al lugar de Conversión	- 51 -
4.2.5.	Costos asociados al lugar de Preparación y almacenamiento	- 52 -
4.3.	Tecnologías de conversión	- 54 -
4.3.1.	Combustión Directa	- 54 -
4.3.2.	Gasificación	- 57 -
4.3.3.	Biocombustibles	- 60 -
4.3.4.	Costos de Inversión de tecnologías de conversión	- 61 -
4.3.5.	Costos de Operación y Mantenimiento.....	- 64 -
5.	Potencial de Generación por tecnología	- 69 -
6.	Análisis Financiero	- 72 -
7.	Modelos de Negocio	- 78 -
7.1.	Manejo sustentable del bosque nativo	- 78 -
7.2.	Aprovechamiento de residuos de aserraderos.....	- 80 -
7.3.	Obtención mediante plantaciones dendroenergéticas	- 82 -
7.4.	Centro logístico y de comercialización de biomasa.....	- 82 -
7.5.	Proyectos de calefacción urbana	- 83 -
8.	Conclusiones y Recomendaciones.....	- 84 -
9.	Bibliografía	- 87 -

Índice de Figuras

Figura 1: Generadores de Energía Eléctrica a partir de Biomasa a Dic 2012 inyectada al SIC. Fuente: Elaboración propia a partir de Balance Nacional de Energía 2012.....	- 12 -
Figura 2: Planta de Almacenamiento de Materia Prima COMASA.....	- 13 -
Figura 3: Planta de Generación Masisa, Cabreros, VIII Región.....	- 14 -
Figura 4: Perspectivas de Crecimiento de la demanda mundial de energía primaria.....	- 15 -
Figura 5: Crecimiento económico y consumo energético Danés.....	- 16 -
Figura 6: Matriz Energética de Brasil al 2012.....	- 17 -
Figura 7: Esquemas de intervención del bosque nativo por estructura Forestal.....	- 20 -
Figura 8: Distribución de Bosques por tipo en Regiones.....	- 26 -
Figura 9: Disponibilidad de Biomasa Potencial base Flujo Anual Sostenido.....	- 29 -
Figura 10: Superficie Potencial de Plantaciones.....	- 32 -
Figura 11: Principales zonas de crecimiento para <i>Pinus Radiata</i> , reconocidas por el simulador INSIGNE (www.simulador.cl).....	- 34 -
Figura 12: Etapas de la Generación de Energía Eléctrica.....	- 41 -
Figura 13: Flujo de proceso para obtención de biomasa. INDEF, 2008.....	- 42 -
Figura 14: Esquema de producción. a) Centralizado, desde orilla de camino a acopio intermedio. b) Descentralizado, desde orilla de camino a planta.....	- 43 -
Figura 15: Sistema Automático de Recepción y Preparación de la Biomasa, Fuente: Antares Group.....	- 47 -
Figura 16: Maquinaria de astillado in-situ.....	- 49 -
Figura 17: Maquinaria de pelletizado y briquetado.....	- 50 -
Figura 18: Costo estimado pretratamiento y acopio.....	- 52 -
Figura 19: Procesos termoquímicos de conversión de la biomasa.....	- 54 -
Figura 20: Diagrama de Sistema de combustión directa de los residuos biomásicos.....	- 56 -
Figura 21: Esquemas de funcionamiento de gasificadores.....	- 58 -
Figura 22: Esquema de producción sintética de biocombustible utilizado por Choren.....	- 60 -
Figura 23: Gráfico de comportamiento costos de inversión por Tecnología.....	- 63 -
Figura 24: Gráfico del Valor de la Energía para alcanzar economías de escala, según inversión por tecnología.....	- 63 -
Figura 25: MESP o precio de nivelación del combustible para bioetanol, NREL, 2011b.....	- 64 -
Figura 26: Costos de Mantenimiento y operación como porcentaje de CAPEX.....	- 65 -
Figura 27: Gráfico evolución y comportamiento precios CER, EUA, ERU (2008-2011).....	- 66 -
Figura 28: Esquema de obtención de potencial eléctrico y térmico de la biomasa.....	- 70 -
Figura 29: Gráfica de precios mínimos de venta de energía eléctrica por región.....	- 73 -
Figura 30: Precio de nivelación de combustibles en bosques forestales.....	- 77 -
Figura 31: Mapa con zonas de interés de aserraderos en cercanías a Coyhaique.....	- 81 -

Índice de Tablas

Tabla 1: Generación de Electricidad de las plantas instaladas por Arauco y Constitución S.A. hasta el 2011.	- 13 -
Tabla 2: Superficie Forestal por Regiones, 2012.....	- 27 -
Tabla 3: Estadísticas Catastro INFOR 2013	- 28 -
Tabla 4: Biomasa Potencial base Flujo anual Sostenido.....	- 30 -
Tabla 5: Superficie (miles de ha) Potencial de Plantaciones en el Escenario de Resguardo Hídrico.	- 32 -
Tabla 6: Comparación de modelos de plantación dendroenergética.....	- 35 -
Tabla 7: Residuos de cosecha de especies exóticas (base Pinus Radiata)	- 37 -
Tabla 8: Residuos de la industria forestal.....	- 37 -
Tabla 9: Residuos de cosecha de bosque nativo (base Lenga)	- 38 -
Tabla 10: Plantaciones dendroenergéticas.....	- 38 -
Tabla 11: Valorización de la biomasa en sectores donde se utiliza para fines energéticos.....	- 45 -
Tabla 12: Costos de las obras de recuperación de suelos degradados.	- 46 -
Tabla 13: Costos de inversión para sistema de recibo y preparación de biomasa.....	- 53 -
Tabla 14: Comparativa de tecnologías de Combustión Directa. Fuente: EPA 2007	- 55 -
Tabla 15: Agentes Gasificadores.....	- 57 -
Tabla 16: Rendimientos típicos de los productos (base madera seca), obtenidos por diferentes modos de pirolisis de la materia. Fuente: PEP 2013.....	- 59 -
Tabla 17: Resumen de Costos de Inversión por Tecnología. Fuente: IRENA 2012	- 62 -
Tabla 18: Resumen de Costos de Mantenimiento y Operación por Tecnología. Fuente: IRENA 2012. -	65 -
Tabla 19: Costos de inversión en planta de bioetanol.....	- 67 -
Tabla 20: Costos de inversión para conversión eléctrica en caldera de lecho fluidizado	- 68 -
Tabla 21: Valores considerados para el cálculo del potencial energético.	- 69 -
Tabla 22: Potencial de Generación Eléctrica, Térmica, Bioetanol y biogás, por biomasa de manejo forestal de bosque nativo.....	- 71 -
Tabla 23: Potencial de Generación Eléctrica, Térmica, Bioetanol y biogás, por biomasa de manejo forestal de plantaciones.	- 71 -
Tabla 24: Precios de Nivelación de energía eléctrica por región.	- 73 -
Tabla 25: Interfaz de resultados ASPEN Plus	- 75 -
Tabla 26: MESP o nivelación de precios de combustible para bosque nativo.....	- 76 -
Tabla 27: MESP o nivelación de precios de combustible para bosque nativo.....	- 77 -
Tabla 28: Resumen de los residuos anuales que se regalan por cada sitio de interés analizado.-	81 -
-	-
Tabla 29: Esquemas de apoyo a las cadenas de producción y suministro de combustibles.	- 83 -

1. Introducción

Chile, históricamente, ha tenido serios problemas energéticos que han mermado no sólo su desarrollo económico, sino que también su desarrollo social, mediante el acceso por precio a la energía (Cepal, 2008). En la actualidad, el país no posee una matriz energética muy diversificada y se encuentra expuesto a la gran dependencia de importación de combustibles para la producción de energía.

Es por dicha razón, y por el alarmante nivel de emisión en la industria de generación de energía en Chile, que se han tomado otras medidas para incorporar tecnologías alternativas en la matriz energética, que junto con disminuir el nivel de emisiones, tienen la misión de reducir la dependencia de energía importada.

La creciente complejidad de la temática del medio ambiente, el dinamismo conceptual que posee el tema, las notorias diferencias en las definiciones de él, y sobre todo su aporte cada vez más importante en las estrategias de desarrollo, conducen a una reflexión en torno a la evolución y utilización de fuentes de recursos autóctonos para la producción de energía.

Una prometedora fuente de recursos renovables es la del uso de biomasa, que se perfila como un combustible sustentable para la producción de diversas energías limpias, dado el actual avance de las tecnologías de conversión.

En Chile, existe un gran potencial de generación de energía en base a biomasa forestal, proveniente de la gran cantidad de bosques existentes, que cubren una superficie de 17,14 millones de hectáreas, lo que representa el 22,9% de la superficie del territorio nacional. De ellas, aproximadamente 14,18 millones de hectáreas, (18.7% del territorio nacional) son bosques nativos y 2,96 millones de hectáreas, corresponden a plantaciones forestales (CONAF, 2013).

En términos generales, la biomasa en Chile ha tenido una fuerte presencia en la matriz energética, principalmente utilizada en forma de leña, llegando en 2007 a abarcar el 16% del consumo bruto de energía primaria y el 17.5% de la energía secundaria. De lo anterior, se desprende que la utilización de la biomasa ha sido principalmente en el uso de calefacción y cocina de los sectores más rurales del país. Sin embargo, el potencial energético de este recurso se desperdicia en la combustión no controlada con un impacto ambiental significativo.

Bajo este marco, se han promovido estudios de iniciativa pública y privada, para el aprovechamiento de este combustible, cuyo objetivo principal es determinar la cantidad y calidad de la biomasa disponible en el país para proyectos de energía, así como investigar las distintas tecnologías disponibles a nivel mundial en el ámbito de la bioenergía, con el fin de que puedan contribuir a los objetivos de seguridad de suministro y sustentabilidad ambiental del país.

La magnitud de dicha contribución y la viabilidad económica de su implementación, depende de elementos tales como **el potencial explotable de los recursos renovables, su localización geográfica y las características de los mercados energéticos**. En el presente trabajo de título, se estudiarán los tres factores antes descritos para el uso del combustible generado por la biomasa forestal, haciendo un análisis técnico-económico del uso residual o primario de ella.

Para determinar el proceso productivo óptimo que permite invertir en el desarrollo de proyectos de este tipo, se evaluarán los principales métodos de extracción de biomasa, dando énfasis en la conservación de los bosques naturales, y explotación de los comerciales, en el marco legal que ofrece la legislación chilena. Lo anterior, con el fin de desarrollar un modelo de negocio sustentable de generación de energía, en base a recursos naturales renovables existentes en el país.

1.1. Justificación

El contexto que motiva el desarrollo del presente trabajo es el siguiente:

- i. Condiciones favorables por disponer de recurso propio, renovable y sin rentabilizar por restricción de protección al bosque nativo. Los bosques han sufrido en las últimas décadas un abandono generalizado, y en algunos casos la falta de gestión ha acarreado problemas de acumulación de un combustible al que no se encuentra salida ni tiene justificación ambiental. En los bosques existe una ingente cantidad de biomasa que aún no se ha valorizado y que puede aportar mucho valor a la sociedad. Esto sumado a la gran dependencia energética del país, la oportunidad se hace manifiesta.
- ii. Bajo una hipótesis conservadora, el potencial disponible en el país es de de 8 millones de toneladas base seca/año. Estos estudios no consideran la biomasa agrícola, los desechos urbanos y la eventual incorporación de cultivos forestales de corta rotación. Un catastro realizado por la Comisión Nacional de Energía y el Instituto Forestal en 2007 a los aserraderos en Chile, cuantifica los residuos energéticamente aprovechables que produce la industria en forma de residuos, en un volumen anual del orden de 5.540.000 m³ sin corteza,

lo que equivale a unas 3.250.000 toneladas de biomasa. Tal cantidad no se encuentra disponible en su totalidad, debido a que parte de ella es consumida por las mismas empresas forestales para la producción de energía, o comercializada a papeleras y otras empresas, demostrando la viabilidad de implementar un modelo de desarrollo en base a estos desechos.

- iii. Gastos asociados a prevención y extinción de incendios forestales, fomentan el aprovechamiento de la biomasa forestal de manejo de bosques. Desde el punto de vista de la sustentabilidad, el aprovechamiento forestal garantiza una reducción de los incendios en torno al 70%, además de favorecer el control de enfermedades y plagas forestales y el cumplimiento de los planes de ordenación, mejorando la calidad de las masas y el arbolado (FAO, 2010).
- iv. El incentivo a las empresas forestales, que se han involucrado activamente en diversos proyectos de investigación, tanto las de trabajo silvícola como aserraderos e industrias de primera transformación, que en términos globales pueden generar nuevos empleos y posibilidad de nuevas inversiones dado un negocio energético rentable.
- v. Financiamiento estatal mediante CORFO a proyectos de investigación en materia de bioenergía con importantes avances en materia de cultivos dendroenergéticos¹, tecnologías de conversión, procesos de obtención de la materia prima desde los bosques o de la industria forestal en forma secundaria y un importante camino recorrido en conjunto con los privados involucrados.

1.2. Objetivos

Para determinar la viabilidad de desarrollar en Chile el potencial de generación de energía a partir de residuos del manejo de la biomasa forestal, se plantean los siguientes objetivos:

1.2.1 Objetivo General

El objetivo se centra en verificar si el manejo forestal y su corolario, los desechos de cosecha, raleos y podas son una alternativa promisorio para uso energético. En particular, se espera estimar la potencial producción de energía, según el rendimiento de la materia prima y generar un análisis de utilidades del proceso.

¹ Cultivos enfocados a la producción de energía

1.2.2 Objetivos Específicos

- i. Cuantificar los volúmenes de biomasa forestal disponible para fines energéticos en el país.
- ii. Evaluar y desarrollar soluciones para los problemas de abastecimiento de combustible, manejo y subproductos; para la utilización de dicha biomasa.
- iii. Evaluar el estado del arte de la tecnología de conversión de biomasa y la factibilidad de emplear/aplicar dicha tecnología en proyectos de generación de energía.
- iv. Evaluar la estructura de costos de producción de energía y desarrollar un análisis técnico-económico para introducir la tecnología seleccionada como solución de eficiencia energética.

1.3. Metodología

La metodología de trabajo es la siguiente:

- i. Recopilación bibliográfica de antecedentes:
 - Antecedentes energéticos y medioambientales de la situación actual en Chile; marco legal regulatorio, incentivos de inversión, experiencias.
 - Estudio bibliográfico para determinar el potencial de la biomasa para la producción de energía; catastro de materia prima.
- ii. Análisis de Antecedentes.
 - Análisis de tratamientos de la materia prima para la producción de bioenergía.
 - Métodos de extracción y costos asociados; inversión necesaria, gastos de transporte, viabilidad técnica.

- Determinación de los procesos óptimos para producción de diferentes tipos de energía (biogás, bioetanol, energía eléctrica, etc.-). Análisis de costos de inversión.
- iii. Evaluación técnico económica
- Determinación de indicadores económicos relevantes
 - Evaluación de Factibilidad de proyectos
- iv. Análisis de Resultados.
- Desarrollo de un modelo de negocio en base a la potencial producción de energía.
 - Recomendaciones; evaluación del proyecto con uso de fondos de inversión de incentivo a ERNC, otros.

2. Características del mercado energético en Chile

En el mercado eléctrico en Chile, la totalidad de la inversión y operación en infraestructura energética se sustenta en la acción de capitales privados. Los agentes de mercado que participan en el sector, se dividen en 3 segmentos; Generadores, Transmisores y Distribuidores. Mientras que los clientes son clasificados como regulados o libres. Esta estructura fue incorporada a través de la Ley General de Servicios Eléctricos (DFL N°1) de 1982. De esta forma, el Estado solo cumple labores de fiscalización y planificación indicativa de inversiones en generación y transmisión, que son sugestivas, pero no obligatorias.

Por lo anterior, el incentivo al desarrollo de proyectos de tipo ERNC, es mermado por la rentabilidad económica y rápido pay back que generan proyectos convencionales y por lo tanto, éstas cuentan con algunos beneficios, como la exención de impuestos, con el fin de que sean competitivas.

2.1. Marco Legal; Normas y Estatutos

A continuación, se resumen las leyes y decretos que norman el mercado de generación, transmisión y distribución, junto con las principales consecuencias de éstas sobre la energía en Chile.

i. Sobre Energía eléctrica

- DFL 1 de 1982. Ley General de Servicios Eléctricos

Norma general que establece los estatutos y garantías básicas del sistema eléctrico chileno. Define los tres sistemas básicos de Generación, Transmisión y Distribución, de la misma forma, cataloga a los clientes como regulados o libres.

- Ley 19.613:

Modifica la Ley 18.410, orgánica de la superintendencia de electricidad y combustible y el DFL N°1 de 1982, con el objeto de fortalecer el régimen fiscalizador del sector.

- Ley 19.674:

Regula la tarificación de la producción, el transporte, la distribución, el régimen de concesiones y tarifas de energía eléctrica y las Funciones del Estado relacionadas con estas materias.

- Ley 19.940: Modifica el DFL 1 de 1982. Ley General de Servicios Eléctricos

Denominada Ley Corta 1: Garantiza los ingresos de las empresas de transmisión, eliminando las barreras de transporte a la competencia en producción y facilita la comercialización de electricidad al interior de las zonas de concesión de las empresas de distribución, todo ello con rentas reguladas. Además, clasifica a estos sistemas en Troncales, de Sub-transmisión y Adicionales. Se desprende que los pequeños medios de generación y en particular los propietarios de dichos medios están exentos del pago total por concepto de inyección de electricidad. Existe un subsidio a los generadores mayores a 9 MW hasta 20 MW de manera proporcional a su capacidad. Esto es válido siempre y cuando el conjunto eximido no supere el 5% de la capacidad en el sistema eléctrico. El subsidio debe aportarse por los demás generadores a prorrata de sus propias inyecciones. Para conjuntos menores a 9 MW la exención es total.

- Ley 20.018: Modifica el DFL 1 de 1982. Ley General de Servicios Eléctricos

Denominada Ley Corta 2: establece que las empresas distribuidoras tienen la obligación de satisfacer el total del consumo proyectado de sus clientes, al menos por 3 años. Además, clasifica las restricciones de gas natural como no fortuitas. La idea central del decreto es hacer clara la responsabilidad de cumplimiento del servicio a las empresas.

- Ley 20.257: Sobre la obligación de generación en base a ERNC

Establece que el 5% de los retiros efectuados por empresas generadoras que mantengan contratos de suministros firmados con fecha posterior al 1 de agosto de 2007, deben provenir de fuentes no convencionales. Porcentaje que debe incrementarse 0.5% anual a partir de 2015, obteniendo un 10% de la generación en 2024.

Para cumplir con lo impuesto, las empresas generadoras que no poseen centrales ERNC propias, tienen la facultad de transar energía con empresas ERNC.

- Ley 20.698: Modifica Ley 20.257.

Propicia la ampliación de la matriz energética fijando una nueva obligación de penetración de ENRC, aplicables a los contratos generados después del 1 de Julio de 2013. Establece una cuota del 6% en el año 2014, la que aumenta hasta llegar al 20% en 2025.

ii. Biocombustibles

- Decreto N° 11/2008, Ministerio de Economía.

Define las especificaciones de calidad para biodiesel y bioetanol, autoriza la mezcla de 2% y 5% con petróleo diesel y gasolina, y anuncia el registro de personas e instituciones en la SEC².

- Circular N° 30/2007, SII.

Indica que los biocombustibles no son afectos al impuesto específico según Ley 18.502/1986.

- Ley N° 20.339/2009 modifica el DFL N°1/1979 del Ministerio de Minería,

Incorpora los biocombustibles como combustibles líquidos y otorga facultades a la SEC para su fiscalización.

- Resolución Exenta N° 746, SEC.

Norma técnica para análisis y/o ensayos para bioetanol y biodiesel

iii. Sobre el Medioambiente

De acuerdo a la Ley 19.300, existen instrumentos de gestión ambiental para el desarrollo previo de un proyecto que consiste en un Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Dentro de las obras susceptibles de requerir dichos procedimientos están las líneas de transmisión eléctrica y sus subestaciones, además de las centrales generadoras mayores a 3MW.

Lo anterior se puede explicitar mediante la realización de un Estudio de Impacto Ambiental, el cual se realiza a proyectos que, entre otras cosas, podría provocar un impacto a la salud y el medio ambiente. El documento debe definir, según las características del proyecto, los efectos ambientales y los medios de mitigación que se han propuesto para lidiar con ellos.

² Secretaría de Electricidad y Combustible

2.2. Políticas Públicas y Subsidios a ERNC

Durante el último tiempo, se han impulsado, desde la tribuna política incentivos que buscan la expansión de proyectos ERNC, en el ámbito de la energía, tanto eléctricos como combustibles. En particular, la utilización de diversos fondos para el financiamiento y la exclusión de pago de impuesto, generan que al evaluar los proyectos, se incentive la inversión.

Parte del esquema de incentivos políticos a la inversión, han sido las leyes referentes al control de barreras de entrada al sistema de las empresas pequeñas de generación o de ERNC, detalladas anteriormente.

Entre los instrumentos de fomento del Estado, se encuentran:

i. Financiamientos CORFO:

- Apoyo al financiamiento de estudios de pre inversión:

Subsidios para el desarrollo de los estudios que permitan evaluar la viabilidad técnica y económica de los proyectos ERNC. Con ello se pretende apoyar y acelerar el desarrollo del mercado de este tipo de proyectos.

- Programa Todo Chile:

Consiste en un subsidio de hasta el 50% del costo de los estudios o hasta el 2% de la inversión estimada y sin sobrepasar los 60.000 USD. Se aboca al fomento de proyectos de inversión en las regiones de Chile distintas a la Metropolitana. Los proyectos que se consideran elegibles son aquellos factibles de conectarse a los sistemas eléctricos y que sean consideradas ERNC.

- Programa Preinversión para proyectos ERNC para la Región Metropolitana:

El aporte de hasta un 50% del costo total del estudio o asesoría, siempre y cuando el subsidio no puede superar el 2% del valor estimado de la inversión del proyecto, ni la suma de 1.700 UF. Cofinancia a aquellas empresas que demuestren ventas anuales netas que no excedan de 1.000.000 UF, con proyectos a materializarse en la Región Metropolitana y que se encuentre evaluando proyectos de inversión en generación de ERNC de pequeño tamaño, por montos de inversión iguales o superiores a 12.000 UF.

- Cofinanciamiento de estudios avanzados de ingeniería o de ingeniería de detalle de proyectos de ERNC

Es un instrumento de apoyo a la preinversión que complementa los subsidios otorgados actualmente de manera de acelerar la finalización de los estudios de preinversión con una cooperación financiera no reembolsable del Gobierno Alemán. Las empresas que postulan al beneficio deben encontrarse en etapas avanzadas del desarrollo del proyecto habiendo finalizado al menos los estudios de prefactibilidad técnica y económica.

- Apoyo al financiamiento de la inversión

Se trata de líneas de crédito de largo plazo que pueden ser destinadas a financiar proyectos de ERNC, a las cuales se puede acceder por medio de la Banca Local. Entre ellas se encuentra, la línea de crédito para financiar inversión en medio ambiente, financiada con aportes del Gobierno Alemán. A través de ella se puede optar a créditos de US\$ 5 millones, con condiciones de plazos y tasas preferentes respecto de la Banca.

ii. Financiamientos Internacionales

- Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

Chile ratificó el Protocolo de Kyoto en agosto de 2002. Este Protocolo que entró en vigencia en febrero de 2005, determina que para el período 2008-2012, los países desarrollados deberán reducir el 5% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI).

Los países en vías de desarrollo como Chile, no tienen obligaciones de reducción de emisiones, sino más bien tienen la posibilidad de obtener aportes financieros a proyectos, postulando a los Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) que fueron establecidos por el Protocolo.

Hasta julio de 2007 se habían registrado 16 proyectos chilenos de energías renovables, principalmente proyectos hidroeléctricos y de biomasa.

Las características que deben tener los proyectos que pueden postular a los MDL son las siguientes:

- El proyecto debe contribuir al desarrollo sustentable del país.
 - El proyecto debe contar con la aprobación de la Autoridad Nacional designada.
 - El proyecto debe contribuir a reducir los GEI.
 - Las reducciones de GEI deben ser reales, medibles y de largo plazo.
- FMAM:

El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) reúne a los Gobiernos de 183 países miembros —en asociación con instituciones internacionales, organizaciones de la sociedad civil y el sector privado— para abordar cuestiones ambientales de alcance mundial.

Abarca proyectos que generan beneficios para el medio ambiente mundial, pues establecen un nexo entre los desafíos ambientales locales, nacionales e internacionales, y promueven medios de subsistencia sostenibles.

El FMAM, es hoy la mayor fuente de financiamiento para proyectos destinados a mejorar el medio ambiente mundial. Ha asignado US\$11500 millones —y ha movilizado cofinanciamiento por un valor superior a los US\$57000 millones— para más de 3215 proyectos en unos 165 países en desarrollo y con economías en transición. A través de su Programa de Pequeñas Donaciones (PPD), también ha concedido directamente más de 16030 pequeñas donaciones a organizaciones no gubernamentales y de base comunitaria.

Existen, además, algunos incentivos que se están aún discutiendo en el Congreso, como la Ley de Medición Neta de Energía que busca establecer el sistema de medición neta en el mercado energético nacional, para incentivar el uso de ERNC.

La medición neta es un sistema que permite a los consumidores generar energía limpia, transformándose en productores de electricidad doméstico, y entregar sus excedentes a la red pública de suministro, descontando de su cuenta el "costo evitado" de generación, por lo tanto pagan a la distribuidora sólo aquello que consumen por sobre su propia producción.

Además, el Gobierno de Sebastián Piñera, a través del Ministerio de Energía, se ha mostrado favorable a la cesión de terrenos a inversionistas que desarrollen proyectos de ERNC.

2.3. Experiencias en Materia de Bioenergía en Chile

En materia de utilización de ERNC, Chile ha tenido un crecimiento notable, impulsado principalmente por la Ley 20.257. En materia de la bioenergía, las empresas que han explotado esta faceta han sido justamente las relacionadas a la actividad forestal.

