



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura

INTRODUCCIÓN A LA DENDROENERGÍA

COLECCIÓN DOCUMENTOS TÉCNICOS

N.º 21



INTRODUCCIÓN A LA DENDROENERGÍA

**Proyecto para la promoción de la energía
derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG)**

FAO. 2020. *Introducción a la dendroenergía*. Colección Documentos Técnicos N.º 21. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/cb0619es>

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, ni sobre sus autoridades, ni respecto de la demarcación de sus fronteras o límites. Las líneas discontinuas en los mapas representan fronteras aproximadas respecto de las cuales puede que no haya todavía pleno acuerdo. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISBN 978-92-5-133159-0

© FAO, 2020



Algunos derechos reservados. Esta obra se distribuye bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales (CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es>).

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente, como se indica a continuación. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: "La presente traducción no es obra de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en [idioma] será el texto autorizado".

Todo litigio que surja en el marco de la licencia y no pueda resolverse de forma amistosa se resolverá a través de mediación y arbitraje según lo dispuesto en el artículo 8 de la licencia, a no ser que se disponga lo contrario en el presente documento. Las reglas de mediación vigentes serán el reglamento de mediación de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules> y todo arbitraje se llevará a cabo de manera conforme al reglamento de arbitraje de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI).

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización (<http://www.fao.org/publications/es>) y pueden adquirirse dirigiéndose a publications-sales@fao.org. Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: www.fao.org/contact-us/licence-request. Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: copyright@fao.org.

Fotografía de portada: © FAO

Este documento fue realizado en el marco del Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG), iniciativa de los siguientes ministerios:

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca

Luis Eugenio Basterra
Ministro de Agricultura, Ganadería y Pesca

Marcelo Alós
Secretario de Alimentos, Bioeconomía
y Desarrollo Regional

Miguel Almada
Director de Bioenergía

Ministerio de Desarrollo Productivo

Matías Sebastián Kulfas
Ministro de Desarrollo Productivo

Sergio Enzo Lanziani
Secretario de Energía

Ángel Guillermo Martín Martínez
Director Nacional de Energías Renovables

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Hivy Ortiz Chour
Oficial Forestal Principal
Oficina Regional América Latina

Francisco Yofre
Oficial de Programas
Oficina Argentina

Alejandro Gallino
Autor

Verónica González
Coordinación Colección

Sofía Damasseno
Colaboración Colección

Alejandra Groba
Rosana Errasti
Edición y corrección

Mariana Piuma
Diseño e ilustraciones



© FAO

ÍNDICE

Prólogo	ix		
Siglas y acrónimos	xi		
Unidades de medida	xi		
Elementos y fórmulas químicas	xii		
Resumen ejecutivo	xiii		
<hr/>			
1.			
Introducción	1		
<hr/>			
2.			
Definición de biomasa y clasificación	3		
2.1. Conceptos de biomasa y bioenergía	3		
Origen y fuentes de biomasa	3		
Uso actual y disponibilidad de la biomasa	4		
Impacto ambiental de la biomasa	4		
De la biomasa a la bioenergía	5		
Aplicaciones de la bioenergía	5		
Ciclo de vida	6		
Competencia con otros usos y con la alimentación	6		
Impacto ambiental y social de la bioenergía	8		
2.2 Biomasa con potencial energético	9		
Tipos de biomasa y clasificación	9		
La biomasa en el mundo	10		
La biomasa en la Argentina y su distribución regional	11		
Caracterización energética	11		
Tecnologías aplicables	16		
<hr/>			
3.			
La dendroenergía	21		
3.1. Concepto y usos	21		
Definición e importancia	21		
Evolución histórica	21		
Usos doméstico, comercial e industrial	23		
<hr/>			
3.2 Formas y disponibilidad de la dendroenergía			24
Recursos del monte natural			24
Recursos del monte implantado			24
Recursos de la producción de madera			24
Recursos de la manufactura de la madera			27
Recursos de la poda de frutales			27
Recursos de la poda urbana			28
3.3 Dendroenergía como combustible			29
La leña y el carbón de leña			29
Las briquetas y los pellets			29
La gasificación			30
Los bio oils			30
3.4. Dendroenergía para producir energía eléctrica			31
La generación de electricidad			31
La generación turbovapor			31
La generación mediante motores de combustión interna			32
La generación mediante motores de vapor			32
Ventajas, inconvenientes y barreras de cada tecnología			33
3.5 Tecnologías de transformación			34
La producción de combustibles sólidos: el carbón de leña			34
La producción de combustibles sólidos: las briquetas y los <i>pellets</i>			35
La producción de combustibles líquidos			36
La producción de combustibles gaseosos			37
<hr/>			
4.			
Usos doméstico, comercial e industrial de la dendroenergía	39		
4.1 La dendroenergía de uso doméstico			39
Los requerimientos de energía domésticos			39
La combustión en artefactos domésticos			39

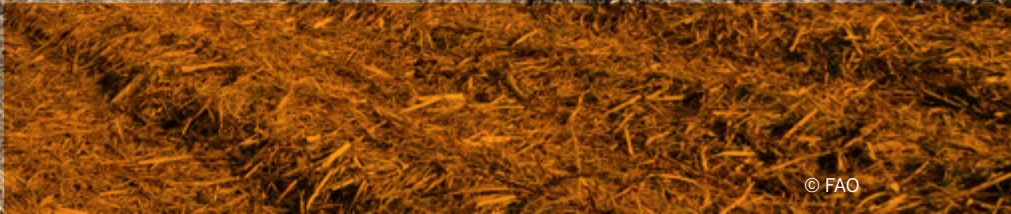
La calefacción doméstica con leña	40	La generación de vapor en mediana escala	48
Los calefactores para combustión de densificados	41	La experiencia en la Argentina	48
Las calderas para uso doméstico	42	4.3 La dendroenergía en la industria	49
La cocción doméstica	43	La industria forestal	49
La experiencia mundial	44	La industria del papel	50
La experiencia en la Argentina	45	El procesamiento de la yerba mate, el té y el tabaco	52
4.2 La calefacción y la cocción en los sectores comercial y de servicios	46	La industria de la alimentación	52
Los requerimientos de energía en panificación	46	La industria del ladrillo y la cerámica	53
El uso de la dendroenergía en servicios	47	La experiencia en la Argentina	55
Dendroenergía en escuelas rurales y en la producción rural	48	Bibliografía	56

Cuadros

Cuadro 1	Recursos con potencial energético provenientes de cultivos en la Argentina	12
Cuadro 2	Recursos con potencial energético provenientes de industrias forestales y agrícolas en la Argentina	14
Cuadro 3	Características típicas de la biomasa	16
Cuadro 4	Composición química de diferentes tipos de biomasa	17
Cuadro 5	Poder calorífico de algunas formas de biomasa	17
Cuadro 6	Estimación de los rendimientos de los residuos de poda de los principales cultivos leñosos en España	28
Cuadro 7	Artefactos domésticos aptos para utilizar dendrocombustibles	40
Cuadro 8	Energía específica consumida al calor necesario para quemar un kilogramo de ladrillos	55

Gráficos

Gráfico 1	Clasificación de las fuentes de energía	5
Gráfico 2	Aplicaciones energéticas de la biomasa	6
Gráfico 3	El ciclo del dióxido de carbono	7
Gráfico 4	Tipos de biomasa según su origen	9
Gráfico 5	Tipos de biomasa según sus características	10
Gráfico 6	Procesos aplicables a la biomasa para la obtención de energía	18
Gráfico 7	Procesos termoquímicos de conversión de biomasa en energía	18
Gráfico 8	Alternativas de procesamiento de la biomasa húmeda	19
Gráfico 9	Evolución de la demanda mundial de energía primaria desde 1800, por tipo de fuente	22
Gráfico 10	Contenidos de carbono típicos en la biomasa existente en un bosque primario, por hectárea	25
Gráfico 11	Distribución energética de un árbol	25
Gráfico 12	Esquema típico de podas y raleo	26
Gráfico 13	Relación producto-residuo (RPR) en la industria forestal de la Argentina	26
Gráfico 14	Procesos de fabricación con madera maciza y con tableros	27
Gráfico 15	Principales componentes del ciclo de generación turbovapor	31
Gráfico 16	Ciclo de cogeneración con extracción de vapor para el proceso	32
Gráfico 17	Sistema de ciclo combinado utilizando turbina de gas	33
Gráfico 18	Esquemas de funcionamiento de gasificadores <i>updraft</i> , de lecho fluidizado y <i>downdraft</i>	36
Gráfico 19	Niveles de eficiencia de diferentes equipos de combustión de leña	41
Gráfico 20	Calefactor de doble paso	42
Gráfico 21	Estructura de una caldera de biomasa	43
Gráfico 22	Sistemas domésticos de cocción con dendroenergía	44
Gráfico 23	Cadena de aprovechamiento de los productos forestales	50
Gráfico 24	Esquema de cámara de secado con deshumidificador	51
Gráfico 25	Esquema de un secadero moderno de yerba mate	53
Gráfico 26	Proceso moderno característico de fabricación de ladrillos	54



© FAO

Prólogo

La matriz energética argentina está conformada, en su gran mayoría, por combustibles fósiles. Esta situación presenta desafíos y oportunidades para el desarrollo de las energías renovables, ya que la gran disponibilidad de recursos biomásicos en todo el territorio nacional constituye una alternativa eficaz frente al difícil contexto energético local e internacional. En este escenario, en 2015, la República Argentina promulgó la Ley 27191 -que modificó la Ley 26190-, con el objetivo de fomentar la participación de las fuentes renovables hasta que estas alcancen un 20% del consumo de la energía eléctrica nacional en 2025, otorgando a la biomasa una gran relevancia.

La biomasa es una de las fuentes de energía renovable más confiables, es constante y se puede almacenar, lo que facilita la generación térmica y eléctrica. En virtud de sus extraordinarias condiciones agroecológicas, y las ventajas comparativas y competitivas de su sector agroindustrial, la Argentina es un gran productor de biomasa con potencial energético.

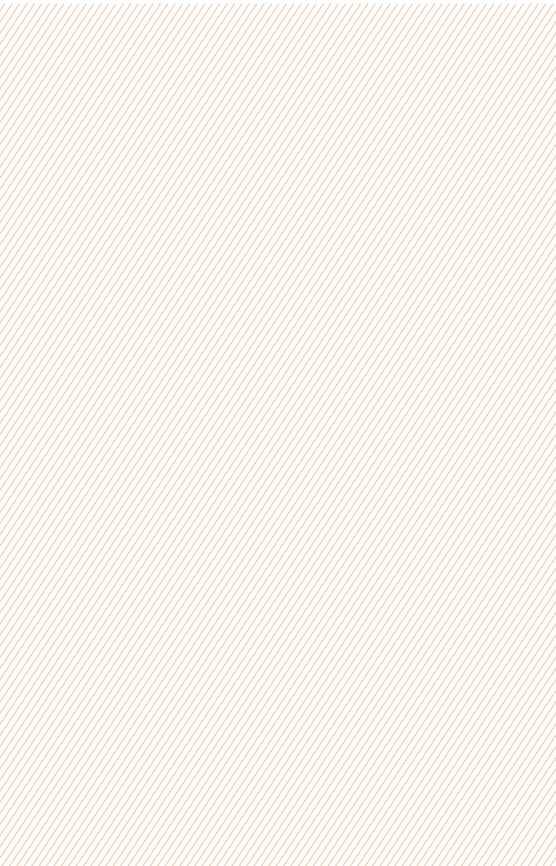
La energía derivada de biomasa respeta y protege el ambiente, genera nuevos puestos de trabajo, integra comunidades energéticamente vulnerables, reduce la emisión de gases de efecto invernadero, convierte residuos en recursos, moviliza inversiones y promueve el agregado de valor y nuevos negocios.

No obstante, aún existen algunas barreras y desafíos de orden institucional, legal, económico, técnico y sociocultural que deben superarse para incrementar, de acuerdo con su potencial, la proporción de bioenergía en la matriz energética nacional.

En este marco, en 2012, se creó el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa – UTF/ARG/020/ARG (PROBIOMASA), una iniciativa que llevan adelante el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca y el Ministerio de Desarrollo Productivo, con la asistencia técnica y administrativa de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

El Proyecto tiene como objetivo principal incrementar la producción de energía térmica y eléctrica derivada de biomasa a nivel local, provincial y nacional, para asegurar un creciente suministro de energía limpia, confiable y competitiva y, a la vez, abrir nuevas oportunidades agroforestales, estimular el desarrollo regional y contribuir a mitigar el cambio climático.

Para lograr ese propósito, el Proyecto se estructura en tres componentes principales con objetivos específicos:

-
- 
- **Estrategias bioenergéticas:** asesorar y asistir, legal, técnica y financieramente, a proyectos bioenergéticos y tomadores de decisión para aumentar la participación de la energía derivada de biomasa en la matriz energética.
 - **Fortalecimiento institucional:** articular con instituciones de nivel nacional, provincial y local a fin de evaluar los recursos biomásicos disponibles para la generación de energía aplicando la metodología WISDOM (Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping, Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles).
 - **Sensibilización y extensión:** informar y capacitar a los actores políticos, empresarios, investigadores y público en general acerca de las oportunidades y ventajas que ofrece la energía derivada de biomasa.

Esta Colección de Documentos Técnicos pone a disposición del público estudios, guías y recomendaciones sobre aspectos específicos de la generación de energía derivada de biomasa, elaborados por consultoras y consultores del Proyecto e instituciones parte, con el propósito de contribuir tanto al desarrollo de negocios como al diseño, formulación y ejecución de políticas públicas que promuevan el crecimiento del sector bioenergético en la Argentina.

Siglas y acrónimos

CHE	Contenido de humedad de equilibrio
PCI	Poder calorífico inferior
RAC	Residuos agrícolas de cosecha
RAI	Residuos agrícolas industriales
RPR	Relación producto-residuo
RSU	Residuos sólidos urbanos
GEI	Gases de efecto invernadero
IEA	<i>International Energy Agency</i> – Agencia Internacional de la Energía
WBA	<i>World Bioenergy Association</i> – Asociación Mundial de Bioenergía
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

Unidades de medida

GWh	gigavatio hora
ha	hectárea
HP	<i>horse power</i> – caballo de fuerza
kcal	kilocaloría
kg	kilogramo
kgf	kilogramo fuerza
kJ	kilojulio
km ²	kilómetro cuadrado
ktep	kilotonelada equivalente de petróleo
kW	kilovatio
kWe	kilovatio eléctrico
l	litro
mg	miligramo
MJ	megajulio
MJ/kg	megajulio kilogramo
MON	número de octano
mm	milímetro
mm ³	milímetro cúbico
msnm	metro sobre el nivel del mar
Mtep	millón de toneladas equivalentes de petróleo
MW	megavatio
NM	número de metano
Nm ³	metro cúbico normal
°F	grado Fahrenheit
°C	grado Celsius
PCS	poder calorífico superior
PCI	poder calorífico inferior
tce	tonelada de combustible equivalente
t	tonelada

Elementos y fórmulas químicas

A	azufre
C	carbono
CH ₄	metano
Cl	cloro
CO	monóxido de carbono
CO ₂	dióxido de carbono
C ₂ H ₄	etileno
C ₂ H ₆	etano
H	hidrógeno
HC	hidratos de carbono
H ₂	hidrogenación
H ₂ O	agua
N	nitrógeno
NO _x	óxidos de nitrógeno
O	oxígeno

Resumen ejecutivo

El presente documento tiene como objetivo principal contribuir al conocimiento, desarrollo y aprovechamiento de la energía derivada de biomasa. En este sentido, el trabajo se estructuró en tres partes.

La primera parte presenta un acercamiento a los conceptos de biomasa y de bioenergía, los tipos existentes y su potencial de generación de energética, así como su impacto ambiental y social y su competencia con otras fuentes de energía.

La segunda parte aborda el concepto de dendroenergía: las formas de obtención a partir de la biomasa natural, cultivada o resultante de procesos; los métodos de recolección, de transporte y de tratamiento; sus usos como combustible y su capacidad para la producir energía eléctrica, así como las tecnologías de transformación.

Finalmente, la tercera parte se enfoca en las formas de uso de la dendroenergía, los requerimientos y la combustión en artefactos domésticos, los usos en los sectores comerciales y de servicios, en las escuelas rurales, en la producción rural y en las industrias.



1. INTRODUCCIÓN



El futuro de la dendroenergía depende de cuán competitiva logre ser para alcanzar los objetivos de las políticas energéticas, cuáles son sus costos y beneficios, y del marco político e institucional.

La Argentina, en virtud de sus extraordinarias condiciones agroecológicas y las ventajas comparativas y competitivas de sus sectores agro y foresto industrial, presenta un gran potencial de desarrollo de la dendroenergía, que comprende toda la energía obtenida a partir de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, primarios y secundarios, derivados de los bosques, árboles y otra vegetación de terrenos forestales.

La dendroenergía es la energía producida por la combustión de la madera, la leña, el carbón vegetal, los *pellets* y las briquetas, entre otros materiales. Es la primera fuente de energía de la humanidad y la energía renovable más importante del mundo. Además, es considerada una fuente de energía sin efectos sobre el clima y viable desde el punto de vista social, apta para generar energía térmica y eléctrica para el sector industrial y lugares residenciales.

La contribución de la dendroenergía a la producción de energía en el futuro dependerá de cuán

competitiva llegue a ser para alcanzar los objetivos contenidos en las políticas energéticas, los costos y beneficios sociales, económicos y ambientales de los sistemas de energía maderera, y las cuestiones políticas e institucionales que conforman el marco dentro del cual se inscriben las actividades forestales.

A partir de estos conceptos, el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA) elaboró un curso de capacitación sobre la dendroenergía, con los objetivos específicos de caracterizar la bioenergía, según su aprovechamiento energético y parámetros de cuantificación; identificar la dendroenergía de acuerdo con las formas de obtención, las tecnologías de abastecimiento y tratamiento de la biomasa lignocelulósica y su aplicación energética; y evidenciar la utilización de la dendroenergía en los sectores doméstico, comercial e industrial.

2. DEFINICIÓN DE BIOMASA Y CLASIFICACIÓN



No utilizar la biomasa disponible implica un impacto ambiental, que puede resolverse aprovechándola energéticamente, se trate de leña o de residuos agrícolas, industriales, pecuarios o urbanos.

2.1 Conceptos de biomasa y bioenergía

La biomasa se define como todo material de origen biológico utilizable como fuente de energía. Comprende la materia originada en procesos biológicos vegetales o animales, incluyendo los materiales que resultan de su transformación natural o artificial. Esos procesos biológicos pueden ser espontáneos, como la formación de montes naturales, o provocados, como la acumulación de guano en criaderos de aves. Se excluyen de esta definición los combustibles fósiles o los productos derivados de ellos, a pesar de que tienen un origen biológico remoto.

Una característica relevante de la biomasa es que es un recurso energético renovable, lo que significa que puede reponerse bajo condiciones determinadas, a diferencia de los combustibles fósiles, que son recursos agotables.

La biomasa como fuente de energía puede resultar, a corto plazo, una variable fundamental para la sociedad, tanto desde el punto de vista energético y ambiental como para el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales.

Origen y fuentes de biomasa

La energía contenida en la biomasa es energía solar almacenada en la materia orgánica a través de la fotosíntesis. La fotosíntesis es el proceso por el cual algunos organismos vivos, como las plantas, utilizan la energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan, como el dióxido de carbono (CO₂), en compuestos orgánicos. Por lo tanto, los vegetales son fuentes directas de biomasa.

Las actividades agrícolas y forestales pueden constituirse en fuentes relevantes de biomasa, por ejemplo, a partir de los residuos agrícolas de cosecha (RAC), que se originan en el proceso de recolección, y los residuos agrícolas industriales (RAI), resultado de la clasificación y procesamiento de la producción agrícola. También son fuentes de biomasa la poda y el raleo, tanto del arbolado urbano como de árboles frutales, o el manejo de bosques y montes (estos últimos pueden ser naturales o implantados y, en ambos casos, requieren pautas racionales y controladas de manejo).

De la misma forma, el proceso de industrialización de la madera genera un volumen significativo de biomasa, compuesto de materia lignocelulósica en forma de costaneros, chips y aserrín, que puede aprovecharse para la producción de energía.

Otra fuente posible de biomasa son los llamados cultivos energéticos, que tienen como objetivo principal la producción de energía, como pasturas de elevado rendimiento y especies arbóreas de rápido crecimiento.

También la actividad pecuaria aporta biomasa en forma de excretas de los animales bajo crianza. Esta biomasa, debido a su elevado contenido de humedad, no puede ser utilizada mediante el quemado directo, aunque sí constituirse en fuente para la producción de biogás, a través del proceso de biodigestión. Además, el procesamiento posterior de la producción pecuaria, en la faena y elaboración, constituye otra fuente de biomasa para la producción de energía.

Asimismo, las áreas urbanas producen efluentes y residuos sólidos urbanos (RSU) con alto contenido de componentes orgánicos, que pueden considerarse biomasa y utilizarse con fines energéticos mediante procesos de biodigestión anaeróbica.

Uso actual y disponibilidad de la biomasa

La heterogeneidad en el origen y composición de la biomasa genera múltiples usos como fuente de energía: puede emplearse para calefacción, cocción de alimentos, obtención de agua caliente y producción de energía eléctrica en el sector doméstico (viviendas unifamiliares, comunidades de vecinos, barrios o municipios enteros); producción de calor y electricidad en el sector industrial, o generación de electricidad con destino a la red.

La disponibilidad de la biomasa está asociada a la posibilidad de recolectarla y la facilidad para utilizarla. Su baja densidad energética, debida a la escasa cantidad de calor por unidad de peso o de volumen, impone que se consuma en las proximidades de la zona donde se encuentra disponible. Por lo tanto, los pobladores rurales y las comunidades emplazadas en cercanías de las fuentes de biomasa son quienes están en mejores condiciones para aprovecharla directamente. Para destinos

alejados o mercados más amplios, es necesario transformar la biomasa disponible en combustibles biomásicos, como el carbón de leña o los *pellets*, para facilitar su transporte y disponibilidad.

La biomasa originada en procesos industriales (RAI) se caracteriza por su producción concentrada y disponibilidad continua, lo que es una ventaja para utilizarla en procesos industriales y generación de energía eléctrica.

Impacto ambiental de la biomasa

La acumulación, el no aprovechamiento y la inconveniente disposición de la biomasa tienen efectos ambientales cuyo impacto es necesario evaluar.

En el caso de la actividad forestal, dejar ramas, despuntes y tocones en el campo aumenta los riesgos de incendios. Del mismo modo, no recolectar la poda de frutales realizada con fines sanitarios origina el riesgo de nuevas infecciones. La acumulación de chips y aserrín en aserraderos o industrias del mueble genera contaminación atmosférica por partículas en suspensión (particulado), proliferación de vectores y emisiones de gases por descomposición, mientras que el quemado en forma descontrolada acarrea problemas aún mayores por emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Por el contrario, dejar parte de los RAC en el campo puede contribuir a la conservación de la estructura y humedad del suelo. Igualmente, recolectarlos en forma controlada puede ser beneficioso, en particular, cuando reemplaza la práctica de eliminarlos por quemado.

En cuanto a las formas tradicionales de disposición de las excretas del ganado vacuno y porcino, pueden ser fuentes de contaminación de aguas subterráneas y de emisión de metano (CH₄) a la atmósfera. Asimismo, la cría de aves produce una cantidad de guano que, si bien se aprovecha como fertilizante, no se lo hace totalmente por las restricciones para su transporte y acumulación, y el excedente resulta contaminante. En todos estos casos, la utilización de biodigestores es una excelente alternativa para reducir el impacto ambiental.

En resumen, no utilizar la biomasa disponible implica un impacto ambiental que puede resolverse satisfactoriamente aprovechándola energéticamente.

De la biomasa a la bioenergía

La bioenergía es la energía procedente de la biomasa. Así, comprende todas las formas de energía derivadas de combustibles de origen biológico (biocombustibles). Abarca tanto los cultivos energéticos, destinados específicamente a producir energía, como las plantaciones polivalentes y los subproductos sólidos, líquidos y gaseosos derivados de las actividades humanas (residuos y desechos).

El Gráfico 1 clasifica las fuentes de energía disponibles en la naturaleza, según si son renovables o no, y si son contaminantes o no de acuerdo con su utilización.

La bioenergía se caracteriza por ser renovable y limpia, y está clasificada entre las denominadas energías alternativas o no convencionales. Sus formas más conocidas y utilizadas son los biocombustibles (fundamentalmente, el biodiesel, el bioetanol y el biogás) y la biomasa.

Los biocombustibles son, a menudo, mezclados en distintas proporciones con otros combustibles convencionales para su uso en el transporte o en la generación de energía eléctrica.

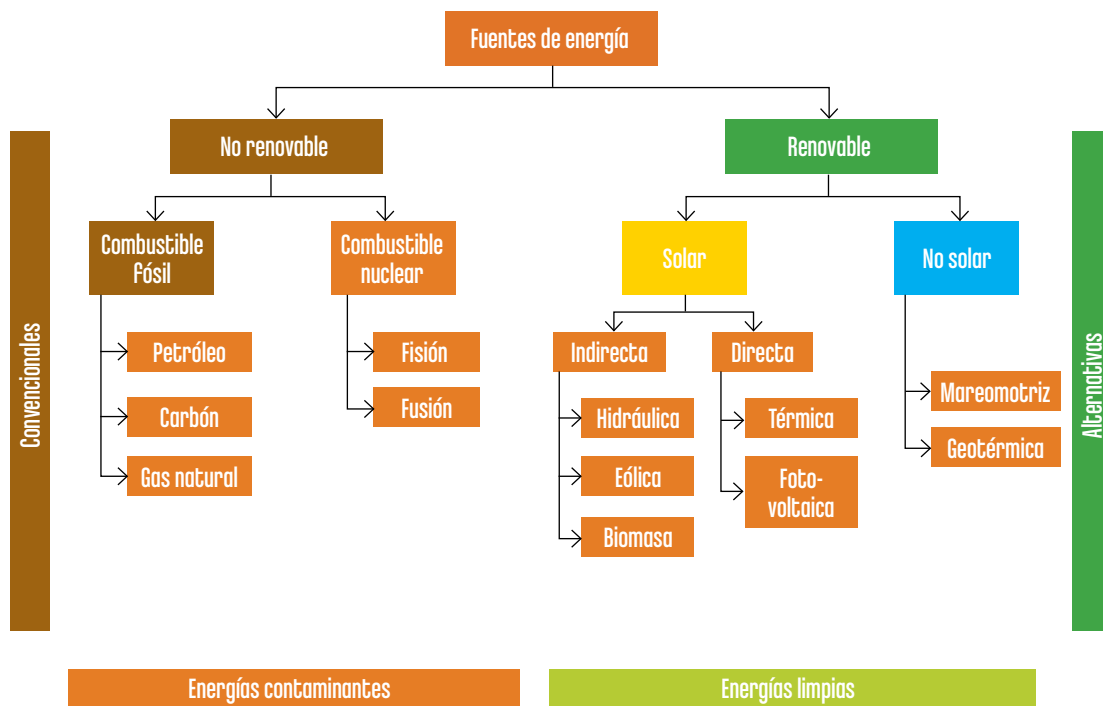
Aplicaciones de la bioenergía

La biomasa es la primera fuente de energía que conoció la humanidad y todavía, en países poco industrializados, la madera, los residuos agrícolas y el estiércol continúan siendo la fuente principal.

La todavía reciente crisis internacional provocada por los precios elevados de la energía, la precaria seguridad energética y los problemas derivados del cambio climático han impulsado el desarrollo de las energías renovables, entre ellas la bioenergía, de manera inédita.

Las ventajas más importantes de la bioenergía se relacionan con el desarrollo de la comunidad, el territorio y los recursos naturales, ya que la biomasa

Gráfico 1. Clasificación de las fuentes de energía



Fuente: Elaborado por el autor.

para uso energético es una fuente disponible localmente. Es también económica, ambiental y socialmente sostenible si se la maneja adecuadamente.

Además, la bioenergía puede reemplazar el consumo de combustibles derivados del petróleo, y así generar ahorros, reducir la dependencia externa y contribuir a la mitigación del cambio climático. El Gráfico 2 muestra algunas de sus aplicaciones.

Ciclo de vida

El uso de biocombustibles constituye un ciclo cerrado de carbono. Esto significa que parte del dióxido de carbono (CO_2) que es enviado a la atmósfera al utilizarlos fue absorbido anteriormente durante el crecimiento de los vegetales empleados para producir el biocombustible, con lo que se produce un balance nulo, a diferencia de los combustibles convencionales (Gráfico 3).

No sucede lo mismo con el balance de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que no es estrictamente nulo debido a que para producir o coleccionar la biomasa suelen utilizarse equipos y transportes que consumen combustibles fósiles, aunque es frecuente que se realicen manualmente o mediante tracción a sangre. No obstante, debe considerarse que cuando la biomasa sustituye el uso de combustibles fósiles se produce efectivamente una reducción de emisiones de GEI.

En general, los residuos agroindustriales son producidos sin incrementar el volumen de emisiones que se generan para cumplir con la producción objetivo del proceso. Las aplicaciones energéticas de los tipos más comunes de biomasa, siempre que no causen cambios en el uso de la tierra, reducen las emisiones de CO_2 entre 55 y 98% en comparación con los combustibles fósiles, aunque resulte necesario transportar la materia prima a larga distancia. Cuando se usan residuos forestales o agrícolas, el ahorro en la emisión de GEI está habitualmente por encima del 80% respecto de los combustibles fósiles.

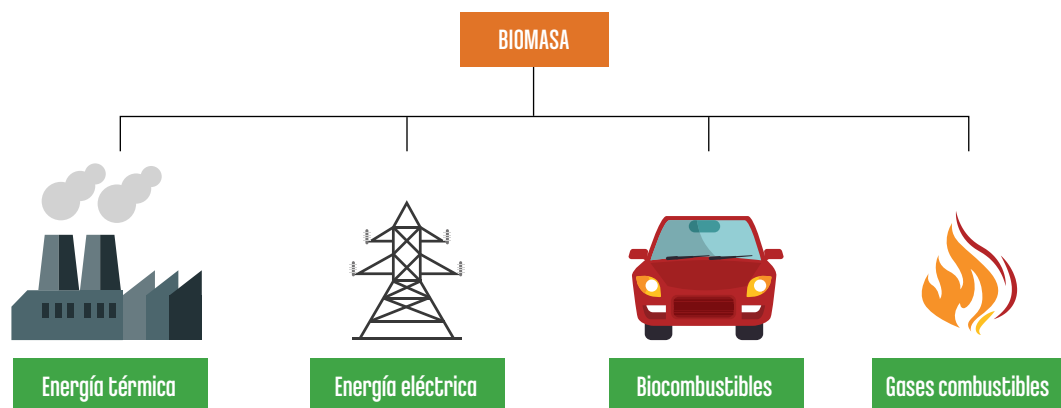
Asimismo, el uso de biomasa residual viene a resolver un pasivo ambiental compuesto por emisiones de metano (CH_4) que se producen en el proceso de descomposición, con una mayor equivalencia de emisiones en CO_2 .

Competencia con otros usos y con la alimentación

Teniendo en cuenta los efectos de su utilización respecto de usos alternativos, debe distinguirse la biomasa aplicada a la producción de biocombustibles (fundamentalmente, biodiésel y bioetanol) de la biomasa originada en residuos (RAC y RAI).

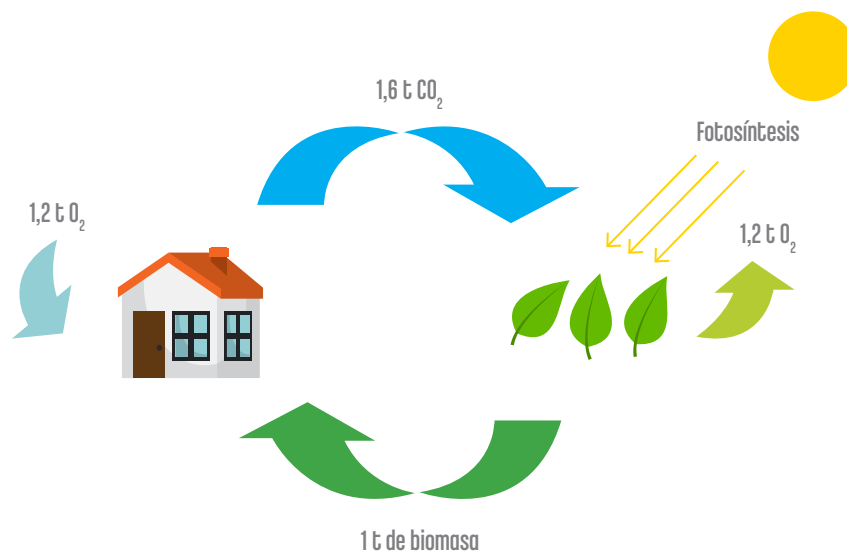
En este sentido, es necesario considerar que mientras la biomasa residual no ofrece demasiadas

Gráfico 2. Aplicaciones energéticas de la biomasa



Fuente: Elaborado por el autor.

Gráfico 3. El ciclo del dióxido de carbono



Fuente: IDAE (2007)

alternativas de uso, los biocombustibles son producidos a partir de cultivos que pueden utilizarse para la alimentación humana o animal, con lo que los destinos energético y alimentario se vuelven potenciales competidores. Asimismo, cabe señalar que la tecnología para producir biocombustibles de segunda y tercera generación (los que se producen a partir de cultivos no comestibles y a partir de algas, respectivamente) se encuentra en un avanzado estado de desarrollo, de manera que la materia prima utilizada no debería resultar una competencia para la alimentación.

Por otra parte, es un hecho que la demanda de biocombustibles se ha incrementado debido a la necesidad cada vez mayor de contar con combustibles, al alza del costo del petróleo, a la búsqueda de fuentes de energía renovables y no contaminantes, y a la aspiración de los países en desarrollo de aumentar los ingresos agrícolas.

El requerimiento creciente de cultivos que puedan utilizarse como materia prima para producir biocombustibles -como el maíz y la caña de azúcar- ha tenido un impacto significativo en los sistemas alimentarios a nivel mundial. Los efectos de la demanda de biocombustibles no son ajenos a los

movimientos en los mercados de granos, reflejo a su vez de los cambios demográficos y de una mejora en la alimentación.

En los países en desarrollo, a medida que la población y los ingresos se incrementan, las preferencias en materia de alimentos van cambiando de cultivos básicos a productos de mayor valor, como los cárnicos y los lácteos. En consecuencia, aumenta la demanda de alimentos forrajeros a base de granos y proteínas, que puede competir con la demanda de alimentos para consumo humano. Estos cambios han llevado a la intensificación de la presión ejercida sobre los mercados mundiales de productos agrícolas y al alza en el precio de los alimentos, independientemente del posible impacto de los biocombustibles.

Se prevé una expansión limitada de los biocombustibles, como recurso energético para el transporte. Los biocombustibles tienen una repercusión importante en los mercados agrícolas mundiales, el medio ambiente y la seguridad alimentaria. Esta nueva fuente de demanda de productos agrícolas básicos puede ofrecer una oportunidad a los países en desarrollo para aprovechar el crecimiento económico, conseguir un mayor bienestar rural y

reducir la pobreza. Sin embargo, existe un riesgo de que el aumento de los precios de los alimentos pueda tener consecuencias muy negativas para la seguridad alimentaria de la población más pobre del mundo.

Impacto ambiental y social de la bioenergía

La bioenergía es una oportunidad para promover el desarrollo rural. La FAO ha apostado firmemente a favor de la bioenergía en sus países miembros, ya que existen claras interrelaciones entre bioenergía y sociedad, economía y territorio. A nivel macroeconómico, se produce una redistribución de la renta hacia los sectores rurales y, a nivel microeconómico, se impulsa la generación de empleos y la mejora de los ingresos en ese sector.

En las áreas rurales, la bioenergía puede convertirse en un mecanismo y complemento ideal para la utilización de los numerosos subproductos, residuos y desechos que generan las actividades humanas, ya sean forestales, agropecuarias o industriales. En muchos casos, esto permite evitar fuertes impactos ambientales ya que la sociedad suele no eliminar adecuadamente estos subproductos, con lo que causa daños al entorno y a sí misma.

Además, los agricultores tienen la posibilidad de dedicar parte de sus terrenos a prácticas distintas de las tradicionales y esto supone un equilibrio en sus ingresos anuales a través de un mercado más amplio para sus productos. La bioenergía pone en valor las tierras yermas o nuevas áreas agrícolas en las que se promueven nuevas plantaciones -ya sean energéticas o de usos múltiples-, con beneficios para el desarrollo del territorio y la incorporación de industrias que generen nuevos empleos y mayores ingresos.

Por otra parte, el fomento de la producción de biomasa para uso energético permite desarrollar una nueva actividad en las áreas rurales, sobre la base de un mercado con una demanda continua y sin fluctuaciones, que genera puestos de trabajo estables, bien remunerados y supone una nueva fuente de ingresos para las industrias locales. Cabe destacar que, a igual potencia instalada, con las energías provenientes de biomasa se crean hasta

cinco veces más puestos de trabajo que con los combustibles convencionales.

Esta oferta de empleo permite radicar a la población, y evitar así algunos de los problemas sociales derivados de la migración hacia las grandes ciudades, como la emergencia de zonas marginales y desempleo en estas últimas, y el abandono de actividades rurales.

El aumento de los ingresos, tanto en las industrias locales como en la población, da lugar a la aparición de nuevas infraestructuras y servicios en zonas rurales, como carreteras, centros hospitalarios y educativos y servicios para la población, sinergia que aumenta aún más el empleo y la calidad de vida en estos ámbitos.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la bioenergía no siempre es sostenible, ya que, si no se planifica debidamente, surgen riesgos, como de deforestación, pérdida de biodiversidad, erosión de suelos, uso excesivo del agua, conflictos en el uso y tenencia de la tierra, escasez de alimentos o subas repentinas de los precios. Por lo tanto, es necesario prestar atención al tipo de bioenergía que se promueve y a los aspectos técnicos que se aplican.

No obstante, en comparación con los combustibles fósiles más utilizados, la bioenergía brinda ventajas medioambientales relevantes:

- disminución de las emisiones de azufre y de material particulado;
- emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NOX;
- ciclo neutro de CO₂, sin contribución al cambio climático;
- reducción de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles en el sector residencial;
- descenso de riesgos de incendios forestales y de proliferación de plagas de insectos;
- aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando quemarlos en el terreno;
- utilización de tierras de barbecho con cultivos energéticos;

- independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior;
- mejora socioeconómica de las áreas rurales.

2.2 Biomasa con potencial energético

Tipos de biomasa y clasificación

La biomasa puede clasificarse de diversos modos. La más habitual es la que hace referencia al origen (Gráfico 4), y permitiendo distinguir los siguientes tipos:

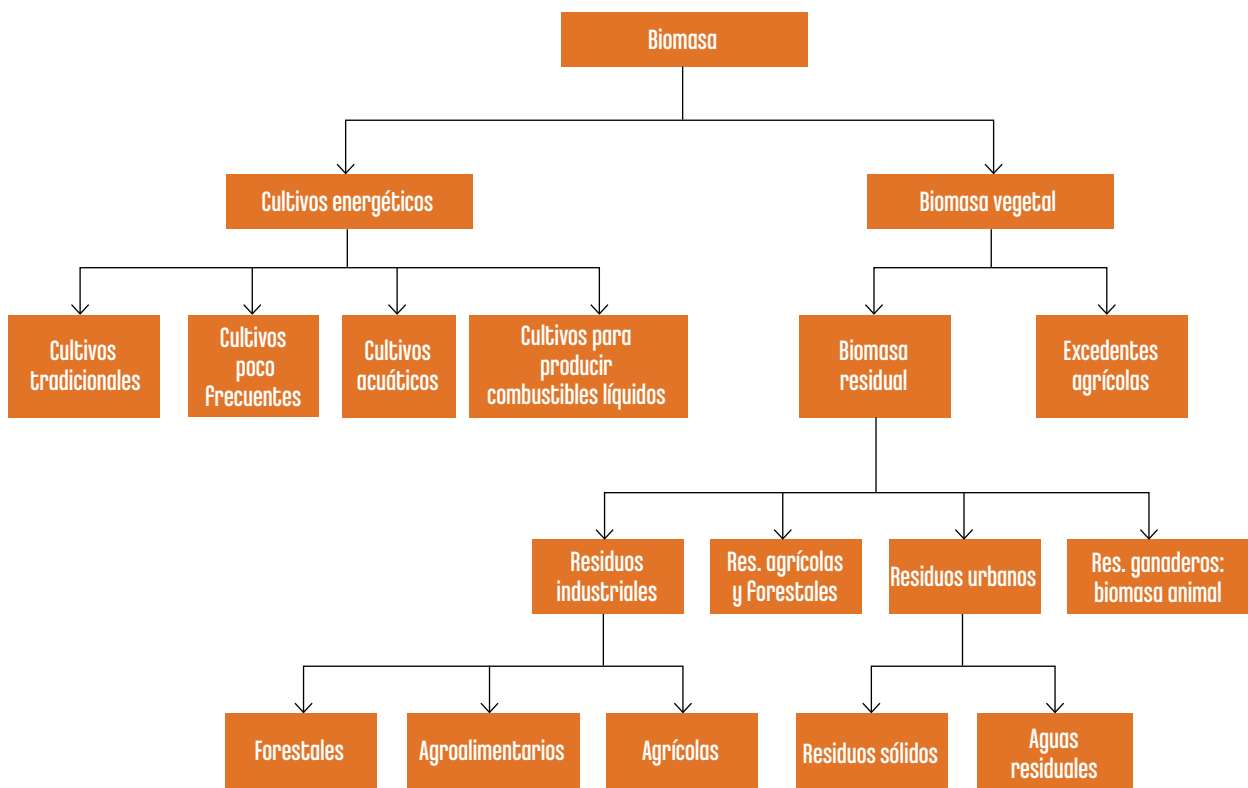
- **Cultivos energéticos:** realizados con el único objetivo de aprovecharlos para generar energía. Pueden ser cultivos tradicionales, modificados genéticamente o destinados a biocombustibles.

- **Biomasa residual:** incluye la biomasa no utilizada en el aprovechamiento forestal y las actividades agrícolas, los residuos de industrias forestales y agrícolas, los residuos sólidos urbanos y los residuos biodegradables, como efluentes ganaderos, lodos de depuradoras y aguas residuales urbanas, entre otros.

- **Excedentes agrícolas:** constituidos por los productos agrícolas que no son utilizados para la alimentación o con fines industriales.