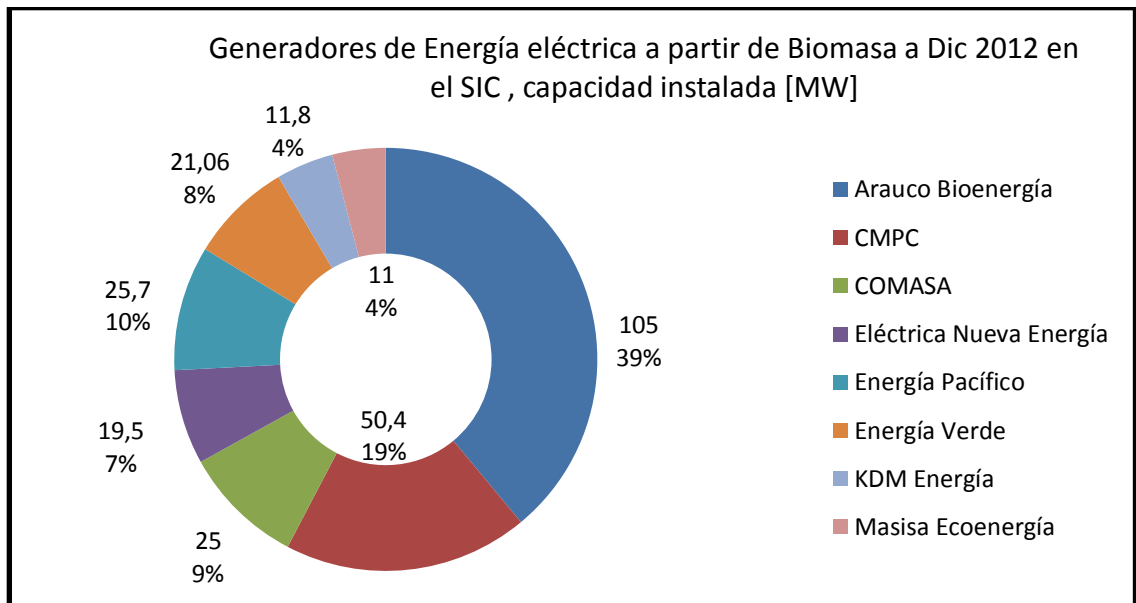


Figura 1: Generadores de Energía Eléctrica a partir de Biomasa a Dic 2012 inyectada al SIC.
Fuente: Elaboración propia a partir de Balance Nacional de Energía 2012

De las empresas señaladas, sólo KDM utiliza biogás para la generación, a partir de los desechos orgánicos generados en Santiago. En general, son empresas del área industrial maderera, papelera y celulosa, que en conjunto para fines de 2012 tenían una potencia instalada de 269,6MW.

Habitualmente, estas empresas inician en la generación con el objetivo de cubrir sus propias necesidades de energía, sin embargo los grupos grandes generan excedentes que venden a la red. Las tecnologías utilizadas en las plantas de generación antes descritas son del tipo termoeléctrica de combustión directa y se utilizan plantas de cogeneración para aumentar la eficiencia del proceso cuando así se requiere. En la Tabla 1, se presenta la evolución de las plantas de generación de la empresa Arauco y Constitución S.A., desde el 2006 a 2011. Esta empresa cuenta con la mayor capacidad instalada en conjunto, generando la energía necesaria para su autoabastecimiento e inyectando a la red los excedentes desde 1996, año en el que se instaló la primera planta.

Adicionalmente, un proyecto interesante es el desarrollado por COMASA, donde proyectan la recolección y plantación del material a utilizar, en su caso paja, para el abastecimiento a diferencia de las otras empresas, que utilizan los desechos del proceso productivo primario.

Tabla 1: Generación de Electricidad de las plantas instaladas por Arauco y Constitución S.A. hasta el 2011.

Planta	Inicio de Operaciones de Inyección de Excedentes al SIC	Capacidad instalada		Generación GWh					
		MW	% del Total	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Chile									
Arauco	1996	127	22%	653	586	622	631	372	760
Constitución	1996	40	7%	229	223	223	231	171	222
Licancel	2004	29	5%	127	56	121	120	110	136
Valdivia	2004	140	25%	559	617	597	655	601	488
Nueva Aldea (Paneles)	2004	30	5%	208	215	233	230	217	237
Cholguán	2003	29	5%	185	187	219	197	210	226
Nueva Aldea (Celulosa)	2006	136	24%	101	522	707	787	648	563
Horcones	2004	24	4%	6	60	7	2	7	12
Nueva Aldea 2	2006	10	2%	1	9	0	0	0	0
Total Chile		565	100%	2.069	2.475	2.729	2.853	2.336	2.644
Argentina									
P. Piray	2002	38	49%	199	178	146	178	199	225
P. Esperanza	N/A	40	51%	311	310	311	289	302	290
Total Argentina		78	100%	510	488	456	467	500	515

Fuente: Arauco, Reporte de Sustentabilidad 2011



Figura 2: Planta de Almacenamiento de Materia Prima COMASA

Fuente: www.comasageneracion.cl

Además, ha sido importante el desarrollo de las capacidades tecnológicas de generación limpia y para ello se ha contado con el apoyo de empresas expertas extranjeras, como el caso de Masisa, que junto a Dalkia³ ha desarrollado un proyecto de cogeneración de una capacidad de 11MW, cuyos excedentes se inyectarán a la red. Una de las principales ventajas del sistema de producción de empresas no relacionadas con la producción de energía como son la mayoría de las listadas, a excepción de Energía Verde, relacionada al grupo AES Gener, es que se descentraliza la producción y se diversifica la matriz, por lo que la dependencia de los factores externos para la generación de las grandes empresas que producen a partir de combustibles fósiles, disminuye.



Figura 3: Planta de Generación Masisa, Cabrerros, VIII Región.

Fuente: www.masisa.com

En el ámbito de los biocombustibles, ENAP ha realizado los primeros acercamientos a la industria de biogeneración a partir de material forestal, junto al Consorcio Maderero y a la Universidad de Chile, han fundado el consorcio BIOCOSMA, destinado principalmente a estudiar tecnologías de conversión de la materia lignocelulística y determinar el potencial existente para llevar a cabo proyectos de esta categoría, con la que se pretende obtener una alternativa en la producción de combustibles.

En esta vía, se han publicado variados estudios de la Universidad de Chile que promueven el desarrollo de biocombustibles desde esta fuente. Un ámbito importante que falta por desarrollar es un análisis de costos de inversión y operación de detalle, para lo que se requiere una definición en materia de tecnologías a emplear, lo que se hará tras definir los parámetros e índices que determinen la mejor vía de conversión.

³ Dalkia es una compañía europea que ofrece servicios de eficiencia energética y medioambiental.

Por otro lado, un segundo Consorcio interesado en el desarrollo de proyectos de este tipo está a cargo de la Universidad de Concepción, la Universidad Católica de Valparaíso, Fundación Chile, Arauco, CMPC y Masisa. Juntos, en el consorcio BioEnercel esperan desarrollar un conjunto de proyectos que, en forma integrada, propongan una alternativa viable al problema energético de Chile, a partir de adaptar tecnologías y la formación de capacidades humanas que permiten implementar una industria de biocombustibles. Ambos consorcios están en funcionamiento desde 2008, con el apoyo del Programa Innova Chile, financiados mediante CORFO⁴.

Se debe destacar la formación de tres consorcios adicionales en 2010, con el fin de desarrollar proyectos de conversión a biocombustibles en base a algas.

2.4. Experiencia Internacional

La experiencia internacional en el área de desarrollos de ERNC, y en particular de la biomasa, está fundada en las estimaciones de requerimiento de la demanda, con un combustible fósil que se agota y con altas expectativas de consumo de los países en crecimiento. En particular, hoy los países de mayor consumo son China e India, abarcando 21 % del consumo total al año.

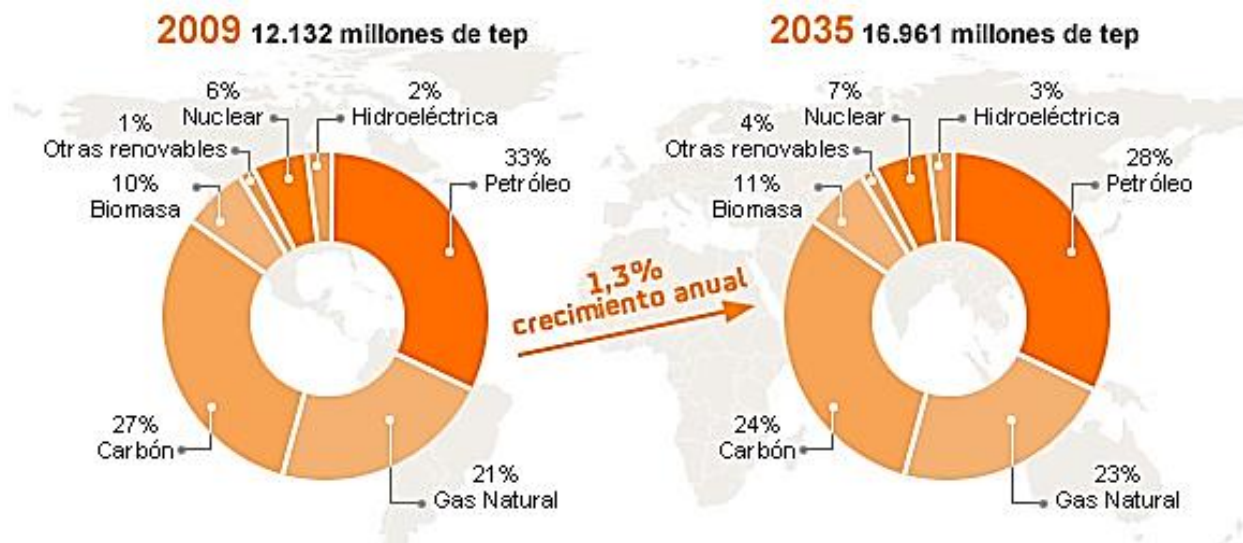


Figura 4: Perspectivas de Crecimiento de la demanda mundial de energía primaria.
Fuente: Dirección de Estudios y Análisis del Entorno de Repsol.

La Figura 4, muestra las perspectivas de demanda de combustible, desarrollado por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) en el WEO⁵

⁴ Concurso Nacional de Consorcios Tecnológicos Empresariales de Investigación en biocombustibles a partir de material lignocelulósico

⁵ World Energy Outlook: Publicación que edita cada año la AIE, junto a los países miembros de la OCDE

2011, donde se observa la importancia que adquieren las fuentes de energía renovables, aun cuando el proceso se muestra muy lento, el inminente agotamiento de los recursos fósiles abre una ventana a nivel mundial para el desarrollo de energías alternativas, que además son limpias.

i. El caso de Dinamarca

Durante la crisis del petróleo, en 1973-74, dos países fueron 99% dependientes de la importación energética: Japón y Dinamarca. Para entonces, fue un asunto de prioridad nacional buscar nuevas soluciones sustentables de generación de su propia energía.

La solución fue buscar en las ERNC y potenciar las propias capacidades basados en los recursos naturales disponibles. Hoy en día, Dinamarca es la nación de mayor contribución de energías renovables a la matriz de electricidad de la Unión Europea, han desarrollado las tecnologías de carbón limpio (biomasa) más eficientes a nivel mundial y son líderes en soluciones energéticas avanzadas, especializándose en el rubro y ofreciendo soluciones tecnológicas a los demás países. Las estadísticas de Dinamarca son:

- La energía eólica contribuye alrededor de un 25% del consumo de electricidad.
- 94% de la basura doméstica se incinera para la producción de energía
- 10% del consumo de electricidad y 25% del consumo de calefacción es a partir de biomasa.
- Uno de los más importantes logros tiene que ver con poseer el consumo de energía más bajo por unidad del PIB en la Unión Europea, desacoplando estas estadísticas del crecimiento económico a principios de los 90.

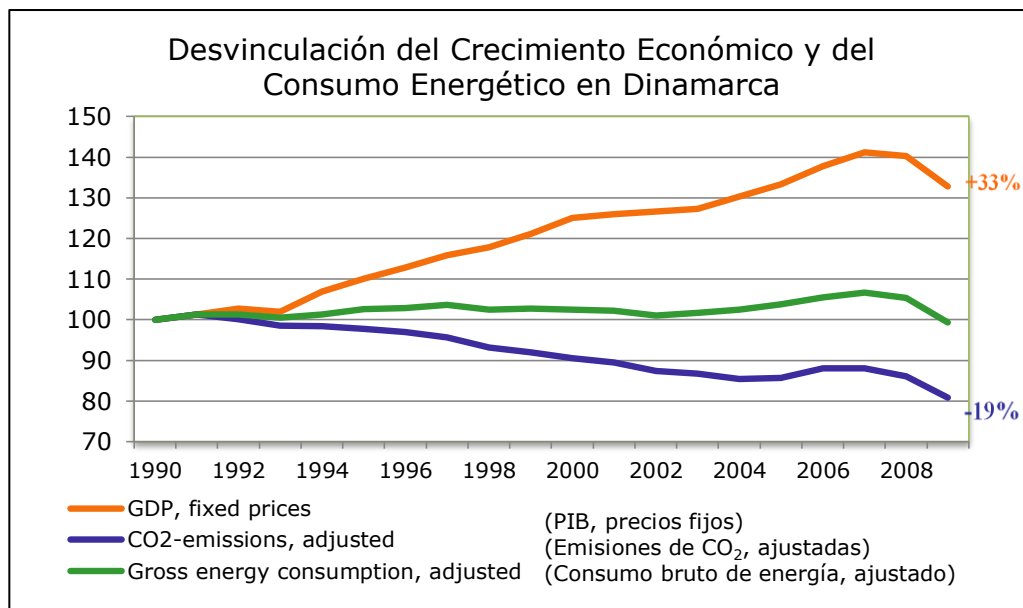


Figura 5: Crecimiento económico y consumo energético Danés

El mercado de energías danés es diferente en su matriz, por las políticas que el nuevo sistema de abastecimiento de energía impuso en período de crisis. La producción y el consumo son fuertemente fiscalizados para el cumplimiento de las normas que impusieron la eficiencia energética y los incentivos en la generación limpia, a través de los incentivos de libre impuesto y subsidios. Si bien se consolida la generación por la implementación de políticas públicas que protegen el sistema de generación, también se aprovechan los recursos propios, estableciendo total independencia energética.

ii. Biocombustibles en Brasil

Desde la crisis del petróleo en la década de los 70, Brasil ha incentivado el uso de combustibles renovables como alternativa a los derivados del petróleo y hoy, al margen de los factores económicos, la búsqueda de dichas alternativas ha acabado por adquirir una gran importancia, también por razones medioambientales. En esta línea, cabe destacar soluciones que reducen el impacto en el medio ambiente, como el alcohol derivado de la caña de azúcar, las nuevas investigaciones e inversiones al desarrollo y la aplicación del biodiésel.

De acuerdo al amplio crecimiento y a la disponibilidad y alto potencial de los recursos, en este caso caña de azúcar, Brasil ha instaurado el mercado más grande de producción de biocombustibles a nivel mundial. La experiencia desarrollada en este país incluye una modificación completa de las tecnologías que utilizan los vehículos del mismo país, dado que se han tenido que adaptar a un combustible con mezclas de alcohol etílico, producido mediante el proceso de fermentación de la caña de azúcar.

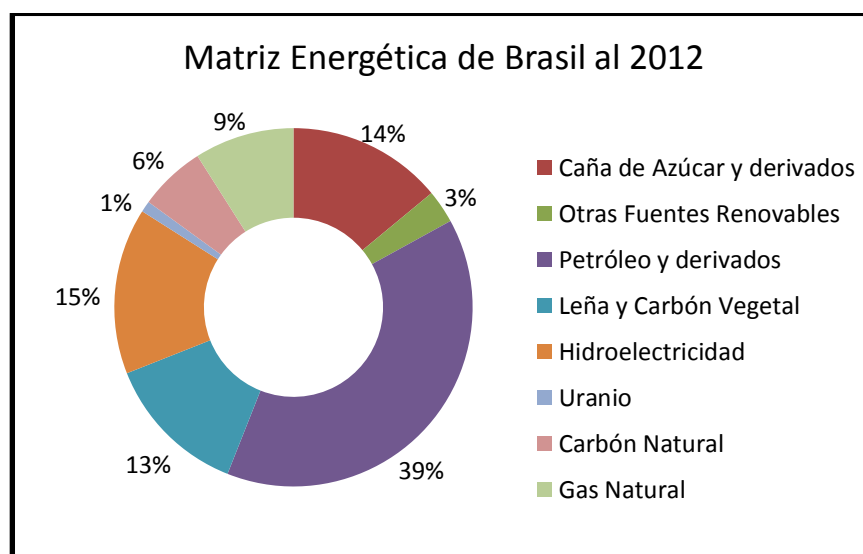


Figura 6: Matriz Energética de Brasil al 2012.
Fuente Ministerio de Energía y Minas de Brasil

Brasil al igual que Chile tiene una ventaja comparado con otros países y es que tienen una gran extensión de selvas y bosques que son capturadores naturales de CO2 y que contribuyen en la reducción de las emisiones a la atmósfera.

En los últimos años Brasil ha promulgado reformas en su política energética, la principal, enfocada al impulso de los biocombustibles, en particular, al etanol donde en un principio cedió herramientas destinadas a crear oportunidades para enfrentar las barreras de entrada y que hoy en día tiene por enfoque lograr la competencia del combustible apostando también a que los mercados internacionales se abran a la utilización de los biocombustibles como en Estados Unidos con el proyecto "15 para el 15" donde se quiere que el 15% del combustible provenga de los biocombustibles para el año 2015 donde Brasil sería uno de los grandes beneficiados.

El otro punto de vista que ha impulsado un buen enfoque de la eficiencia energética tuvo que ver con los años de racionamiento debido a la falta de agua y al exceso en el consumo de energía, donde se ha cambiado la política energética con el objetivo de tener planes de almacenamiento de agua y combustibles en los embalses.

3. Cuantificación de los recursos lignocelulósicos

La materia prima y su caracterización definen los parámetros más importantes en el diseño de proyectos basados en biomasa forestal. Las características principales a considerar tienen que ver con **el origen de la biomasa, los volúmenes de extracción y períodos de abastecimiento, la distancia al lugar de conversión y características físicas como el contenido de humedad y poder calorífico del material combustible.**

La lignocelulosa, en particular, es el principal componente de la pared celular de las plantas. Esta biomasa producida por la fotosíntesis es una fuente de carbono renovable, con potencial de reemplazar en parte el uso de los combustibles fósiles dada su composición rica en carbono. Está formado básicamente por celulosa, hemicelulosa y lignina.

El aprovechamiento de esta clase de biomasa se considera de carbono neutral, dado que el carbono producido en su procesamiento fue consumido durante su vida útil mediante fotosíntesis. Adicionalmente, no existe competencia por suelos agrícolas, puesto que se trata de un residuo que en su caso alternativo es desechado y no necesita cultivarse en su uso residual.

La producción de residuos forestales a utilizar depende del tipo de bosque, la diferencia fundamental radica en el uso final de cada tipo; **comercial para plantaciones, y con fines de preservación para bosques nativos.**

El uso de material proveniente de bosques nativos, normados a partir de la Ley N° 20.283, estipula planes de manejo para fomento forestal y recuperación del bosque. Las especies que se encuentran en él, son más variadas en sus características y requieren de planes de conservación de bosques y entorno para su utilización, que incluyen cuidado de suelos, agua y humedales.

En este tipo de bosques, se puede distinguir entre bosques adultos y renovales. Los bosques adultos, en términos generales, están bastante degradados por cuanto fueron sometidos a una extracción selectiva en el pasado lo que tuvo como consecuencia actual, un bosque poco rentable para producción de empresas madereras y celulosas. La baja rentabilidad es consecuencia de su alejamiento de los centros de actividad económica rural, de la carencia de vías expeditas de acceso, de la deteriorada calidad de la madera y del bajo valor forestal por unidad de superficie de los bosques remanentes, ya que en el pasado se extrajeron las mejores especies y ejemplares (INFOR, 2008).

Los bosques nativos renovales representan 3,5 millones de hectáreas y son formaciones constituidas por árboles jóvenes que surgen como consecuencia de las extensas áreas que en el pasado se quemaron por incendios incontrolables originados en su mayoría por faenas para la habilitación de tierras agrícolas. (CNE, GTZ, 2008).

La estimación de la biomasa proveniente del manejo del bosque resulta compleja y requiere la implementación de prácticas y métodos para el manejo sustentable, tanto de plantaciones como de bosques naturales. El esquema de la Figura 7 presenta las técnicas de manejo por estructura forestal de bosque nativo.

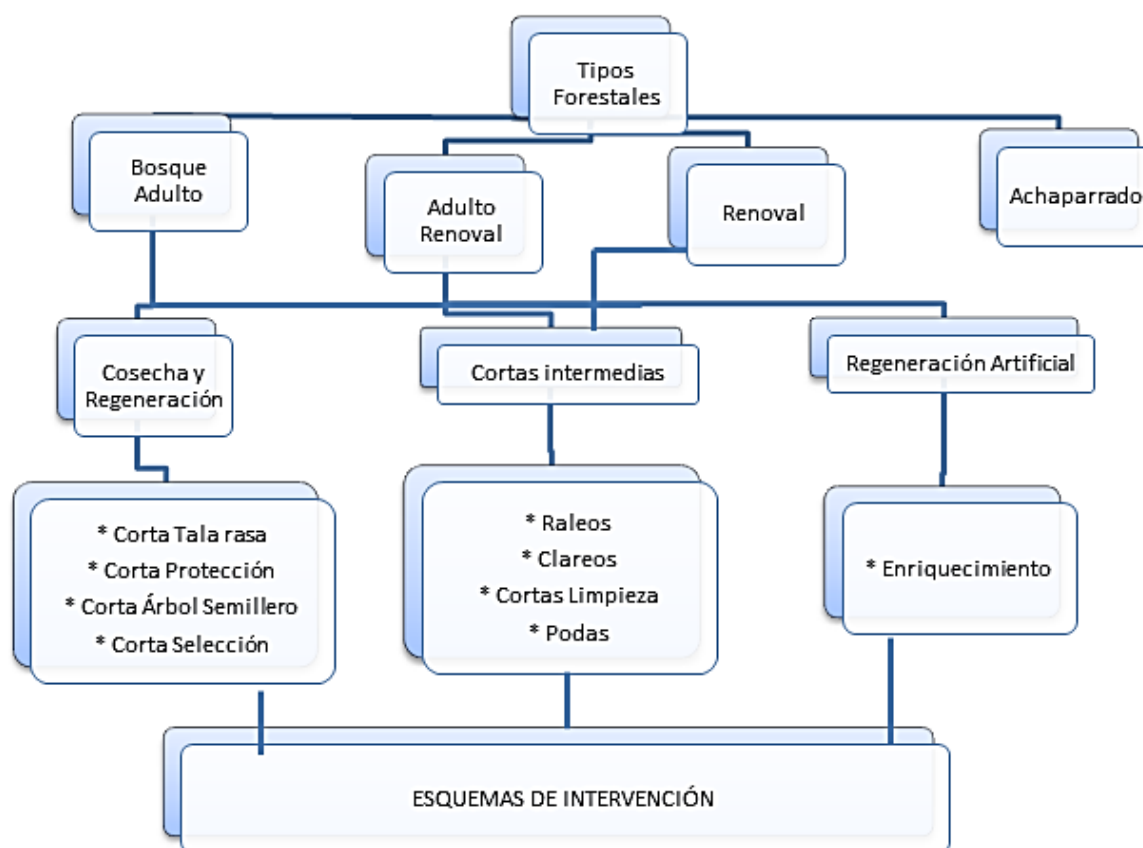


Figura 7: Esquemas de intervención del bosque nativo por estructura Forestal.

En particular, para realizar una aproximación a los volúmenes de biomasa disponible en el país, es necesario determinar la superficie de bosque nativo, segregado por tipo forestal de interés, descontando en primer término la superficie de bosque nativo presente en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE); los bosques nativos con estructura de bosque achaparrado, los bosques con una altura menor a los 8 metros, aquellas superficies clasificadas como bosques abiertos, los bosques establecidos en pendientes superiores al 60% y finalmente descontar aquellas superficies ubicadas en zonas de protección, especialmente asociadas a cursos de agua. (Patricio Emanuelli Avilés, GTZ 2005).

Por su parte, las labores de raleo y limpieza de este tipo de bosques suele ser compleja debido a la rigidez de las reglamentaciones que los protegen. Las reglas generales para la obtención de biomasa en forma de residuos de manejo forestal incluyen restricciones para la extracción de biomasa, el que considera el retiro del 75% del máximo potencial de los cortes finales, del 45% de aclareos forestales, del 20% de los tocones de los cortes finales y del 25% de los adicionales (The World Bank, 2010).

Actualmente, la participación de los bosques nativos en la industria forestal es nula. Esto se debe a que no es una alternativa de negocio por los bajos rendimientos en madera de calidad y a los altos costos que implica su explotación. Por esta razón, es necesario buscar una alternativa de utilización de la madera baja en calidad que se obtiene del manejo del bosque nativo, especialmente los renovales que son formaciones jóvenes que presentan una necesidad creciente de un manejo forestal.

La biomasa proveniente de los bosques de tipo comercial, en cambio, se caracteriza por la utilización de especies leñosas de corta rotación que son denominadas comúnmente plantaciones. En el caso de éstas, las normas aplicables se rigieron por el DFL 701, a modo de incentivar el uso de suelos dañados de pequeños agricultores con el fin de mejorarlos y hacer de la actividad forestal un negocio sustentable, mediante bonificaciones. A partir de la promulgación de la ley de fomento forestal, se cubren los ítems que deja la expiración del decreto a fines del 2012, y que considera restricciones de igual peso que para los bosques nativos.

Los bosques comerciales se talan completamente al finalizar su ciclo de crecimiento para su utilización por empresas madereras. Sin embargo, entre periodos de forestación y tala también se puede obtener biomasa a partir de labores de raleo y limpieza. Los residuos de los cortes finales y de las maderas obtenidas que no puedan comercializarse también pueden ser usados con fines energéticos.

En la experiencia actual, se observa que la penetración de la biomasa como fuente de energía se ha desarrollado fundamentalmente por industrias que utilizan sus residuos para la producción de energía necesaria de sus propios procesos, evitando además problemas medioambientales importantes derivados de la acumulación en el medio de dichos residuos.

Hoy en día, existen 13 centrales eléctricas cuya fuente primaria de combustible es biomasa. A excepción de la central Russfin (Timaukel, Provincia de Tierra del Fuego) están todas conectadas al SIC (Sistema Interconectado Central). Se estima que anualmente estas centrales necesitan alrededor de 3,3 millones de TH (toneladas de biomasa al 55% de humedad) para satisfacer la Potencia Instalada equivalente a 530MW (Central Energía, 2012 y Vaccarezza, 2010). Sin embargo, la información del

origen de la materia prima no es pública y por tanto de difícil acceso para catastro y se considera biomasa de un segundo ciclo productivo (residuos de la industria primaria forestal).

Una alternativa promisorio es determinar la potencialidad de cultivar especies dendroenergéticas cuyo fin no es producir celulosa ni madera y sus derivados, sino biomasa, transformándose en materia prima para producir bioenergía orientada al consumo industrial o doméstico. En lugar de pino y eucalipto, especies para producción de la industria forestal, se usan especies de rápido crecimiento, alta generación de biomasa y con rotaciones cortas a tala rasa (aprovechamiento total del árbol), de no más de cuatro o seis años en promedio. Las especies preferidas son del género *Populus* sp como el álamo, sauces, aromos, la *Acacia melanoxylon* y los *Eucalyptus nitens*, *globulus* y *camaldulensis*, entre otras. Todas exóticas e introducidas.

Este tipo de plantaciones ofrece una biomasa más homogénea respecto de la que se comercializa en la actualidad y con un abastecimiento más seguro. Las zonas más promisorias para el cultivo dendroenergético son terrenos planos húmedos o con fácil acceso a agua en las regiones del Maule, Biobío y La Araucanía, que han ido perdiendo gradualmente su capacidad de generar rentabilidad con fines agrícolas tradicionales y también suelos agrícolas marginales o desaprovechados.

Las plantaciones dendroenergéticas están consideradas en el Proyecto de Ley de Fomento Forestal, que contempla incentivos a propietarios de terrenos de aptitud preferentemente forestal (APF) orientados al establecimiento y manejo de las plantaciones con fines ambientales y productivos. Los incentivos destinados a establecer plantaciones dendroenergéticas están orientados solo a privados que sean propietarios de terrenos APF, con el fin de asegurar un buen tratamiento del suelo y cosechas rentables.

El desarrollo de la normativa aplicable pretende que estas plantaciones se establezcan siguiendo los mismos procedimientos establecidos por CONAF para una plantación forestal tradicional, dado que los proyectos en estudio de plantas de generación de energía a partir de biomasa implican generar convenios con propietarios forestales para que sean ellos los que entreguen la biomasa requerida a las futuras plantas de generación y por tanto, la ley de fomento forestal replicará los beneficios a este sector. El objetivo que se persigue con lo anterior, es fomentar la implantación de un recurso forestal para ser utilizado por una industria asociada, y así los beneficios pueden ser cuantificados desde el punto de vista económico, ambiental y social.

En términos económicos, que el flujo de caja sea positivo en este negocio dependerá de los costos de establecimiento, los cuidados culturales de los sembradíos en los primeros años y el rendimiento esperado para el sitio utilizado al cabo del ciclo de corta y cosecha.

Consortios conformados alrededor de estas alternativas han determinado la capacidad por hectárea de producción y los costos asociados, a utilizar en la evaluación del presente trabajo. En particular, el consorcio BIOCOTSA desarrolló un análisis técnico bastante detallado en el marco del estudio del potencial para generación de biodiesel de segunda generación.

Para la estimación de la biomasa disponible, se utiliza el catastro realizado en 2013 por la CONAF y la Universidad Austral de Chile, cuya metodología se describe a continuación.

3.1. Estimación de Biomasa Aprovechable en Bosques Nativos

En el estudio desarrollado por la CONAF y la Universidad Austral de Chile denominado "*Proyecto de Evaluación de Mercado de Biomasa y su Potencial en Chile*", cuyo informe final se publicó en junio de 2013, se determinó la superficie de bosque nativo que puede ser incorporada en actividades de planificación de manejo silvícola con el propósito de generar una oferta de biomasa sostenida para su utilización energética.

El proyecto contempló la zonificación, determinación de especímenes por especie y cuantificación de la biomasa aprovechable con un enfoque de conservación a través de la planificación de cortas intermedias (raleos). La aplicación de raleos significa la extracción de un porcentaje de árboles del bosque, intervención silvícola que permite favorecer el crecimiento y mejorar la calidad de los árboles remanentes, manteniendo una cobertura arbórea permanente.

La metodología utilizada para las estimaciones principales de volumen, superficies y ciclos de corta, se resume a continuación:

3.1.1. Superficies a considerar

Se enfocó en estimar a nivel regional la superficie neta de bosque nativo que puede ser incorporada en actividades de planificación de manejo silvícola con el propósito de generar una oferta de biomasa aprovechable. Esta caracterización regional puede no ser representativa de las condiciones locales de la región. En particular, la superficie de las regiones puede distorsionar el valor por área de sectores poblados, por lo que se sectorizaron estos lugares para abarcar áreas efectivamente explotables.

En el estudio se considera el recuento de las superficies netas de disponibilidad de materia prima utilizable en fines dendroenergéticos. Esto considera la exclusión de bosque nativo que presenta restricciones de uso de acuerdo a la normativa legal y ambiental vigente, y a las observaciones de expertos consultados. Estas restricciones son

básicamente por especies en protección, ecosistemas de humedales o ríos, zonas de interés turístico o protección indígena y zonas de difícil acceso por pendientes o altura.

3.1.2. Volumen de Biomasa aprovechable

El cálculo de las existencias volumétricas en pie para la superficie neta de bosque nativo, se realizó con la utilización del procesamiento de parcelas del inventario nacional extensivo del proyecto catastro (Universidad Austral de Chile, CONAF, 2013), lo cual permitió obtener información respecto a la estructura, composición y parámetros dasométricos (de conservación, cultivo y aprovechamiento final para determinar crecimiento y producción forestal) de cada tipo de bosques, importante para la simulación de cortas intermedias.

El procedimiento divide la población forestal en bosque adulto, adulto renoval y renoval, y se realizó para cada una de las regiones en estudio de manera individual. Cabe hacer notar que los bosques achaparrados no tienen valor energético ni forestal alguno, por lo que se excluyen de la cuantificación.

Lo más importante de esta diferenciación es el volumen aprovechable considerado, que en los dos primeros casos se basa en las acciones de raleo de la materia prima. Para lo anterior, se determinan los volúmenes de producto según el tamaño y la calidad de la biomasa extraída, para consideraciones de volúmenes fustales (tronco) y de copa de cada especie, que darán origen a biomasa debobinable (utilizable en capas), aserrable o leña. En el caso de los árboles renovales, se asume que la totalidad del árbol se destinará a uso energético, sin existir desagregación a nivel de productos.

Finalmente, la biomasa potencial es calculada al obtener los volúmenes aprovechables y multiplicarlos por la densidad básica (base peso seco) de cada especie (alrededor de 70% del peso neto en bosque nativo).

3.1.3. Planificación de Ciclos de corta

Para la estimación de biomasa disponible anual, se determinaron ciclos de corta que permiten la extracción de biomasa de manera sostenida. Esto es, que permitan que el bosque recupere la biomasa extraída en un plazo determinado, lo cual dependerá de la cantidad de biomasa extraída y de las tasas de crecimiento de los árboles remanentes, asegurando la sustentabilidad del recurso.

Para que los ciclos de corta se aplicaran a todas las especies, se consideraron extracciones proporcionales al área basal de cada especie, consiguiendo para el caso de los bosques de estructura adulto y adulto

renovar la recuperación de conjuntos madereros simultáneamente con volúmenes aprovechables para uso energético. El ciclo de corta para cada estructura de bosque quedó determinado por el número de años requerido para recuperar el volumen bruto fustal extraído en la intervención de raleo, luego el flujo anual queda determinado por el volumen de raleo sobre la tasa de crecimiento de cada especie en estudio. Lo anterior lleva a que los flujos varíen por especie y por estructura de bosque.

3.2. Estimación de Biomasa Aprovechable en Plantaciones

La biomasa de plantaciones debe considerar especies de ciclo de corta pequeño, con lo que se puede renovar la materia prima en poco tiempo. En el caso de Chile, son las industrias madereras las que han desarrollado las plantaciones en terrenos al sur del país, reemplazando bosques nativos por especies de pino radiata y eucaliptus. La utilización del material es completo, a pesar que se genera biomasa en las labores intermedias de raleo y poda, que se puede cuantificar.

La utilización del material debe considerar un ciclo de plantación, crecimiento, cosecha y reforestación, por lo que los costos aumentan. Los cuidados del suelo en el que se genera la reforestación debe tener ciertas restricciones, para que puedan considerarse los nutrientes que requiere la especie para volver a crecer, debidamente regulado por la CONAF. Las plantaciones deben ser consideradas cuando se hace uso de los bosques nativos en sus especies renovales, las que se utilizan completamente.

Las plantaciones que hoy existen, están constituidas básicamente por especies de pino radiata y eucaliptus. Los propietarios de ellas son quienes hicieron uso del bosque nativo en el pasado, y tal explotación significó su reforestación obligatoria. Uno de los puntos importantes para la utilización de los suelos, es que para la explotación de las especies, no es necesario ser dueño de las hectáreas, muchas veces públicas o pertenecientes a privados. Esto conlleva a una serie de problemáticas que tienen que ver con el estado y conservación de los dueños. Por otro lado, el análisis y los ciclos de corte de material, se deben entender con autoridades o entendidos en el tema, en este caso ingenieros forestales que realicen una planificación de los ciclos de cosecha.

En el caso de plantaciones de tipo forestal, las empresas de la industria han sabido dar valor agregado a sus residuos, por lo que la disponibilidad de los residuos es baja o casi nula. Adicionalmente, no existe información detallada

de los volúmenes generados, por lo que los residuos de la industria forestal se considerarán en un uso alternativo.

Un reciente estudio, llevado a cabo por el consorcio BIOCOSMA, conformado por la Universidad de Chile, el consorcio maderero y ENAP, constituidos con el fin de desarrollar proyectos de investigación en producción de biodiesel a partir de material lignocelulósico, como desarrollar tecnologías sustentables para la predicción, cuantificación, cosecha, manejo y transporte de la biomasa para producción de biodiesel, y cultivos bioenergéticos, ha planteado la necesidad de estudiar las plantaciones de dedicación exclusiva a la producción de material para energía. De acuerdo a las caracterizaciones que se han desarrollado bajo éste marco de estudio, se analiza el potencial de éste ítem.

3.3. Resultados

En el caso del bosque nativo, se obtuvo que las mayores tasas de crecimiento para los distintos tipos forestales observados se dan en los de tipo renoval y adulto renoval, por lo que son las especies prioritarias a considerar en un eventual manejo dendroenergético. Ambos abarcan cerca del 48% del bosque en estudio. Considerando la superficie neta, tasas de crecimiento y stock de biomasa disponible, la mayor densidad se focaliza en las regiones más australes y las especies son variadas por región.

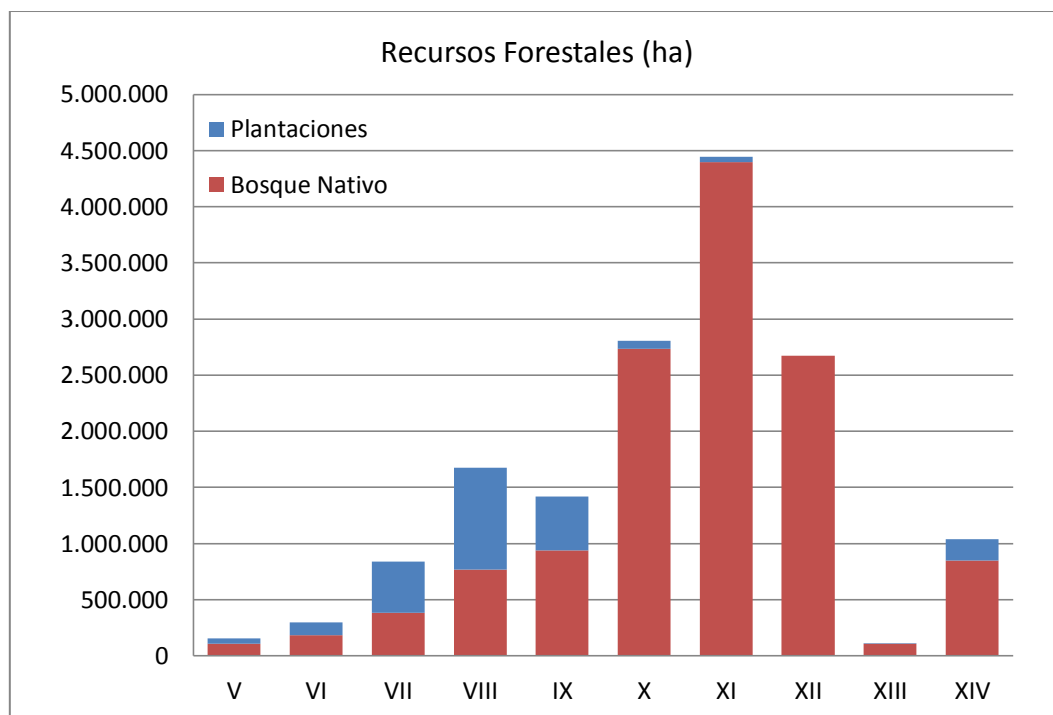


Figura 8: Distribución de Bosques por tipo en Regiones.

En la Figura 8 (Tabla 22), se muestra la distribución de la superficie de los bosques en Chile. Se observa que las zonas con más cantidad de bosques están concentradas en las regiones australes, mientras que en las regiones donde se ubica la industria primaria de la madera (VII a IX), el bosque nativo está en igualdad de proporción a las plantaciones.

Tabla 2: Superficie Forestal por Regiones, 2012

Región	Bosque nativo	Plantaciones	Total	%
V	106.376	47.659	154.035	0,99%
VI	185.313	112.764	298.077	1,92%
VII	384.714	452.752	837.466	5,38%
VIII	768.554	907.356	1.675.910	10,77%
IX	937.312	480.439	1.417.751	9,11%
X	2.736.331	70.029	2.806.360	18,04%
XI	4.398.746	43.782	4.442.528	28,56%
XII	2.671.592	0	2.671.592	17,18%
XIII	105.409	6.106	111.515	0,72%
XIV	849.771	190.111	1.039.882	6,69%
Total	13.144.118	2.310.998	15.455.116	99,36%

Para calcular la disponibilidad real de los recursos se deben corregir estos valores por las restricciones de uso de los bosques nativos. Se estima que alrededor de un 60% de estos bosques están en reservas de protección o fuera de condiciones de uso. Es importante además, considerar los usos alternativos que se le puede dar a esos recursos, para no competir por la explotación de ellos, en particular, los usos de calefacción como leña y los terrenos explotados por la industria forestal.

En la Tabla 3, se resumen las principales estadísticas del censo forestal para bosque nativo y plantaciones. Se observa que el tipo de bosque en estudio cubre sobre el 75% del total y que se encuentra determinado por sobre el 80% en tan sólo 4 especies; siempreverde, lenga, coihue y roble raulí.

Las especies de plantaciones, cubren las necesidades de la industria forestal en calidad de madera, con dos especies principales; eucalipto y pino radiata, que poseen ciclos de rotación mayores a los que requieren los cultivos dendroenergéticos.

El catastro muestra el enorme potencial existente en el bosque nativo, por sobre las plantaciones.

Tabla 3: Estadísticas Catastro INFOR 2013

	Hectáreas	%
Tipo de Estructura de Bosque Nativo		
Total	13.182.824	100,0%
Bosque Adulto	6.056.928	45,9%
Renoval	3.357.468	25,5%
Adulto Renoval	907.344	6,9%
Achaparrado	2.861.084	21,7%
Superficie de Bosque Nativo por Especie Plantada		
Total	13.182.824	100,0%
Siempreverde	3.750.084	28,4%
Lenga	3.541.308	26,9%
Coihue de Magallanes	2.052.070	15,6%
Roble-Raulí-Coihue	1.468.476	11,1%
Ciprés de las Gualtecas	575.032	4,4%
Coihue-Raul-Tepa	556.189	4,2%
Escalerófilo	474.152	3,6%
Alerce	258.371	2,0%
Araucaria	253.739	1,9%
Roble Hualo	205.974	1,6%
Ciprés de la Cordillera	47.157	0,4%
Plantaciones Forestales por Especie		
Total	2.414.389	100,0%
Pinus Radiata	1.470.665	60,9%
Eucalyptus globulus	541.860	22,4%
Eucalyptus nitens	232.138	9,6%
Atriplex sp.	60.814	2,5%
Pinus Ponderosa	28.080	1,2%
Pseudotsuga menziesli	15.969	0,7%
Otras especies	64.863	2,7%

Con los antecedentes obtenidos, se genera una base de datos que debe modificarse según las restricciones y cálculos antes mencionados.

Es importante notar que las plantaciones no son parte del potencial de biomasa, dado que se generan producto de la reforestación del bosque que ya ha sido utilizado con fines principalmente industriales, por lo que el potencial neto está dado por el bosque nativo en su totalidad. La evaluación del potencial dendroenergético se estudiará posteriormente de forma separada.

En particular, para la obtención de la biomasa técnicamente aprovechable (BTA) de bosque nativo, se utilizaron factores de reducción de la densidad (20%) y de aprovechamiento en la cosecha de los bosques (25%), además se realizó una agregación por comuna y provincia, de manera tal de obtener por territorio, las potencialidades de obtención de la materia prima.

La biomasa técnicamente aprovechable neta (BTN), es la obtenida luego de descontar el consumo actual de la biomasa en otras actividades (industrial, leña residencial, otros). Las cifras en detalle se observan en la Tabla 4.

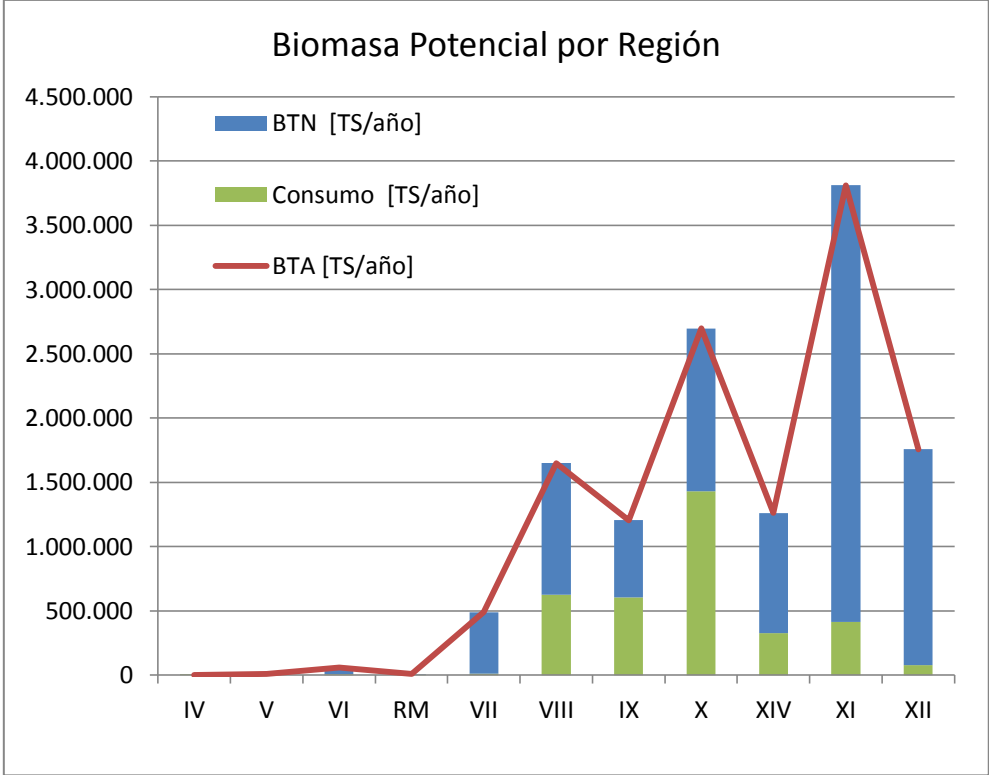


Figura 9: Disponibilidad de Biomasa Potencial base Flujo Anual Sostenido

Tabla 4: Biomasa Potencial base Flujo anual Sostenido

Región	BTA (TS/año)	Consumo (TS/año)	BTN (TS/año)
IV	1.466	4.403	0
V	7.744	2.846	4.898
VI	60.142	7.852	52.290
RM	6.752	4.132	2.620
VII	489.143	11.177	477.966
VIII	1.649.843	623.825	1.026.018
IX	1.204.897	602.218	602.679
X	2.696.784	1.430.798	1.265.986
XIV	1.260.501	325.161	935.340
XI	3.811.817	412.298	3.399.519
XII	1.757.199	75.076	1.682.123
Total	12.946.288	3.499.786	9.446.507

Se observa que un 27% de la biomasa técnicamente aprovechable de bosque nativo está cautiva por el consumo desde diversos segmentos (consumo de leña residencial y consumo de biomasa de grandes industrias), es decir 3,5 millones de TS/año (toneladas en base seca al año). La biomasa disponible anual restante a nivel país es de aproximadamente 9.5 millones TS/año.

La mayor disponibilidad de biomasa se asocia a un aumento en el consumo, a excepción de los extremos norte y sur del país que presentan leves disociaciones a la norma debido a la baja cobertura de bosques, normas ambientales o a la utilización mayoritaria de otros combustibles. (Evaluación del mercado de la Biomasa y su Potencial, Universidad Austral de Chile, 2013).

Por otra parte, para determinar la disponibilidad de terrenos para plantaciones dendroenergéticas en las regiones en estudio, se requiere contar con una base de datos de ensayos, experiencias y pilotos, identificar las zonas con mayor factibilidad de producción de biomasa dendroenergética y estimar su potencial, junto a la elaboración de una base de datos estandarizada de áreas degradadas y potencialmente erosionables, con identificación de clase de propietarios.

A través del sistema de información territorial, desarrollado por la UACH y la CONAF, se generó una herramienta para obtener el potencial de suelos para plantaciones dendroenergéticas. Lo anterior, se llevó a cabo tomando en cuenta las restricciones por uso actual de suelos y tienen la ventaja de ser realizados en base a los datos disponibles por región. La información completa se puede encontrar en el sitio <http://sit.conaf.cl> y el potencial de cultivo de los suelos por región se puede obtener según cuatro escenarios base de protección a otros mercados (agroindustria, humedales, hídricos).

En general, se obtiene que los suelos con disponibilidad de abarcar plantaciones se encuentren con altos índices de erosión. Uno de los tópicos estudiados, que abarca el estado del suelo y que pone en resguardo la dotación hídrica del lugar, es la que define las zonas disponibles para la plantación de especies de explotación energética a utilizar.

La zonificación anterior, considera la filtración de datos por temas de accesibilidad (pendientes superiores al 30%), utilización alternativa del suelo (resguardo agrícola), y utilización de cursos de agua en zonas donde existe sensibilidad de utilización del recurso. Además, se considera que los suelos con alto grado de erosión no logren altos rendimientos por la discapacidad fértil en estas zonas.

El escenario óptimo para el estudio de la disponibilidad de suelos es la de resguardo hídrico, que considera los factores antes mencionados (Evaluación del mercado de la Biomasa y su Potencial, Universidad Austral de Chile, 2013). Este apartado considera que de acuerdo a los antecedentes de utilización y sensibilidad del recurso hídrico en la zona centro norte (desde Coquimbo a O'Higgins), las plantaciones no aplican en estas regiones.

Por otra parte, la falta de información por catastro y ensayo de las condiciones de crecimiento y cultivo de especies en la región más austral de Magallanes, hacen que las estimaciones no sean representativas de la zona, ya que presentan altas desviaciones, por lo que tampoco se considera su cuantificación.

El resultado se muestra gráficamente en la Figura 10, con el respectivo detalle numérico en la Tabla 5.

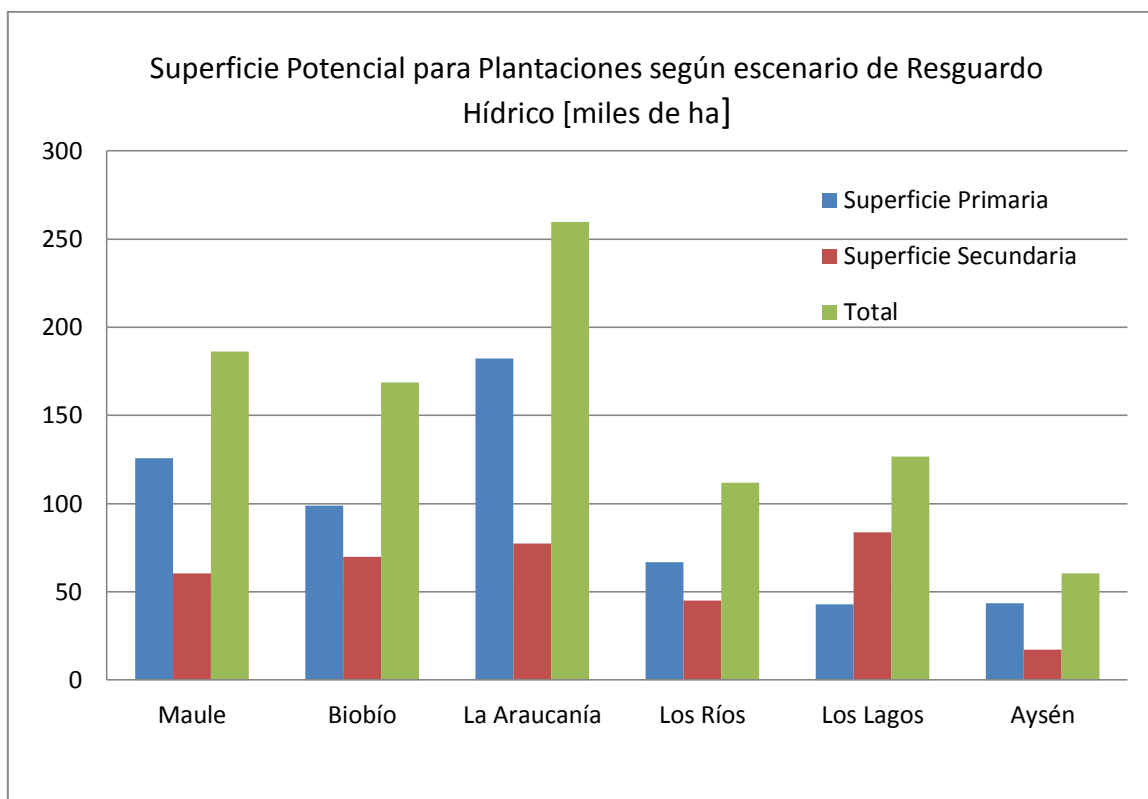


Figura 10: Superficie Potencial de Plantaciones

Tabla 5: Superficie (miles de ha) Potencial de Plantaciones en el Escenario de Resguardo Hídrico.
Fuente UACH, CONAF 2013

Resguardo hídrico	Primaria	Secundaria	Total
Coquimbo	N/A	N/A	N/A
Valparaíso	N/A	N/A	N/A
Metropolitana	N/A	N/A	N/A
O'Higgins	N/A	N/A	N/A
Maule	125,8	60,3	186,2
Biobío	98,9	69,8	168,7
La Araucanía	182,2	77,4	259,6
Los Ríos	66,9	45	111,8
Los Lagos	42,9	83,7	126,6
Aysén	43,4	17,1	60,5
Magallanes	1.497,30	105	1.602,3
Total hasta Aysén	560,1	353,3	913,4
Total hasta Magallanes	2.057,40	458,3	2.515,7

De las áreas cuantificadas, se distinguen las superficies primarias, como aquellas aptas para aplicar rotaciones cortas, poseen erosión actual y potencial baja y son la mejor alternativa para fines dendroenergéticos. Las secundarias, en cambio, son aquellas que por su condición de erosión actual requieren un manejo diferenciado y planificación de aprovechamiento a mediano plazo, con grado de erosión moderado, es posible el establecimiento de plantaciones forestales, con un mayor costo de mantención e inversión. Se han omitido los suelos con mayor grado de erosión en el estudio.

En general, se espera que las plantaciones energéticas sean de bajo costo y de menor retorno en comparación con otros fines silviculturales madereros, ya que deben producir materia prima sin valor agregado para un mercado que tiene otras opciones de abastecimiento. Este retorno está en función del precio de la madera proveniente de estos cultivos (incierto), de la obtención de grandes cantidades de biomasa en corto tiempo y de la minimización de costos de producción.