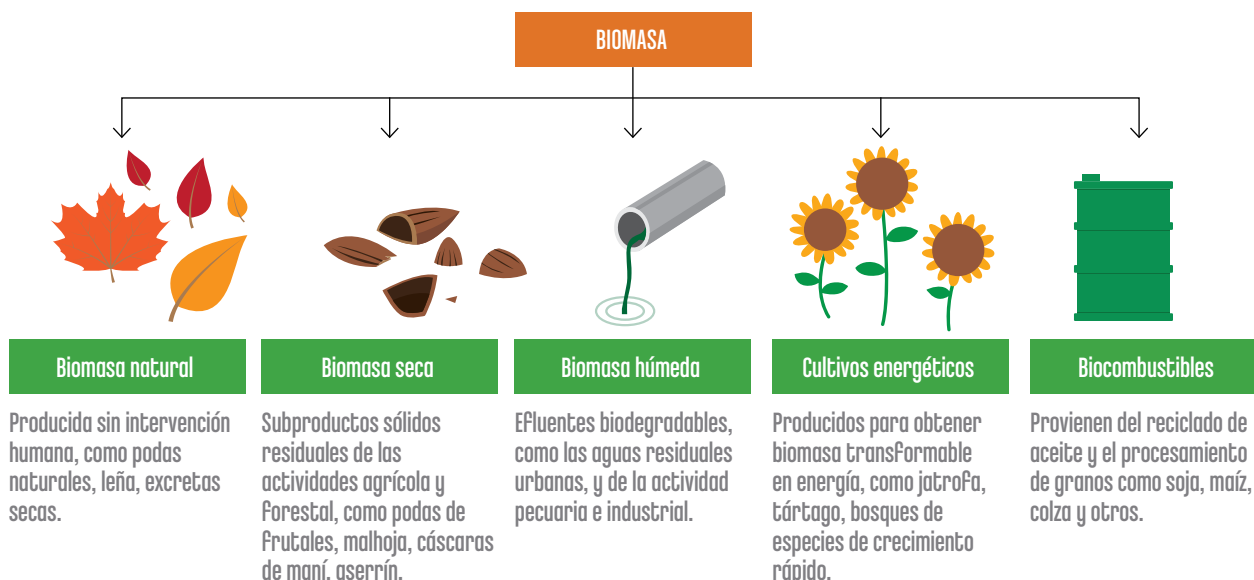
Otra caracterización útil es la que agrupa los tipos de biomasa de acuerdo con sus características (Gráfico 5):

Gráfico 4. Tipos de biomasa según su origen



Fuente: Elaborado por el autor.

Gráfico 5. Tipos de biomasa según sus características



Fuente: Elaborado por el autor.

- La biomasa natural, producida sin intervención del hombre y obtenida por recolección, es utilizada de la forma más simple, por combustión directa.
- La biomasa seca, que abarca la residual de los procesos de recolección, de la industria forestal y de la agroindustria, se aprovecha de diversos modos, desde la simple combustión hasta procesos tecnificados de producción de electricidad.
- La biomasa húmeda, que supera el 60% de contenido de humedad, requiere procesos de secado o puede ser destinada en procesos húmedos para la producción de biogás.
- Los cultivos energéticos pueden usarse directamente o mediante su transformación en biocombustibles.
- Los biocombustibles son los combustibles líquidos o gaseosos que han sido producidos mediante la transformación de cereales u otros cultivos de alto contenido energético.

La biomasa en el mundo

Algunos países de escaso desarrollo económico obtienen el 90% de su energía de la leña y otros biocombustibles, según indican la Agencia Internacional de la Energía, así como la FAO (IEA, 2014; FAO, 2017a). Esta es la principal fuente de energía en los hogares de 2400 millones de personas en el mundo y supone cerca de un tercio del consumo energético en África, Asia y Latinoamérica.

El problema de este tipo de uso de la biomasa, en ocasiones de supervivencia, es la falta de desarrollo tecnológico y eficiencia energética y sin una planificación sostenible de aprovechamiento, lo que conlleva la deforestación de grandes áreas con el consecuente impacto ambiental asociado. Una tecnología más desarrollada y un aprovechamiento planificado impulsarían el mercado internacional de biomasa, mejoras ambientales y el desarrollo rural de zonas degradadas.

De acuerdo con cifras de la IEA¹, en 2009, la oferta total de energía primaria en el mundo fue

¹ <https://www.iea.org/data-and-statistics>

de 12 169 Mtep, de los cuales 1 589 Mtep (es decir, el 13,1%) eran energías renovables. De estas, el 75,9% (1 206 Mtep) correspondía a bioenergía, de acuerdo con los siguientes porcentajes: biomasa sólida, 92,5%; biocarburentes, 4,5%; biogás, 1,8%, y residuos municipales renovables, 1,2%.

La biomasa sólida es ampliamente la mayor fuente de energía renovable en el mundo debido a la biomasa tradicional utilizada en los países en vías de desarrollo. Supone el 9,2% de la oferta total de energía primaria en el mundo y el 70,2% de la oferta total de energía renovable.

Puede distinguirse entre biomasa tradicional y biomasa moderna. La biomasa tradicional consiste en leña que se obtiene sin mediar transacción comercial, se utiliza fundamentalmente para cocinar y proporcionar calor en los hogares, tiene niveles bajos de eficiencia y genera problemas de salud al emitir gases y partículas contaminantes a causa de la combustión incompleta de la biomasa.

La biomasa moderna se caracteriza por las transacciones en el mercado, funciona con mejores niveles de eficiencia, no tiene por qué dar lugar a problemas de salud y es utilizada para generar energía eléctrica, para producir calor y refrigeración en los hogares y en la industria y para producir biocombustibles para el transporte.

La biomasa moderna está claramente en expansión en el mundo. En los países de la OCDE, cuando se habla de biomasa, se considera que ya se está haciendo referencia a la biomasa moderna.

La biomasa en la Argentina y su distribución regional

Desde el punto de vista agronómico y forestal, la Argentina tiene condiciones ecológicas adecuadas para el desarrollo de los insumos básicos necesarios para la producción de energía a partir de biomasa. Asimismo, tiene un gran potencial y ventajas comparativas para la elaboración de biocombustibles, ya que es uno de los principales productores mundiales de cereales y oleaginosas.

El país tiene grandes extensiones de tierras aptas para cultivos tradicionales (soja, maíz, girasol y sorgo) y no tradicionales (cártamo, colza, tártao, etc.), principales insumos para la elaboración

de biocombustibles, y es uno de los principales exportadores del mundo de aceites vegetales.

El balance bioenergético en la Argentina realizado por el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA) ha permitido cuantificar el volumen de biomasa disponible en varias provincias y actualizar esta información a nivel país, con su distribución geográfica (FAO, 2020). El Cuadro 1 muestra los principales tipos de biomasa potencialmente disponibles provenientes de cultivos a nivel provincial, mientras que el Cuadro 2 hace lo propio respecto de la biomasa proveniente de las industrias forestales y agrícolas.

La Secretaría de Energía cuenta con información geográfica sobre los volúmenes de biomasa accesible y comercial disponible, por departamento, para todo el país².

Caracterización energética

Los distintos tipos de biomasa presentan diferentes potenciales energéticos, fundamentalmente asociados a su contenido de humedad y composición. A partir de esas características, será la tecnología aplicada la que permitirá obtener una cantidad de energía de acuerdo con su rendimiento.

El Cuadro 3 muestra, para distintos tipos de biomasa, las principales características y los rangos de humedad habituales.

Para caracterizar la biomasa respecto de su capacidad y facilidad para ser utilizada con fines energéticos, los principales parámetros son los siguientes:

- composición química y física;
- contenido de humedad (HR);
- porcentaje de cenizas;
- poder calórico;
- densidad aparente;
- características de recolección, transporte y manejo.

² <https://sig.se.gob.ar/visor/visorsig.php>

Cuadro 1. Recursos con potencial energético provenientes de cultivos en la Argentina

Provincia	Forestaciones	Caña de azúcar	Té	Vid	Arroz	Banana
Buenos Aires	44 071	-	-	79	-	-
Catamarca	51	-	-	-	-	-
Chaco	11 924	-	-	-	9 336	-
Chubut	65 989	-	-	-	-	-
Córdoba	18 532	-	-	-	-	-
Corrientes	993 593	-	53 344	-	428 396	-
Entre Ríos	318 156	-	-	-	-	-
Formosa	4 535	-	-	-	-	124 775
Jujuy	24 677	374 058	-	-	-	33 720
La Pampa	741	-	-	-	-	-
La Rioja	339	-	-	95	-	-
Mendoza	18 721	-	-	484 353	-	-
Misiones	1 442 577	31 500	942 842	-	-	-
Neuquén	99 718	-	-	-	-	-
Río Negro	17 828	-	-	-	-	-
Salta	91 765	200 746	-	4 749	-	309 008
San Juan	6 595	-	-	102 494	-	-
San Luis	316	-	-	162	-	-
Santa Cruz	22	-	-	-	-	-
Santa Fe	61 583	-	-	-	-	-
Santiago del Estero	13 621	-	-	-	-	-
Tierra del Fuego	0	-	-	-	-	-
Tucumán	11 511	1 355 097	-	-	-	-
Total	3 246 863	1 961 401	996 186	591 932	437 732	467 503

Fuente: FAO (2020).

Definición de biomasa y clasificación

Frutas de carozo	Cítricos	Yerba mate	Olivos	Arándanos	Kiwi	Nuez pecán	Total	Aporte relativo
6096	7541	-	3272	1380	846	-	63285	0,7
-	-	-	-	-	-	-	51	0,0
-	-	-	-	-	-	-	21260	0,3
-	-	-	-	-	-	-	65989	0,8
-	-	-	1134	-	-	-	19666	0,2
-	76770	18874	-	-	-	-	1570977	18,5
-	39650	-	-	6028	-	154	363988	4,3
-	-	-	-	-	-	-	129310	1,5
-	-	-	-	-	-	-	432455	5,1
2893	-	-	-	-	-	-	3634	0,0
-	-	-	-	-	-	-	434	0,0
268201	-	-	43393	-	-	-	814667	9,6
-	17980	163038	-	-	-	-	2597937	30,7
-	-	-	-	-	-	-	99718	1,2
-	-	-	-	-	-	-	17828	0,2
-	14640	-	74	-	-	-	620983	7,3
3254	-	-	-	-	-	-	112343	1,3
-	-	-	-	-	-	-	478	0,0
-	-	-	-	-	-	-	22	0,0
-	-	-	-	-	-	-	61583	0,7
-	-	-	-	-	-	-	13621	0,2
-	-	-	-	-	-	-	-	0,0
-	98895	-	-	7408	-	-	1465503	17,3
280444	255476	181912	47873	7408	846	154	8475731	

Cuadro 2. Recursos con potencial energético provenientes de industrias forestales y agrícolas en la Argentina

Provincia	Industria azucarera	Industrias forestales	Procesadoras de maní	Bodegas	Desmotadoras	Molinos de arroz
Buenos Aires	-	61421,5	-	21,2	-	-
Catamarca	-	-	-	1162,0	-	-
Chaco	-	128980	-	-	192780	18240
Chubut	-	8903	-	-	-	-
Córdoba	-	58061,5	325805,0	60,2	1496	-
Corrientes	-	743178,1	-	-	-	161487
Entre Ríos	-	676189,1	-	-	-	-
Formosa	-	25857,5	-	-	-	-
Jujuy	1182834,6	10594,5	-	2,1	-	-
La Pampa	-	1269,5	-	56,5	-	-
La Rioja	-	-	-	8007,3	-	-
Mendoza	-	27555	-	141579,4	-	-
Misiones	19500,0	1186026,2	-	-	-	-
Neuquén	-	17175,5	-	617,0	-	-
Río Negro	-	74119	-	9,3	-	-
Salta	468059,7	21072,5	5,8	2528,0	13500	-
San Juan	-	3875	-	47733,1	-	-
San Luis	-	-	-	3,7	-	-
Santa Cruz	-	-	-	-	-	-
Santa Fe	15025,5	15435	-	-	-	-
Santiago del Estero	-	27738	-	-	-	-
Tierra del Fuego	-	30469,5	-	-	-	-
Tucumán	3845402,1	11439,5	-	28,9	-	-
Total	5530822	3129360	325811	201809	207776	179727

Fuente: FAO (2020).

Definición de biomasa y clasificación

Hornos de carbón	Procesadoras de jugo	Poda urbana	Semilleros	Molinos de yerba	Procesadoras de mandioca	Frigoríficos y sacaderos fruta	Otras fuentes*	Total
-	-	-	-	-	-	-	-	61443
-	-	-	-	-	-	-	40	1202
168728,8	-	-	-	-	-	-	45,5	508774
-	-	8586,0	-	-	-	-	910	18399
-	-	-	-	-	-	-	-	385423
-	15525,0	-	-	3356,0	-	-	66	923612
-	108123,0	-	-	-	-	-	150	784462
-	-	-	-	-	-	-	-	25858
-	-	-	-	-	-	-	2029,3	1195460
-	-	-	-	-	-	-	-	1326
-	-	-	-	-	-	-	-	8007
-	-	-	-	-	-	21761,5	-	190896
-	-	52057,0	-	21323,0	22178	-	5718,6	1306803
-	-	-	-	-	-	-	-	17793
-	-	-	-	-	-	-	-	74128
-	-	-	-	-	-	-	1616,5	506782
-	-	-	-	-	-	-	-	51608
-	-	-	-	-	-	-	-	4
-	-	-	-	-	-	-	-	0
-	-	93539	26634	-	-	-	-	150634
-	-	-	-	-	-	-	-	27738
-	-	-	-	-	-	-	-	30470
-	-	-	-	-	-	-	4045	3860916
168729	123648	154182	26634	24679,0	22178,0	21761,5	14620	10131740

Cuadro 3. Características típicas de la biomasa

Recurso de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrado: corteza, aserrín, astillas. Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas. Restos de plantaciones: ramas, cortezas, raíces.	Polvo, sólido, HR* > 50%. Polvo sólido, HR 30-45%. Sólido, HR > 55%.
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales. Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café). Estiércol. Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura.	Sólido, alto contenido de humedad. Polvo, HR < 25%. Sólido, alto contenido de humedad. Sólido HR > 55%.
Residuos industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales. Residuos de procesamiento de carnes. Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales. Grasas y aceites vegetales.	Sólido, humedad moderada. Sólido, alto contenido de humedad. Líquido. Líquido, grasoso.
Residuos urbanos	Aguas negras. Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales). Basura orgánica.	Líquido. Sólido, alto contenido de humedad. Sólido, alto contenido de humedad.

* HR = Contenido de humedad.

Fuente: BUN-CA, 2002.

En el Cuadro 4, se presenta la composición química y el porcentaje de cenizas de diferentes tipos de biomasa, teniendo como referencia el carbón mineral.

Cada forma de biomasa tiene un poder calorífico que se expresa en cantidad de energía por unidad física, por ejemplo, joule por kilogramo (J/kg), y representa la energía liberada en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente.

El poder calorífico bruto o superior (PCS) se define como la cantidad total de energía que se liberaría vía combustión, dividida por el peso. El poder calorífico neto o inferior (PCI) expresa la cantidad de energía disponible después de la evaporación del agua que se produce en el proceso; es decir, es la cantidad de energía realmente aprovechable, siempre menor que la del PCS.

El Cuadro 5 presenta valores característicos del PCS, para diferentes tipos de biomasa, en MJ/kg.

Tecnologías aplicables

Desde el punto de vista de las tecnologías aplicables con fines energéticos, resulta conveniente

dividir la biomasa en húmeda y seca, como muestra el Gráfico 6.

Los procesos termoquímicos comprenden básicamente la combustión, la gasificación y la pirólisis, mientras que se encuentra aún en etapa de desarrollo la licuefacción directa (Gráfico 7).

Los procesos bioquímicos se aplican a la biomasa húmeda (Gráfico 8) y se basan en la degradación de la biomasa por la acción de microorganismos, y pueden dividirse en dos grandes grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos).

Mediante procesos físicos de prensado y de recuperación mediante solventes pueden obtenerse aceites vegetales que admiten ser usados en forma directa como biocombustibles. Con posteriores procesos de transesterificación se obtiene el denominado biodiésel, que admite usarlo mezclado con gasoil convencional en motores alternativos sin modificaciones, o en estado puro, en motores apropiados.

Cuadro 4. Composición química de diferentes tipos de biomasa

Tipo de biomasa	Porcentaje del peso (sin humedad)						
	C	H	N	O	S	Cl	Ceniza
Madera							
Sauce	47,66	5,20	0,30	44,70	0,03	0,01	1,45
Madera suave	52,10	6,10	0,20	39,90	-	-	1,70
Corteza de madera dura	50,35	5,83	0,11	39,62	0,07	0,03	3,99
Madera dura	50,48	6,04	0,17	42,43	0,08	0,02	0,78
Eucalipto	50,43	6,01	0,17	41,53	0,08	0,02	1,76
Roble	49,89	5,98	0,21	42,57	0,05	0,01	1,29
Corteza de pino	52,30	5,80	0,29	38,76	0,03	0,01	2,90
Aserrín de pino	52,49	6,24	0,15	40,45	0,03	0,04	0,60
Subproductos agrícolas							
Brizna de trigo	39,07	4,77	0,58	50,17	0,08	0,37	4,96
Caña de azúcar	44,80	5,35	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Bagazo de caña	46,95	5,47	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Paja de arroz	39,65	4,88	0,92	35,77	0,12	0,50	18,16
Cascarilla de arroz	38,68	5,14	0,41	37,45	0,05	0,12	18,15
Paja de maíz	46,91	5,47	0,56	42,78	0,04	0,25	3,99
Olote de maíz	47,79	5,64	0,44	44,71	0,01	0,21	1,20
Fibra de coco	50,29	5,05	0,45	39,73	39,63	0,28	4,14
Carbón mineral	71,70	4,70	1,30	8,30	0,64	0,06	20,70

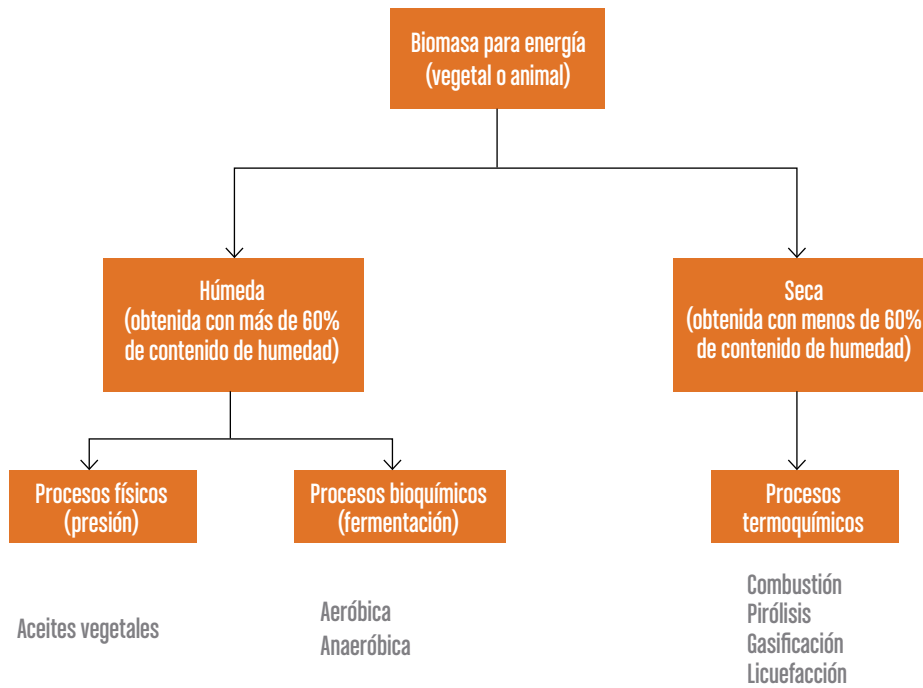
Fuente: BUN-CA, 2002.

Cuadro 5. Poder calorífico de algunas formas de biomasa

Tipo de biomasa	Valor calorífico bruto (MJ/kg)
Madera	
Astilla de madera	20,89
Corteza de pino	20,95
Desechos industriales de madera	19,00
Subproductos agrícolas	
Paja de trigo	18,94
Caña	18,06
Bagazo	18,09
Cáscara de coco	18,60
Marlo de maíz	17,72
Paja de arroz	15,61
Cascarilla de arroz	15,58
Aserrín	19,34

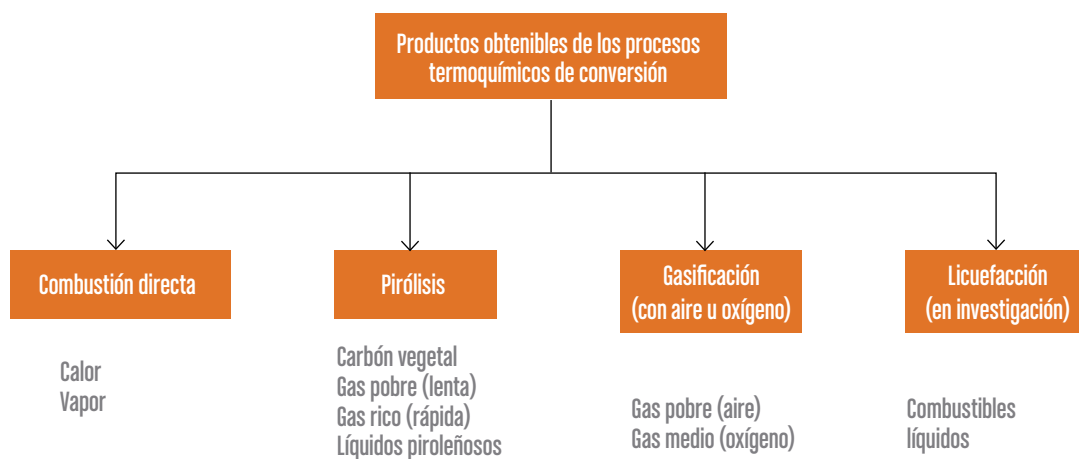
Fuente: BUN-CA (2002), sobre la base del *Regional Wood Energy Development Programme*.