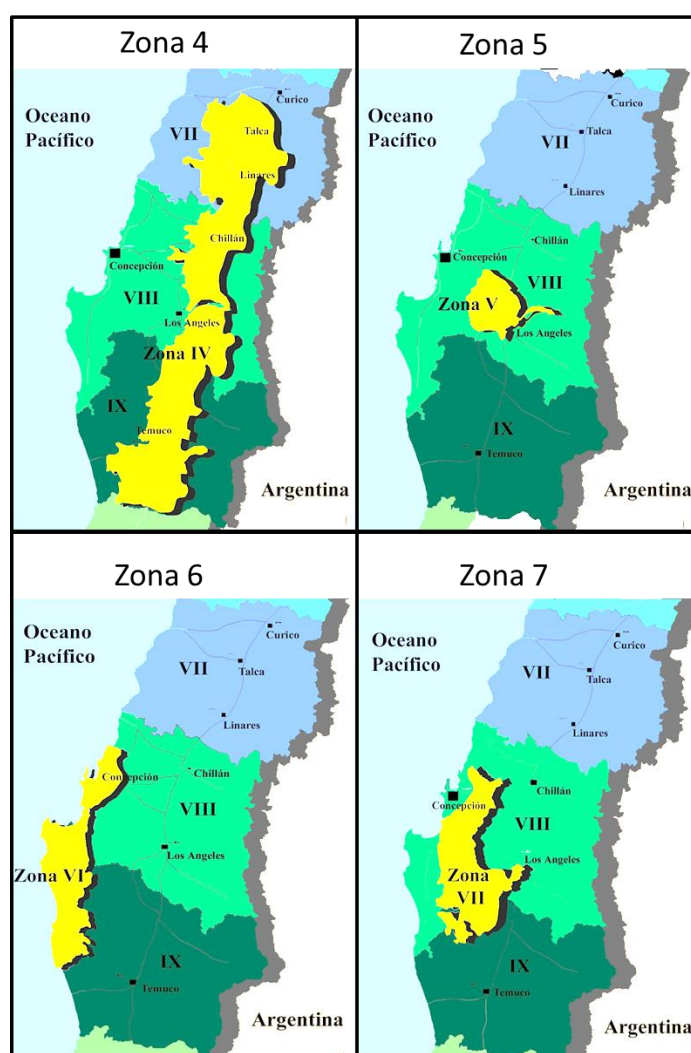
De acuerdo al estudio que se enmarcó en el proyecto denominado "*Modelo de productividad forestal*", cuyo objetivo fue determinar ecuaciones de crecimiento para la predicción del material biomásico a obtener por plantación, se realizó una adaptación de modelos tradicionales de crecimiento para predecir biomasa y captura de carbono utilizados en Europa, mediante los software INSIGNE y EUCASIM (línea base de predicción forestal actual), ampliamente utilizados en la industria forestal chilena, cuyo fin fue obtener una estimación de la materia seca generada. Adicionalmente, se estableció una red de parcelas permanentes para calibrar modelos híbridos de productividad forestal y finalmente se construyó una primera generación de modelos híbridos para la predicción final de biomasa de corta rotación para fines energéticos, en particular para su uso en biocombustibles.

De acuerdo a los simuladores, las zonas de potencial crecimiento son las que se muestran en las imágenes de la Figura 11, de las que se puede prorratear por área la disponibilidad por región para determinar los volúmenes finales de biomasa aprovechable para las características de crecimiento, según lo que estableció el proyecto "*Plantaciones dendroenergéticas y estimación de las áreas prioritarias de establecimiento*", del mismo consorcio.

Es importante destacar que de acuerdo a la bibliografía existen rangos extraordinariamente amplios para estimar rendimientos de biomasa que van desde 1.500 a más de 100.000 individuos por hectárea (DeBell et al. 1997, Stanton et al. 2002, Marcos 2006). Las densidades de plantación disminuyen el rendimiento hasta 36.000 individuos/ha (Marcos 2006), debido al cuidado de suelos.

La elección de rendimiento utilizado para la estimación de volúmenes de biomasa generada en plantaciones dendroenergéticas se realizará en base a los modelos de mayor utilización a nivel global, validando los datos con ensayos en plantaciones realizadas por el consorcio BIOCOSA en las regiones Metropolitana y de Los Lagos, con el fin de obtener una muestra representativa del comportamiento de los especímenes en diversas zonas geográficas.

El primer modelo ha sido llamado "modelo norteamericano" o MRF (medium rotation forestry); se estudia en Estados Unidos y también en Europa, aunque en menor medida. En el oeste norteamericano se reconoce como un modelo de espaciamientos medios, con densidades de 1.500 a 2.200 individuos por hectárea, en rotaciones de cinco a siete años.



Zona 4: Sector Precordillerano VII, VIII y IX regiones, Zona 5: Arenales, Norte Río Itata-Sur Río Biobío, Zona 6: Sector Costero VIII, Colcura – Purén y Zona 7: Secano Interior VIII, Río Itata - Hualqui

Figura 11: Principales zonas de crecimiento para *Pinus Radiata*, reconocidas por el simulador INSIGNE (www.simulador.cl).

El llamado "modelo europeo" o SRF (short rotation forestry) consiste en densidades de plantación desde unos 5.000 individuos por hectárea o más en períodos de rotación usuales de dos años. Este modelo se estudia en la mayor parte de los países de Europa y en el noreste de Estados Unidos.

La aplicación y conveniencia de un modelo u otro depende de los rendimientos de las especies en sitios específicos, los costos de cada una de las faenas y la calidad del producto requerida. En la Tabla 6, se presenta un cuadro comparativo de ambos.

Tabla 6: Comparación de modelos de plantación dendroenergética

Modelo	Ventajas	Desventajas
SRF o "modelo europeo", 5.000 a 36.000 plantas ha ⁻¹ . Cortas cada uno a tres años con rebrote.	<ul style="list-style-type: none"> - Alto rendimiento en producción de biomasa. - Costos de cosecha más bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevados costos de plantación. - Poca flexibilidad de productos. - Menor calidad de biomasa, mayor proporción de corteza, mayor contenido de humedad. - Mayor tendencia a la formación de patologías.
MRF o "modelo americano", 1.000 a 2.000 plantas ha ⁻¹ . Rotaciones de cuatro a siete años.	<ul style="list-style-type: none"> - Menores costos de plantación. - Mayor flexibilidad de productos (pulpa, <i>pallets</i>, energía). - Mejor calidad de la biomasa, menos corteza, menos humedad. - Control más fácil de patologías. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor rendimiento en producción de biomasa. - Rotaciones más largas. - Costos de cosecha más altos.

En Chile, el modelo a implementar debe considerar sobre las 3000 unidades por hectárea para regirse bajo los reglamentos del DFL N° 701 de 1974 y sus modificaciones posteriores.

En particular, los rendimientos se pueden calcular para una densidad promedio de una especie. En este caso, la variedad genética de los álamos es extremadamente reducida, una especie exótica introducida y de buen comportamiento en los climas del territorio centro sur del país.

Considerando la poca diversidad genética y, por otro lado, el enorme potencial que podría tener el género en Chile, tanto para la industria de la madera como con fines energéticos, en el año 1999 el Centro Tecnológico el Álamo (CTA - Universidad de Talca) comenzó la importación y ensayo de alrededor de 2.500 híbridos experimentales a partir de cinco especies, entre las regiones de O'Higgins y de Los Ríos. Se obtuvo un potencial para generar incrementos en biomasa que superarían 30 TS/ ha al año. (Ricardo Baettig et al, 2010). Por otro lado, se estiman rendimientos de hasta 35 TS/ ha al año para especies exóticas como *Arundo Donax*, de acuerdo a la información recabada en BIOCOSA.

Por lo anterior, dados los rendimientos antes descritos, se utilizarán los costos de la plantación de estas especies a modo de evaluación, con presunción de raleo a los 5, 7 y 12 años, que disminuirán la densidad inicial por hectárea en un 70%.

Luego de estos períodos, se estudiará la necesidad de volver a invertir en el repoblamiento total del territorio, dado un estudio de suelos, costos que no serán cuantificados en el presente trabajo.

3.4. Caracterización de la biomasa

Las consideraciones respecto al combustible, para una eventual evaluación, incluyen:

- Poder Calorífico (energía almacenada en la biomasa)
- Contenido de humedad (incluidos los efectos de almacenamiento)
- Rango de calidad del combustible (contaminantes que pueden afectar a equipos de generación)

El poder calorífico de la biomasa lignocelulósica es poco variable y se encuentra usualmente en la literatura con un valor entre 4.400 y 4.600 kcal/kg (Kauter et al. 2003). La biomasa pierde humedad gradualmente con el tiempo luego de la poda, si se mantiene en condiciones ambientales secas. Con el aumento del contenido de humedad se produce una rápida pérdida de poder calorífico (Ince 1977).

Se utilizarán los valores de la referencia "Caracterización de biomasa leñosa con fines energéticos disponible en Chile", publicado en Diciembre de 2013. Los resultados se observan en las tablas siguientes:

Tabla 7: Residuos de cosecha de especies exóticas (base Pinus Radiata)

ORIGEN DEL RESIDUO		COSECHA					
		CONSTITUCIÓN ARAUCO		CONSTITUCIÓN ARAUCO		CONSTITUCIÓN ARAUCO	
LOCALIDAD							
TIPO DE BIOMASA		CORTEZA	CORTEZA	MADERA	MADERA	MEZCLA	MEZCLA
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	0,46	0,40	0,41	0,36	0,43	0,38
	Análisis químico	% Extraíbles	23,4	25,8	4,6	4,2	15,6
% Lignina		42,4	55,5	26,9	28,8	41,4	46,4
% Holocelulosa		65,2	67,1	77,0	80,7	66,4	82,6
α-Celulosa		28,6	44,5	43,9	48,0	33,0	51,7
Análisis energético	% Cenizas	3,6	4,8	0,3	0,7	3,5	1,6
	Poder calorífico superior [Cal/g]	4.954	5.136	4.834	4.912	4.886	4.939
Composición elemental [%]	C	48,5	49,5	48,7	46,4	48,4	48,6
	H	5,7	5,6	6,0	5,9	5,7	5,9
	O	43,7	40,1	43,9	43,7	41,7	43,2
	S	0,0005	0,0004	0,0005	0,0002	0,0005	0,0003
	Cl	0,0059	0,0059	0,0061	0,0060	0,0071	0,0059

Tabla 8: Residuos de la industria forestal.

LOCALIDAD		CONSTITUCIÓN ARAUCO		CONSTITUCIÓN ARAUCO	
		CORTEZA		MADERA	
TIPO DE BIOMASA					
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	—	—	0,43	0,42
	Análisis químico	% Extraíbles	23,0	35,0	5,3
% Lignina		42,2	50,3	30,1	27,9
Holocelulosa		66,5	57,7	88,4	87,7
α-Celulosa		31,7	30,2	51,6	59,6
Análisis energético	% Cenizas	2,7	4,0	0,5	0,5
	Poder calorífico [Cal/g]	5.034	5.033	4.697	4.894
Composición elemental [%]	C	50,1	49,9	48,4	49,2
	H	5,7	5,7	6,0	6,0
	O	40,6	40,4	44,4	44,1
	S	0,0002	0,0002	0,0001	0,0005
	Cl	0,0068	0,0061	0,0070	0,0069

Tabla 9: Residuos de cosecha de bosque nativo (base Lengua)

TIPO DE BIOMASA		CORTEZA	MADERA
Análisis físicos	Densidad básica [mg/L]	—	0,45
Análisis químico	% Extraíbles	24,4	7,6
	% Lignina	35,9	16,7
	Holocelulosa	70,0	84,3
	α-Celulosa	42,5	50,0
Análisis energético	% Cenizas	2,8	0,5
	Poder calorífico superior [Cal/g]	5.085	4.579
Composición elemental [%]	C	50,2	48,8
	H	6,0	6,0
	O	43,1	44,5
	N	0,54	0,55
	S	0,1	0,03
	Cl	0,1	0,09

Tabla 10: Plantaciones dendroenergéticas

LOCALIDAD		ACACIA DEALBATA MEZCLA	ACACIA MEARNSII MEZCLA	EUCALYPTUS CAMALDULENSIS MEZCLA	ACACIA MELANOXYLON MEZCLA
TIPO DE BIOMASA					
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	0,49	0,50	0,50	0,49
Análisis químico	% Extraíbles	11,4	14,4	8,2	24,1
	% Lignina	24,0	25,5	28,9	25,6
	Holocelulosa	82,5	73,7	69,6	69,3
	α-Celulosa	42,2	32,2	32,3	36,8
Análisis energético	% Cenizas	1,6	2,7	4,0	1,9
	Poder calorífico [Cal/g]	4.462	4.356	4.401	4.417
Composición elemental [%]	C	49,1	49,0	47,9	48,7
	H	5,8	5,8	5,8	5,8
	O	42,0	42,0	42,1	42,7
	N	3,1	3,1	4,2	2,6
	S	0,1	0,1	0,1	0,2
	Cl	0,3	0,2	0,4	0,5

De acuerdo a lo anterior, se definirán potenciales de conversión de los distintos tipos de biomasa disponible. Notar que se excluye del análisis la biomasa de desechos o residuos de la industria forestal, y que ellos poseen características muy similares a las obtenidas en los otros tipos de biomasa en estudio.

Adicionalmente presentan la ventaja de encontrarse medianamente tratados y sin necesidad de recolección, lo que disminuye los costos de la evaluación económica.

Sin embargo, se encuentran en uso por empresas forestales con fines energéticos en la actualidad. Un análisis posterior puede considerar un cambio en tecnología de conversión o en el combustible energético final generado.

4. Alternativas tecnológicas de conversión

La conversión de biomasa en energía combustible, se puede llevar a cabo en diferentes procesos. Las tecnologías de conversión más comunes para la producción de calor y energía, son la combustión directa y los sistemas de gasificación, con ellos se pueden obtener energía eléctrica y gas sintético (syngas). Los procesos más complejos incluyen procesos biológicos y fisicoquímicos como fermentación, pirólisis y otros. El producto de estos últimos procesos es más elaborado y puede ser biocombustible o biogás

En el presente capítulo se evaluarán los procesos sentando las bases de la discusión de rentabilidad de producción de energía.

Para ello, se analizan los principales procesos de conversión de la biomasa forestal con el fin de obtener diversos indicadores, referentes a rendimiento del material, costos de inversión y operación, rentabilidad y factibilidad técnico económica. Se espera poder evaluar los sistemas que optimizan la potencialidad de las materias primas del bosque, para luego desarrollar un modelo conceptual del proyecto que mejor comportamiento presente.

Las alternativas tecnológicas de conversión a analizar se deben separar según el tamaño de planta que se puede proyectar según la materia prima disponible.

De acuerdo a lo anterior, se agrupan de la siguiente forma los procesos de conversión, según el producto final y el tipo de tecnología utilizada para su producción:

- Combustión Directa
- Conversión térmica avanzada de la biomasa en combustibles secundarios por gasificación o pirólisis
- Conversión química o bioquímica de materiales orgánicos mediante procesos de fermentación en hidrogeno, etanol o combustible diesel

En la actualidad, el desarrollo tecnológico de conversión energética de la biomasa se ha concentrado en:

- Procesos de Pretratamiento para disminuir humedad y tamaño de partículas de biomasa, de manera de aumentar su poder calorífico y reducir los costos de transporte.

- Generación de energía eléctrica a pequeña y mediana escala, con tecnologías de combustión de ciclos orgánicos de Rankine y utilización de motores Stirling.
- Aumentar eficiencia en la generación eléctrica a partir de la biomasa, con tecnologías como gasificación o co combustión.
- Investigación en tecnologías de conversión a combustibles más versátiles como gas o etanol.

Se deben observar al menos cinco fases de conversión para la estimación de los costos de generación de energía, tal como lo muestra la Figura 12:

- Recolección de la Biomasa
- Preparación de la Biomasa
- Generación de la Energía
- Valorización de la Energía
- Distribución de la Energía



Figura 12: Etapas de la Generación de Energía Eléctrica

De acuerdo al esquema, los costos de inversión a considerar en las etapas de estudio de proyecto deben al menos incluir los lugares de almacenamiento y preparación de la biomasa. Los equipos y la planta necesaria para la conversión, los costos asociados a la obtención del material, mediante recolección o por compra directa y los métodos de transmisión y distribución de la energía eléctrica y térmica, biogás o biocombustibles.

En lo que sigue, se presentarán las etapas previas de conversión, que engloban los procesos de pre tratamiento que deberán tener la mayoría de los sistemas de conversión.

4.1. Recolección

El proceso de recolección de biomasa depende del origen que esta tenga. En particular, para la recolección se tienen desechos de cosecha forestal, desechos industriales y manejo sustentable del bosque nativo. Para los tres casos se pueden distinguir tres etapas en el proceso de producción; acopio, triturado y transporte.

El flujo del proceso productivo de biomasa tipo se presenta en el siguiente diagrama, donde además, se describe la maquinaria necesaria para realizar las actividades, para el caso de plantaciones:

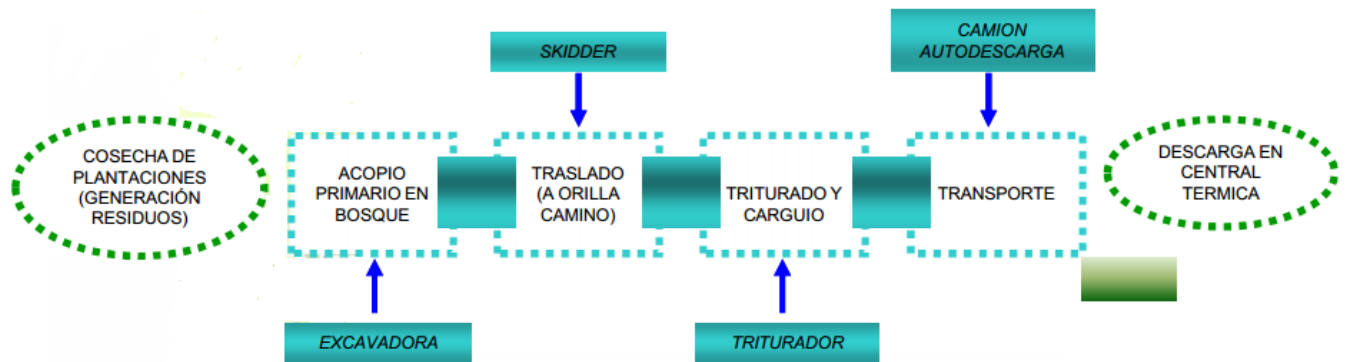


Figura 13: Flujo de proceso para obtención de biomasa. INDEF, 2008.

Para el análisis, se ha considerado un radio máximo de suministro según recomienda la empresa especialista en abastecimiento de biomasa para la industria forestal, INDEF, que se relaciona con la posibilidad de procesar los residuos forestales hasta el punto de acopio final, basado en el método BMCh (Bosque modelo). La ejecución directa de estas actividades requiere la identificación de los residuos a recolectar, el acopio o traslado a orilla de camino, el triturado en lugar para cargue y transporte al lugar de conversión y la entrega final, según dos esquemas principales de producción, que se presentan en la figura siguiente.

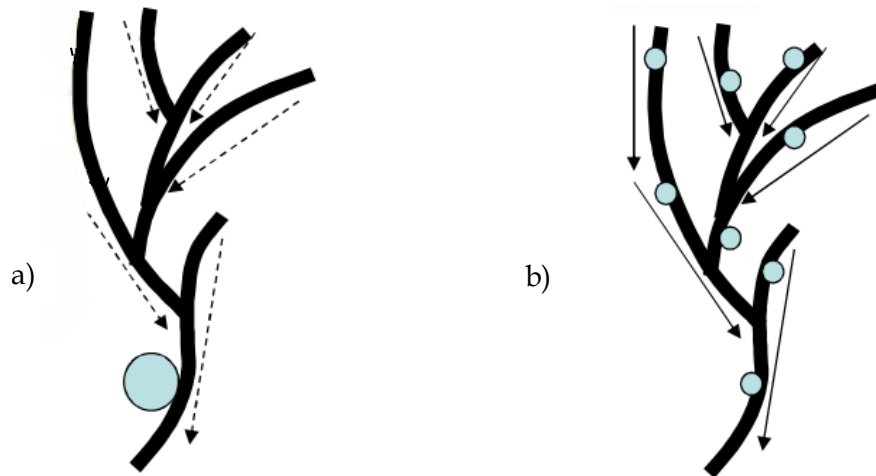


Figura 14: Esquema de producción. a) Centralizado, desde orilla de camino a acopio intermedio. b) Descentralizado, desde orilla de camino a planta.

4.1.1. Consideraciones de Costos de obtención de biomasa

Los sistemas de recolección de la biomasa son resultado directo del tipo de utilización y fuente de producción de la materia prima. Este proceso, deberá cubrir el trayecto desde el punto de recolección a la planta y se requerirá maquinaria para ello. En general, para las labores de cosecha se utiliza maquinaria que puede trasladar el material hasta un punto de acopio, lo que dependerá de la distancia a la que éste se encuentre.

Las estimaciones de maquinaria requerida, comprenden el uso de desarrollo modelos Origen-Destino. Uno de los puntos importantes para la consideración de proyectos en la distancia a la zona de suministro de materia prima. Los costos asociados a ellos, se obtienen de la empresa INDEF, que abarca más del 90% del mercado de biomasa en Chile, en el transporte y procesamiento de ella.

Biomasa Chile (INDEF) es líder en procesar y originar biomasa forestal, y es uno de los pocos proveedores en Chile con trayectoria probada, ejecutando directamente todas las etapas del procesamiento y entrega de biomasa. Actualmente procesan a razón de 3,0 millones m^3 /año, la mayoría bajo contratos de largo plazo. Teniendo 9 líneas de producción con capacidad instalada de 4 millones m^3 año. Suministran a diez centrales de generación y cogeneración de las compañías forestales más grandes y generadoras de energía

El método de recolección de la materia prima para residuos de la agricultura o cultivos energéticos, incluyen el tipo de secuencia de recolección, la eficiencia de los equipos de recolección y restricciones medioambientales, como la necesidad de controlar la erosión del suelo, mantener un suelo productivo, y los niveles de carbón en él. La recolección y sus diferentes mecanismos utilizados, dependen de los sistemas utilizados, con variaciones en los costos de aproximadamente 20 a 25% del total del costo de entrega, típicamente de 5 a 7\$/ton transportada.

Para residuos forestales, el costo de recolección es uno de los más caros costos de despacho de combustible maderero. Pueden ser recolectados fácilmente por equipos si estos caben en las proximidades o alrededor de los árboles. En sectores de alta densidad puede ser más difícil por tener problemas de accesibilidad al lugar

El costo de acopio en terreno (acopio intermedio) del producto es de entre 55 y 90 US\$/tonelada en base seca, dependiendo de la calidad y la distancia de transporte. (Estudio para la elaboración de una estrategia nacional de Bioenergía, 2013). Este costo, se considera variable por región en la estimación de este estudio, proporcional a la variable del costo de combustible, dado que un acopio intermedio además, dependerá mucho de las condiciones de caminos en sectores rurales, acceso y conectividad a lugares de extracción, costo de transporte entre puntos de recolección y acopio, afecciones climáticas y capacidad de protección parcial o total de la biomasa a condiciones externas (lluvia, incendio, etc.-).

4.1.2. Costos de Compensación por obtención de materia prima

Dependiendo del lugar a utilizar para el retiro de la biomasa, se requerirán compensaciones por uso de suelos y de las plantaciones existentes. Una de las compensaciones que se debe considerar en el caso de la utilización de bosques con fines de explotación, es la reforestación, para asegurar materia prima a futuro y por normativa de la CONAF

En el caso del uso con fines conservativos de los bosques, las labores de raleo y poda son benéficas para el crecimiento de los bosques, toda vez que se limpian los suelos y se cortan las malezas que impiden el correcto crecimiento de los árboles. Así también, en el uso de los desechos orgánicos de las industrias agrarias y ganaderas, dónde además de generar combustible, generalmente gaseoso, se da solución a la producción de un gran volumen de basura, reutilizándola y convirtiéndola en energía.

En el caso de la generación de un proyecto energético, se deben identificar a los propietarios de los terrenos que se explotarán y además, se debe dar prioridad en la cadena de relaciones comerciales a las necesidades que se cubrirán o se generaran con la explotación de los recursos. El estudio de los costos que estas compensaciones generarán, son importantes porque son

costos de producción. Es importante señalar que no necesariamente, el costo de estos, es perjudicial, pues se puede pagar por el uso de desechos para fines energéticos, obteniendo un boucher positivo del proceso de recolección y extracción de materia prima un aproximamiento a lo anterior se presenta en la siguiente valorización de recursos:

Tabla 11: Valorización de la biomasa en sectores donde se utiliza para fines energéticos.

Tipo de biomasa	Precio (USD/GJ)	Precio (USD/ton)
Residuos forestales	1,30-2,61	15-30
Desechos madereros	0,50-2,51	10-50
Residuos agrícolas	1,73-4,33	20-50
Plantaciones energéticas	4,51-6,94	39-60

En lo netamente económico, junto con favorecer al sector que haga aprovechamiento del insumo dendroenergético, se verá favorecido el sector forestal, específicamente el subsector bosque nativo, al abrirse un mercado para una parte importante del volumen extraído en las intervenciones silvícolas y que hoy o constituye un residuo o está siendo subutilizado, limitando las opciones para un manejo sustentable del recurso bosque nativo.

4.1.3. Costos por Plantación

De acuerdo a lo desarrollado en el presente capítulo, se observa que los factores críticos que afectan los costos de inversión y operación de una planta de biomasa son:

- Tipo de recurso forestal utilizado y origen de éste.
- Distancia de transporte desde su lugar de origen hasta el lugar de consumo.
- Capacidad de la planta para alcanzar economías de escala.
- Tipo de energía a generar (eléctrica, térmica, cogeneración, combustibles).

En el caso de plantaciones dendroenergéticos se estiman valores de acuerdo a las bonificaciones y costos de forestación, recuperación de suelos degradados, estabilización de dunas, poda y raleo, en pesos (\$) por hectárea, y establecimiento de cortinas cortavientos, en pesos (\$) por kilómetro, para la temporada de forestación del año 2012.⁶

⁶ CORPORACION NACIONAL FORESTAL, 31 de Julio de 2011

Para estos efectos sólo se bonifican plantaciones con especies del género Eucaliptus aplicándose un costo único de \$ 806.980 por hectárea, para una densidad mínima de 3.000 plantas/ha.

A este valor se le deberá agregar los componentes de preparación de suelo y cerco, que se detallan en el “Procedimiento para la determinación del costo de forestación”, contenido en esta misma la Tabla 12.

Tabla 12: Costos de las obras de recuperación de suelos degradados.

TIPO DE OBRA DE LADERA	UNIDAD DE MEDIDA	COSTO (\$/UNIDAD)
1. Zanja de infiltración	Metro lineal	695
2. Canal de desviación	Metro lineal	649
3. Microterrazza manual	Metro lineal	659
4. Fajinas	Metro lineal	3.664
5. Muretes de sacos	Metro cuadrado	7.037
6. Microterrazza con escarificado	Hectárea	200.289
7. Empalizada	Metro cuadrado	30.206
TIPO DE OBRA DE CAUCE	UNIDAD DE MEDIDA	COSTO (\$/UNIDAD)
1. Muretes de piedras	Metro lineal	4.330
2. Diques de postes	Metro cuadrado	39.872
3. Gaviones	Metro cúbico	49.831

4.2. Preparación de la biomasa sólida

La biomasa debe ser preparada, almacenada y transportada al proceso de conversión de energía, donde serán utilizados para generar electricidad o producir combustibles. A continuación se describen los requerimientos y costos de la preparación de la biomasa sólida para la generación de energía.

Los mayores requerimientos de una zona de almacenamiento estándar pueden ser divididos en cuatro categorías:

- i. Recepción
- ii. Procesamiento
- iii. Almacenamiento
- iv. Transporte al lugar de conversión

Una configuración típica de los patios de preparación, se muestra en la Figura 15.

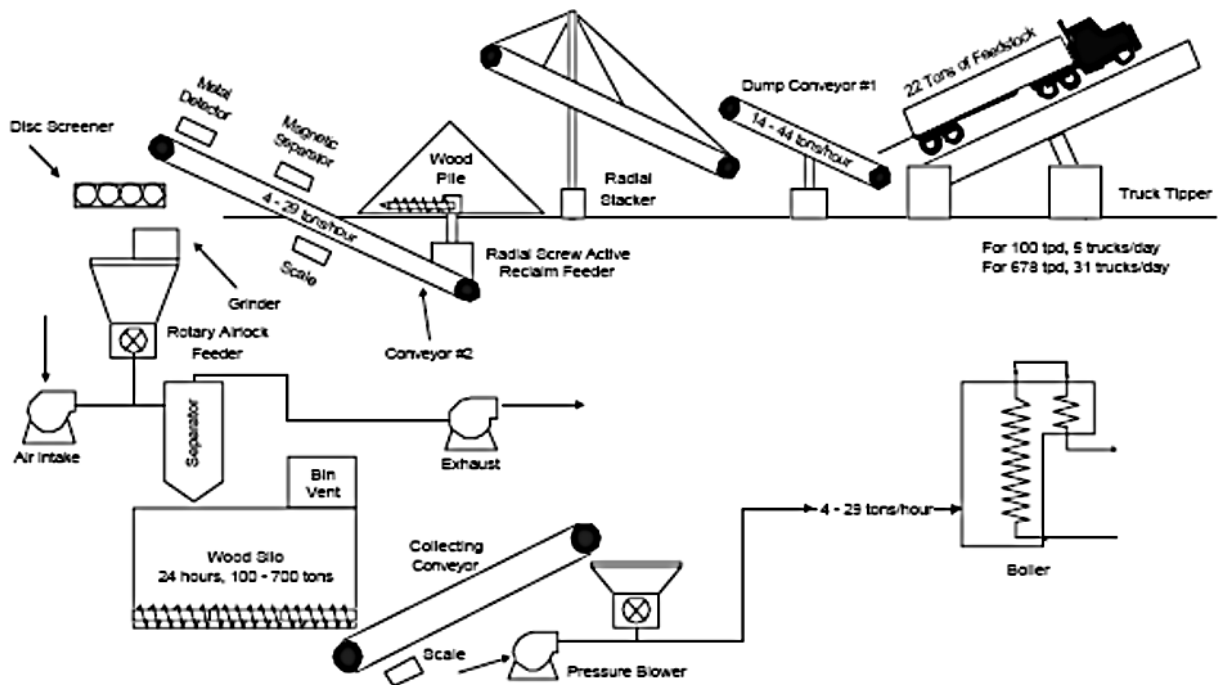


Figura 15: Sistema Automático de Recepción y Preparación de la Biomasa, Fuente: Antares Group

Se muestra un patio de preparación completamente automatizado, el que requiere una inversión mayor, pero que demanda menos mano de obra. Un sistema automatizado es eficiente en cuanto al costo, sólo para grandes sistemas de conversión de biomasa. La alternativa manual para el alimentador, debe ser usada para requerimientos de movimientos más cortos. Esta alternativa incluye un alimentador manual, que reduce los costos de capital, pero que incrementa los requerimientos de trabajo.

El esquema está basado en un alimentador de biomasa forestal para el que se deben tomar en cuenta diferentes tamaños de alimentación de planta para el análisis económico.

4.2.1. Sistema de recepción

El sistema de recepción abarca principalmente el transporte al lugar de acopio, y la carga y descarga de la materia prima en él.

La elección de la maquinaria transportadora, desde la recolección de la biomasa hasta el lugar de acopio, depende básicamente de la cantidad de biomasa a transportar y de la maquinaria disponible para la descarga. Se debe considerar que los tiempos de descarga del material, son influyentes en el rendimiento de la maquinaria a utilizar y por tanto, deben ser minimizados.

Con la excepción de la biomasa utilizada en lugares residenciales en forma de leña, carbón u otros, en Chile, la mayor parte de la biomasa forestal es despachada en camiones a usuarios de tipo industrial, como celulosas o papeleras. Por otra parte, para transportar la biomasa se suelen usar sistemas de escalerilla, mecánicos o electrónicos. También son utilizadas cintas transportadoras por peso, pero estos sistemas son menos precisos, consumen más tiempo y son más caros para operar.

Finalmente, los métodos de despacho y recepción dependen del tamaño de la instalación, Instalaciones pequeñas de unas pocas toneladas al día, usan camiones tolva o camiones de remolque estándar para el despacho de la biomasa. Las instalaciones más grandes podrán hacer mejor uso de un camión de remolque automático, justificando una mayor inversión y es probable que requieran maquinaria adicional, como cintas transportadoras.

Para la evaluación se considerará un sistema automático de recepción de biomasa, ajustados a los valores de la empresa líder en la industria, INDEF.

4.2.2. Procesamiento

Los procesamientos a los que se debe someter la biomasa dependerán de su uso posterior, pero se pueden identificar tres principales

- **Astillado:**

Proceso de conversión de la materia que consiste básicamente en la reducción del tamaño de la materia prima ingresada, a dimensiones no mayores a 10x6x2cm, logrando una densidad aparente de unos 250-350 kg/m³. Es un proceso de transformación física que puede realizarse

inmediatamente después de la recolección de la materia prima, o una vez ésta haya sido transportada a planta, dependiendo de la maquinaria a utilizar. Existen para ellos, astilladoras fijas y móviles y pueden ser de alimentación manual o mecánica.



Figura 16: Maquinaria de astillado in-situ

Secado:

El contenido de humedad de la materia prima es un factor muy importante en los procesos de combustión, ya que esta propiedad determina la capacidad calorífica al momento de producir energía y puede además, modificar los procesos químicos o biológicos de otros tratamientos. En el caso de la utilización en sistemas de combustión, se requiere un bajo contenido de humedad que garantice que la energía no se pierda en la vaporización del contenido de agua en la materia prima, pero en general el contenido de la materia prima es de alrededor del 45%. Lo anterior, hace necesario en el mínimo de las necesidades de almacenamiento, mantener la humedad o bajarla.

Se propone generalmente que el lugar de almacenamiento está protegido en la cubierta en caso de lluvia, para no afectar el contenido de humedad y además se recomienda que esté abierto lateralmente para que el viento ejerza una acción de secado de ella. En el caso opuesto, se requiere biomasa de alto contenido de humedad para la fermentación de la materia lignocelulósica y la posterior generación de biocombustibles, lo que se logra en cámaras con aditivos y agentes que agilizan el proceso. Se considerará material a 50% de humedad, sin éste pretratamiento para las evaluaciones.

- **Procesos de densificación** (Pelletizado /briquetado):

La eficiencia de la biomasa en su estado natural puede tener valores muy bajos, lo que se puede mejorar mediante densificación. El proceso mejora el poder calorífico de la biomasa, sin embargo, requiere trabajar con el material molido, astillado o aserrado. Los procesos más utilizados se enfocan en desarrollar material combustible que mejore las capacidades de la leña, en materia de emisión de humo y contaminantes, energía producida y volumen requerido.

La pelletización, es un proceso que requiere una maquinaria de menor tamaño, donde es introducido el material previamente modificado y mediante un sistema de densificación mecánico en el que la materia vegetal se comprime por acción de rodillo contra una matriz de agujeros, se obtiene un material combustible de determinadas molde con dimensiones específicas que en general no sobrepasan los 2.5cm de diámetro y 7cm de longitud, estandarizado y de mejores propiedades.

El briquetado, es un proceso análogo, en el que se le aplica una presión que aumenta la temperatura del material vegetal hasta unos 100-150°C con lo que al aplicar temperaturas elevadas la lignina se plastifica, permitiendo la formación de unidades compactas. Las dimensiones de las briquetas son un tanto mayores a las del pellet, con longitudes entre 15-50cm y diámetros de 3-20cm. La característica común de estos productos son su elevada densidad (1000-1300kg/m³).

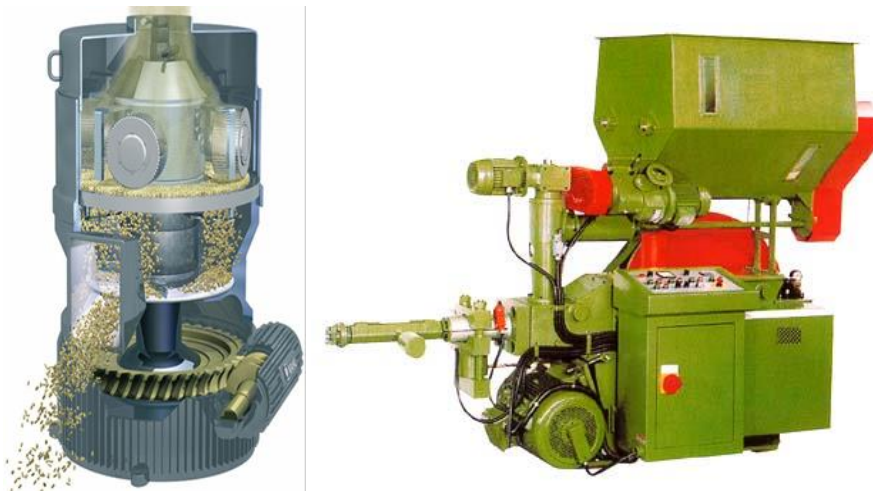


Figura 17: Maquinaria de pelletizado y briquetado

La evaluación del material densificado se vuelve atractivo cuando se plantea como una alternativa al uso de la leña, lo que no será evaluado en el presente estudio.

4.2.3. Áreas de Almacenamiento

El área de acopio debe considerar según las características del proyecto a desarrollar un mínimo de abastecimiento temporal para volúmenes diarios de consumo de la tecnología a utilizar. Dependiendo del lugar dónde se ubique la planta, se deberán considerar factores de incidencia climática, como la lluvia o agua nieve, crecidas de caudales cercanos, etc.-, para salvaguardar las propiedades fisicoquímicas del material a utilizar, principalmente contenido de humedad y poder calorífico de la biomasa.

Un caso base, es la planta termoeléctrica de biomasa Lautaro, que compra los residuos agrícolas en una temporada del año, por lo que requiere almacenarla durante el resto del tiempo para la utilización de ella en períodos de baja producción.

En este caso, se disponen de 6.1 hectáreas de áreas de bodega separadas como sigue:

- Bodega de Biomasa: 70x33m², nave industrial cerrada
- Dos canchas de acopio para Rotación, de 90x30m² y 105x30m², base de tipo hormigón no techada
- Dos canchas de acopio para Almacenamiento, de 75x55m² cada una, con base del tipo estabilizado compactado, no techada

Desde las canchas de acopio hasta el lugar de conversión, además, el proyecto considera una zona intermedia con el propósito de mantener un stock de fardos secos para la operación continua de la caldera por 24 horas.

Para el estudio general de costos, se considera un lugar de almacenamiento para abastecer 30 días de biomasa la tecnología de combustión. Esta cantidad de biomasa puede lidiar con temporadas bajas tanto en invierno como en verano. Para esta cantidad de biomasa, el lugar de acopio requiere un área de entre 1300 y 8850 m² (para 100 ton/día y 680 ton/día respectivamente), asumiendo que la materia prima tendrá una densidad de 640kg/m³ y una altura del recinto de acopio de 3.6m. El tamaño del lugar indica que un área significativa debe ser considerada cercana a la planta.

4.2.4. Transporte al lugar de Conversión

El transporte final al lugar de procesamiento y producción de combustibles energéticos se debe realizar, dependiendo de las instalaciones, asegurando la mantención de las características físicas y químicas de la materia prima. En particular, se requiere que el contenido de humedad y las propiedades de

ella, no se vean mayormente alterados. Generalmente se utiliza una cinta transportadora desde el lugar de acopio a la planta, si ambas están conectadas. De lo contrario, se requerirá maquinaria que permita el traslado de la materia prima de un lugar a otro. Es importante definir cuál será el sistema de alimentación de la planta, dado que esto puede significar costos operacionales y de mano de obra significativos, o al contrario, puede significar una inversión importante en el caso de trabajar con maquinaria automatizada.

En caso de tener una separación entre los sistemas de acopio con los de sistema de secado y preparación, se debe considerar adicionalmente el transporte entre ambas.

4.2.5. Costos asociados al lugar de Preparación y almacenamiento

Adicionalmente a los costos antes nombrados, se ha consultado en la base de datos del catálogo CHP (Combined Heat and Power), publicado en 2007 por EPA, para ajustar los valores de inversión para los casos de generación eléctrica y térmica, obteniéndose las curvas de costos de inversión a la Figura 18 para el patio de almacenamiento en base a la Tabla 13.

En ellos, se observan los efectos de escalamiento claramente para sistemas de baja capacidad de procesamiento de biomasa, y es posible obtener un valor por tonelada procesada al día.

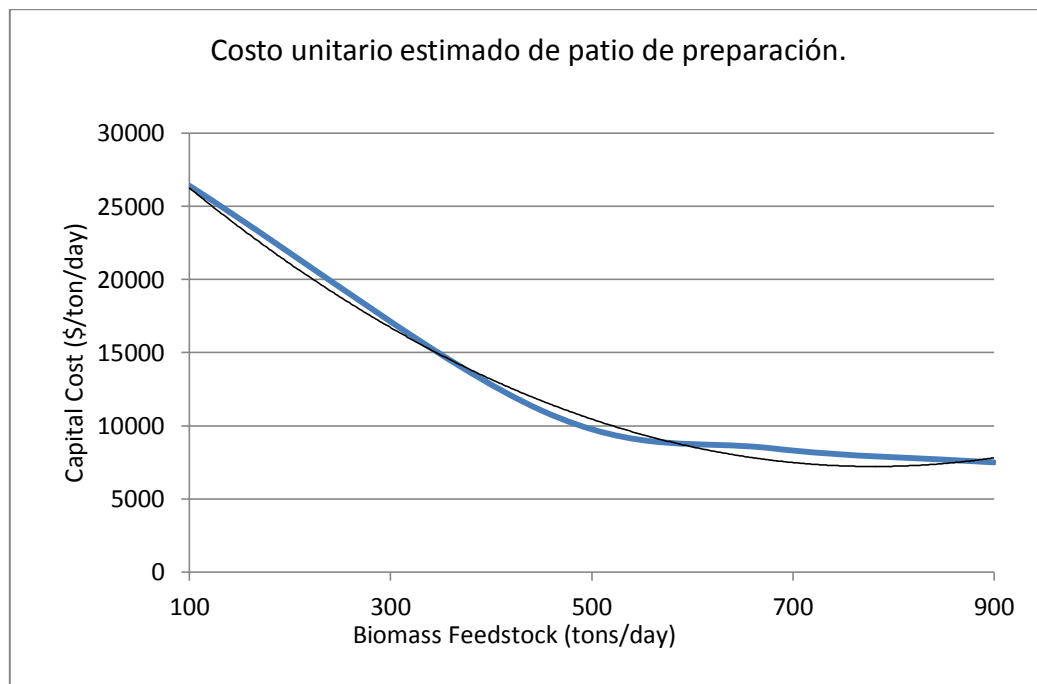


Figura 18: Costo estimado pretratamiento y acopio

Tabla 13: Costos de inversión para sistema de recibo y preparación de biomasa

Componente	Ton/día Combustible		
	100	450	680
Sistema Receptor			
Camiones volcadores	\$ 230.000	\$ 230.000	\$ 230.000
Transporte a pila de acopio		\$ 40.000	\$ 45.000
Acumulador radial		\$ 190.000	\$ 205.000
Cargadores frontales	\$ 100.000		
Subtotal Sistema Receptor	\$ 330.000	\$ 460.000	\$ 480.000
Sistema de Procesamiento			
Alimentador		\$ 230.000	\$ 230.000
Transportadora		\$ 149.000	\$ 160.000
Separador de metales	\$ 40.000	\$ 40.000	\$ 40.000
Criba	\$ 150.000	\$ 220.000	\$ 250.000
Molino	\$ 250.000	\$ 400.000	\$ 600.000
Subtotal Equipo de Procesamiento	\$ 440.000	\$ 1.039.000	\$ 1.280.000
Acumulador	\$ 60.000	\$ 98.000	\$ 135.000
Medidor de combustible	\$ 252.000	\$ 313.000	\$ 364.000
Controles	\$ 115.000	\$ 166.000	\$ 196.000
Subtotal Equipos	\$ 1.197.000	\$ 2.076.000	\$ 2.455.000
Instalación de Equipos	\$ 500.000	\$ 1.093.000	\$ 1.220.000
Trabajo Civil/Estructural	\$ 370.000	\$ 787.000	\$ 877.000
Trabajo Eléctrico	\$ 170.000	\$ 275.000	\$ 305.000
Total Costo Directo	\$ 2.237.000	\$ 4.231.000	\$ 4.857.000
Ingeniería (10% del Costo Directo)	\$ 223.700	\$ 423.100	\$ 485.700
Contingencias (8% del Costo Directo)	\$ 178.960	\$ 338.480	\$ 388.560
Subtotal Costos Indirectos	\$ 402.660	\$ 761.580	\$ 874.260
Total Costo Pretratamiento	\$ 2.639.660	\$ 4.992.580	\$ 5.731.260
Costo Unitario Pretratamiento (\$/ton/día)	\$ 26.397	\$ 11.046	\$ 8.453

Fuente: Basado en Antares Group, 2003.

4.3. Tecnologías de conversión

De acuerdo a lo plantado anteriormente, se estudiarán tres alternativas de conversión según productos a obtener, tal como lo muestra el diagrama de la Figura 19. En lo que sigue se describirán sus principales características para una selección de tecnología y su posterior evaluación.

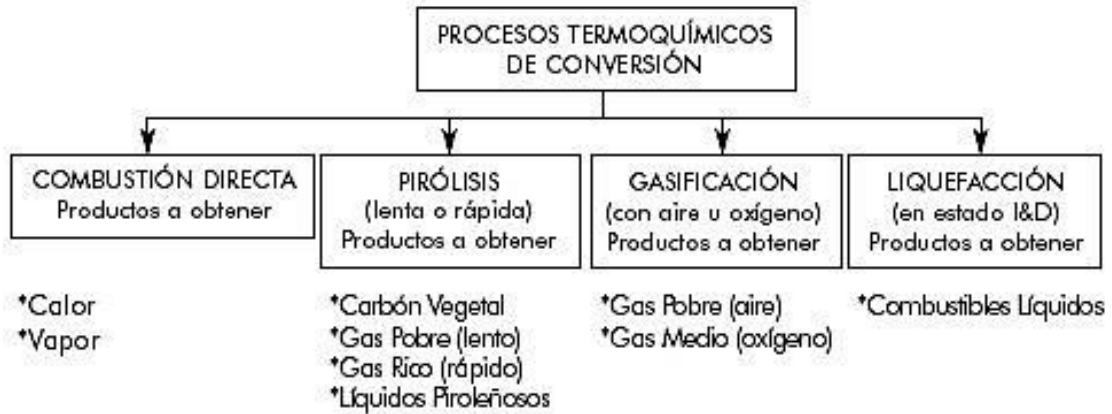


Figura 19: Procesos termoquímicos de conversión de la biomasa.

4.3.1. Combustión Directa

La conversión de biomasa está enfocada a la generación de electricidad o calor. En esta categoría, las principales tecnologías incluyen calderas tipo parrilla, calderas de lecho fluidizado o fijo y sistemas de encendido.

La generación eléctrica por combustión directa es, en primera instancia, uno de los fines más prácticos para el uso de residuos forestales, principalmente porque la tecnología y maquinaria utilizada en el proceso de conversión son mínimas en comparación a los procesos para la generación de otros combustibles. Los procesos pueden ser optimizados mediante tecnología de aprovechamiento de calor (cogeneración) y eficiencia energética.

Estos sistemas de generación son típicamente de no más de 50MW de capacidad instalada. Comparados con los sistemas termoeléctricos a carbón que tienen tamaños de 100 a 1000MW parecen pequeños, pero producen con costos de materia prima menores. La mayoría de las plantas de generación en base a biomasa existentes hoy en día son en base a sistemas de incineración directa. La biomasa es quemada en una caldera para producir grandes presiones en turbinas que son usadas y conducidas para la generación, en los que se conoce como ciclos Rankine. En muchas aplicaciones, el vapor es extraído de la turbina a media presión y temperatura y es utilizado para producir energía de calefacción, calor o generador de frío, mediante sistemas de absorción que permiten la tri generación.

Las ventajas del lecho fluidizado sobre la combustión en calderas tipo parrillas son variadas, entre ellas, la disminución de emisiones, que se deben a una mejor combustión, pero también a las menores temperaturas con las que se realiza el proceso, requiriendo entre 1400-1600°F, mientras que los sistemas de horno funcionan sobre los 2200°F. Estas menores temperaturas producen menos óxidos de nitrógeno (NOx), por otro lado, las emisiones de SO2 son insignificantes cuando se trata de residuos forestales o madereros, sin embargo, cuando estos están contaminados pueden ser un gran problema de emisión. Por otra parte, las ventajas de la tecnología de caldera tipo parrilla tienen que ver con la experiencia existente y menores costos de inversión, que pueden compensar la menor eficiencia del proceso de combustión.

A continuación se presenta en la Tabla 14 un cuadro comparativo de ambas tecnologías disponibles:

Tabla 14: Comparativa de tecnologías de Combustión Directa. Fuente: EPA 2007

Característica	Tipo de Caldera	
	Tipo Parrilla	Lecho Fluidizado
Flujo del Combustible sólido	Transportado en parrilla	Fluidizado por el aire de combustión y circulación a través de la cámara de combustión y ciclones
Zona de Combustión	En la parrilla	Toda el área de combustión en el horno
Transferencia de masa	Baja	Movimiento vertical activo y transferencia de calor
Control de la Combustión		
Velocidad de respuesta	Lenta	Rápida
Control del exceso de aire	Difícil	Posible
Problemas de Combustible		
Aplicable a varios combustibles	No	Alta capacidad de adaptación
Pretratamiento del Combustible	Generalmente no es necesario	Deben ser molidos
Factores Ambientales		
Bajas emisiones de óxidos de sulfuro	Desulfurización no es posible en horno	Alto radio de desulfurización en el horno
Bajas emisiones de óxidos de nitrógeno	Difícil	Inherente bajas emisiones
Fácil adaptación de tamaño	Pequeña	Medio a Alto

Las características antes descritas se deberán evaluar en cada caso, según la disponibilidad de la materia prima, las características físico-químicas de ella y los volúmenes de alimentación de la planta, o equivalentemente, la potencia de la misma, siendo técnico-económicamente factible según el análisis conjunto de todos los factores.

Los valores de inversión de las plantas requieren una visión amplia de acuerdo al análisis económico, pues las tecnologías de mayor costo pueden recuperar más rápido el capital invertido, aunque requieren además mayores costos de operación. Por lo anterior, se obtendrán tamaños ideales según ubicación o potencial de transformación. Para el presente estudio se considerarán los costos asociados a una caldera de lecho fluidizado, con el fin de obtener mayores rendimientos del material a utilizar.

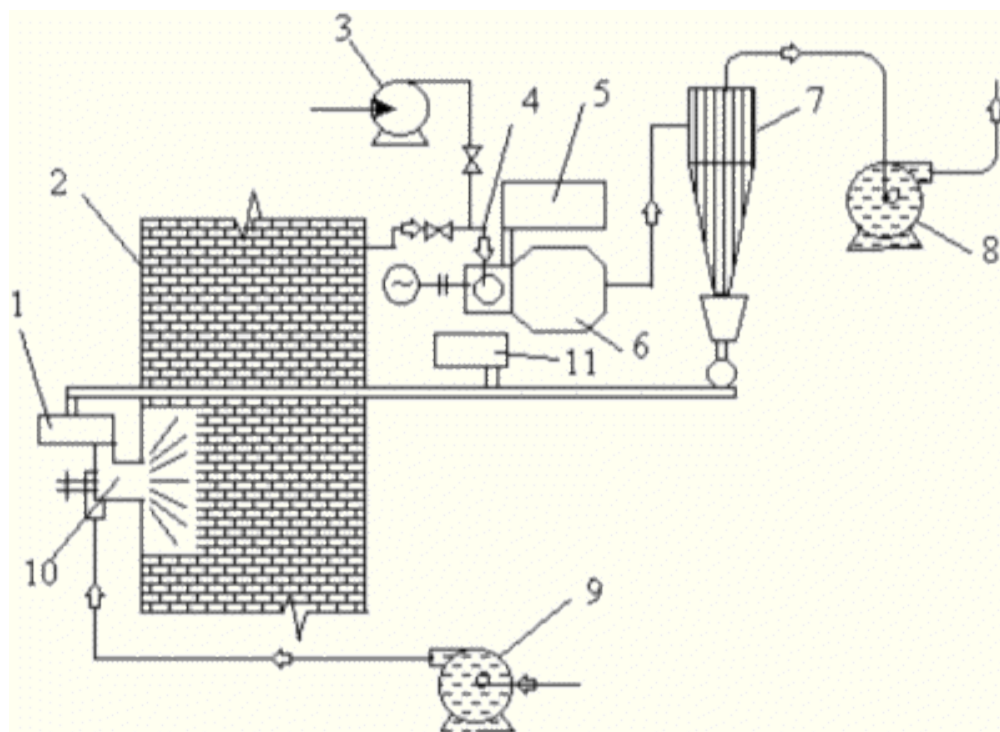


Figura 20: Diagrama de Sistema de combustión directa de los residuos biomásicos. 1. Alimentador al quemador. 2. Horno. 3. Ventilador. 4. Entrada de gases al secador. 5. Alimentador húmedo. 6. Secador dinámico. 7. Ciclón. 8. Ventilador de tiro inducido. 9. Ventilador de tiro forzado. 10. Quemador rotatorio. 11. Alimentador de los RAC.