Gráfico 6. Procesos aplicables a la biomasa para la obtención de energía



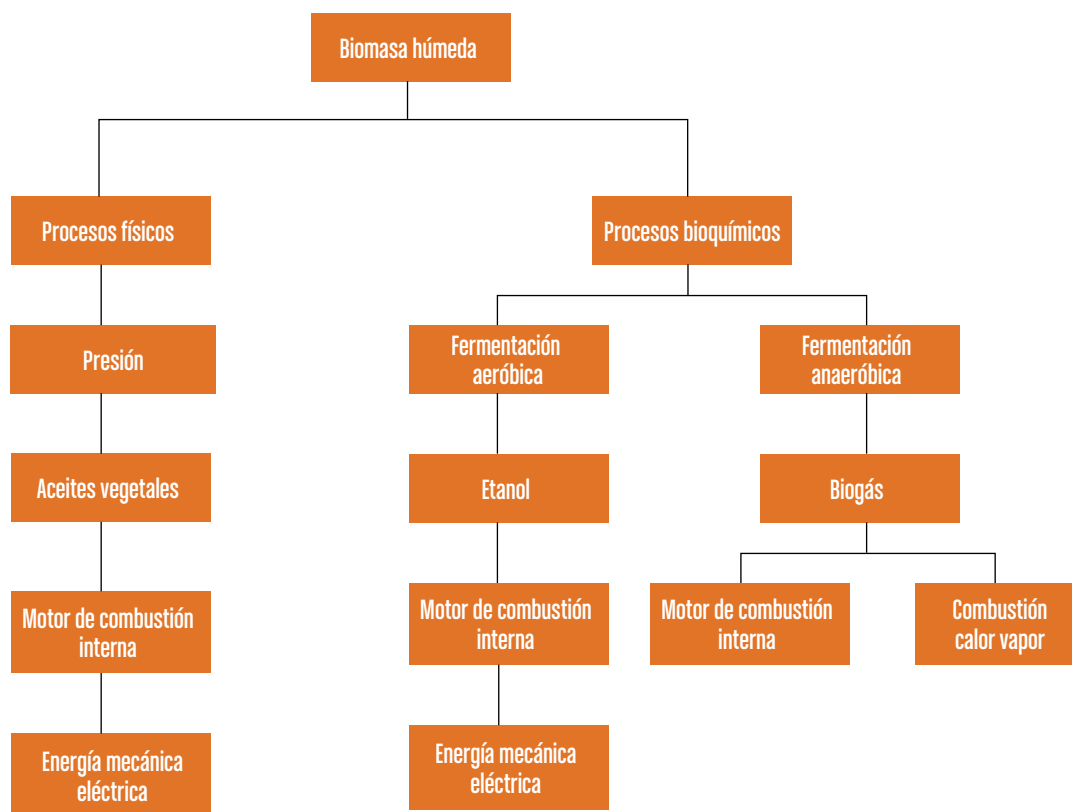
Fuente: Secretaría de Energía, 2008.

Gráfico 7. Procesos termoquímicos de conversión de biomasa en energía



Fuente: Secretaría de Energía, 2008.

Gráfico 8. Alternativas de procesamiento de la biomasa húmeda



Fuente: Secretaría de Energía, 2008.

3. LA DENDROENERGÍA



Cuando se produce con tecnologías eficientes, la dendroenergía es competitiva frente a la energía fósil, y puede ofrecer los mayores niveles energéticos y de eficiencia de carbono de todas las bioenergías.

3.1 Concepto y usos

Definición e importancia

Se denomina dendroenergía a la derivada directa o indirectamente de la biomasa leñosa. Abarca toda la energía obtenida a partir de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos primarios y secundarios provenientes de árboles y otra vegetación de terrenos forestales.

La dendroenergía se produce tras la combustión de madera, leña, carbón vegetal, *pellets*, briquetas y otros materiales, de acuerdo con su correspondiente poder calorífico neto. La madera es considerada la primera fuente de energía de la humanidad, y es también la más tradicional.

Su importancia equivale a la de todas las otras fuentes de energía renovables juntas (hidroeléctrica, geotérmica, de residuos, biogás, solar y biocombustibles líquidos), y es la única asequible y disponible para la cocción de alimentos y calefacción de millones de hogares de los países en desarrollo.

Debido a las preocupaciones relativas al cambio climático y la seguridad energética, la dendroenergía ha entrado en una nueva fase de gran importancia y viabilidad, debido a que constituye una fuente

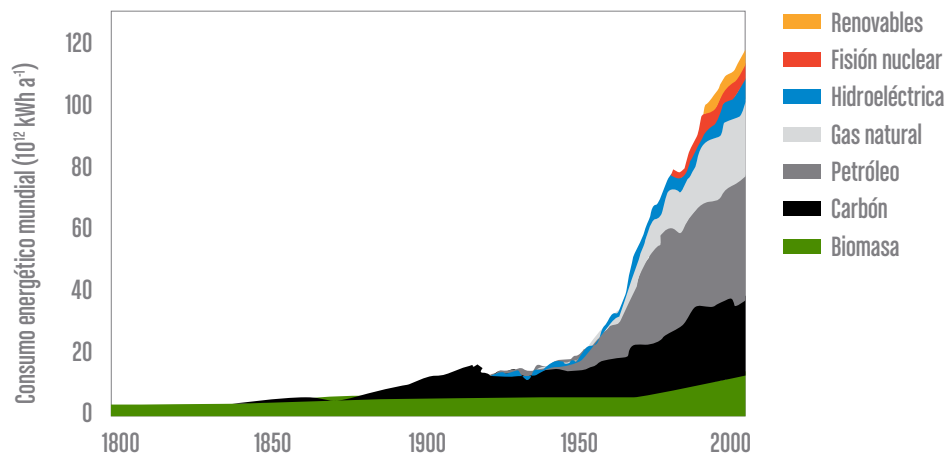
renovable que no tiene efectos negativos sobre el clima y es viable desde el punto de vista social, apta para generar energía térmica y eléctrica para el sector industrial y conjuntos residenciales.

Evolución histórica

La leña ha sido el principal combustible empleado por la humanidad hasta la Revolución Industrial. Se utilizaba para cocinar, calentar el hogar, fabricar elementos de cerámica y, posteriormente, producir metales y alimentar las máquinas de vapor. Fueron estos nuevos usos, que progresivamente requerían mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido, los que promocionaron el uso del carbón como combustible sustitutivo, a mediados del siglo XVIII.

Más tarde empezaron a utilizarse otras fuentes energéticas con un mayor poder calorífico, y la participación de la biomasa fue disminuyendo hasta mínimos históricos que coincidieron con el uso masivo de los derivados del petróleo y con precios bajos de estos productos (Gráfico 9). No obstante, continúa desempeñando un papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. Además, su carácter

Gráfico 9. Evolución de la demanda mundial de energía primaria desde 1800, por tipo de fuente



Fuente: Hydropole. *The Swiss Hydrogen Association**

*<https://hydropole.ch/hydrogen/energycarrier/>

renovable y no contaminante y el papel que puede jugar en la generación de empleo y activación económica de zonas rurales llevan a considerar a la dendroenergía como una clara alternativa.

En muchos países en desarrollo, la dendroenergía sigue siendo la principal fuente energética. En la mayor parte de África, el consumo de combustible procedente de la madera continúa en aumento, fundamentalmente por el crecimiento de la población, aunque en general disminuye en otras regiones en desarrollo, a consecuencia del aumento de los ingresos y la urbanización, factores que determinan la utilización de combustibles de mayor facilidad de uso y abastecimiento.

En los países industrializados, y especialmente en aquellos que tienen grandes elaboradoras de madera, la dendroenergía se destina tanto a fines domésticos como industriales en cantidades considerables.

En los bosques naturales se puede disponer de un alto porcentaje del volumen total de biomasa para la generación de energía. Copas y otras piezas desechadas que se abandonan en el bosque después de la cosecha constituyen residuos leñosos que ofrecen, probablemente, la mejor oportunidad inmediata de generación de bioenergía debido a su disponibilidad, valor relativamente bajo

y proximidad entre los puntos de producción y los lugares en que se realizan las operaciones forestales. Por otra parte, los desechos de aserraderos constituyen otra fuente de residuos fácilmente accesible, que proviene de los cortes y elaboración de tablas o machimbres.

Las plantaciones forestales energéticas se están volviendo más habituales en algunos países. También representan fuentes potenciales de madera para energía las especies forestales que hoy no cuentan con el favor del mercado, las áreas sobreexplotadas y los árboles fuera del bosque, además de los productos que se comercializan comúnmente y que, por consiguiente, reciben un precio más alto.

Cuando se produce mediante tecnologías eficientes, la dendroenergía es competitiva con respecto a la energía fósil, y puede ofrecer los niveles energéticos y de eficiencia de carbono más altos del conjunto de las materias primas bioenergéticas. En particular, las instalaciones combinadas para generación de energía térmica y eléctrica, llamadas de cogeneración, tienen una eficiencia de conversión que puede alcanzar el 80%.

Algunos países explotan sistemas de generación de energía a partir de la madera como una alternativa ecológica a los combustibles fósiles. Se

han desarrollado nuevas tecnologías para mejorar la eficacia y la viabilidad económica de la dendroenergía, particularmente en países con grandes áreas forestales. Estados Unidos, Canadá, Suecia y Finlandia se encuentran entre los países que más utilizan la dendroenergía en sus industrias, y dependen principalmente de los subproductos del procesamiento de la madera.

La mayor parte del suministro mundial de madera en rollo o rollizos (troncos en estado natural, sin tratar) procede de países industrializados, mientras que la leña se produce y consume mayoritariamente en países como India, China, Chile y Brasil, en gran medida de modo informal.

Si bien el consumo mundial de combustibles leñosos (leña y el carbón vegetal) está aumentando debido al crecimiento de la población, el consumo per cápita disminuye en todas las regiones del mundo, excepto en los países de Asia y Oceanía.

Usos doméstico, comercial e industrial

En numerosos países en desarrollo que dependen de la madera como fuente de energía, los recursos se ven amenazados por la pérdida de la cubierta vegetal, por la mayor población, la expansión agrícola y las prácticas forestales insostenibles.

Los países industrializados y los países en desarrollo en rápido crecimiento, que consumen la mayor parte de los combustibles fósiles del mundo, recurren cada vez más a la dendroenergía, a escala industrial. Algunos han conseguido estabilizar o incrementar su superficie forestal.

El uso de la dendroenergía está determinado por varios factores, como la existencia de recursos, el precio, los ingresos de las personas y la disponibilidad de otros tipos de energía. En general, la elección de la dendroenergía por parte de los consumidores de países en desarrollo se debe a estos dos últimos factores.

Los hogares que utilizan la dendroenergía pueden dividirse en cuatro tipos:

- Los que producen leña sólo para sus propias necesidades.
- Los que producen y venden leña.
- Los que producen y compran leña.

- Los que sólo compran leña.

La mayor parte de los hogares rurales se ubica en los dos primeros grupos, mientras los hogares urbanos suelen encontrarse entre los dos últimos. Es razonable que los hogares que sólo compran leña respondan a sus cambios de precio modificando su consumo total de energía o utilizando otros tipos. Tales variaciones influirán probablemente en la producción del segundo grupo o el consumo total del tercero. El efecto de los cambios de precios sobre la cantidad que estos grupos producen para sí mismos dependerá del valor de la fuerza de trabajo utilizada para la producción de leña. Los hogares del primer grupo generalmente no participan en el mercado por su lejanía y el bajo valor de su propia mano de obra. Sin embargo, si los precios de la leña cambian mucho, los hogares de este grupo podrían entrar en el mercado como compradores o vendedores.

Otros factores sociales y ambientales que influyen en el consumo de leña en los hogares son el clima (por ejemplo, la altitud, la duración del invierno y las estaciones de lluvias), el acceso a los mercados y recursos forestales, los efectos del humo para la salud y el medio ambiente, y las variables culturales.

En muchos países, los programas de sustitución de la leña y el carbón vegetal han fracasado debido a la resistencia de los consumidores a cambiar sus hábitos de cocina, como el uso de cocinas de leña y carbón vegetal por otras tecnologías.

Las aplicaciones de la biomasa en las industrias abarcan un amplio campo de nuevas posibilidades en los procesos, operaciones de secado, producción de agua caliente o aceite térmico e, incluso, la climatización de naves industriales. La utilización de combustibles biomásicos en hornos cerámicos para la fabricación de ladrillos, tejas y bovedillas puede ser un ejemplo de mejora de la rentabilidad, al sustituir otros combustibles de mayor precio.

En principio, no existen limitaciones técnicas en el uso de la biomasa como combustible si el calor demandado por una industria va a ser cubierto por un proceso de intercambio en una caldera. La madera es el tipo más difundido, y cualquier sector industrial puede utilizarla. En las industrias de

primera y segunda transformación de la madera, es decir, en los aserraderos, fábricas de tableros, muebles y otros, es posible valorizar los residuos ya sea para uso propio o para la venta a otros sectores industriales.

En general, las plantas que generan residuos lignocelulósicos tienen la capacidad de producir un volumen de energía que excede su propia demanda, por lo que se encuentran en condiciones de vender excedentes, tanto de biomasa como de la energía producida a partir de esta. Cuando se genera energía eléctrica, los excedentes pueden comercializarse entregándolos a la red de servicio público.

3.2. Formas y disponibilidad de la dendroenergía

Recursos del monte natural

El monte natural ofrece una utilidad potencial muy amplia, que va desde su aprovechamiento energético hasta sus funciones como regulador de cuencas hídricas, pasando por toda una serie de productos (medicinales, químicos, maderas, frutos) y servicios (turismo, abrigo y sombra, conservación de suelos, entre otros).

A grandes rasgos, los usos alternativos del monte natural pueden clasificarse en:

- agroindustriales;
- agrosilvopastoriles;
- turísticos.

La mayoría de las especies nativas no sólo son aptas para emplearse como leña y carbón, sino que además son valiosas como maderas para distintos destinos (postes, cabos de herramientas, carpintería, tornería y ebanistería).

El uso tradicional del monte natural ha traído aparejado el deterioro del recurso, lo que a su vez determinó la sanción de una legislación restrictiva en la materia. El monte natural es una fuente de biomasa forestal (Gráfico 10) que debe ser colectada racionalmente. El manejo racional debe asegurar un uso sostenible, no sólo como monte, sino también como ecosistema y como conservador del equilibrio de otros ecosistemas relacionados.

Además, es preciso mejorar la capacidad productiva de los montes, mediante la plantación artificial de especies autóctonas de buena conformación forestal, capaces de alcanzar grandes dimensiones.

Cuando se trata de desmontes en zonas donde se permite afectar las tierras a otros usos, se obtiene una biomasa que debe priorizarse según su valor: en primer lugar para madera, luego para industrias extractivas como la del tanino o la del carbón, y, finalmente, para uso energético. A este se destinan los residuos biomásicos que quedan disponibles en el manejo racional del monte natural, ya sea por tareas de limpieza, sanitarias o de extracción de ejemplares.

Recursos del monte implantado

En el Gráfico 11 puede apreciarse la distribución energética de un árbol. En todo el proceso de la industria forestal, desde la extracción en el monte hasta que el producto se entrega al mercado, se producen residuos lignocelulósicos. De cada árbol que se extrae para la producción de madera, alrededor del 30% se aprovecha comercialmente, un 40% queda en el campo (ramas, despuntes y raíces) y otro 30% se desperdicia en el aserrado (costaneros, astillas, corteza, aserrín).

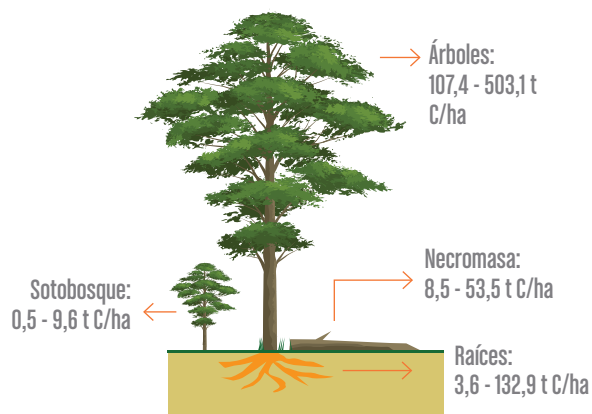
Bajo un manejo racional, el monte implantado proporciona biomasa durante el período de crecimiento, previo a la cosecha, a través de las actividades de poda y raleo, que se realizan para obtener árboles de mayor grosor y un producto final de buena calidad

Luego, en la cosecha de los rollizos del diámetro y la longitud requeridos para el aserrado, queda en el campo un volumen importante de biomasa que puede colectarse y ser utilizada con fines energéticos, constituida por los tocones (la parte del tronco que queda unida a la raíz cuando lo cortan por el pie), el ramaje y los despuntes. El Gráfico 12 muestra un programa característico de manejo del monte implantado, desde la plantación hasta la cosecha.

Recursos de la producción de madera

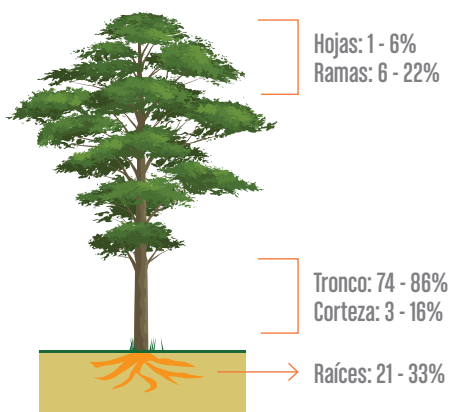
En el proceso industrial, los valores de la relación producto-residuo (RPR) dependen de la eficiencia

Gráfico 10. Contenidos de carbono típicos en la biomasa existente en un bosque primario, por hectárea



Fuente: BUN-CA, 2002.

Gráfico 11. Distribución energética de un árbol



Fuente: BUN-CA, 2002.

de la maquinaria utilizada, como el tipo de sierra o de mecanización en la cosecha. Por lo tanto, es importante determinar el grado de tecnología en la cosecha y en los aserraderos en cada región. El Gráfico 13 muestra porcentajes característicos del aprovechamiento del rollizo cosechado, hasta la elaboración de molduras.

La biomasa no utilizada puede ser aprovechada energéticamente en la propia industria o en instalaciones que concentren los residuos de un conjunto de aserraderos. Debe considerarse que existen usos alternativos para esa biomasa residual, ya sea en la producción de combustibles sólidos (como *pellets* o briquetas), en la elaboración de tableros manufacturados o en la industria de la pasta de papel.

Los aserraderos más sencillos producen tablas y tirantes, destinados a la industria de la construcción o la del mueble. La elaboración más simple consiste en el armado de pallets, que se utilizan como base para el transporte de materiales, o de cajones para el embalaje de frutos. Algunos incorporan un desarrollo mayor con la producción de machimbres para la construcción.

Los aserraderos más tecnificados implementan un proceso de secado que incrementa el valor de la producción, pero requiere una fuente adecuada de calor.

Durante el procesamiento del rollizo se producen diversos tipos de biomasa, que tendrán más valor si el aserradero dispone de una descortezadora:

- **Costaneros:** son los cantos del rollizo que se descartan en la producción de tablas.
- **Chips:** son las astillas o pequeños trozos de madera que se producen de las varillas, descartes y costaneros para facilitar su manipuleo o uso posterior.
- **Aserrín:** son finos residuos de madera originados en el proceso de corte o cepillado.

Los porcentajes de humedad pueden variar desde un 50% en el caso del rollizo recién cosechado, hasta entre 10 y 20% si se trata de chips o aserrín, dependiendo de si existe un período de secado o condiciones climáticas adversas durante el acopio o el transporte.

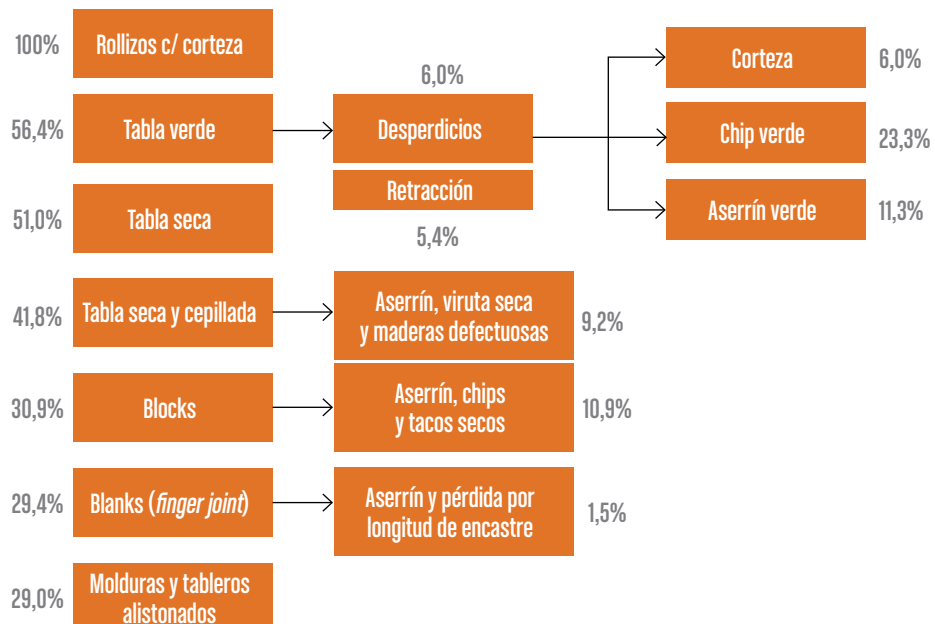
Los residuos pueden utilizarse en la producción energética mediante combustión directa, gasificación o transformándolos en *pellets*. Existe la posibilidad de dedicarlos a la fabricación de tableros o pasta celulósica cuando no tienen corteza.