La eficiencia de las calderas es definida como el porcentaje del potencial energético del combustible que es convertido a energía en forma de vapor. Los factores más incidentes en la eficiencia de la biomasa son el contenido de humedad del combustible, el exceso de aire introducido en la caldera al momento de la combustión y el porcentaje de material parcialmente o no incinerado. El rango general de eficiencia de un horno tipo parrilla y un sistema de caldera fluidizado es cercano al 65 y 95%, respectivamente. En general el tipo y la disponibilidad del combustible tienen una mayor

incidencia en el nivel de eficiencia, ya que material con alto poder calorífico y bajo contenido de humedad puede rendir con un 25% de mayor eficiencia que combustibles de bajo poder calorífico y alta humedad.

Estos valores son confirmados para el cálculo de pérdidas de eficiencias estimadas por la EPA (2011), en el catálogo de cogeneración, en base a las características del combustible de entrada, tales como el exceso de aire, flujo de gas, temperatura exhausto, contenido de humedad, porcentajes de hidrógenos y otros.

Adicionalmente, las calderas de biomasa son típicamente operadas con un considerable exceso de aire, de manera tal que pueda ocurrir combustión completa del material, pero esto tiene un impacto negativo en los niveles de eficiencia. En general, se indica que los niveles de eficiencia aumentan un 1% por cada 15% de reducción del exceso de aire en la caldera. (ORNL, 2002).

4.3.2. Gasificación

La gasificación es un proceso de conversión térmica incompleta, donde el combustible sólido es transformado parcialmente a un gas mediante un proceso de oxidación a muy altas temperaturas. Como producto principal se obtiene un gas combustible compuesto por hidrógeno, metano y monóxido de carbono. La calidad y composición del gas producido en la gasificación termoquímica depende del agente gasificador y del lecho de gasificación utilizado.

La gasificación es una alternativa con mejores rendimientos que la combustión en calderas. El empleo de motores diesel o de turbinas de gas para quemar el gas introducido puede elevar el rendimiento a valores por encima del 30% con fin último de generación eléctrica, sin embargo ésta es una opción poco extendida. Los métodos convencionales usan el aire como agente gasificante, si bien en ocasiones se emplea aire enriquecido en oxígeno, aumentando el poder calorífico del gas resultante, al disminuir el contenido de nitrógeno (Tabla 15).

Tabla 15: Agentes Gasificadores

Proceso	Agente de Gasificación	Poder Calorífico [MJ/m ² N]
Gasificación Directa	Aire	4 - 7
Gasificación con oxígeno puro	Oxígeno	10 - 12
Gasificación Indirecta	Vapor	15 - 20

El principal problemas que presenta la gasificación de biomasa como tecnología para la generación eléctrica es la limpieza del gas resultante del proceso de las impurezas que lo acompañan, por lo que dentro de las tecnologías, se deben considerar los costos de los equipos de limpieza y/o filtros purificadores. Un diagrama de los esquemas de gasificación, clasificados por el lugar de ingreso del agente gasificante, se muestra en la Figura 21.

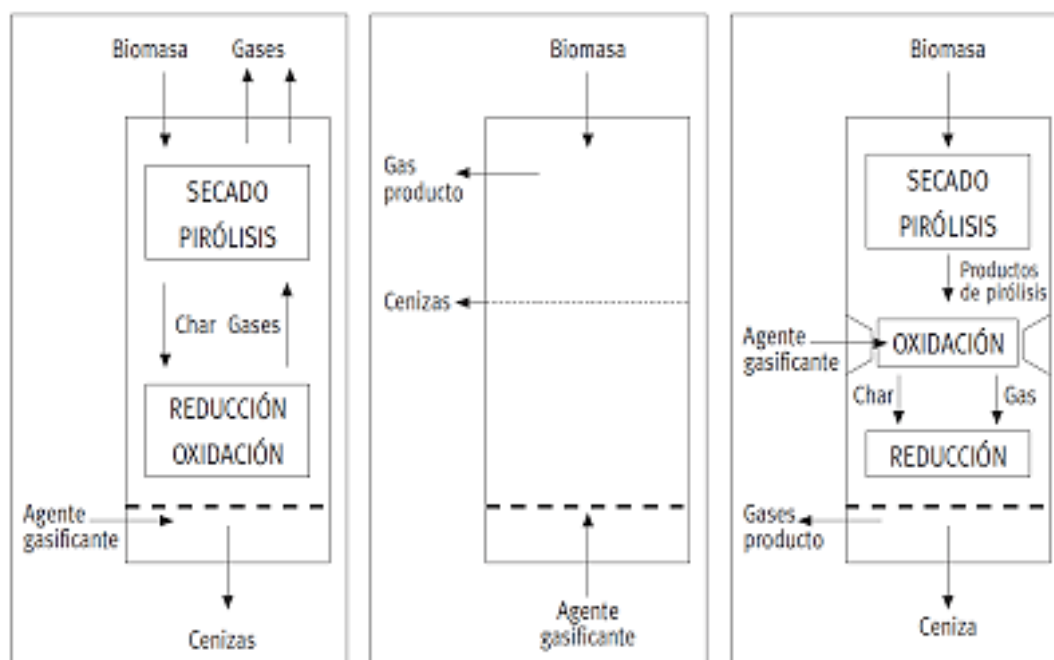


Figura 21: Esquemas de funcionamiento de gasificadores: a) Updraft, b) Lecho fluidizado y c) Downdraft

Para la producción de syngas, se requiere una serie de pasos. El primero de ellos, llamado pirólisis, consiste en calentar la materia prima a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, evitando así su combustión. Esto es realizado utilizando entre un quinto a un tercio del oxígeno requerido para la combustión completa. De esta forma sucede la descomposición térmica del material, produciendo una fracción gas (syngas), líquida (alquitrán) y sólida (char) (Fatih Demirbas, et al., 2011; U.S. EPA, 2007).

Existen varios procesos por los cuales se lleva a cabo la pirólisis en biomasa forestal, la que dependerá de ciertos factores que pueden modificar la composición de los combustibles obtenidos. En general, los factores que contribuyen a la variación de la composición de los productos obtenidos y de las fracciones de gas, líquido y sólido son: la velocidad de calentamiento del reactor, la presión y el tiempo de residencia de los gases.

Tabla 16: Rendimientos típicos de los productos (base madera seca), obtenidos por diferentes modos de pirolisis de la materia. Fuente: PEP 2013

Modo	Condiciones	Líquido	Carbón	Gas
Gasificación	~800° C	5%	20%	85%
Flash	~500° C corto tiempo de residencia de vapor caliente (~1s)	75%	12%	13%
Intermedio	~500° C tiempo de residencia de vapor caliente (~10-30s)	50%	25%	25%
Carbonización lenta	~400° C largo tiempo de residencia de vapor caliente (~horas-días)	30%	35%	35%
Torrefacción lenta	~500° C tiempo de residencia de sólidos (~30min)	-	82%	18%

Las decisiones de diseño se deben basar en la calidad y destino para la que se producen los combustibles, siendo estos procesos muy diversos en sus potenciales productos.

Los siguientes pasos consisten en gasificaciones adicionales de las fracciones líquidas y sólidas. Los gases producidos cuentan con poderes caloríficos reales de un 60-80% el poder calorífico de la biomasa.

Existen diferencias en los valores de eficiencia y poderes caloríficos de los distintos tipos de gasificadores, pero los valores de operación usuales son apreciables cuando la biomasa se gasifica con fines eléctricos, en plantas de pequeña dimensión. Un gasificador que produce 12MWe es uno considerado de gran tamaño y por lo tanto, no se considera para fines de éste estudio significativa la evaluación de una tecnología a tan pequeña escala, pues los costos de inversión se deben multiplicar y no son representativos por unidad de capacidad instalada.

Adicionalmente, se ha utilizado una tecnología de conversión eléctrica que optimiza su rendimiento por usar éste tipo de tecnología, lo que se hará igualmente en la conversión a biocombustibles, por lo que una conclusión importante es que la gasificación es un proceso intermedio de conversión que no será evaluado en forma particular.

Un punto importante a favor de los gasificadores que vale la pena mencionar, es que ellos necesitan menor cantidad de biomasa para producir igual potencia, debido a su mayor eficiencia en la producción de energía (posibilidad de utilizar ciclo combinado).

4.3.3. Biocombustibles

La biomasa tiene potencial de generación de biocombustibles de segunda generación por su estructura lignocelulosa (contenido de azúcares, lignina y celulosa). En particular, para la producción de bioetanol se han desarrollado varios acercamientos mediante el financiamiento de proyectos de investigación.

Existen dos aproximaciones a la producción de etanol. El primero corresponde a la plataforma de azúcar (sugar platform), y el segundo a la plataforma de syngas (syngas platform). El primero consiste en la producción de bioetanol a partir del rompimiento de la biomasa en azúcares individuales, para luego fermentar estas azúcares a etanol. En contraste, la plataforma de syngas consiste en gasificar la biomasa, cuyo producto gaseoso es luego transformado catalíticamente a etanol, o bien, fermentado a etanol por microorganismos específicos

La producción de etanol celulósico en la actualidad es factible y se está realizando. La pregunta que surge de inmediato es si esta producción está siendo rentable a escala comercial. En el marco de un proyecto de investigación del consorcio BIOCORMSA, se desarrolló un intercambio de experiencias en el caso de gasificación, junto a un consorcio de desarrollo tecnológico financiado por Volkswagen y Shell. Sin embargo, el escalamiento de la tecnología y la poca experiencia de expertos, hicieron que el proceso de comisionamiento tardara lo suficiente para el retiro de las inversiones y la insolvencia del proyecto.

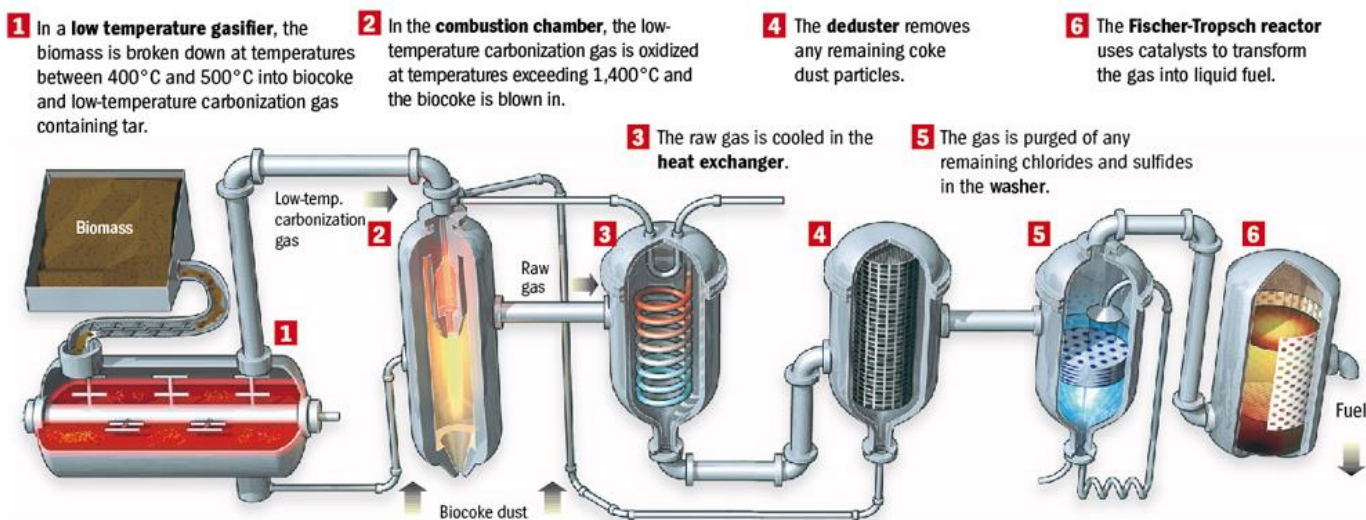


Figura 22: Esquema de producción sintética de biocombustible utilizado por Choren. 1 Gasificador a bajas temperaturas. 2. Cámara de combustión. 3 Intercambiador de calor. 4 Eliminador de cenizas. 5 Lavador de residuos. 6 Reactor Fisher – Tropsch.

Sin embargo, la búsqueda por el mejor proceso para el desarrollo de estas inversiones no cesa y numerosas son las compañías que poseen proyectos para producciones comerciales de etanol celulósico (*Abengoa Bioenergy, Bluefire Ethanol, POET, Range fuels, Verenium-BP*), y están siendo apoyadas por el gobierno de Estados Unidos a través del departamento de energía (*US. DoE*).

Aun así, hasta la fecha no se ha conocido información de ninguna planta funcionando en modo comercial y existe cierta incertidumbre sobre la tecnología más eficiente (*Abengoa Bioenergy, 2010; Coskata, 2011; Spatari, Bagley, & MacLean, 2010*). Algunas de estas compañías cuentan con plantas piloto actualmente funcionando de hasta 5.4m³ de etanol al año.

En contraste, los proyectos actuales para la producción de etanol celulósico a escalas comerciales proponen plantas diseñadas para la producción de 100 – 400 miles de m³ de etanol al año, para lo cual necesitan consumir entre 500.000 – 1.100.000 toneladas anuales de biomasa.

En particular, dado que la información disponible es bibliográfica, para el desarrollo del presente trabajo, se utilizará la información proporcionada en el diseño de 2011 del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (*NREL*).

La NREL (<http://www.nrel.gov/>) se dedica a la investigación, desarrollo, comercialización y despliegue de tecnologías de energías renovables y de eficiencia energética. Es por esto que su interés está centrado en el desarrollo y posterior comercialización de las tecnologías.

Sus diseños se han transformado en los procesos estándar de obtención de etanol celulósico (*Huang, Ramaswamy, Al-Dajani, Tschirner, & Cairncross, 2009; Sohel & Jack, 2011*).

Es así que estas tecnologías son, en consideración, las formas más cercanas y costo-eficientes de aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica proveniente de residuos forestales. Todas estas se encuentran ampliamente analizadas y reconocidas en la literatura (*NREL, 2011b; Sohel & Jack, 2011; Wright & Brown, 2007; Wyman, 1994*).

4.3.4. Costos de Inversión de tecnologías de conversión

En 2012, la Agencia Internacional de la Energía Renovable (IRENA, por sus siglas en inglés), desarrolló un estudio estimativo de los costos de inversión y de mantención y operación de las tecnologías que se encuentran en fase avanzada de desarrollo, de las que se excluyen los procesos en etapa de investigación y proyectos de planta pilotos.

En la Tabla 17, se muestra una tabla resumen de los costos de las tecnologías con mayor desarrollo y los costos de nivelación que requiere cada una para ser rentables; se entiende por éste último, el valor mínimo al que debe ser comercializada la unidad de energía, tal que el proyecto no presente pérdidas, para un período de evaluación de 25 años, a una tasa de mercado del 12% (IRENA, 2012).

En el caso de estudio, interesan las primeras tres tecnologías. Mientras que para la conversión a biocombustibles, los costos se presentan por separado, dado que la tecnología y los procesos de conversión no pueden ser comparados de esta manera.

Tabla 17: Resumen de Costos de Inversión por Tecnología. Fuente: IRENA 2012

	Costos de Inversión (USD/kW)		Costo nivelación de la energía (USD/kWh)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Calderas de Lecho Fijo	1880	4260	0,06	0,21
Calderas de Lecho Fluidizado	2170	4500	0,07	0,21
Gasificación en Lecho Fluidizado	2140	5700	0,07	0,24
Caldera Lecho Fijo, Cogeneración	3550	6820	0,07	0,29
Gasificación, Cogeneración	5570	6545	0,11	0,28
Rellenos Sanitarios	1917	2436	0,09	0,12
Biodigestores	2574	6104	0,06	0,15
Co-combustión (costo adicional)	140	850	0,04	0,13

Los costos de inversión indicados consideran la ingeniería, planificación y construcción del proyecto, además del pre tratamiento de la biomasa y la conexión a la red, basado en la experiencia de los países con mayor desarrollo en éstas tecnologías. Se prevé que los precios estimados para la adquisición de la biomasa disminuyan en los países en vías de desarrollo, que tienen en menor cantidad este tipo de tecnologías, por lo que el valor podría ser sobre estimativo de los costos reales.

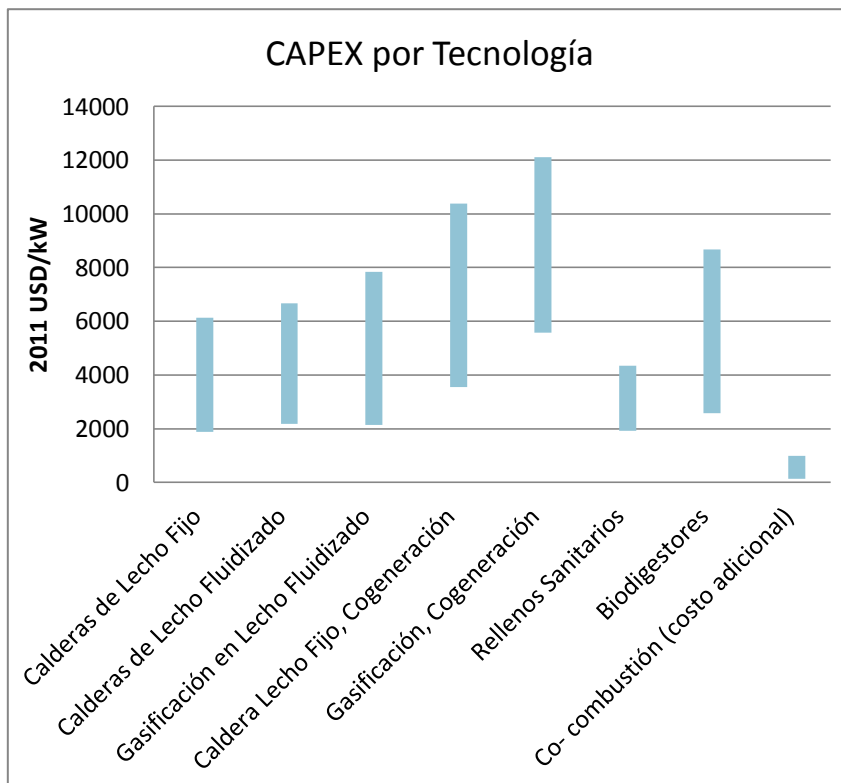


Figura 23: Gráfico de comportamiento costos de inversión por Tecnología

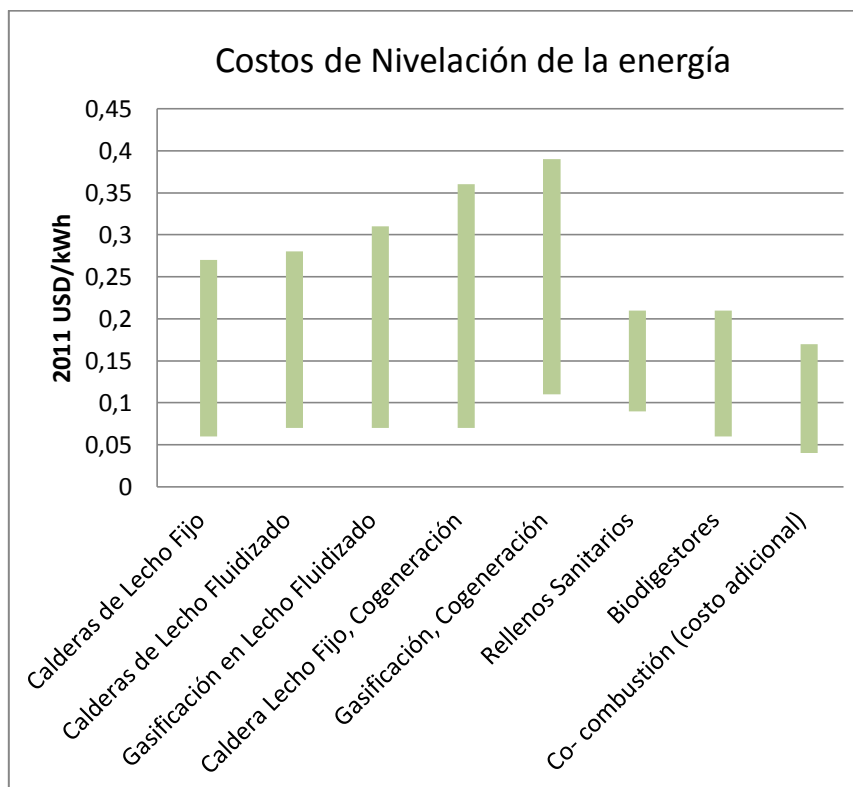


Figura 24: Gráfico del Valor de la Energía para alcanzar economías de escala, según inversión por tecnología.

Del mismo modo, se tienen costos de nivelación para biocombustibles, desarrollados por NREL, que se actualizaron desde la publicación anterior (2008), como se muestra en la Figura 25, donde MESP es el valor mínimo de venta del combustible, dados los costos de conversión:

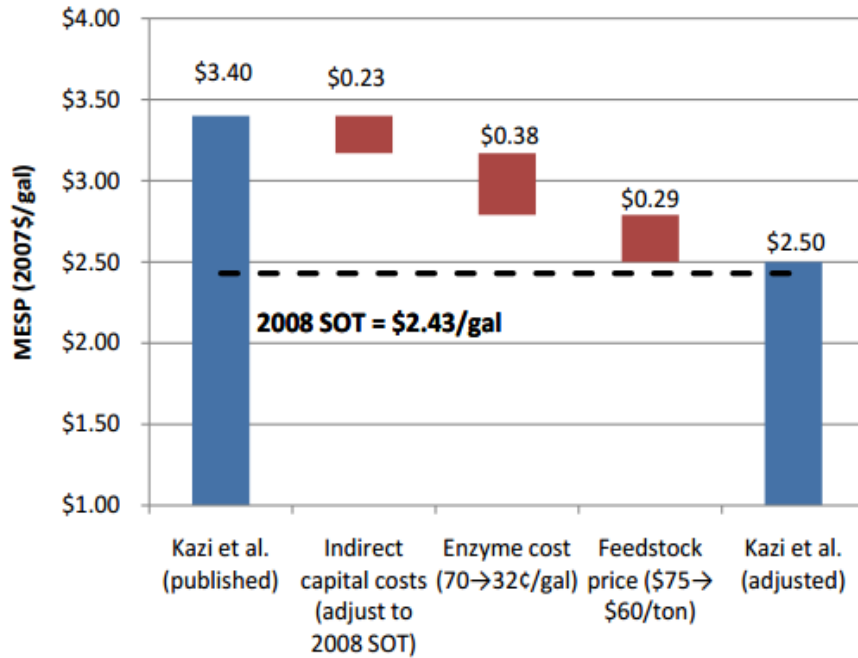


Figura 25: MESP o precio de nivelación del combustible para bioetanol, NREL, 2011b

4.3.5. Costos de Operación y Mantenimiento

En cuanto a los costos de operación, se consideran costos fijos que abarcan costos de personal, mantenimiento programada, reemplazos rutinarios de componentes o equipos (para calderas, gasificadores, equipos del sistema de alimentación, etc.-), contingencia y seguros. Para plantas de mayor tamaño, se tienen costos específicos (por kW) más bajos, debido al impacto en las economías de escala de los costos fijos. Los costos variables, en cambio, dependen de la producción de la planta y son usualmente expresados como el valor por unidad de energía generada (USD/kWh). Incluyen costos de combustible de biomasa, mantenciones imprevistas, retiro de cenizas y los costos incrementales por servicios.

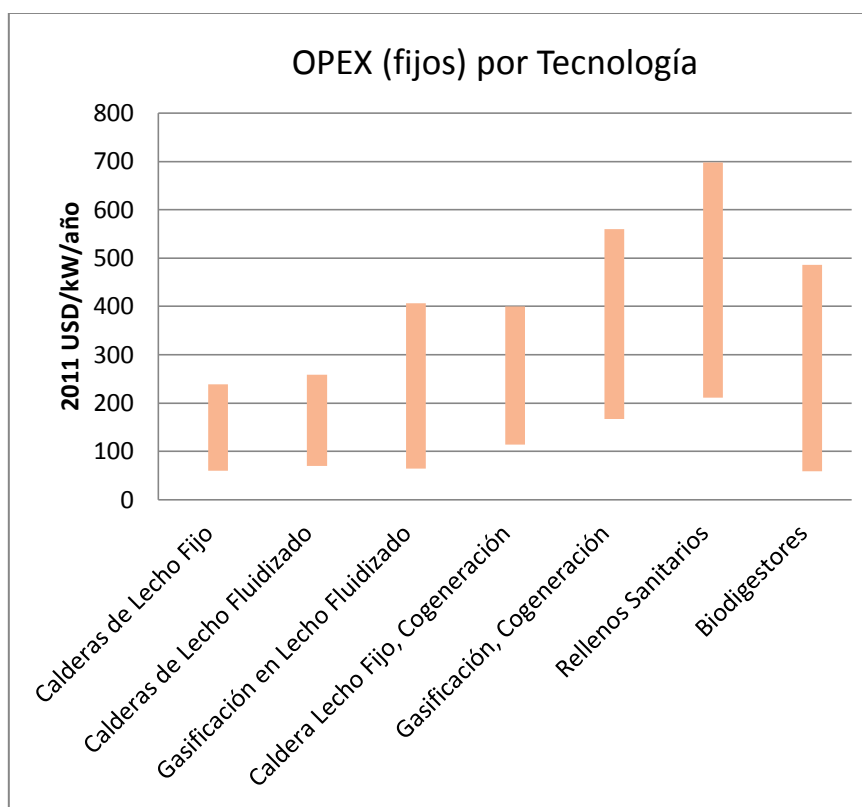


Figura 26: Costos de Mantenimiento y operación como porcentaje de CAPEX

Tabla 18: Resumen de Costos de Mantenimiento y Operación por Tecnología. Fuente: IRENA 2012

	Costos Fijos de Operación (% CAPEX/año)		Costos Variables de Operación (USD/MWh)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Calderas de Lecho Fijo	3,2%	4,2%	3,80	4,70
Calderas de Lecho Fluidizado	3,2%	4,2%	3,80	4,70
Gasificación en Lecho Fluidizado	3,0%	6,0%	3,70	-
Caldera Lecho Fijo, Cogeneración	3,2%	4,2%	3,80	4,70
Gasificación, Cogeneración	3,0%	6,0%	3,70	-
Rellenos Sanitarios	11,0%	20,0%	No aplica	No aplica
Biodigestores	2,3%	7,0%	4,20	-

Se observa que los costos demandan en promedio alrededor del 1-6% de los costos iniciales de inversión por año.

Las alternativas que se proyectan como las más rentables según estas estimaciones son aquellas que requieren un menos costo de nivelación de energía, sin embargo, dependiendo de cuál será el método de financiación de la inversión de cada proyecto, se tiene que los costos iniciales pueden generar diferentes períodos de retorno.

Por otro lado, los países que firman el protocolo de Kyoto, tienen la posibilidad de bajar los costos de inversión, dada una venta regular de bonos por mover toneladas de carbono. Estos no han sido considerados, pero se estima que plantas con capacidades entre 1 a 3MW, pueden lograr costos de inversión menores a USD500/kW, mientras que otros tienen costos tan altos como USD5000/kW.