Gráfico 12. Esquema típico de podas y raleo



Fuente: Elaborado por el autor.

Gráfico 13. Relación producto-residuo (RPR) en la industria forestal de la Argentina



Fuente: Uasuf y Hilbert (2012), sobre datos del INTI.

Recursos de la manufactura de la madera

La carpintería y la fabricación de muebles son actividades clasificadas como industrias de segunda transformación. Utilizan madera como materia prima principal, sea maciza o tableros de fibras, de partículas o contrachapados. También utilizan colas y adhesivos para incrementar la resistencia de los productos finales, que pueden permanecer en el residuo lignocelulósico del proceso de producción. Los procesos de producción varían según las materias primas que se utilicen.

Se estima que los residuos generados en la industria del mueble representan del 30 al 50% de la madera procesada, dependiendo del tipo de mueble y de su calidad. Entre ellos se encuentran el aserrín, las virutas, los restos de chapas y tableros y los recortes de madera. Gran parte de estos residuos se produce durante las operaciones de dimensionado y mecanizado de la madera, mientras que el

resto son materiales que no son susceptibles de continuar en el proceso de producción o bien constituyen piezas defectuosas (Gráfico 14).

Recursos de la poda de frutales

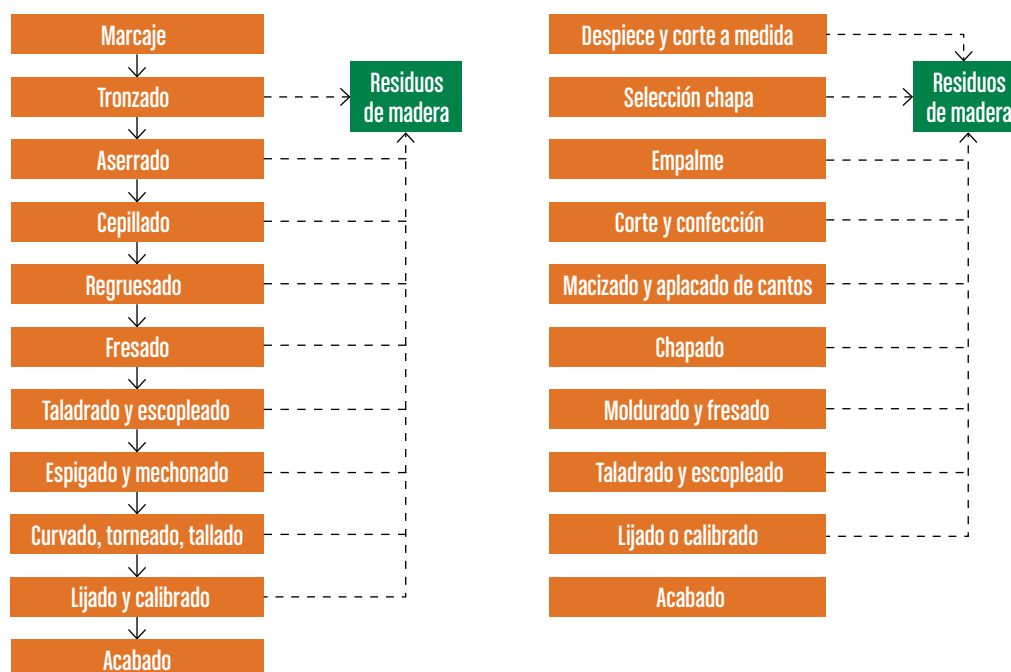
La poda de frutales puede constituir una fuente de recursos dendroenergéticos. Se realiza con diferentes propósitos:

- lograr que los frutales entren en producción en el menor plazo posible;
- obtener cosechas regulares todos los años;
- producir máxima calidad y cantidad de fruta.

Existen distintos tipos de podas en los frutales:

- poda de plantación;
- poda de formación;

Gráfico 14. Procesos de fabricación con madera maciza y con tableros



Fuente: Elaborado por el autor.

- poda de fructificación;
- poda en verde.

El Cuadro 6 muestra, a modo de ejemplo, las producciones y rendimientos por hectárea de los residuos de poda de los principales cultivos en España.

La mayoría de los residuos no se produce todo el año. Para el uso de la biomasa se pretende atenuar esta estacionalidad, debida a las operaciones que generan los residuos

En general, el momento más adecuado para la poda de fructificación en plantas adultas es al final del invierno, antes de la brotación primaveral. Es conveniente hacerla luego de la cosecha, lo que resulta fácil en variedades de cosecha temprana y de media estación. En el caso de las de producción tardía, se debe decidir entre sacrificar algo de la producción del año en beneficio de la siguiente cosecha o tener la producción completa y perder parte de la del año siguiente.

Aunque no existe un consenso generalizado, se aconseja que la poda de fructificación no se realice todos los años. Sin embargo, deberá considerarse que el grosor de las ramas que se deben cortar dependerá de la frecuencia con que se realicen las podas y, en consecuencia, variará el costo de la operación. Asimismo, a mayor grosor de las ramas mayor posibilidad de entrada de enfermedades. En el limonero, se recomienda una poda cada 2 o 3 años.

Cuadro 6. Estimación de rendimientos de residuos de poda de los principales cultivos leñosos en España

Cultivo	Superficie (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)
Olivo	2 200 000	3 394 700	1,5
Viñedo	1 163 000	5 420 700	4,7
Almendro	664 000	279 100	0,4
Cítricos	283 350	5 820 900	20,5
Manzano	50 000	922 200	18,4

Fuente: Moreno Casco *et al.*, 2014.

El contenido de humedad en las leñas, ramas y hojas procedentes de la poda varía según el momento de la medición, y resulta muy distinto según el régimen de lluvias anterior a esta operación. El secado de los restos de la poda en el campo durante unos días, denominado oreo, da lugar a una reducción importante de la humedad, que puede alcanzar el 25%.

Un problema es que un agricultor medio no tiene capacidad para adquirir la maquinaria necesaria para triturar los restos de poda y gestionar su almacenamiento y transporte a la planta. Ello genera la participación de empresas de servicios agrícolas o cooperativas que realizan el triturado en campo y el transporte a destino de los restos de poda, así como la gestión previa de la logística de almacenamiento de los restos en el propio campo.

La biomasa residual de las podas de olivos, viñedos y árboles frutales se caracteriza por encontrarse dispersa en el territorio donde se produce. Esta característica supone la mayor limitación en su aprovechamiento como fuente de energía, a diferencia de los combustibles fósiles, que se encuentran concentrados espacialmente.

Recursos de la poda urbana

Para los residuos de poda urbana, vale lo expuesto con respecto a la poda de frutales en cuanto a sus características, estacionalidad y dispersión.

Para el tratamiento de los residuos de poda se han planteado diferentes opciones:

- Recolección y relleno de cavas o basurales a cielo abierto, que generan un alto impacto ambiental.
- Recolección y envío a disposición final en relleno sanitario, que implica además un alto costo.
- Recolección, acopio en puntos estratégicos, chipeado y compostaje, que implica una actividad sustentable y económica.
- Chipeado in situ, transporte y compostaje, que implica una actividad sustentable y económica.

El chipeado reduce de 5 a 7 veces el volumen de los residuos transportados a basurales o rellenos sanitarios, y puede venderse o utilizarse para cubrir suelos.

Transformar los residuos de poda urbana en chips genera una biomasa que puede ser utilizada con fines energéticos, con ventajas respecto de las alternativas planteadas desde el punto de vista medioambiental y económico.

3.3 Dendroenergía como combustible

La leña y el carbón de leña

La leña es el conjunto de troncos, ramas y trozos de madera destinado a hacer fuego. Constituye el combustible más antiguo.

Los principales compuestos orgánicos de la madera son celulosa, hemicelulosa y lignina. Una pequeña fracción corresponde a resinas. En el proceso de combustión, la lignina se transforma principalmente en carbono fijo. Los otros compuestos se liberan como elementos volátiles, por lo cual el quemado de esta fracción se realiza con reacciones similares a las de un combustible gaseoso. En comparación, esta fracción gaseosa posee aproximadamente un 40% más de poder calorífico que la fracción sólida de carbono fijo.

La composición química elemental indica que la madera seca, libre de agua, es un combustible rico, compuesto de un 43% de carbono y un 7% de hidrógeno, mientras el resto corresponde a oxígeno (O_2). Esta composición elemental no sufre mayores variaciones en las distintas especies de madera; las propiedades de combustión de estas varían principalmente por densidades, porosidades y contenidos de humedad.

La leña es higroscópica, es decir, la atracción entre la madera seca y el agua es fuerte. El agua en la leña toma dos formas: libre y ligada. El agua libre existe en estado líquido y como vapor en las cavidades de las células (*lumen*). El agua ligada es parte de los materiales de la pared celular, se une con sus fibras de celulosa (microfibrillas).

Se deben distinguir dos estados de madera: verde y seca. La verde presenta un contenido de humedad superior al 30%, en estado inestable, ya que en el interior del lumen se encuentra agua en estado líquido y también aire saturado.

La madera alcanza un contenido de humedad de equilibrio (CHE) en relación con la humedad relativa de su ambiente circundante cuando no pierde ni

adquiere humedad. Si la humedad relativa ambiente se incrementa, el CHE también se incrementa, lo que implica más humedad retenida en la madera.

La madera que se comercializa como seca es la que ha sido estacionada con el propósito de alcanzar el contenido de humedad esperado, tanto si se la ha puesto en un secador como si se la ha dejado en el ambiente, protegida de la lluvia, durante un período más o menos largo.

La leña no es un combustible homogéneo como el petróleo o el gas natural. A diferencia de lo que sucede con los combustibles líquidos y gaseosos, en el proceso de combustión de la madera se identifican varias fases de reacción: secado, gasificación y oxidación, todas ellas con diferentes temperaturas.

Las nuevas normativas ambientales internacionales han obligado a los fabricantes de equipos para el uso de leña a mejorar sus diseños y lograr altas eficiencias y muy bajas emisiones, con resultados comparables a los del petróleo y el gas.

El incremento de la eficiencia logró una reducción importante en la emisión de monóxido de carbono (CO). Las estufas modernas presentan índices menores a 200 mg/Nm³ de CO.

El carbón de leña, o vegetal, es el residuo sólido que queda cuando se "carboniza" la madera, o se la "hidroliza" en condiciones controladas, en un ambiente cerrado. Durante el proceso de pirólisis o carbonización, se controla la entrada del aire para que la madera, en vez de transformarse en cenizas, se descomponga químicamente y forme el carbón vegetal.

En los países en desarrollo, el carbón de leña se usa principalmente como combustible doméstico, para cocinar y calefacción, pero también es importante a nivel industrial.

Las briquetas y los pellets

La variabilidad de las características de la biomasa forestal es muy amplia. El tamaño de las piezas, su densidad, la humedad contenida, el poder calorífico de las diferentes especies de madera y la composición del residuo (corteza, aserrín, ramas, hojas y otros) muchas veces hacen difícil su almacenaje, transporte y combustión.

Se han desarrollado procesos a fin de densificar y homogeneizar la biomasa forestal para facilitar

su almacenamiento, transporte, manipuleo y conversión energética. La densificación consiste en compactar pequeños trozos de madera (como aserrín o chips) y así homogeneizarlos en:

- configuración y tamaño, lo que permite optimizar aún más la eficiencia de combustión según lo requerido por los generadores de calor y la inclusión de automatizaciones en estos equipos;
- densidad (independientemente de la especie de la que provienen);
- poder calorífico;
- contenido de humedad, que puede ser controlado, lo que facilita la combustión y mejora la eficiencia en el equipo generador de calor.

Según el volumen de las unidades obtenidas en la densificación de los residuos de la industria forestal, estas se clasifican en briquetas y *pellets*.

La gasificación

Los gasificadores de carbón mineral, madera y carbón vegetal han sido empleados, desde el comienzo del siglo XX, para el funcionamiento de motores de combustión interna. Su utilización alcanzó un punto máximo durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se emplearon en el mundo casi un millón de gasificadores, principalmente en vehículos que funcionaban con combustibles sólidos, en lugar de gasolina.

La gasificación es un proceso termoquímico en el cual combustibles sólidos, tales como maderas, residuos agrícolas y otros tipos de biomasa seca son convertidos en un gas denominado “gas pobre” o gas de síntesis (*syngas*) mediante una combustión controlada.

La composición del gas pobre varía entre las siguientes proporciones: CO₂ (~1 a 15%), CO (~20 a 30%), CH₄ (~1 a 5%), H₂ (~4 a 20%), N₂ (~50 a 65%). Es decir, los gases combustibles constituyen aproximadamente un 40% del volumen total del gas. Las mezclas de gas pobre y aire presentan un número de octanos superior al de las mezclas de gasolina y aire. Por este motivo, pueden emplearse motores con índices de compresión superiores, hasta 1:11, lo que se traduce en una mejor eficiencia

térmica del motor y en un aumento relativo de la potencia de salida.

Esta mezcla de gases que compone el gas pobre tiene un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la sexta parte del PCI del gas natural cuando se emplea aire como agente gasificante.

El rendimiento del proceso de gasificación varía de 70 a 80%, dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice. El resto de la energía introducida en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento del *syngas*, en la eliminación de vapor de agua y en la filtración y lavado, cuando es necesario eliminar los alquitranes.

Los bio oils

Pueden producirse combustibles líquidos a partir de biomasa lignocelulósica mediante procesos de pirólisis rápida que se encuentran en estado de desarrollo tecnológico, para utilizar de manera eficiente y masiva en grandes instalaciones industriales de producción de bio oil.

Por otra parte, también se encuentran en desarrollo los biocombustibles de segunda generación, que se obtienen a partir de materias primas que no tienen usos alimentarios; entre otras especies arbóreas, el álamo para etanol. El desarrollo de estos biocombustibles ofrece la oportunidad de usar más materias primas, aprovechar suelos no aptos para cultivos alimentarios y generar una mayor eficiencia de conversión.

Por su parte, los biocombustibles de tercera generación utilizan tecnologías de producción similares a las de los agrocombustibles, pero aplicadas a cultivos bioenergéticos. Es el caso de los productos forestales bajos en lignina, que reducen los costos y las etapas del pretratamiento, no son materiales alimentarios y, en muchos casos, son considerados residuos.

Se pueden definir tres tipos de materias primas para la producción de etanol:

- materiales con azúcares solubles, con carbohidratos como fuente (caña de azúcar, remolacha azucarera, sorgo dulce, entre otros);
- almidones (maíz, sorgo grano, trigo y otros);

- materiales lignocelulósicos, cuyos carbohidratos se encuentran en formas más complejas (madera, residuos agrícolas, cultivos lignocelulósicos, entre otros).

Estos últimos requieren procesos de hidrólisis y fermentación que los hacen más costosos económica y energéticamente.

3.4 Dendroenergía para producir energía eléctrica

La generación de electricidad

La energía eléctrica no es una energía primaria, dado que no se encuentra en la naturaleza para utilizar directamente, sino que se produce a partir de otro tipo de energía. Constituye un vector energético con notorias ventajas, ya que puede utilizarse para satisfacer todo tipo de demandas, como iluminación, calor (o frío) y movimiento.

Hay diversas tecnologías que pueden emplearse para transformar la dendroenergía en energía mecánica, es decir, en potencia disponible en un eje, con el propósito de obtener energía eléctrica al acoplarlo a un generador o alternador.

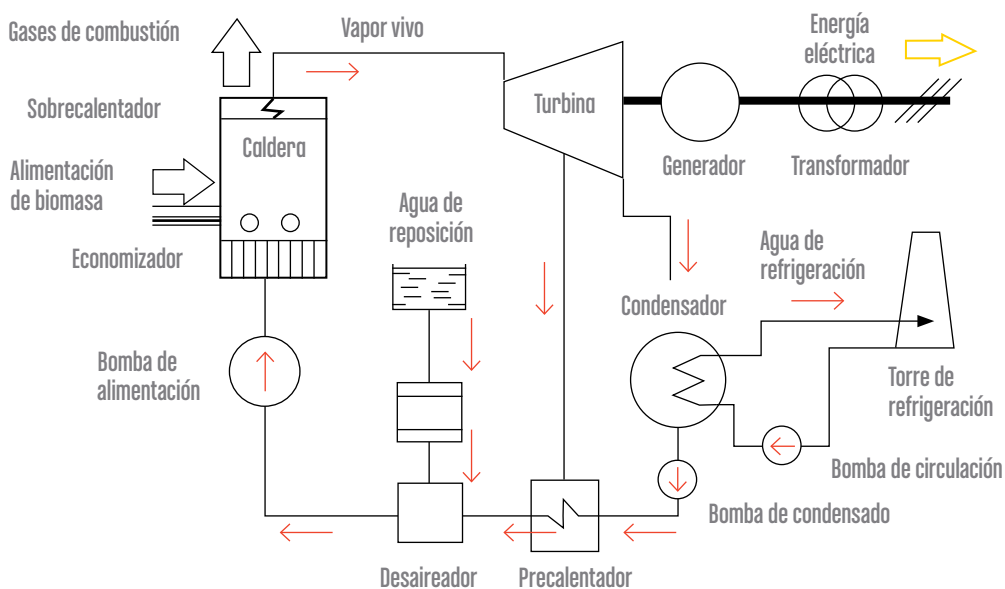
La generación turbovapor

Cuando la máquina motriz es una turbina de vapor se debe disponer de una caldera como fuente de alimentación. Este tipo de central de generación eléctrica se denomina "turbovapor".

La caldera es alimentada por uno o varios tipos de dendrocombustibles que, gracias a su poder calorífico, permiten generar vapor en condiciones de presión y temperatura adecuadas para enviarlo a la turbina. La combustión se realiza en un hogar especialmente diseñado, integrado generalmente a la caldera o generador de vapor. Las calderas pueden ser de tipo humotubular o acuotubular, dependiendo fundamentalmente de la capacidad de la instalación. En las potencias menores, la tendencia actual es el retorno hacia las calderas humotubulares, por su mejor adecuación al uso propuesto.

La turbina es una máquina compuesta por un eje con álabes que transforman la energía calórica en energía mecánica. Luego de su evolución en la turbina, el vapor generalmente es condensado y se utiliza para alimentar la caldera, cerrando de ese modo el ciclo (Gráfico 15).

Gráfico 15. Principales componentes del ciclo de generación turbovapor



Fuente: Elaborado por el autor.

Cuando este tipo de instalación permite utilizar el vapor total o parcialmente en un proceso industrial, se denomina “cogeneración” (se genera tanto electricidad como calor). El vapor puede obtenerse a la salida de la turbina, que en ese caso se denomina de contrapresión, o mediante extracciones en alguna etapa intermedia del cuerpo de la turbina (Gráfico 16).

Las calderas pueden diseñarse para diversos tipos de combustión de la biomasa: en forma directa en grillas, en cámaras de mezcla, con lecho fluido o con gasificación previa. La elección de la tecnología estará supeditada al dendrocombustible disponible y a los aspectos económicos.

Los rendimientos de la instalación dependerán, principalmente, de las condiciones del vapor generado en la caldera: a mayor presión y temperatura, mejores niveles de rendimiento.

La generación mediante motores de combustión interna

También puede generarse energía eléctrica mediante el uso dendrocombustibles en motores de combustión interna. Estos deben ser alimentados

por combustibles gaseosos o líquidos, como los biocombustibles o los bio oils.

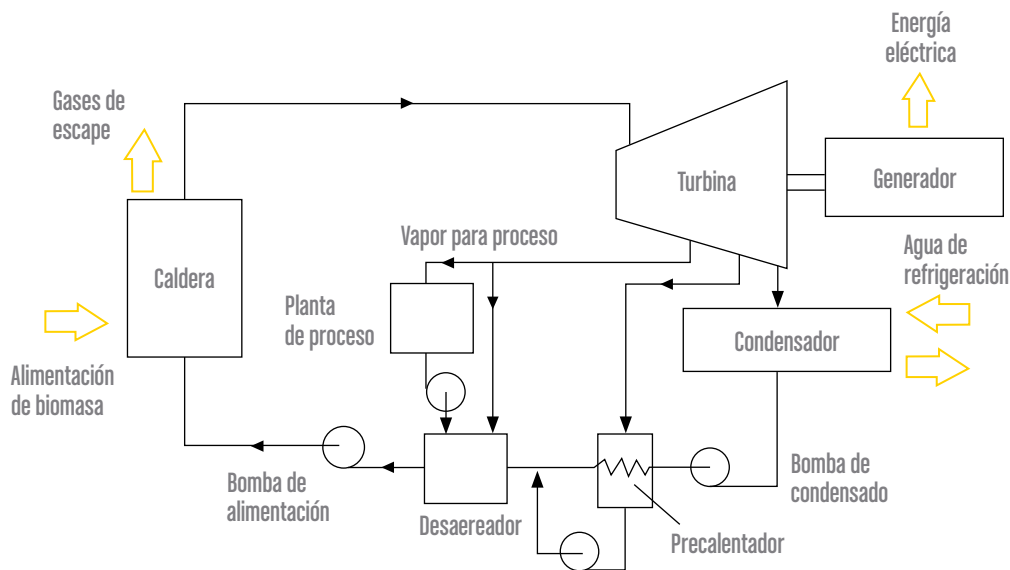
Por lo tanto, si se dispone de leña o chips, debe implementarse una etapa de gasificación previa. Los gases producidos por pirólisis deben pasar por un proceso de limpieza y separación de alquitranes y componentes que puedan perjudicar el funcionamiento de los motores o producir su desgaste.