Se observa en la siguiente figura, la evolución y rango de precios de los certificados de reducción de emisiones en el período indicado, donde se observa claramente que la incidencia en el flujo analizado no es importante, dada la baja de precios de venta en el mercado.

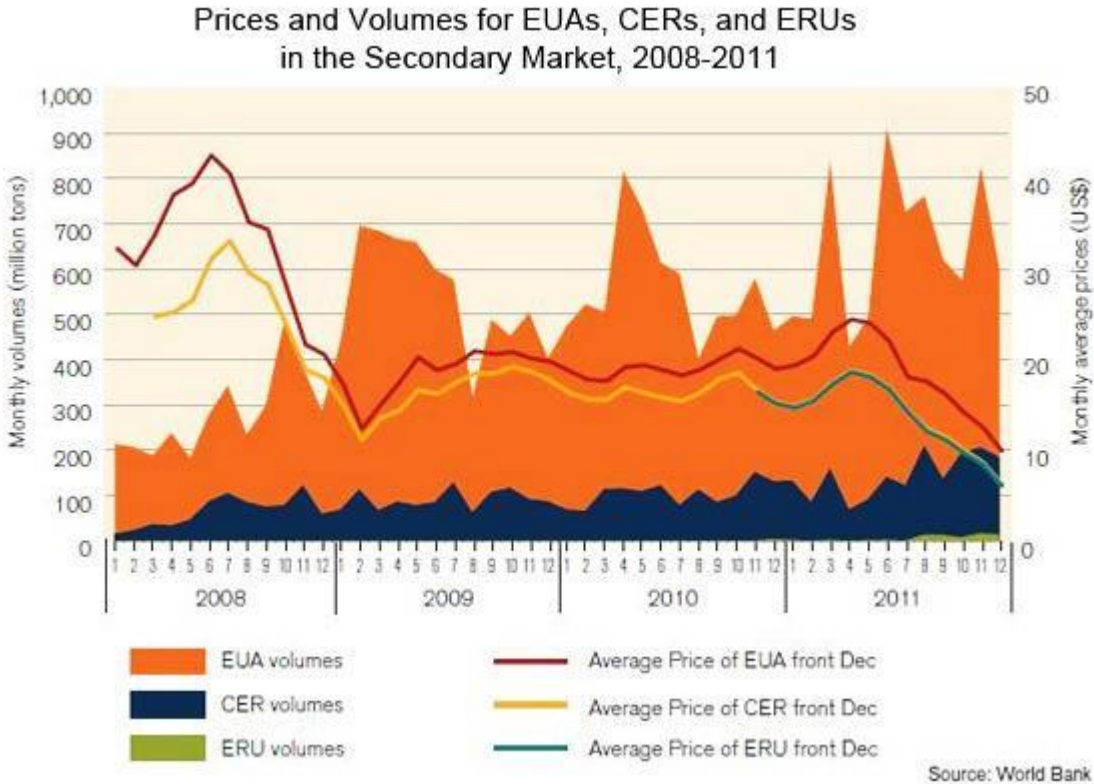


Figura 27: Gráfico evolución y comportamiento precios CER, EUA, ERU (2008-2011), Fuente: World Bank (2012): States and Trends of the Carbon Market Report 2012

Los costos unitarios de inversión para el caso de la conversión a biocombustibles se presentan en la Tabla 19:

Tabla 19: Costos de inversión en planta de bioetanol

Área de Proceso	Costo Compra	Costo Instalado
Área 100: Manejo de materias Primas*	\$ 14.200.000	\$ 24.200.000
Área 200: Pretratamiento	\$ 19.900.000	\$ 29.900.000
Área 200: Acondicionamiento	\$ 1.500.000	\$ 3.000.000
Área 300: Hidrólisis Enzimática y fermentación	\$ 18.500.000	\$ 31.200.000
Área 400: Producción de Enzimas	\$ 10.700.000	\$ 18.300.000
Área 500: Recuperación	\$ 11.100.000	\$ 22.300.000
Área 600: Aguas residuales	\$ 49.300.000	\$ 49.400.000
Área 700: Almacenamiento	\$ 2.800.000	\$ 5.000.000
Área 800: Caldera	\$ 36.500.000	\$ 66.000.000
Área 900: Utilidades	\$ 4.000.000	\$ 6.900.000
Total (excluyendo Área 100)	\$ 154.500.000	\$ 232.100.000
Almacén	4.0% ISBL**	\$ 4.200.000
Acondicionamiento de sitio	9.0% ISBL	\$ 9.400.000
Cañerías adicionales	4.5% ISBL	\$ 4.700.000
Total Costos Directos (TCD)		\$ 250.400.000
Gastos Prorratableables	10.0% TCD	\$ 25.000.000
Gastos trabajo en Terreno	10.0% TCD	\$ 25.000.000
Gastos de Oficina y Construcción	20.0% TCD	\$ 50.100.000
Contingencias	10.0% TCD	\$ 25.000.000
Otros Costos	10.0% TCD	\$ 25.000.000
Total Costos Indirectos		\$ 150.200.000
Inversiones de Capital Fijo (ICF)		\$ 400.600.000
Terreno		\$ 1.800.000
Capital de Trabajo	5.0% ICF	\$ 20.000.000
Total Inversiones de Capital (TIC)		\$ 422.500.000
Factor de Lang (ICF/costo de compra equipos)***		3,1
TIC anual por galón		\$ 6.92/gal
2007 dollars		

*Manejo de materias primas no incluido en cálculo

**Inside-battery-limits (ISBL), equipment costs

***Área 600 no incluida en Factor de Lang

Se consideran sistemas de pretratado diferentes a los considerados en el caso de transformación eléctrica. Los costos y el detalle de éstos están incluidos en el programa ASPEN.

Mientras que para el caso de la conversión eléctrica se presentan en la Tabla 20:

Tabla 20: Costos de inversión para conversión eléctrica en caldera de lecho fluidizado

Carácterística	Consumo de Biomasa Combustible (ton/día)		
	100	600	900
Entrada de calor por Biomasa (MMBtu/hr)	35,4	297,5	446,3
Planta Integrada de Vapor de Lecho Fluidizado			
Salida de Vapor (lb/hr)	20.000	175.000	260.000
Costos de caldera de Lecho Fluidizado	\$ 6.175.000	\$ 14.490.000	\$ 19.790.000
Cosotos otros equipos e instalaciones	\$ 795.000	\$ 10.020.000	\$ 12.460.000
Costo Total Sistema de Calderas instalado	\$ 6.970.000	\$ 24.510.000	\$ 32.250.000
Costo Total Pretratamiento de Biomasa	\$ 2.640.000	\$ 5.430.000	\$ 7.110.000
Costo Total Planta de Vapor	\$ 9.610.000	\$ 29.940.000	\$ 39.360.000
Costo Unitario (\$/lb de vapor)	\$ 480	\$ 171	\$ 151

*Costos de Pretratamiento son estimados de acuerdo a la curva de capital desarrollada en la sección 4.1.5

Fuente: Basado en datos de Antares Group, Inc., 2003: discusión con proveedores y fabricantes de equipos.

5. Potencial de Generación por tecnología

El cálculo del potencial de generación anual se realiza en base a las estimaciones del manejo de bosque nativo y plantaciones dendroenergéticas, según las consideraciones de la Tabla 21. En ella, se describen las características físicas a considerar, donde se ha supuesto que una vez cosechada la biomasa, tendrá un tiempo variable de espera en lugares de acopio, con lo que la humedad se verá reducida hasta un 50% promedio.

Tabla 21: Valores considerados para el cálculo del potencial energético.

Factor	Bosque nativo	Plantaciones	Unidad
Poder calorífico inferior especies bosque nativo para 50% humedad base peso seco	2.686,00	3.253,96	kcal/kg
Densidad básica de la madera según especie	425,00	495,00	kg/m ³
Contenido de Humedad madera verde base peso seco	50	50	%
Eficiencia eléctrica	30	30	%
Eficiencia Térmica	70	70	%
Eficiencia Bioetanol	75	75	%
Factor de planta	80	60-90	%
Constante potencial energético	0,001163	-	kWh/kcal
Constante contenido energético	-	21,10	MJ/lt

Se ha considerado un potencial técnico de generación base por tipo de conversión. En particular, el factor de eficiencia eléctrica con biomasa se sitúa entre 20 y 25% para tecnologías convencionales (*Direct ombustion/Steam Cycle*). Sin embargo con tecnologías mejoradas como ciclos combinados de Rankine (*Organic Rankine Cycle*) y alternativas de gasificación permiten mejorar la eficiencia eléctrica en 10 a 15%. Envergent TECH LLC. (2010) indica eficiencias de hasta un 36% para el caso de biomasa con reutilización del calor (*RTO Dual Engine Advanced Cycle*). Así también para generación térmica, en base a ciclos de cogeneración, donde se ha estimado una eficiencia del 70%. Finalmente, la eficiencia del bioetanol está dada por el modelo NREL, como se detalla en el siguiente apartado.

A partir de la información anterior, y siguiendo el esquema de la Figura 28, los rendimientos por región se encuentran en la Tabla 22 y

Tabla 23 para residuos de bosque nativo y plantaciones, respectivamente.

Se describe la metodología de obtención para los residuos forestales de bosque nativo y plantaciones a continuación:

- Generación eléctrica y térmica:

Se calcula según el esquema de la Figura 28, considerando factores de eficiencia eléctrica del 30% (conservadoras dado que se ha llegado a eficiencias de hasta 38%) y del 70% en eficiencia térmica. Factores de planta del 80% y volúmenes de biomasa (BV) al 50% de humedad por región.

Adicionalmente, el poder calorífico considerado es para especímenes verdes a la misma humedad, puesto que no se han considerado inversiones en pretratamiento. Luego el cálculo está dado por el producto del volumen de biomasa, el poder calorífico de ésta y los respectivos factores de conversión de energía, reducidas por la eficiencia real de los sistemas.

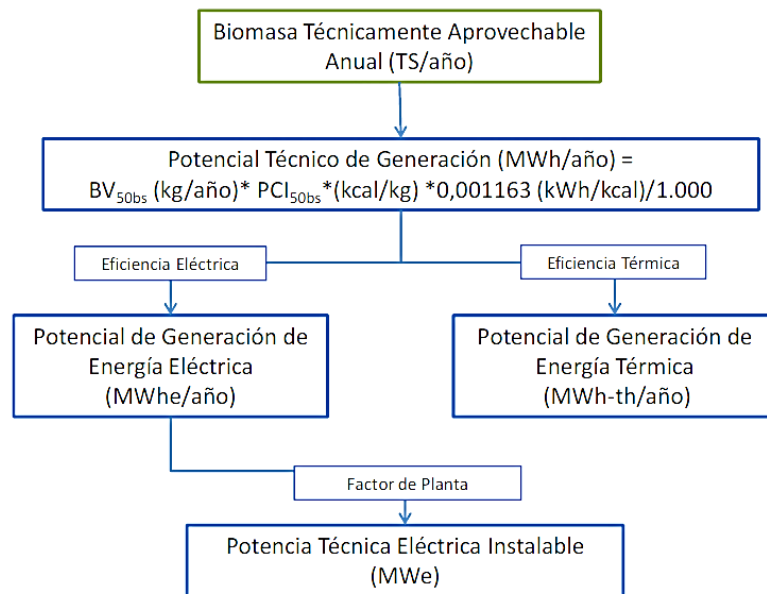


Figura 28: Esquema de obtención de potencial eléctrico y térmico de la biomasa. Fuente: UACH, CONAF, 2013

- Generación de biocombustibles:

El proceso analizado corresponde al último proceso diseñado por la NREL (NREL, 2011b) y se encuentra escalado para trabajar con un mínimo de 2.000 toneladas secas de materia prima por día. A partir de este consumo de biomasa, el diseño posee un rendimiento de 79 galones por tonelada seca de biomasa, resultando en 173.000 galones por día de etanol.

Para fines de ajustar a la disponibilidad de biomasa presente, se ha utilizado la calculadora de rendimiento teórico de la NREL (herramienta gratuita disponible en http://www1.ere.energy.gov/biomass/ethanol_yield_calculator.html) que entregará un rendimiento estándar por característica de espécimen considerado en la conversión energética final. Las tecnologías disponibles y pruebas en plantas han permitido acotar la producción real a un 60-90% del teórico, por lo que en éste caso, se obtendrá un rango de producción.

Tabla 22: Potencial de Generación Eléctrica, Térmica, Bioetanol y biogás, por biomasa de manejo forestal de bosque nativo.

Región	Potencial Técnico de Generación (PTG) [MWh/año]	Potencial Eléctrica base BTA [MWhe/año]	Potencial Térmica base BTA [MWht/año]	PTG base BTN [MWh/año]	Potencial Eléctrica base BTN [MWhe/año]	Potencial Térmica base BTN [MWht/año]	BTL Etanol (60% rend.) base BTN [m ³ /año]	BTL Etanol (90% rend.) base BTN [m ³ /año]
IV	6.869	2.061	4.808	-	-	-	-	-
V	36.286	10.886	25.400	22.951	6.885	16.065	404.236	606.354
RM	31.638	9.491	22.147	12.277	3.683	8.594	216.231	6.473.308
VI	281.809	84.543	197.266	245.017	73.505	171.512	4.315.539	324.346
VII	2.291.991	687.597	1.604.393	2.239.618	671.885	1.567.733	39.446.946	59.170.418
VIII	7.730.714	2.319.214	5.411.500	4.807.640	1.442.292	3.365.348	84.678.149	127.017.224
IX	5.645.818	1.693.746	3.952.073	2.823.989	847.197	1.976.792	49.739.617	74.609.425
X	12.636.394	3.790.918	8.845.476	5.932.065	1.779.619	4.152.445	104.482.915	156.724.372
XIV	5.906.364	1.771.909	4.134.454	4.382.748	1.314.824	3.067.924	77.194.416	115.791.624
XI	17.861.134	5.358.340	12.502.794	15.929.218	4.778.765	11.150.453	280.565.231	420.847.846
XII	8.233.755	2.470.126	5.763.628	7.881.969	2.364.591	5.517.378	138.827.060	208.240.590
Total	60.662.771	18.198.831	42.463.940	44.263.753	13.279.126	30.984.627	779.628.358	1.169.442.538

Tabla 23: Potencial de Generación Eléctrica, Térmica, Bioetanol y biogás, por biomasa de manejo forestal de plantaciones.

Región	PTG base BTN [MWh/año]	Potencia Eléctrica base BTN [MWhe/año]	Potencia Térmica base BTN [MWht/año]	BTL Etanol (60% rend.) base BTN [m ³ /año]	BTL Etanol (90% rend.) base BTN [m ³ /año]
VII	47.114	14.134	32.980	829.831	1.244.747
VIII	42.686	12.806	29.880	751.840	1.127.759
IX	65.686	19.706	45.980	1.156.951	1.735.426
X	28.289	8.487	19.802	498.255	747.383
XIV	32.034	9.610	22.423	564.214	846.321
XI	15.308	4.592	10.716	269.628	404.442
XII	405.429	121.629	283.800	7.140.917	10.711.375
Total	231.117	69.335	161.782	4.070.719	6.106.079

6. Análisis Financiero

De acuerdo a los potenciales y costos asociados a los sistemas de operación e inversión de las tecnologías seleccionadas, se analizarán de manera separada los potenciales energéticos, por región y por conversión, dado que se estimaron los volúmenes de esta manera. Así, se tendrán valores de potencia instalada en generación energética por región y sus correspondientes precios de nivelación de energía.

Como parte de la evaluación, se recurre a la estimación de precio mínimo de venta de combustible o energía, para obtener indicadores económicos deseables. De ésta forma, se tendrán herramientas para desarrollar incentivos financieros que permitan hacer competitivos los combustibles generados como ERNC.

Los indicadores considerados fueron $TIR > 12\%$ y $VAN > 0$ para un período de evaluación de 20 años, con 70% financiamiento a tasa de 6% y un crecimiento estimado de 4%, según lo recomienda la *Guía metodológica para evaluación de EERR*, publicada por Fundación Chile y el Banco Interamericano de Desarrollo (2007).

En el primer caso, para las potencias de generación eléctrica de la Tabla 22, usando factores de conversión y calculando la potencia instalada base a 80% de factor de planta, equivalente a 7008 horas de trabajo anual, se calcularon los costos de inversión (CAPEX) y operación y mantención (OPEX), tanto fijos como variables, para obtener un precio mínimo de venta de energía.

Las tecnologías a evaluar, seleccionadas anteriormente, deben tener un punto de desarrollo que permita estimar los costos de instalación para una producción de al menos un 75% de confianza, por lo que la única tecnología de gasificación considerada es la gasificación *up drift*, comparable a los costos de generación de energía más transporte. En general, la ventaja de gasificar se muestra en los costos asociados a conectar esa energía, versus el transporte, que no es una alternativa viable en las zonas más australes sin un punto intermedio de procesamiento del combustible.

Los resultados para los residuos de bosque nativo se presentan a continuación:

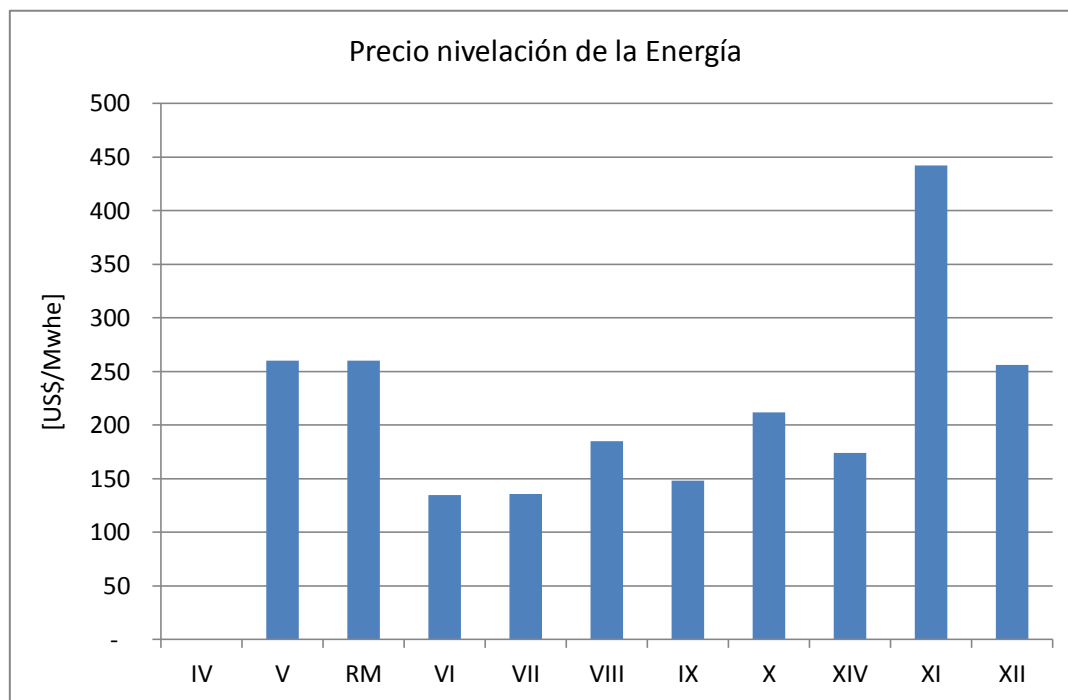


Figura 29: Gráfica de precios mínimos de venta de energía eléctrica por región.

Tabla 24: Precios de Nivelación de energía eléctrica por región.

Región	Potencia Eléctrica Instalada base BTN [MWe]	Costos de Inversión [US\$]	Costos de Operación y Mantenimiento [US\$/año]	Energía generada [MWH]	Precio nivelación de la Energía [US\$/Mwhe]
IV	-	-	-	-	-
V	1	386.863	19.982	6.885	260
RM	1	206.945	10.689	3.683	260
VI	10	4.130.194	213.325	73.505	135
VII	96	24.503.925	1.393.486	671.885	136
VIII	206	46.100.532	2.718.287	1.442.292	185
IX	121	30.897.627	1.757.082	847.197	148
X	254	56.882.645	3.354.047	1.779.619	212
XIV	188	42.026.224	2.478.048	1.314.824	174
XI	682	152.745.499	9.006.536	4.778.765	442
XII	337	75.580.329	4.456.544	2.364.591	256

Se observa que los costos son elevados en general, sin embargo algunos están dentro del margen de venta actual (0.129 US\$/kWh, Diciembre 2013). Adicionalmente, los escalamientos de la tecnología se hacen patentes en las grandes desviaciones que presenta el valor con la capacidad instalada de las plantas. Cabe destacar que se ajustaron los valores de CAPEX y OPEX por capacidad instalada, según lo descrito en el apartado anterior y que por tanto, para menores capacidades el costo por MWe instalado es mayor.

Lo que sucede en el caso de la XI región, es una dispersión que se debe tratar con mucho cuidado, dado que el potencial de bosques nativos es muy alto, sin embargo, dadas las dificultades de acceso a ellas, y el poco registro de éstos problemas, se ha sobreestimado la biomasa que se puede obtener de ésta zona. Así mismo, los costos de inversión asociados a la conversión de tal cantidad de biomasa, hacen inviable la amortización de la inversión que es por mucho mayor al promedio.

Un análisis más estricto, determinaría que los rangos de precios mínimos para una rentabilidad como la supuesta no se alcanzan con los bajos rendimiento y altos costos de recolección de la biomasa, la dispersión de las zonas de producción de la misma y la tecnología seleccionada.

Dados los resultados adversos, y la poca productividad para este tipo de conversión de las plantaciones dendroenergéticas, no se tienen evaluaciones de ellas. La capacidad instalada de éste tipo de plantas es mínima, de 3MWe en el mejor de los casos y los costos de inversión son mucho mayores que los aplicables al bosque nativo.

Los precios se encuentran en los rangos descritos por IRENA en la Tabla 24, sin embargo no constituyen un real nicho de negocio si no se valorizan externalidades positivas en el marco de desarrollo de ENRC y sus beneficios en el manejo del bosque.

En segundo lugar, la evaluación del precio de nivelación para bioetanol o MESP (Minimum ethanol selling Price, por sus siglas en ingles), se realizó mediante la aplicación del software ASPEN Plus (Tabla 25), diseñado con una base de datos desarrollada junto a la NREL que determina la conversión de azúcares, lignina, hemicelulosa y celulosa por tipo de biomasa, de acuerdo a los registros y análisis físico químicos de especies en Estados Unidos.

Tabla 25: Interfaz de resultados ASPEN Plus

Ethanol Production Process Engineering Analysis

Corn Stover Design Report Case: 2012 model DW1102A
 Dilute Acid Pretreatment with Enzymatic Hydrolysis and Co-Fermentation
 All Values in 2007\$

Minimum Ethanol Selling Price (MESP):	\$2,15 /gal
Gasoline-Equivalent MESP:	\$3,27 /gal gasoline equivalent
Contributions:	
Feedstock	\$0,74 /gal
Enzymes	\$0,34 /gal
Non-Enzyme Conversion	\$1,07 /gal
Ethanol Production	61,0 MMgal/yr (Ethanol at 68 °F)
Ethanol Yield	79,0 gal / dry U.S. ton feedstock
Feedstock + Handling Cost	\$58,50 /dry U.S. ton
Internal Rate of Return (After-Tax)	10%
Equity Percent of Total Investment	40%

Capital Costs		Manufacturing Costs (cents/gal ethanol)	
Pretreatment	\$29.900.000	Feedstock + Handling	74,1
Neutralization/Conditioning	\$3.000.000	Sulfuric Acid	2,4
Saccharification & Fermentation	\$31.300.000	Ammonia	6,5
On-site Enzyme Production	\$18.700.000	Glucose (enzyme production)	19,3
Distillation and Solids Recovery	\$22.300.000	Other Raw Materials	12,9
Wastewater Treatment	\$49.300.000	Waste Disposal	2,5
Storage	\$5.000.000	Net Electricity	-10,8
Boiler/Turbogenerator	\$65.800.000	Fixed Costs	17,5
Utilities	\$6.900.000	Capital Depreciation	22,0
Total Installed Equipment Cost	\$232.200.000	Average Income Tax	12,3
		Average Return on Investment	56,7
Added Direct + Indirect Costs	\$190.700.000	Manufacturing Costs (\$/yr)	
(% of TCI)	45%	Feedstock + Handling	\$45.200.000
Total Capital Investment (TCI)	\$422.900.000	Sulfuric Acid	\$1.500.000
		Ammonia	\$4.000.000
Installed Equipment Cost/Annual Gallon	\$3,80	Glucose (enzyme production)	\$11.800.000
Total Capital Investment/Annual Gallon	\$6,93	Other Raw Materials	\$7.900.000
		Waste Disposal	\$1.500.000
Loan Rate	8,0%	Net Electricity	-\$6.600.000
Term (years)	10	Fixed Costs	\$10.700.000
Capital Charge Factor (Computed)	0,131	Capital Depreciation	\$13.400.000
		Average Income Tax	\$7.500.000
Denatured Fuel Production (MMgal/yr)	61,7	Average Return on Investment	\$34.600.000
Denatured Fuel Min. Sales Price	\$2,18	Specific Operating Conditions	
Denaturant Cost (\$/gal denaturant)	\$2,10	Enzyme Loading (mg/g cellulose)	20
		Saccharification Time (days)	3,5
Maximum Yields (100% of Theoretical)		Fermentation Time (days)	1,5
Ethanol Production (MMgal/yr)	80,3	Ethanol titer (wt%)	5,4%
Theoretical Yield (gal/U.S. ton)	103,9	Excess Electricity (kWh/gal)	1,8
Current Yield (Actual/Theoretical)	76,0%	Plant Electricity Use (kWh/gal)	3,9
		Plant Water Usage (gal/gal)	5,4

El proceso analizado corresponde al último proceso diseñado por la NREL (NREL, 2011b) y se encuentra escalado para trabajar con 2.000 toneladas secas de materia prima por día. A partir de este consumo de biomasa, el presente diseño posee un rendimiento de 79 galones por tonelada seca de biomasa, resultando en 173.000 galones por día de etanol.

Como resultado de este diseño, se obtiene un costo de US\$2,15/gal en moneda del 2007 (plant-gate price) como MESP para evaluación de proyectos de éstas características. Si bien, este costo representa un aumento considerable con respecto al reportado en el último diseño del 2002 (US\$1,49/gal en moneda del 2007) se cree que este diseño es más preciso, escalable e incluye avances tecnológicos en el tratamiento de los residuos. Cabe notar que los resultados se expresan en dólares base 2007, por lo que se debe considerar un cambio al valor actual de la moneda.

Un primer ajuste para la utilización de esta información es definir en la base de datos qué especie es la más representativa de las condiciones que se muestran en las Tabla 6, Tabla 7 y

Tabla 9. Posteriormente, los datos a ingresar para un abastecimiento de biomasa como el que ofrecen las regiones del país y el costo por tecnología para igualar el análisis realizado con la energía eléctrica. El escalamiento de la tecnología debe ser cuidadoso, ya que la producción depende fuertemente del proceso y los volúmenes de abastecimiento.