También es posible sustituir el motor alternativo por una turbina de gas e incorporar una caldera de recuperación para cerrar un ciclo combinado (Gráfico 17), es decir, aquel que proporciona energía eléctrica mediante una turbina de gas y una turbina de vapor accionada con el vapor generado a partir de los gases de escape de la turbina de gas.

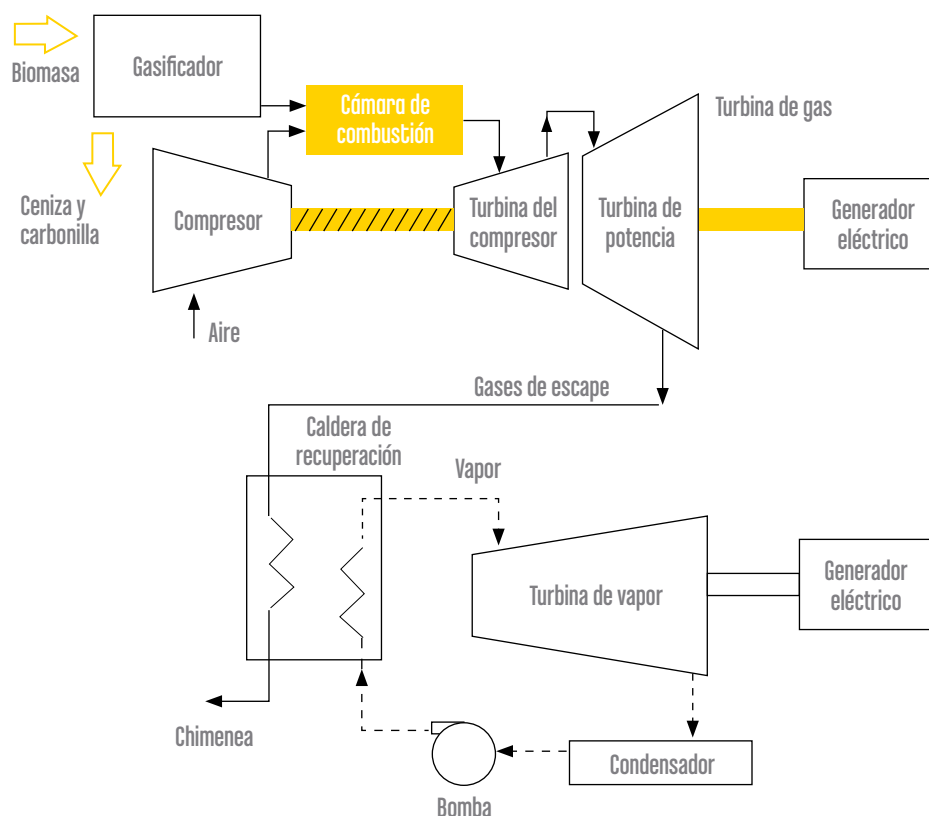
La generación mediante motores de vapor

La tecnología de los motores a vapor es la más antigua y actualmente casi no se utiliza, aunque pueden encontrarse algunas instalaciones en operación. Consiste en la combustión de la biomasa en una caldera y, luego, la utilización del vapor generado para accionar el motor.

Gráfico 16. Ciclo de cogeneración con extracción de vapor para el proceso



Fuente: Elaborado por el autor.

Gráfico 17. Sistema de ciclo combinado utilizando turbina de gas

Fuente: Elaborado por el autor.

La instalación básica se compone de una caldera de media presión (normalmente hasta 25 bares), de vapor apenas sobrecalentado que se utiliza para accionar un motor alternativo muy similar a los de combustión interna. Con el objetivo de hacer equipos más compactos, más eficientes o más durables, se han diseñado variantes con motores de cilindros a simple o doble efecto, con válvulas de asiento o corredizas, de una o varias etapas de expansión.

Los motores verticales rápidos, tipo Stirling, están basados en una combinación de las características más favorables del diseño de los viejos motores de vapor con las de los motores Diesel. De los primeros, conservan la baja velocidad del pistón de las válvulas circulares; de los últimos, adoptan el árbol de levas rotativo como comando para la distribución del vapor. De esta forma, se logra un

motor de larga duración, característica tradicional de los motores de vapor, y reducidas necesidades de mantenimiento, como las de los modernos motores *Diesel*.

Ventajas, inconvenientes y barreras de cada tecnología

Como se señaló, la producción de energía mecánica a partir de dendrocombustibles y, posteriormente, de energía eléctrica -agregando un generador- puede realizarse mediante diversas tecnologías, a través de la generación de vapor y mediante motores de combustión interna. En general, la selección tanto de los equipos de combustión y de generación de vapor como de la máquina motriz debe ser encarada considerando los siguientes factores:

- confiabilidad, con reducidas posibilidades de falla y tecnología simple que facilite su reparación;
- adaptación a diferentes tipos de combustibles biomásicos, incluyendo la posibilidad de co-combustión con derivados del petróleo;
- aptitud para la absorción de rápidas variaciones de carga, frecuentes en las instalaciones aisladas;
- posibilidad de cogeneración, que permita elevar el rendimiento global de la instalación.

En instalaciones mayores a los 20 MW alimentadas exclusivamente con biomasa, de las que hay muy pocas en el mundo, no existen restricciones tecnológicas, pero deben contemplarse los problemas resultantes del volumen de la biomasa que debe manejarse y solucionar aspectos de logística, como el transporte y acopio.

Las instalaciones con un rango de potencia de 5 a 20 MW, que son las más comunes, deberían localizarse en regiones con alta disponibilidad de dendrocombustibles. Para estas potencias, deben considerarse calderas acuotubulares y vapor de alta presión sobrecalentado. En cuanto a la localización, se torna gravitante la cercanía a la zona de origen de la biomasa, la disponibilidad de agua y la interconexión al sistema eléctrico.

Para el rango de 1 a 5 MW, la generación turbovapor asume costos de inversión con notoria deseconomía de escala, por lo que pueden resultar convenientes las calderas humotubulares, de media presión. Asimismo, deben tenerse en consideración sistemas de gasificación y máquinas de combustión interna. El uso de estas últimas exige un cuidado especial en el tratamiento de los gases.

La tecnología caldera-turbina de vapor posibilita ventajosamente la implementación de ciclos de cogeneración, con evidente conveniencia para la industria y altos rendimientos.

Para un rango menor, de 100 a 500 kW -requerimiento habitual de un aserradero aislado u otra industria de la madera- la instalación más apta sería una máquina alternativa de vapor alimentada por un hogar o gasificador con una caldera.

Los motores de vapor se fabrican en dos tamaños básicos: los más pequeños pueden producir

40 kW a 1 500 rpm, y pueden extenderse hasta un máximo de cinco módulos, lo que le permite alcanzar los 200 kW.

La utilización de motores alternativos accionados con vapor tiene la ventaja de que la combustión es exterior. Esto quiere decir que el motor no entra en contacto con los gases combustibles susceptibles de incluir contaminantes y, por lo tanto, sus partes móviles no se perjudican. En contraposición, se tienen rendimientos eléctricos comparativamente inferiores. El inconveniente típico es la condensación de agua dentro del cilindro y el deterioro del aceite lubricante.

3.5 Tecnologías de transformación

La producción de combustibles sólidos: el carbón de leña

El principal combustible sólido producido por pirólisis de la madera es el carbón de leña. Los métodos modernos para producirlo no permiten ninguna entrada de aire, lo que proporciona un mayor rendimiento, ya que el exceso de madera no se quema y se facilita el control de la calidad.

La pirólisis, una vez iniciada, continúa espontáneamente y descarga notable cantidad de calor. Esta descomposición termal de la celulosa y de la lignina de la madera se inicia cuando esta supera los 300 °C de temperatura.

En la carbonera tradicional, se parte de la madera puesta en el horno, que se quema solo para secar y para aumentar la temperatura de la carga total. Así se inicia la pirólisis y continúa hasta el final del proceso. La madera quemada de esta manera se pierde. El éxito de las retortas continuas que producen altos rendimientos se debe a la forma en que emplean el calor de la pirólisis, normalmente desperdiciado, para elevar la temperatura de la madera que va ingresando.

Todos los sistemas de carbonización ofrecen mayores eficiencias cuando son alimentados con madera seca, puesto que la eliminación del agua requiere energía. En el proceso de producción de carbón vegetal se obtienen cenizas, gases de combustión, alquitranes, productos químicos -principalmente, ácido acético- y vapor de agua originado en el secado y en la descomposición pirolítica de la

madera. Cuando finaliza la pirólisis, se llega a una temperatura aproximada de 500 °C. Luego, se deja enfriar el carbón vegetal sin acceso de aire.

En la producción de carbón vegetal, pueden emplearse otros materiales leñosos, como cáscaras de nueces, cortezas y otros residuos agrícolas. En estos casos, el carbón que resulta es un polvo fino que, generalmente, debe ser aglomerado.

En el carbón, el contenido de cenizas representa alrededor del 30% del peso y el balance de carbono fijo, alrededor del 67 al 70%. Un ulterior calentamiento aumenta el contenido de carbono fijo, eliminando y descomponiendo aún más los alquitranes. Una temperatura de 500 °C da un contenido típico de carbono fijo de alrededor del 85% y un contenido de materia volátil de cerca del 10%.

Existen diversas modalidades para la fabricación de carbón vegetal. Las más usuales son fosas de tierra, parvas, hornos de ladrillos y hornos metálicos. En la Argentina, se utiliza en forma generalizada el llamado horno media naranja, semiesférico, con un diámetro que varía entre 5,0 y 7,5 metros.

La producción de combustibles sólidos: las briquetas y los pellets

Como se indicó anteriormente, la biomasa lignocelulósica también puede procesarse en forma de briquetas o *pellets*, lo que aumenta su densidad y facilita su manipuleo y transporte. Las briquetas pueden hacerse de manera industrial o artesanal; su densidad es importante y pueden adoptar desde la forma de discos hasta de grandes barras extruidas. Los *pellets* son densificados de residuos de la industria forestal a los que se les da una forma cilíndrica que puede ir de 4 a 22 mm de diámetro y de 10 a 70 mm de largo, aunque los tamaños comerciales normalizados más utilizados son los de 6 y 8 mm de diámetro con una longitud no superior a 38 mm. De esta manera, el combustible se comporta como un fluido, optimizando el espacio de almacenamiento y evitando obstrucciones en los mismos mecanismos de transporte y alimentación.

Tanto los *pellets* como las briquetas presentan ventajas en la aplicación; sin embargo, las soluciones no son universales y los métodos de densificación

más adecuados deberán elegirse teniendo en cuenta los requerimientos y potencialidades locales.

En general, la utilización de briquetas responde a:

- producción artesanal;
- reducción del costo de inversión en las plantas de densificación;
- características de la materia prima a densificar;
- posibilidades de adaptación a la combustión tradicional de leña en hogares.

En el proceso de fabricación de las briquetas es más sencillo compactar elementos que hacerlos pasar por orificios pequeños. El diámetro de los cilindros briquetadores, tanto industriales como artesanales, permite la introducción de polvos, fibras y hasta partículas de mediano tamaño.

El briquetado permite utilizar materia prima más heterogénea que en el caso de los *pellets*, un grado de humedad menos controlado y, por consiguiente, la adopción de métodos de producción artesanales. Para igual volumen de producción, el costo de los equipos para fabricar briquetas es inferior al de los que elaboran *pellets*.

El *pelletizado* requiere de un mayor control de las materias primas involucradas: su origen, pureza, tamaño y grado de humedad son esenciales para obtener un *pellet* de buena calidad. En varios países existen normas para clasificarlos de acuerdo con el grado de ceniza y poder calorífico. El tamaño reducido y la homogeneidad del *pellet* permiten usarlo como combustible casi fluido. Además, los *pellets* se adaptan a sistemas de alimentación automáticos controlados electrónicamente y sistemas de almacenamiento y recarga similares a los de combustibles líquidos, lo que facilita su adopción en reemplazo de los basados en GLP o gasoil tradicionales.

El rendimiento que puede obtenerse con *pellets* en estufas o convertidores de doble combustión es superior al de las briquetas. Esto los vuelve adecuados como combustible de estufas, cocinas, calefones y otros artefactos diseñados para consumo hogareño.

Para poder convertir la madera residual en briquetas y, fundamentalmente, en *pellets*, es necesario

utilizar trituradores o chipeadoras, que reducen su tamaño, y secadores, para llevar la humedad a un porcentaje adecuado.

Los sistemas de briquetizado se pueden clasificar en cuatro grupos, según con qué se efectúe la conformación:

- ruedas formadoras;
- extrusión a tornillo;
- extrusión a pistón;
- compresión manual.

Las tecnologías de *pelletización* comercial son de dos tipos, derivados del mismo principio:

- sistemas de anillo plano (*flat type die*);
- sistemas de anillo cilíndrico (*ring type die*).

Además, se pueden encontrar sistemas por extrusión y otros que no tienen mayor éxito comercial debido a su rendimiento y complejidad. Los

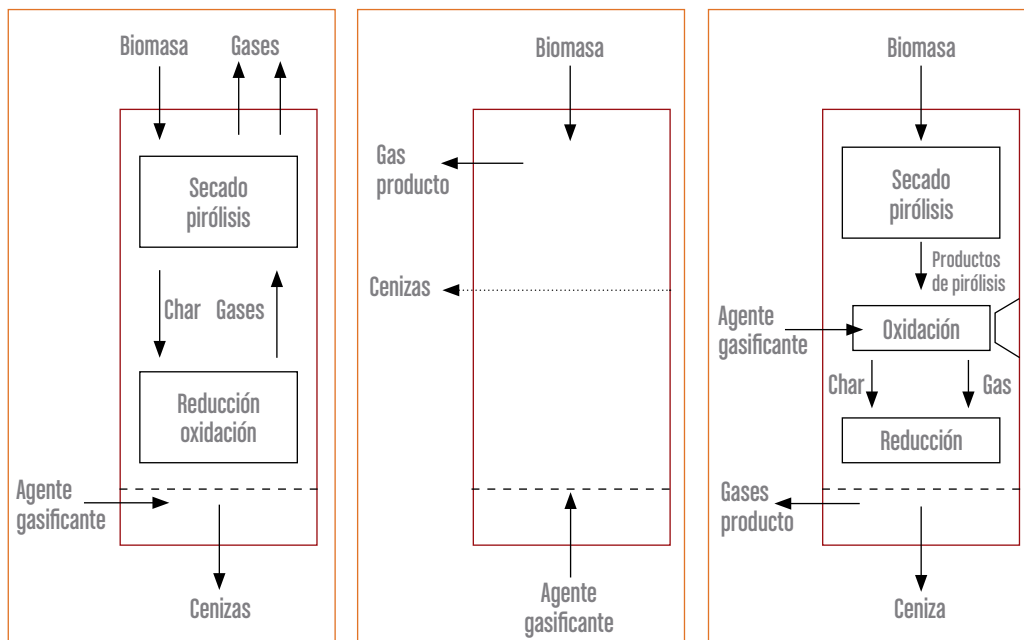
sistemas de *pelletizado* solamente sirven para granulometrías finas, con bajo contenido de humedad.

En la Argentina, debido fundamentalmente a que no hay consumo interno de *pellets* combustibles -tampoco existe normativa al respecto-, en general las empresas que los producen lo hacen fundamentalmente con miras a la exportación, con lo cual se basan en las normas vigentes en esos mercados.

La producción de combustibles líquidos

El proceso de transformación de la biomasa lignocelulósica se encuentra en una etapa de desarrollo tecnológico. El *Forschungszentrum Karlsruhe GmbH* junto con *LURGI GmbH* han construido una planta piloto para la producción de combustibles tipo gasolina en Alemania. El proceso, que se denomina *Bioliq*, ha sido desarrollado por el *Karlsruhe Institute of Technology (KIT)* y consta de cuatro etapas. La primera es un proceso de pirólisis rápida por el que la biomasa residual se transforma en

Gráfico 18. Esquemas de funcionamiento de gasificadores *updraft*, de lecho fluidizado y *downdraft*



Fuente: Elaborado por el autor.

bio oil que, posteriormente, es procesado para obtener gasolinas.

El objetivo del proceso de pirólisis es obtener el mayor rendimiento posible de productos de condensación (45 a 70%) y sólo pequeñas cantidades de sólidos (15 a 25%) y gases (15 a 30%).

Otras empresas con proyectos de referencia a nivel mundial en el campo de la pirólisis rápida para la obtención de bio oil son *Dynamotive* y *Ensyn*, de Canadá, y *Nextfuels*, de los Estados Unidos. Los proyectos europeos de investigación más relevantes en este campo son los de *Biocoup*, *Bio-cat*, *Cascatbell* y *Empyro*.

La producción de combustibles gaseosos

Las tecnologías principales de gasificación se clasifican de acuerdo con el tipo de gasificador que emplean (Gráfico 18):

- La tecnología de lecho móvil se subdivide en dos, según el sentido relativo de las corrientes de biomasa y del agente gasificante: cuando las corrientes son paralelas, el gasificador se denomina *downdraft* o de corrientes paralelas; cuando circulan en sentido opuesto, se denomina *updraft* o de contracorriente.
- La tecnología de lecho fluidizado consiste en que el agente gasificante mantiene en suspensión un material inerte y la biomasa, hasta que las partículas de esta se gasifican y convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del syngas.

Con independencia del tipo de lecho, la biomasa pasa por distintas etapas:

- La primera, de calentamiento hasta 100 °C, provoca el secado de la biomasa por evaporación del agua contenida, y absorbe el calor sensible para elevar la temperatura, además del necesario para la evaporación del agua.
- La segunda, que también absorbe calor, es la de pirólisis, en la que se rompen las moléculas grandes y dan lugar a otras de cadena más corta que, a la temperatura del reactor, están en fase gaseosa.

- La tercera, en los reactores *updraft*, es la etapa de reducción, por la combinación del vapor de agua producido en la primera etapa con el dióxido de carbono que viene arrastrado por la corriente del gasificante desde la cuarta etapa.
- La última es la etapa de oxidación de la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa, al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno o vapor de agua).

Siguiendo la reacción en el sentido del agente gasificante, las etapas son:

- La oxidación parcial del residuo carbonoso y caliente de la biomasa, que eleva su temperatura, ya que las reacciones de oxidación son exotérmicas.
- En la zona de reducción, la falta de oxígeno unida a la disponibilidad de carbono, CO₂ y vapor de agua, hace que se produzca una recombinación hacia hidrógeno molecular y monóxido de carbono.
- En la pirólisis, por efecto del calor, los componentes más ligeros de la biomasa se rompen y se convierten en gas, y se unen a la corriente.
- Los gases calientes evaporan el agua contenida en la biomasa entrante.

4. USOS DOMÉSTICO, COMERCIAL E INDUSTRIAL DE LA DENDROENERGÍA



4.1 La dendroenergía de uso doméstico

Los requerimientos de energía domésticos

La energía proveniente de la madera se aprovecha desde que el hombre aprendió a controlar el fuego. En el ámbito doméstico, se usa principalmente para satisfacer las necesidades de calefacción y de cocción.

El uso para calefacción, ya sea circunstancial o de base en invierno, es sumamente amplio, y más si se considera el consumo de agua caliente, ya que en regiones templadas y hasta calurosas los usuarios la utilizan aún en verano, tanto para bañarse como para lavar la vajilla.

En el caso de la cocción, el uso de la energía calórica es independiente del lugar de emplazamiento y de la temperatura ambiente. La elección del combustible está orientada casi exclusivamente a su disponibilidad y costo.

Tradicionalmente, el consumo de leña se acentúa en los hogares rurales próximos a las fuentes de abastecimiento. También resulta relevante el uso doméstico del carbón. Desde el punto de vista de la eficiencia energética, es más conveniente utilizar leña que carbón. Pero usar carbón se justifica cuando se consideran los costos de transporte, ya que con el flete de 1 kg de leña se trasladan entre 2500 y 4000 kcal, mientras que con el de 1 kg de carbón se

El consumo de leña suele darse más en hogares rurales próximos a las fuentes de abastecimiento. También puede ser relevante el uso de carbón. Existen además equipos aptos para *pellets* o briquetas, más supeditados a la conveniencia económica.

trasladan 7 000 a 8 000 kcal. Además, el carbón es más cómodo para cocinar, por la menor generación de humo y por la velocidad para generar brasas. Así, el desperdicio de energía en la elaboración del carbón puede recuperarse en el transporte y en la eficiencia de las cocinas y los calefones.

Actualmente, los hogares urbanos tienen acceso a equipos aptos para utilizar dendrocombustibles de mayor densidad, como *pellets* o briquetas, aunque su uso está condicionado por la conveniencia económica.

En el Cuadro 7 se presentan los artefactos más usados, con su función y el combustible que demandan.

La combustión en artefactos domésticos

La combustión incompleta de leña en los hogares produce un humo dañino para la salud humana, por lo que son esenciales fogones eficientes y con una adecuada ventilación. Las características necesarias para una combustión limpia varían de acuerdo con el combustible y el artefacto utilizado.

La eficiencia de los métodos tradicionales -como los fogones para cocinar, los braseros típicos, los hogares o las chimeneas-, usados durante mucho tiempo, es realmente baja, de menos del 35%, ya que se desperdicia el calor generado y la energía calórica en secar y calentar el aire y el combustible.

Cuadro 7. Artefactos domésticos aptos para utilizar dendrocombustibles

Artefacto	Objetivo	Combustible
Parrilla	Cocción	Carbón, leña o briquetas
Cocina económica	Cocción	Carbón, leña o ramas
Horno de barro	Cocción	Leña o ramas
Brasero	Cocción y calefacción	Carbón o leña
Hogar	Calefacción	Leña
Salamandra	Calefacción	Leña o briquetas

Fuente: Elaborado por el autor.

En la combustión de la madera intervienen dos factores importantes: el combustible sólido y el oxígeno. Según la relación entre ambos, el resultado de esa combustión originará diferentes subproductos: con poco oxígeno, la combustión entregará poco calor pero generará muchos gases, material particulado y carbón residual; con mucho oxígeno, entregará más calor, pocos gases y menos material particulado, generando cenizas. Para lograr este último tipo de combustión, es habitual forzar la entrada de aire para aportar más oxígeno.

En consecuencia, los fabricantes de artefactos han incorporado mejoras que favorecen una combustión más eficiente y menos contaminante:

- **Sistemas de alta temperatura:** se busca que el combustible (leña o briquetas) se queme a temperaturas lo suficientemente elevadas como para quemar, además, los gases generados en el proceso, lo que da como resultado una combustión más limpia. Es preciso que todo el combustible se queme a la misma temperatura elevada, por lo que, al no poder regular su temperatura y obtener buenos rendimientos, este tipo de sistemas es utilizado en elementos que funcionan en cortos períodos de tiempo, como cocinas económicas y estufas del tipo escandinavas o rusas. Un ejemplo clásico es el sistema de combustión tipo *rocket* usado con briquetas.

- **Sistemas de doble combustión:** los gases generados por la primera combustión -la de la leña o briquetas- son quemados mediante la inyección de aire secundario en una segunda cámara de combustión, en flujos turbulentos. Los gases son precalentados para aumentar el rendimiento del sistema. Este tipo de sistemas es actualmente el más utilizado en estufas a leña de alta eficiencia.
- **Sistemas catalíticos:** son para leña. Se obliga al humo de la primera combustión a pasar por una especie de nido de abeja metálico recubierto en cerámica, dentro del cual los gases y partículas consiguen quemarse a una temperatura menor que en los sistemas de alta temperatura. Cuando se utilizan en estufas hogareñas, tienen como desventaja una corta vida útil del catalizador y, por ello, son menos empleados que aquellos.
- **Sistemas de quema de pellets:** se les aplica el primer concepto pero a baja escala, ya que no se puede regular la cantidad de aire para disminuir el calor generado, se reduce la cantidad de combustible. De ese modo, se hace quemar siempre a la más alta temperatura, para controlar el calor generado sin disminuir el rendimiento ni aumentar la polución. Se produce una combustión limpia que utiliza poco combustible y solo consume mayores cantidades cuando se requiere más calor. El funcionamiento de éste tipo de artefactos es similar al de los que son alimentados a gas natural.

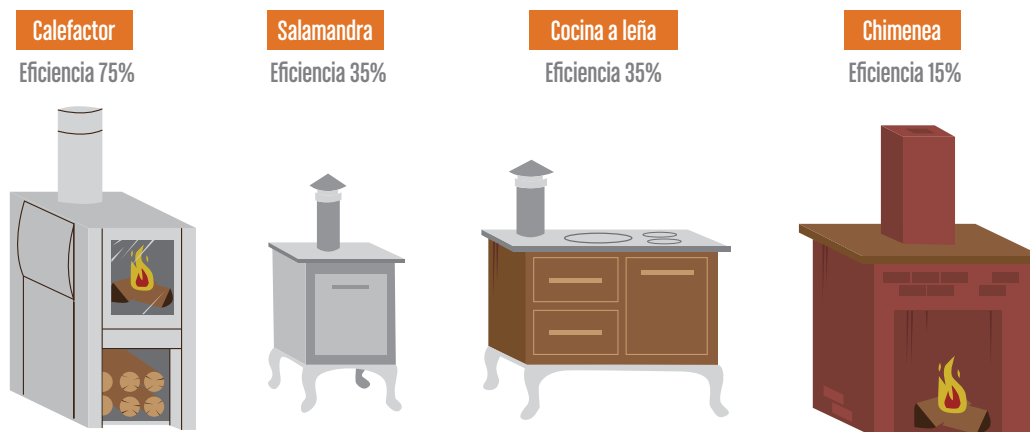
La calefacción doméstica con leña

La eficiencia energética en los calefactores se puede lograr a través de dos estrategias: el recambio tecnológico y la transformación de las conductas. La primera está asociada con el uso de un calefactor eficiente y de baja emisión, capaz de producir calor limpio y seguro.

La segunda involucra un cambio de los hábitos cotidianos, como aprender a comprar, almacenar, secar y hacer un uso eficiente de la leña.

Es fundamental que la combustión de la leña sobrepase los 800 °C, temperatura necesaria para quemar los gases y humos perjudiciales para la salud.

Gráfico 19. Niveles de eficiencia de diferentes equipos de combustión de leña



Fuente: Ministerio de Energía de Chile (2014), sobre datos de AIFBN.

A continuación, se presenta el nivel de eficiencia de los distintos aparatos, que evidencia la superioridad del calefactor moderno respecto de los tradicionales.

Los calefactores modernos a leña calientan, con la misma cantidad de combustible, de seis a siete veces más que las chimeneas abiertas. Estas liberan una cantidad mayor de partículas contaminantes directamente al ambiente; en tanto, un calefactor puede ser más o menos contaminante, eficiente y seguro, dependiendo de sus características de diseño y fabricación.

Para el correcto funcionamiento de un equipo, se deben contemplar las siguientes claves:

- Instalar adecuadamente; el ducto de salida de gases debe estar derecho.
- Usar leña seca, en el tamaño indicado por el fabricante.
- No incluir papeles u otros materiales para quemar.
- Limpiar regularmente el ducto.

Los calefactores para combustión de densificados

Los sistemas más utilizados en la combustión de combustibles densificados, generalmente *pellets*,

pueden clasificarse de acuerdo con su modo de alimentación.

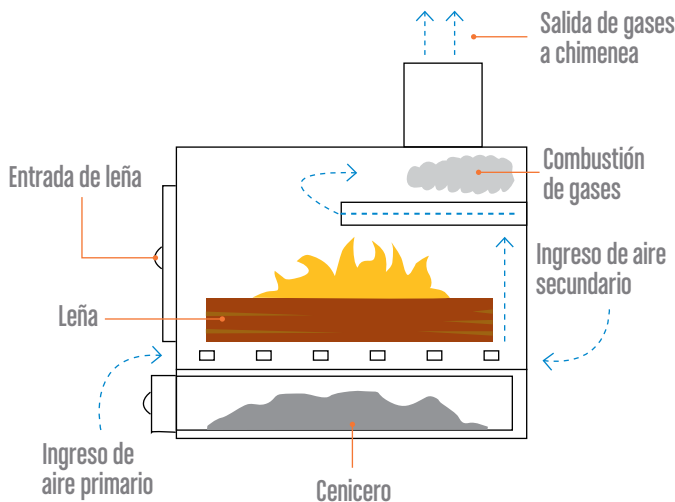
- sistemas de alimentación inferior;
- sistemas de alimentación horizontal;
- sistemas de alimentación superior;
- sistemas de alimentación por gravedad.

La alimentación por gravedad se usa generalmente en calefactores o cocinas muy económicas y pequeñas. Los demás sistemas suelen basarse en un tornillo que dosifica la cantidad requerida de combustible. Tanto la alimentación del combustible mediante tornillo como la inyección de aire se producen mediante motores eléctricos, por lo que requieren este tipo de energía.

Existen estufas o calefactores para *pellets* con formatos diversos para aplicaciones específicas. Sin embargo, comparten una serie de elementos debido a las características de combustión y a la alta eficiencia a la que aspiran.

Los artefactos para *pellets* tienen una tecnología más avanzada que la de las estufas convencionales: la mayoría necesitan energía eléctrica para funcionar y tienen conductos separados de aire, para combustión y para calefacción. Un intercambiador de calor se encarga de extraer el calor de la combustión y entregarlo al ambiente.

Gráfico 20. Calefactor de doble paso



Fuente: Elaborado por el autor.

Los elementos más comunes de estos equipos son:

- El depósito, que almacena los *pellets*.
- El sistema de alimentación, que suele incluir un tornillo de alimentación y una salida. Esta puede ser de caída superior o inferior, lo que obliga a los *pellets* ya quemados y cenizas a descender hacia la periferia, para ser reemplazados por nuevo combustible para quemar.
- Los ventiladores, que insuflan aire para producir un quemado total de combustible, gases y particulado. Ese aire es inyectado mediante boquillas, y un ventilador fuerza el aire de calefacción hacia la habitación.
- El cajón o bandeja que almacena la escasa ceniza que estas estufas generan.
- El panel de control, generalmente digital; puede contar con accesorios como sensores que optimizan la combustión, y bandejas humidificadoras, para reducir alergias y mejorar las condiciones del aire interior de las viviendas.

Las calderas para uso doméstico

Para cubrir las necesidades de calefacción y agua caliente sanitaria de viviendas unifamiliares o edificios de tamaño pequeño, pueden utilizarse calderas de hasta 40 kW (térmicos).

La caldera es un equipo o dispositivo diseñado para generar vapor, normalmente de agua. El vapor se produce a partir de una transferencia de calor a un fluido en estado líquido, que al calentarse cambia de fase. Así, el potencial energético del combustible se convierte en energía térmica, que posteriormente se transmite a un medio en el que pueda ser útil.

Existen en el mercado calderas de 15, 20, 25, 30, 35 y 40 kW, aptas para cualquier usuario. Pueden utilizarse como sistemas de calefacción normal, con radiadores o en suelos radiantes, como sistemas de aire caliente y para la producción de agua caliente.

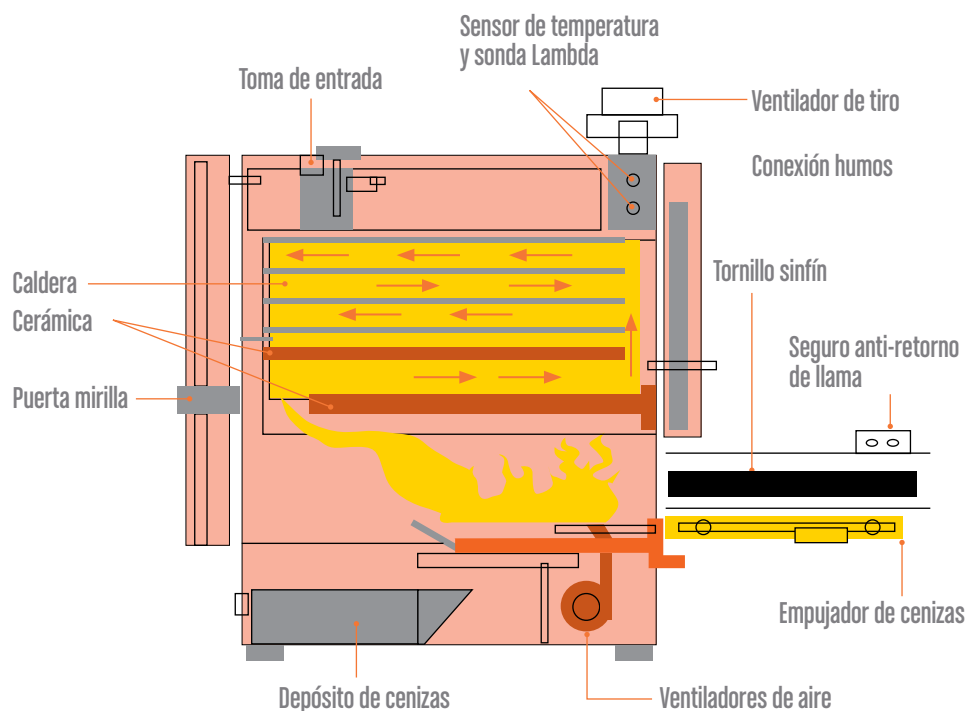
La diferencia entre las calderas y las estufas es que estas últimas proporcionan calor directo en el lugar donde se instalan, no necesitan radiadores y se utilizan como elemento decorativo del hogar. El costo de instalación de una estufa suele ser algo menor, ya que en general no requiere el almacenamiento de combustible, que se introduce manualmente en la tolva destinada a ese fin.

Las calderas pequeñas se alimentan principalmente de astillas o *pellets*.

Los requisitos recomendados para elegir una caldera de biomasa para vivienda son:

- Rendimiento: mayor de 75%.
- Emisiones de CO: menores de 200 mg/m.
- Emisiones de partículas: menores de 150 mg/m.
- Sistema automático de limpieza de los intercambiadores de calor y de extracción de cenizas.
- Control remoto de la caldera por el fabricante o instalador.
- Alta fiabilidad y fácil operación y mantenimiento, confirmadas por experiencias en proyectos similares (no industriales).
- Equipos que cumplan todas las normativas nacionales, regionales y locales vigentes a la fecha de la instalación.

Gráfico 21. Estructura de una caldera de biomasa



Fuente: Hildebrandt Gruppe, 2015.

Según el tipo de combustible, se distinguen tres tipos de calderas:

- **Calderas específicas de pellets:** suelen ser pequeñas, de hasta 40 kW, altamente eficientes y de bajo costo. Se destaca su compacidad debido a la estabilidad del combustible suministrado.
- **Calderas de biomasa:** su potencia varía desde 25 kW a cientos de kW. No admiten varios combustibles simultáneamente, aunque se puede cambiar el combustible si se programa con suficiente antelación el vaciado del silo, la nueva recarga y la reprogramación de la caldera.
- **Calderas mixtas o multicomcombustibles:** admiten varios tipos de combustible distintos, cambiando de uno a otro de manera rápida y eficiente, como, por ejemplo, pellets y chips. Suelen fabricarse para potencias medias, de alrededor de 200 kW, o grandes.

La cocción doméstica

Numerosos sistemas han utilizado, y lo siguen haciendo, combustibles déndricos para cocer alimentos. Algunos de ellos también emplean dendrocombustibles densificados.

En el Gráfico 5 pueden observarse algunos de los sistemas y el tipo de combustible que utilizan. No todos son de alta eficiencia y algunos deben ser usados exclusivamente en exteriores. Se emplean en situaciones de bajos recursos.

Además de esos sistemas clásicos, actualmente se desarrollan artefactos para la combustión de pellets, para uso en hogares o en la actividad comercial e industrial. Debido a sus características, generalmente necesitan circulación forzada de aire y de combustible.

En la Argentina, se han desarrollado diversos equipos para el mejoramiento de la cocción doméstica, como por ejemplo el asador giratorio a carbón o leña con infiernillo central, la cocina a leña

GERM y la cocina horno a leña, impulsados por la Asociación UNESCO, en la provincia de Corrientes.

La experiencia mundial

Existen numerosas experiencias internacionales de utilización de biomasa déndrica en la generación de calor. La aplicación comercial de calefactores a *pellets* tiene una amplia difusión en Europa y América del Norte. La falta de redes de gas natural y/o la conciencia ecológica hacen que tales sistemas sean ampliamente utilizados para calefacción y agua caliente. Los artefactos para cocinar -del estilo de braseros o cocinas económicas- están adquiriendo cada vez mayor auge alentados por fundaciones y organizaciones no gubernamentales. En estos casos, los usos se orientan según la conveniencia del combustible, la sustentabilidad de su aprovisionamiento y la seguridad de los usuarios.

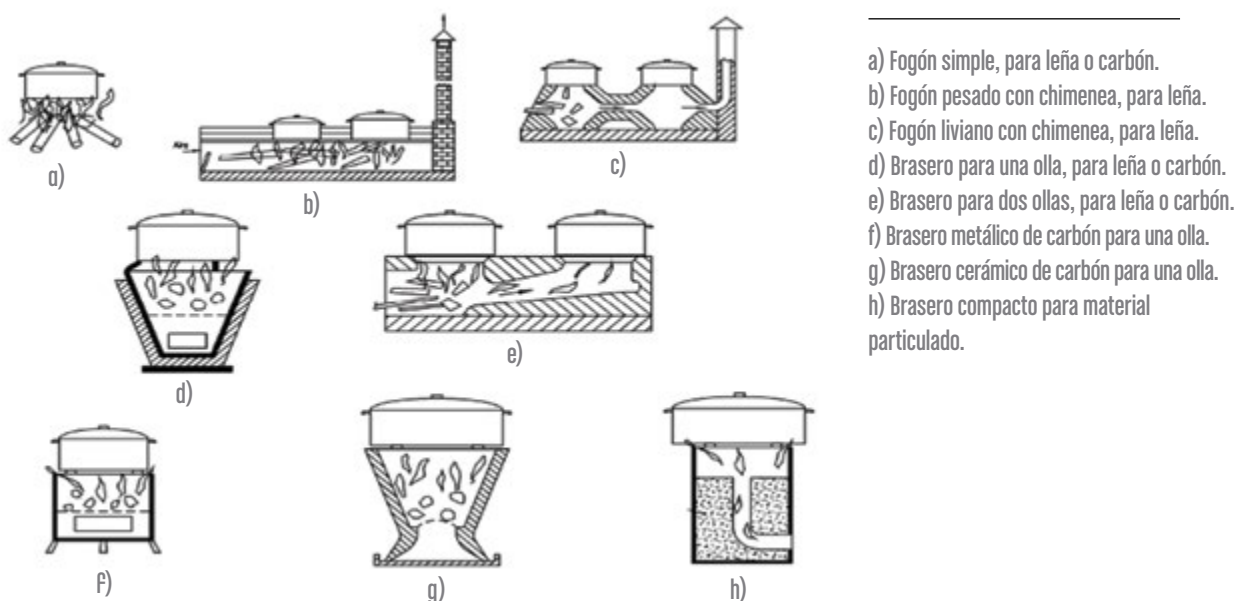
A continuación, se describen brevemente algunas experiencias internacionales positivas. En Navarra, España, se integró una planta productora de *pellets* para consumo comunitario. El avance tecnológico hizo posible la distribución de GLP y facilitó el consumo doméstico e institucional, lo que

generó confort para el pueblo rodeado de bosques naturales. Más tarde, el costo del GLP subió y el bosque aledaño creció y se hizo tupido, lo que dificultó el acceso y trajo problemas para los pobladores. La instalación de una planta productora de *pellets* combustibles solucionó ambos problemas, al ofrecer un combustible limpio y amigable con el medio ambiente.

En España, según datos facilitados por el Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa (ONCB), en 2013 se contabilizaban 80 000 instalaciones funcionando y una potencia acumulada de 5 000 MW térmicos. La producción de *pellets* alcanzó ese año 350 000 toneladas, y unas 30 plantas superaban las 10 000 toneladas de capacidad por año. El aumento del consumo de *pellet* respondió al importante ahorro generado por la instalación de estufas y calderas en todo tipo de edificios, tanto de uso público (colegios, residencias, instalaciones municipales) como privado (industrias, hoteles, comunidades de vecinos y viviendas individuales).

En el Congo, varias experiencias de *Mercy Corps* y otras ONGs con briquetas hechas artesanalmente por los pobladores locales permitieron solucionar

Gráfico 22. Sistemas domésticos de cocción con dendroenergía



Fuente: Elaborado por el autor.

problemas energéticos a la vez que aumentar la seguridad de las mujeres refugiadas, ya que el tráfico de carbón y la situación bélica local volvió peligrosa la tarea de recolección de leña.

En la India, se dio un desarrollo de punta en lo referido a cocinas orientadas a la base de la pirámide social, con numerosos proyectos auspiciados por empresas sociales y fundaciones de empresas petroleras. *Envirofit International*, por ejemplo, llevó a cabo un proyecto internacional para producir cocinas de combustión de biomasa de alta eficiencia que, según la organización, lograron reducir hasta un 80% las emisiones, utilizar un 60% menos de combustible y reducir el tiempo de cocción en un 50%.

En América Central, el mayor porcentaje de la leña es consumido en el sector doméstico y proviene de la recolección en campos de cultivo y bosques. Se utilizan estufas simples de combustión directa, caracterizadas por una baja eficiencia y un alto nivel de emanaciones nocivas para la salud. La biomasa es la fuente de energía doméstica más importante en la región, y en algunas zonas representa más del 80% del consumo total. Entre otros, se utilizan residuos de podas forestales, cortavientos y rotación de cultivos como el café.

Chile ha realizado investigaciones y desarrollado políticas de energías alternativas desde el ámbito gubernamental y no gubernamental en las áreas de biomasa vegetal y solar, con la construcción masiva de equipamientos de fuego y solares para la cocción de alimentos y calefacción, destinados a pequeños productores minifundistas. En Paraguay, Brasil, Uruguay y la Argentina también se incorporan tecnologías apropiadas que tienen el objetivo de producir cambios integrales en el manejo de la energía.

La experiencia en la Argentina

En la Argentina, es tradicional el uso doméstico de la leña y del carbón por parte de numerosas familias. Este no resulta degradante en regiones donde la capacidad de regeneración de leña en el propio predio de la familia rural es mayor que la de extracción. En cambio, en zonas donde los pobladores rurales no disponen de este recurso en cantidades suficientes, su uso no resulta sustentable.

Muchos hogares rurales y algunos urbanos utilizan estufas o calefactores a leña, con variaciones según las zonas geográficas y el nivel socioeconómico de los usuarios. En zonas rurales, es más frecuente encontrar cocinas a leña o salamandras.

Salvo casos excepcionales, prácticamente no existen en la Argentina artefactos que consuman *pellets* a nivel doméstico. Esto constituye una oportunidad para el desarrollo y la producción local de tales tecnologías, inicialmente como conversión de alguna línea de artefactos actuales o como generación de nuevas empresas.

Con respecto a la conveniencia de la utilización de *pellets*, en general los de aserrín de desecho son más económicos que la mayoría de los otros combustibles utilizados, excepto el gas natural. Influye la aplicación de subsidios sobre el precio de los combustibles energéticos.