Los resultados se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26: MESP o nivelación de precios de combustible para bosque nativo

Región	BTL Etanol (90% rend.) base BTN [galones/año]	CAPEX [US\$]	OPEX [US\$/año]	MESP [US\$/galón]
IV	-	-	-	
V	386.942	8.248.220	923.047	0,50
RM	4.130.910	88.056.234	9.854.256	0,58
VI	206.980	4.412.074	493.749	0,50
VII	37.759.314	804.893.589	90.074.570	1,24
VIII	81.055.422	1.727.811.834	193.357.122	2,10
IX	47.611.641	1.014.909.980	113.577.225	1,41
X	100.012.894	2.131.917.366	238.580.034	2,43
XIV	73.891.860	1.575.110.301	176.268.497	1,93
XI	268.562.001	5.724.781.785	640.652.707	5,70
XII	132.887.717	2.832.691.069	317.002.686	3,08

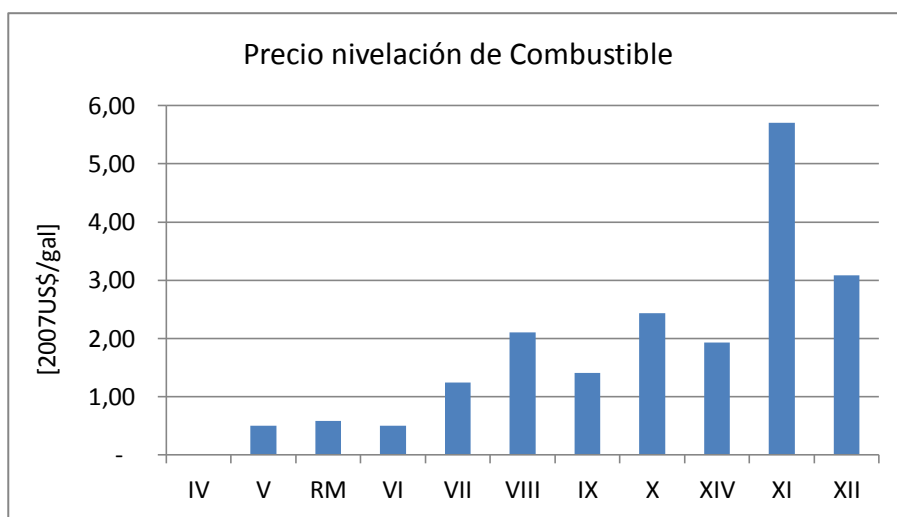


Figura 30: Precio de nivelación de combustibles en bosques forestales

Se observa que los precios mínimos de venta coinciden en rango a los que estipula la NREL. Un análisis más detallado debe considerar la caracterización del mercado, sobre todo para las escalas dónde los costos son similares respecto a los proyectados por el programa APEN Plus, indicados a continuación.

Tabla 27: MESP o nivelación de precios de combustible para bosque nativo

Región	BTL Etanol (90% rend.) base BTN [galones/año]	CAPEX [US\$]	OPEX [US\$/año]	MESP [US\$/galón]
IV	-	-	-	-
V	-	-	-	-
RM	-	-	-	-
VI	-	-	-	-
VII	14.710	313.560	35.090	0,54
VIII	13.327	284.090	31.792	0,50
IX	20.508	437.166	48.923	0,52
X	8.832	188.271	21.069	0,51
XIV	10.001	213.194	23.858	0,52
XI	4.780	101.882	11.401	0,52
XII	126.582	2.698.269	301.960	0,50

Se observa que los volúmenes de abastecimiento para aquellos precios bajo 2007US\$/gal no cumplen con la restricción de producción mínima dónde aplica la simulación a pesar de que se ajustan bastante bien a los volúmenes de producción de plantas pilotos y de investigación existentes, es claro que el costo de producción es bastante mayor al obtenido.

7. Modelos de Negocio

De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible constatar que existe una gran superficie utilizable para nuevas plantaciones y un gran potencial de bosque nativo, donde se puede realizar manejo de los residuos de la extracción y procesamiento de la madera en las regiones centrales y australes.

Por esto, de acuerdo a la información proporcionada y a las técnicas utilizadas en los países descritos en los apartados anteriores, se presentan alternativas para aprovechar el potencial forestal para obtener energía de biomasa en Chile.

Una de las conclusiones de los valores de nivelación de las energías calculados, indican que la incursión en el desarrollo de algunos proyectos requiere subvención. En particular, en el caso de la generación de biocombustibles, se tiene que dada la tecnología existente, poco desarrollada y poco probada, el incentivo debe estar puesto en programas de investigación que permitan la competitividad de este tipo de conversión.

Las alternativas propuestas para utilización de biomasa, se detallan a continuación.

7.1. Manejo sustentable del bosque nativo

Esta alternativa considera el aprovechamiento del bosque nativo mediante un manejo sustentable y con el fin de establecer una estrategia de gestión forestal sostenible y producción de energía renovable utilizando la biomasa generada en tratamientos de prevención de incendios forestales. El bosque nativo, al constituir el mayor recurso forestal disponible en nuestro país, con un 17,8% de cobertura de suelo a nivel nacional y sobre el 20% de la octava región al sur compone una de las alternativas más viables en cuanto al aprovechamiento para obtención de biomasa.

El manejo sustentable tiene efectos positivos en la mantención de la biodiversidad de bosques nativos mediante la replantación de individuos de las mismas especies cosechadas, además de la regeneración natural propia de los bosques. Más aún, la apertura del dosel mediante una leve

perturbación, en el bosque puede implicar una aceleración en la regeneración de los bosques debido a que se favorecen las condiciones para el reclutamiento de plántulas, al contar con más luminosidad y temperatura a nivel del suelo.

Por tanto, la utilización sustentable, además de asegurar la permanencia de la cobertura de bosque nativo, evitaría la cosecha para usos de menor valor de retorno, como el de leña para calefacción. Esto es posible al educar y capacitar a los dueños de predios acerca del recurso que poseen y al potencial negocio al que pueden incorporarse.

Más aún, la utilización de este recurso conlleva la necesidad de incorporar tecnologías de bajo impacto, con lo que también se incrementa la actividad económica en torno a la producción de biomasa, contribuyendo en un beneficio social para las comunidades en que se aplique esta alternativa, además de los desarrollos industriales en el área a nivel nacional.

El aspecto más difícil de implementar de esta alternativa es la logística que se debe establecer entre productores, extractores y consumidores del recurso, de manera de lograr una producción eficiente y a bajo costo. En países escandinavos, esta labor está generalmente a cargo de los municipios, debido a que son los principales consumidores al utilizar el recurso para cogeneración, con lo cual la labor se simplifica al estar centralizado el consumo.

En el caso de Chile, para la implementación a corto plazo de un plan de manejo forestal falta legislación e incentivos respecto a las energías renovables no convencionales y a la no utilización de sistemas de calefacción distritales, que podrían implementarse en ciudades australes.

Para facilitar la coordinación y proteger los intereses de los propietarios del recurso, es conveniente fomentar la agrupación de ellos en cooperativas. De esta manera se haría más eficiente la operación de un mercado de biomasa forestal, regulando los precios de manera más estable para los compradores y asegurando ingresos a los productores debido al mayor volumen de venta involucrado, en comparación a lo que podría lograr cada productor individualmente.

7.2. Aprovechamiento de residuos de aserraderos

Es importante el nivel de residuos resultantes del procesamiento de la madera en aserraderos. Las grandes empresas forestales aprovechan estos para cogeneración, donde se utiliza el calor para secado de la madera u otro proceso industrial, y/o para mover una turbina acoplada a un generador eléctrico para generar energía eléctrica de manera constante, a diferencia de otras energías renovables.

Es decir, los grandes productores de madera ya utilizan de manera eficiente el recurso de biomasa por lo que no habría que considerar mecanismos de incentivo dirigidos a este sector, sino que debe estar destinados a los pequeños y medianos aserraderos. Los pequeños y medianos aserraderos generalmente no utilizan este recurso en su propio beneficio y donan parte de sus residuos a personas o instituciones que les dan algún uso, como por ejemplo para actividades ganaderas.

El INFOR ha realizado un catastro de los aserraderos que operan en Chile, tanto móviles como permanentes, y da cuenta de los volúmenes de utilización de sus desechos. Al revisar las cifras es evidente que existe un importante potencial de utilización para el desarrollo de la energía de biomasa forestal. En particular, se analizará el caso de aserraderos cercanos Coyhaique, haciendo factible la utilización coordinada de estos recursos debido a la cercanía.

Coyhaique posee un sistema un sistema eléctrico independiente al SIC, el Sistema Eléctrico de Aysén. La generación de este sistema se basa principalmente en turbinas diesel, cuya tecnología posee una mayor emisión de contaminantes que si se utilizara plantas térmicas utilizando biomasa como combustible.

En la Figura 31 se muestra un mapa con los sitios de interés identificados, el cual fue obtenido de la aplicación de INFOR (CNE. "Sistema de Información de Residuos Madereros". 2005).

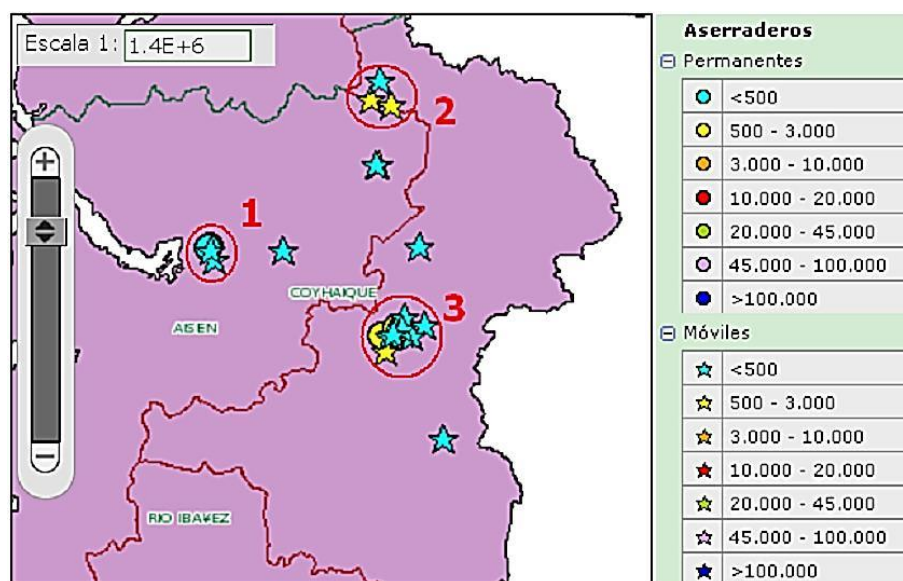


Figura 31: Mapa con zonas de interés de aserraderos en cercanías a Coyhaique.

Respecto a los aserraderos contemplados en cada zona de interés, las producciones individuales fueron agrupadas por sector, resultando las cantidades de residuos que no se comercializan, identificados en la Tabla 28.

Tabla 28: Resumen de los residuos anuales que se regalan por cada sitio de interés analizado.

Sector	Producción Aserrada (m3 ssc)	Aserrín Regala (m3 ssc)	Despunte Regala (m3 ssc)	Corteza Regala (m3)
1	1975,3	114,5	0	175,6
2	1839,6	0	0	0
3	8050,1	455	61,9	30,6
TOTAL	11.865	569,5	61,9	206,2

Si bien, la cantidad de residuos no es menor, esta no es suficiente para un desarrollo importante de generación a partir de biomasa debido a que gran parte ya se comercializa, por tanto, es necesaria la implementación de incentivos para la utilización de suelos sin uso actual con nuevas plantaciones de especies dendroenergéticas.

Con la base de datos proporcionada por INFOR es posible analizar otros lugares que puedan ser una alternativa económicamente viable, por lo que la información recopilada es de gran utilidad.

7.3. Obtención mediante plantaciones dendroenergéticas

El uso de suelos sin cobertura vegetal o actualmente en uso agrícola o ganadero constituye una gran alternativa para reforestar o rentabilizar terrenos de una manera estable, tanto para los productores como para los consumidores del recurso de biomasa. Se estima en dos millones de hectáreas la superficie disponible y factible a nivel nacional para el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas.

Las especies vegetales clasificadas como dendroenergéticas se caracterizan por poseer una altísima tasa de crecimiento, la posibilidad de regenerar de tocón (al talarse pueden volver a crecer a partir de la base) y de un alto poder calorífico. Entre ellas se cuentan los géneros Acacia, Eucalyptus y Salix. Estas especies permiten obtener un recurso constante a través del tiempo, teniendo entre otros efectos positivos la disminución de los efectos de la erosión, la degradación y compactación de los suelos, preservando, en definitiva, el patrimonio del país.

De las plantaciones forestales existentes en nuestro país, el pino radiata es la principal especie con más de 1,4 millones de hectáreas, seguida por plantaciones de eucalipto con aproximadamente 500.000 millones de hectáreas. Estas plantaciones abastecen principalmente a dos grandes industrias, el pino radiata el de la madera aserrada y el eucalipto las plantas de celulosa (entre ellas las papeleras).

Por tanto, es importante incentivar las plantaciones para suplir la demanda de estas industrias y, así indirectamente contribuir al desarrollo de la energía de biomasa, ya que según los antecedentes, ya descritos, estas industrias son las que utilizan actualmente el recurso como fuente de energía para sus procesos térmicos además de aprovecharlo para generación eléctrica. Más aún, debido a la magnitud del negocio forestal de Chile a nivel mundial, siendo su tercera mayor exportación tras el cobre y el salmón, es necesario incorporar tecnologías renovables que permitan reducir la huella de carbono de nuestras exportaciones forestales y además aumentar el volumen de ellas.

7.4. Centro logístico y de comercialización de biomasa

Un centro logístico y de comercialización de biomasa es una "estación de servicio" regional para combustibles de madera de gran calidad gestionada por un grupo de agricultores o empresarios forestales de la zona. Este

modelo de negocio, focaliza las oportunidades en la necesidad de acopio y suministro, potenciando las cadenas de producción al dar valor a la biomasa y generando un plan de desarrollo regional importante. Se presentan esquemas de desarrollo para incentivo de estos centros en Europa, en la Tabla 29.

Tabla 29: Esquemas de apoyo a las cadenas de producción y suministro de combustibles.

ESQUEMA	NOTAS	DISPONIBILIDAD
Plan de cultivos energéticos	Proporciona subvenciones para propietarios de tierras que planten cultivos energéticos de corta rotación.	Comercio, organizaciones sin fines de lucro, sector público y privado.
Subvenciones de la Comisión Forestal	Cartera de subvenciones gestionadas por la Comisión Forestal. Su objetivo es ayudar a promover la gestión de los bosques existentes, la creación de nuevos bosques y aumentar los beneficios al público.	Comercio, organizaciones sin fines de lucro, sector público y privado.
Programa de Desarrollo Rural	El Programa de Desarrollo Rural es una suma importante de fondos europeos para el desarrollo de las zonas rurales. La financiación está disponible para una amplia gama de actividades que incluyen el desarrollo y la diversificación de las empresas con base en tierra y la instalación de calderas de biomasa.	Comercio y organizaciones sin fines de lucro.
Programa de apoyo a la inversión estratégica	Un programa de subvenciones de Woodfuel East para apoyar la producción de chips de madera, almacenamiento, secado, etc., para utilizar como combustible.	Comercio y organizaciones sin fines de lucro.

7.5. Proyectos de calefacción urbana

La implementación de proyectos de calefacción urbana en base a biomasa en el Reino Unido también son incentivados por el esquema de subvenciones de capital a la bioenergía (Bioenergy Capital Grants scheme). El apoyo se dirige a plantas de cogeneración de pequeña y mediana escala, entre otras.

Dentro del Reino Unido existe una gran variedad de organizaciones y organismos públicos destinados a incentivar y apoyar distintas medidas a favor de un mayor uso de fuentes de energía renovables. Entre estos organismos destacan The Carbon Trust, una compañía creada por el gobierno para apoyar al comercio y entidades públicas a reducir sus emisiones de dióxido de carbono a través de mejoras en la eficiencia energética y desarrollo de nueva tecnología; Energy Saving Trust, organización fundada en conjunto por el gobierno y el sector privado para frenar el cambio climático mediante la promoción del uso sustentable de energía; entre otros.

Los incentivos y subvenciones se dividen en los destinados a incentivar la compra, instalación y desarrollo de equipamiento, los destinados a apoyar la cadena de suministro de combustibles, los destinados al apoyo de la utilización de biomasa, entre otros. En las siguientes tablas se detallan los principales mecanismos de incentivo en el Reino Unido.

8. Conclusiones y Recomendaciones

Si bien la biomasa se presenta como una buena oportunidad de negocio, existen barreras técnicas, económicas y socioculturales para llegar a su plena utilización. Estas barreras dejan espacio para la actuación pública y privada que comprende entre otros el desarrollo de infraestructura vial, mejorar los sistemas productivos e incorporación de tecnologías de producción de biomasa, además del necesario desarrollo de políticas e instrumentos económicos y financieros para dar financiamiento a iniciativas de desarrollo de proyectos de ésta índole.

Un impedimento en materia económica es el transporte ya que se requiere manejar grandes volúmenes de combustibles que se encuentra disperso, sin embargo, lo anterior es una ventaja para el desarrollo de proyectos a niveles locales e incluso rurales, como desarrollo de modelo de negocios.

Destacando este punto, es posible entender el porqué de la propiedad casi exclusiva de esta clase de proyectos por parte de compañías que tienen ya en su poder el recurso de biomasa. Estas empresas son, por naturaleza, aquellas que tienen menores costos de acopio y transporte de biomasa del mercado. Como se observó, el costo de la biomasa corresponde entre un tercio a un medio de los costos de operación y esto se aplica tanto en los sistemas de combustión para generación eléctrica como en los de producción de biocombustibles

Así, la captación de los residuos de biomasa es el factor central del presente trabajo; la disposición de los residuos se debe evaluar para determinar, principalmente los volúmenes de extracción para la alimentación de las centrales a proyectar. Es por ello, que la posibilidad de obtener biomasa en las cercanías es un factor crítico para el desarrollo de un proyecto eficiente, y por tanto, el estudio de los recursos y su distribución en el país, es determinante para conducir la decisión de las lugares que tienen potencial para el desarrollo de este tipo de proyectos, como también diagnosticar los principales problemas de abastecimiento y corregirlos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que el gran potencial de obtención de la misma se ve mermado por condiciones geográficas o de resguardo de ecosistemas. Los rendimientos de los bosques nativos con potencial son bajos y requieren de grandes inversiones para tener acceso a ellos. Adicionalmente, se observa que los volúmenes más grandes se encuentran en regiones australes, donde la industria forestal no ha intervenido y donde las condiciones climáticas generan inestabilidad para la implantación de proyectos que ven afectado el acceso al recurso primario y que provocan problemas de mantención de las características físicas deseadas (contenido de humedad y otros) aumentando los costos de inversión requeridos.

En este contexto, cabe señalar que es sumamente importante asegurara la confiabilidad de los datos de disponibilidad del recurso. Lo anterior, para asegurar que las tecnologías de los equipos seleccionados pueda manejar diferentes tipos de humedad o tamaños de biomasa, en caso de ser necesario, o tecnologías capaces de funcionar con diferentes grados de calidad del combustible, proveyendo seguridad de operación sin efectos de sucesos adversos que afecten la eficiencia del proceso, los costos de operación o mantención niveles de emisión y rentabilidad.

Bajo esta premisa, se deberán desarrollar estrategias que garanticen un porcentaje de abastecimiento, para evaluar existencia de lugares de acopio o por la vía de analizar futuros convenios de reforestación con privados y convenios de abastecimiento a largo/mediano plazo.

En términos de tecnologías, se observa que las tecnologías más utilizadas en la actualidad, son de bajos costos iniciales de inversión, mientras que fuentes de conversión más innovadoras aún se encuentran a niveles de inversión poco rentables. Adicionalmente, si bien existen procesos con interesantes factores de conversión, ellos están muy lejos del alcance de aplicación para volúmenes de transformación estudiados, es el caso de técnicas de gasificación avanzadas, como *flash* o de conversión de biocombustibles de segunda generación.

En cuanto al potencial de generación eléctrico en el país, se obtuvo que la capacidad instalada utilizando residuos del manejo de bosque forestal totaliza 1896 MWe, dando uso a las más de 9.4 millones de TS/año de residuos que el bosque puede generar. Suponiendo que esta biomasa tiene un contenido de humedad promedio de 50 % en base seca. Lo anterior representar un potencial energético de 44 millones de MWh al año. Con una eficiencia de conversión de 30 % en la obtención de energía eléctrica, este potencial energético representa una planta termoeléctrica de 2000 MW funcionando los 365 días del año a plena capacidad. La distribución y los costos sectoriales por capacidad de abastecimiento de biomasa y el escalamiento de tecnologías hacen que los valores de venta de energía reduzcan la cifra según las expectativas de privados, dado que los precios de nivelación son muy cercanos o superiores al nivel de venta de otro tipo de generadoras con menores costos.

Por otra parte, existe consenso en que la obtención de biocombustibles de origen lignocelulósico significará un salto extraordinario en los rendimientos energéticos. Se estima una relación de 1,8:1 hasta 36:1 en cuanto al rendimiento energético de biocombustible con respecto al consumo de combustibles fósiles en las etapas de cultivo, cosecha y transformación. Sin embargo, hoy en día, la transformación química y bioquímica de la madera en bioetanol o en biodiesel no ha llegado a una fase de plena industrialización.

El interés político de los principales países industrializados sobre el tema se ha materializado en importantes inversiones en investigación. Existen diversos procesos que están siendo estudiados y escalados a nivel prototipo. Según el reporte de BIOFRAC (2006), se estima que el desarrollo en gran escala de los BtL tendrá lugar en la década de 2020 a 2030.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la rentabilidad de proyectos de emprendimiento privado con respecto a ésta alternativa es muy baja y los precios obtenidos superan largamente los precios de combustibles alternativos. Se debe considerar que no existen estudios que permitan una mayor participación de biocombustibles en mezclas y se tienen restrictivas proporciones (E2, E5 y E10, en relación al % de etanol en mezcla con combustible tradicional) y que no existen incentivos dado que requieren instalaciones separadas en la distribución final. Es por ello que el emprendimiento debe ser estatal a través de ENAP.

Finalmente, es importante considerar los beneficios a mediano y largo plazo que puede conllevar la implantación de energías renovables sobre la economía chilena. Debido a su carácter autóctono y dado que generan impactos ambientales significativamente inferiores a las fuentes convencionales de energía, las ERNC, en general, pueden contribuir a los objetivos de seguridad de suministro y sostenibilidad ambiental.

En particular, se tiene que las factibilidades técnicas de desarrollo existen, sin embargo, por los altos costos de manejo y uso de plantaciones dedicadas, se coartan en el tema económico. Por ello, el manejo del bosque forestal requiere de incentivos adicionales que valoricen los beneficios que se generan con la extracción de biomasa y cuidado de suelos.

En este sentido, es recomendable para la planificación operacional de actividades silvícolas con fines energéticos y la promoción de plantaciones energéticas en el país, considerar el manejo de superficies de bosques y de factibilidad de transacción de la biomasa tanto en aspectos económicos como de índole social que interactúan en las decisiones de políticas públicas. Para ello, se requiere realizar enfoques regionales de la evaluación del potencial de plantaciones, dadas las grandes diferencias en geografía física y económica que existe en el país, deben ser considerados elementos de ordenamiento territorial para precisar los resultados obtenidos.

Los modelos de negocio factibles recomendados, se enfocan en mejorar la situación actual de abastecimiento y desarrollo de proyectos de innovación con nuevas tecnologías, los que requieren promoción de inversiones en producción de biomasa, implementación de centros logísticos y comercialización de biocombustibles forestales, fomento de la contratación de la bioenergía y desarrollo de normas para establecer estándares de calidad y criterios de sostenibilidad en el uso de ella.

9. Bibliografía

Abengoa Bioenergy, 2010; Coskata, 2011; Spatari, Bagley, & MacLean, 2010).

BIOFRAC (Biofuels Research Advisory Council, EU). 2006. Biofuels in the European Union - A Vision for 2030 and Beyond. 32 p. (Final Draft Report of the Biofuels Research Advisory Council).

Campos M, F Marcos. 2002. Los biocombustibles. Madrid, España. Mundi-Prensa.

Campino J. 2006. Disponibilidad de biomasa en Chile. Concepción: Seminario Generación de Energía con Biomasa. FINPROLIGNUM. 2008.

CNE (Comisión Nacional de Energía, CL). 2008. Balance Nacional de Energía 20013.

CNE (Comisión Nacional de Energía, CL), GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, DE), INFOR (Instituto Forestal, CL). 2007. Residuos de la industria primaria de la madera. Disponibilidad para uso energético. Santiago, Chile.

CNE (Comisión Nacional de Energía, CL), GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, DE), José Bertran Spichiger, Eduardo Morales Verdugo, "Potencial de Generación de Energía por Residuos del Manejo Forestal en Chile" Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile, Enero 2008

CNE (Comisión Nacional de Energía, CL), Fijación de precios de nudo de corto plazo SIC, abril 2014

Centre for Biomass Technology. "Wood for Energy Production, Technology – Environment – Economy". 2002.

CONAMA-CONAF-BIRF. "Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile". 1999.

Corporacion Nacional Forestal, Universidad Austral de Chile, EVALUACION DEL MERCADO DE BIOMASA Y SU POTENCIAL, 2011

Corporacion Nacional Forestal Libro Ley de Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, 2013

Cooperación y sinergias en materia de aprovechamiento Forestal Sostenible en la Región Macaronésica (FORESMAC), Plan Económico de Aprovechamiento Forestal y Desarrollo Rural, Noviembre 2011

EPA, U. S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership Biomass Combined Heat and Power Catalog of Technologies g, 2007

EU (European Union). 2006. Estrategia de la UE para los biocarburantes. Comunicación (2006) FERN. "Woody Biomass for Energy: NGO Concerns and Recommendations". Abril 2011.

Gnansounou E, A Dauriat. 2005. Energy balance of bioethanol: a synthesis. 14th European Biomass Conference. 2008.

Huang, Ramaswamy, Al-Dajani, Tschirner, & Cairncross, 2009; Sohel & Jack, 2011

INFOR-CNE. "Sistema de Información de Residuos Madereros". 2005

INFOR. Juan Carlos Pinilla. "Opciones dendroenergéticas eficiente como alternativa productiva para pequeños y medianos propietarios forestales". 2011.

National Renewable Energy Laboratory, Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol, May 2011

Ricardo Baettig P, Marco Yáñez A, Marta Albornoz A, Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte

Seminario Internacional "Biocombustibles y su futuro en la matriz energética", "Biocombustibles a partir de Biomasa Forestal: Experiencia de ENAP" Noviembre 2009

Zamudio F, R Baettig, F Guerra. 2008. Origen y futuro del cultivo del álamo en Chile. Monografía Proyecto FONDEF D04I1027. Talca, Chile. Universidad de Talca.