A pesar de la existencia de una extensa red de gas natural, en localidades aisladas y poblaciones rurales muchos usuarios deben optar por combustibles alternativos, como el GLP, que tiene un costo elevado.

Los artefactos más utilizados en la Argentina son los tradicionales hogares o chimeneas, salamandras, braseros y cocinas del tipo "de campo", también llamadas "económicas", que utilizan el calor generado por la leña para cocinar y para calefactar. Además, es relevante el consumo de carbón en parrillas para asar carnes.

La línea *Ñuke* constituye un ejemplo de desarrollo, en la Argentina, de artefactos de mayor eficiencia, para el uso de leña o residuos biomásicos de la industria forestal. Estos calefactores permiten obtener energía en forma independiente y a bajo costo. Con el aporte del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), que certifica el diseño, incorporaron tecnología tendiente a minimizar las emisiones de CO y material particulado y maximizar la eficiencia. Tienen un suministro controlado de aire de combustión primario y secundario; las cámaras de combustión logran una adecuada turbulencia de llama, y están concebidos para extraer la mayor cantidad de calor útil para calefacción del ambiente, calentamiento de agua y cocción de alimentos.

En el diseño se incorporó una segunda cámara de combustión encima de la primera, y las cañerías

le insuflan aire precalentado, usando como única fuente de absorción pasiva la baja presión interna de la segunda cámara, donde la turbulencia, la temperatura y la velocidad de los gases son extremas.

La mayor demanda de estos calefactores se encuentra en la región cordillerana de Chubut. Allí abunda la leña, pero también las afecciones respiratorias graves por inhalación domiciliar de humo. Estos calefactores/cocinas/hornos y generadores de agua caliente sustituyen el sistema de cocina y calefacción domiciliar más antiguo (fogón u hogar), pero con nueve veces más eficiencia térmica (con rendimientos del orden del 75%) y sin generación de humo, ya que queman a una temperatura tal que la madera se gasifica y sale por la chimenea como dióxido de carbono y agua.

4.2 La calefacción y la cocción en los sectores comercial y de servicios

Los requerimientos de energía en panificación

Numerosos restaurantes y pequeños negocios, especialmente en áreas rurales, utilizan leña para aplicaciones similares a las domésticas, por ejemplo, para la preparación de comidas y panificación. Los equipos, generalmente, son de mayor calidad que las estufas domésticas; sin embargo, aún se pueden mejorar.

Es frecuente el uso de leña en el horneado de panes y pizzas en zonas urbanas por una cuestión tradicional y la preferencia de los consumidores. En el nordeste de la Argentina, numerosas familias productoras utilizan el horno de barro ya descrito. Es una práctica tradicional muy arraigada, pero tiene la desventaja de que necesita muy buena leña para su combustión y es de bajo rendimiento. La producción se complica cuando se trata de alimentos para la comercialización, porque deben realizarse diferentes horneadas que requieren fuego continuo para la producción de brasas.

En el horno metálico a leña de *Teknycampo*, en la ciudad santafesina de Reconquista, la energía se obtiene por medio de la combustión de leña o carbón. Este horno está especialmente diseñado para la producción de panificados para autoconsumo y

comercialización a pequeña escala. Tiene alta eficiencia y es de funcionamiento continuo. Una vez prendido, puede mantenerse con la provisión de troncos finos provenientes de podas, árboles caídos, arbustos y cualquier combustible sólido. Es utilizado por pequeños productores, trabajadores rurales y en escuelas rurales, para la elaboración de pan y la producción de comidas. Como no genera inconvenientes con la disponibilidad del combustible requerido, es ideal para entornos urbanos. En estos hornos, el combustible no entra en contacto con los alimentos que se cocinan. El fuego del hogar abrasa todo el cilindro que hace de horno, calentándolo, y la mampostería de ladrillo y barro envuelve el horno reduciendo la pérdida de calor. Para cocinar unos 2 kg de pan se utilizan 10 kg de leña de mediana calidad. Esto hace un volumen calórico de unas 30 000 kcal, equivalentes a 2,8 kg de gas aproximadamente.

Los hornos de mayor escala alimentados a leña para la producción de panificados, construibles de forma sencilla, son de dos tipos: los tradicionales, en los que la leña se quema dentro, y los de escopeta, en los que la leña se quema en un quemador. Para la realización de un horno de leña tradicional con quema interior, basta disponer de ladrillos y una puerta, preferiblemente de hierro fundido para que resista la elevada temperatura. Para la producción de panificados en mayor escala, se fabrican hornos alimentados con leña de diverso tipo, en general con flujo de calor envolvente.

La construcción de los hornos involucra componentes metálicos, como la cámara de cocción y los conductos de gases, estructura y elementos accesorios. La mayor parte de la construcción está hecha de mampostería para el hogar o de materiales refractarios, como la cámara de combustión. El combustible es preferentemente leña o maderas secas, pero pueden adaptarse quemadores para otro tipo de combustibles líquidos (como gasoil) o gaseosos (gas natural o GLP). Las dimensiones usuales van desde 2,25 hasta 4,50 metros de diámetro de solera, con un alto útil de 2,4 metros. El diámetro exterior es de un metro adicional.

El uso de la dendroenergía en servicios

El recurso dendroenergético puede ser utilizado en servicios centralizados de calefacción y provisión de agua caliente en edificios de propiedad horizontal, hoteles y edificios públicos. Las calderas de biomasa para este fin son de tamaño medio, entre 50 y 500 kW térmicos.

En España, por ejemplo, la experiencia comprende desde la adaptación de antiguas calderas de carbón mineral o de calderas convencionales nuevas mediante la instalación de quemadores para biomasa, hasta calderas específicas para el consumo de biomasa. Con ello, y mediante contratos de financiación a través del suministro de la biomasa de la planta, se han conseguido niveles de rentabilidad para el usuario que compiten con los de las instalaciones de gas natural. Las potencias de las instalaciones van desde 90 kW, para plantas de generación de agua caliente sanitaria, hasta 400 kW, para la calefacción de grandes bloques de viviendas.

El uso de combustibles procedentes de industrias agroalimentarias permite asegurar un suministro con alto poder calorífico y buen precio.

En esa línea, una referencia para soluciones ambientales es el centro de convenciones Exporama, en las afueras de Oslo, Noruega. Para cubrir las necesidades de calefacción del hall de la exposición, de 6 000 m², se han instalado una caldera de *pellets* de madera y una caldera de propano. La caldera de *pellets* tiene una potencia de 895 kW y está equipada con un quemador sueco. Cubre la mayor parte de la demanda de calor durante los días medios del invierno. La caldera de gas, de 1 120 kW, cubre los picos de la demanda durante períodos muy fríos. Esto hace que el sistema sea muy flexible con respecto a la elección de la fuente de energía más barata en cualquier momento.

En Cataluña, se instaló una caldera de biomasa para un edificio nuevo de 92 plazas de alojamiento, que tiene un laboratorio de investigación, un centro de documentación, una biblioteca, un planetario, un observatorio astronómico y un auditorio para 200 personas. La caldera, de 175 kW de potencia, suministra al edificio agua caliente y calefacción a través de suelo radiante, mediante la combustión de triturados de madera (aserrín y viruta) procedentes de dos aserraderos locales.

En cuanto al sector hotelero, puede mencionarse la instalación energética del Hotel Flamingo 4, de 126 habitaciones, ubicado en Tarragona, España. Fue realizada en 2005 y es mixta, puesto que combina energía solar con biomasa. Se trata de un sistema inteligente que usa la energía solar térmica o las calderas de biomasa automáticamente en función de las necesidades. El agua caliente de todo el edificio y la calefacción de la piscina interior se consiguen gracias a la instalación solar, pero cuando la luz del sol no es suficiente, el sistema pone en funcionamiento una o dos calderas de biomasa, de 100 kW. El hotel cuenta también con un silo de 83,3 t para almacenar la biomasa. El proyecto se ha podido amortizar en siete años.

También se han implementado instalaciones de suministro de calefacción y agua caliente en conjuntos de viviendas o barrios. Estos sistemas, denominados usualmente *district heating*, tienen una potencia instalada superior a 500 kW. Pueden utilizarse para varios edificios o viviendas unifamiliares, barrios e incluso poblaciones completas. Se sustentan en el aprovechamiento del calor residual generado en industrias y plantas de generación de energía eléctrica, constituyendo un sistema de cogeneración. La biomasa utilizada para estos sistemas proviene principalmente de aprovechamientos forestales o residuos agrícolas.

Un ejemplo es la red de calefacción centralizada de Cuéllar, en España. Utiliza como energía primaria 789 tep/año de residuos de industrias forestales. Las calderas tienen una potencia de 4 500 000 y 600 000 kcal/h, y cuentan con una red de distribución con tubería aislada. Los usuarios son tres edificios municipales, cinco cooperativas de viviendas, trece viviendas individuales y una piscina. Fue habilitada en abril de 1999.

En estos casos, por lo general, una empresa especializada realiza la producción y distribución de calor. Este se entrega mediante un sistema de conductos que permite llevar el agua caliente varios cientos de metros e, incluso, algunos kilómetros. El calor generado en la caldera circula por el circuito primario, intercambiando calor con los circuitos secundarios situados en las edificaciones o viviendas de los usuarios, aportando calefacción y agua caliente sanitaria.

Dendroenergía en escuelas rurales y en la producción rural

Con frecuencia, en algunas escuelas se utilizan salamandras, que deben instalarse con las correspondientes medidas de protección para la seguridad de los alumnos, y adecuados tirajes para no generar contaminación ambiental.

Las instalaciones centralizadas tienen mayor rendimiento y presentan mejores condiciones de seguridad. Habitualmente, se trata de generadores de vapor, con un circuito de agua caliente y radiadores en las aulas.

En un colegio de Colonia Dora, en la provincia de Santiago del Estero, Argentina, se instaló un sistema de colectores solares y una estufa tipo *Rocket*, para funcionar a partir de biomasa recogida del monte ubicado en las inmediaciones del lugar. Esta estufa es capaz de proveer agua caliente a partir de energía solar y de un sistema biomásico de alta eficiencia, para cerca de 100 alumnos.

La dendroenergía puede asistir a la producción agropecuaria como fuente accesible y económica de calor. Por ejemplo, en una granja porcina en Benloch, en España, se buscó minimizar el gasto energético a través del uso de biomasa, con una demanda energética comprendida entre 250 000 y 300 000 kWh/año. Se debía calefaccionar una superficie de 1100 m² y se decidió hacerlo mediante suelo radiante. Se instaló una caldera de 100 kW, compacta y muy robusta, con un doble sistema de limpieza del quemador y un doble tornillo sin fin de alimentación desde la tolva de la caldera hacia el interior de la explotación; también se habilitó un silo de 26 m³. Esta instalación permitió cubrir la demanda energética de la explotación, reemplazando el antiguo consumo de gasoil, que alcanzaba los 24 000 l/año, con 60 000 kg de biomasa.

Otro ejemplo es el de un vivero con calefacción a partir de biomasa en otra ciudad española, Carcar, dedicado a producir flores en maceta y al cultivo de hortalizas. De los 41 000 m² destinados a producción con que cuenta, 25 600 m² son superficie cubierta calefaccionada. Utiliza calefacción 6 meses al año, con temperaturas de entre 11 y 15° C.

Para reducir el gasto en energía, se instalaron dos calderas de biomasa para calentar agua, de

1 163 kW cada una. Se emplazó un generador de aire caliente con biomasa de 523 kW, que calienta un invernadero de 3 600 m², y otros dos generadores iguales, que se alimentan de tres silos de biomasa de 20 000 kg de capacidad cada uno.

La generación de vapor en mediana escala

Los biocombustibles pueden almacenarse en un depósito dentro del edificio, en una habitación cerrada cerca de la caldera o en un almacén separado fuera del edificio. La construcción puede ser un silo, en superficie o subterráneo, o una habitación desde donde el combustible es transportado hasta la caldera por un tornillo sin fin. Otra solución es un contenedor situado al lado del edificio, con rampas de descarga, que transporten la biomasa de uno a otro lado mediante un vehículo de intercambio de carga.

El cuarto de calderas y el de almacenamiento del combustible deben estar siempre separados por razones de protección contra incendios.

Se han hecho grandes avances con respecto al aumento del rendimiento y a la reducción de las emisiones de partículas y monóxido de carbono (CO) de las calderas, particularmente en el diseño de la cámara de combustión, en el suministro del aire de combustión y en los sistemas de control automático del proceso de la combustión.

La tecnología de las calderas automáticas ha mejorado, durante los últimos años, y su rendimiento ha aumentando de cerca de un 60% a alrededor de 90%, con una disminución de las emisiones de CO desde 5 000 mg/m³ hasta 50 mg/m³ o menos.

Se pueden distinguir varios tipos de quemadores automáticos en el rango de potencias entre 50 y 500 kW. Los más comunes son los equipos compactos, las calderas con alimentación inferior, las calderas con parrilla móvil, las calderas mixtas y las calderas con alimentación en cascada.

La experiencia en la Argentina

En la Argentina, la experiencia del uso de dendroenergía en actividades comerciales o de servicios utilizando modalidades tradicionales es amplia, pero reducida cuando se trata de tecnologías modernas de mejor rendimiento y menor contaminación. Un

factor decisivo es el bajo precio de los combustibles fósiles.

En el medio rural es frecuente encontrar la panificación mediante hornos de barro o de ladrillos tradicionales. En áreas urbanas, han sido reemplazados paulatinamente por hornos a gas, aunque subsiste la preferencia por el sistema tradicional por parte de algunos consumidores.

La fabricación de hornos de ladrillos con métodos rudimentarios sin demasiado control se mantiene sobre la base del consumo de leña, con bajos niveles de eficiencia y de calidad y homogeneidad del producto.

Desde el ámbito oficial se han encarado acciones de difusión y promoción del uso de la dendroenergía en las actividades productivas a escala familiar en el medio rural y en escuelas.

La gran disponibilidad de recursos dendroenergéticos en la Argentina hace que el desarrollo de equipos de alta eficiencia para uso rural y urbano de mediana envergadura constituya una excelente oportunidad para fabricantes y proveedores de servicios. Esto queda asociado a los precios de los combustibles alternativos, a la normalización de las características de los dendrocombustibles y a la seguridad y garantía de su suministro.

4.3 La dendroenergía en la industria

La industria forestal

De la biomasa extraída del monte que llega a la industria, una parte se emplea para la elaboración de bienes manufacturados; la que no se utiliza se denomina residuo industrial. Esta biomasa residual se genera en diferentes puntos, que son consideradas fuentes:

- las explotaciones forestales;
- la industria de aserrado;
- la industria de tableros y pasta;
- las aplicaciones de segunda transformación.

Los residuos generados en la industria del aserrado, tableros, pasta y segunda transformación son generalmente materiales de alta calidad calorífica, densos y con baja humedad. Además, tienen

como ventaja que están concentrados en las diferentes industrias. Mediante un sistema de recolección bien organizado, estos residuos se utilizan ampliamente, para crear subproductos o generar energía térmica, empleada en las propias industrias o en plantas de energía eléctrica. En el Gráfico 23 se reseñan los tipos de residuos generados y los posibles destinos de la biomasa forestal.

En los aserraderos y carpinterías, la dendroenergía puede utilizarse para calefacción de las naves de producción y provisión de agua caliente sanitaria, aunque la aplicación más relevante es la generación de calor para secado de la madera. Este proceso puede complementarse con generación de energía eléctrica, y constituir así un ciclo combinado.

El secado puede implementarse mediante hornos o en cámaras deshumidificadoras.

El proceso de secado en hornos consiste en colocar la madera apilada en un cuarto o túnel cerrado, bien aislado térmicamente, en el que el aire caliente es circulado sobre la madera que se va a secar, ya sea forzado con ventiladores o por convección. Los hornos convencionales generalmente operan a temperaturas de secado iniciales entre 38 y 77 °C y finales entre 66 y 93 °C. Usando estas temperaturas y con una circulación del aire a una velocidad de 1 a 2 metros por segundo, se consigue acelerar el secado de la madera muy por encima de la velocidad de secado al aire.

La circulación del aire puede efectuarse forzosamente mediante ventiladores y, en los hornos de circulación, por convección. Los hornos de secado pueden ser de compartimiento, en los que la carga de madera permanece estacionaria mientras dura el secado. La temperatura y la humedad relativa permanecen más o menos uniformes durante cierto período de tiempo, y se cambian a medida que progresa el secado.

En los hornos de túnel o progresivos, la carga consta de una serie de vagonetas, cada una con madera en un estado diferente de secado. Existen puertas en los extremos del túnel.

Los sistemas de calefacción en los hornos pueden ser de dos tipos:

Gráfico 23. Cadena de aprovechamiento de los productos forestales



Fuente: Elaborado por el autor.

- los que usan vapor caliente proveniente de una caldera;
- los de calefacción directa, que reciben el calor directamente de un quemador, y están complementados con radiadores de agua para variar las condiciones de humedad dentro del horno.

El secado por deshumidificación consiste en un recinto cerrado en donde se coloca la madera en pilas horizontales. Una corriente de aire seco, con una humedad relativa entre 15 y 40% y calentado a temperaturas no superiores a 60° C, es forzado a pasar a través de la pila por medio de ventiladores, para extraer la humedad de la madera. Luego, el aire húmedo pasa por un sistema de refrigeración en donde es enfriado por debajo de la temperatura del punto de rocío; parte de la humedad es condensada y drenada fuera del horno. Una vez que ha perdido el agua, el aire es recirculado hacia la madera, para repetir el ciclo (Gráfico 24).

En los deshumidificadores se obtienen ahorros de energía del orden de 50% con respecto al horno convencional.

La industria del papel

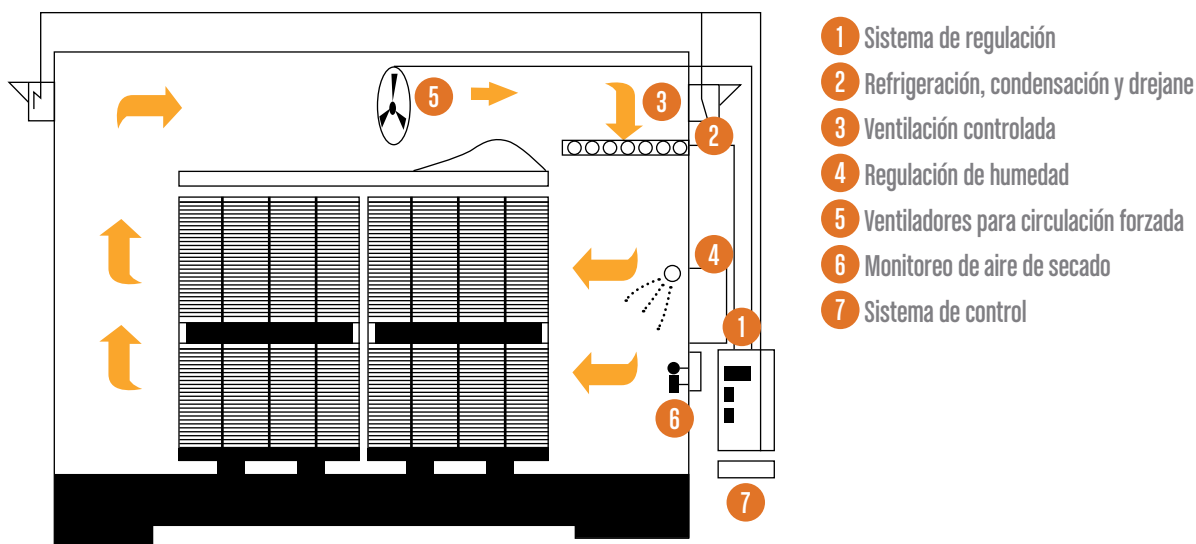
En el proceso de fabricación de pasta de celulosa y papel se requiere energía eléctrica de principio a fin, mientras que el vapor es consumido sólo en determinadas etapas. Las necesidades energéticas tienen que ver con factores de escala: están vinculadas al tipo de producto, volumen de producción y tamaño de las unidades productivas.

La industria papelera consume electricidad para accionar las máquinas, y vapor para secar la pasta y el papel.

Las plantas de producción de energía dentro del sector papelero comprenden las siguientes instalaciones:

- **Calderas de recuperación de licor negro:** el licor negro es un biocombustible que se genera

Gráfico 24. Esquema de cámara de secado con deshumidificador



Fuente: Elaborado por el autor

en la producción de la pasta química y consiste en una mezcla de productos químicos inorgánicos utilizados en la cocción de la madera, lignina y otros compuestos orgánicos. Se quema en estas calderas para producir vapor de agua, que puede ser utilizado en el proceso y, además, para generar electricidad.

- **Calderas de combustión de cortezas:** aprovechan energéticamente la biomasa renovable del proceso de tratamiento de la madera para la elaboración de celulosa, como cortezas, astillas y fangos con contenidos fibrosos.
- **Centrales de cogeneración:** al tener una demanda de electricidad y energía térmica en forma de vapor intensiva, la industria de la pasta y del papel ha integrado masivamente las tecnologías de cogeneración en sus procesos productivos. En estas calderas puede utilizarse biomasa forestal de provisión de terceros.
- **Calderas de generación de vapor:** generan vapor de agua, empleando combustibles fósiles, que se utiliza en los procesos de secado de

la pasta y el papel. También puede emplearse biomasa forestal provista por terceros. Donde se dispone de plantas de cogeneración, estas calderas se utilizan solo como apoyo.

El uso agregado de electricidad por tonelada de papel se ve afectado por muchos factores, tres de ellos, de particular importancia:

- **El tipo de proceso para obtener la pasta:** el proceso químico es mucho menos intensivo en electricidad que el mecánico.
- **La mezcla de productos finales, que en gran medida determina la elección de la tecnología de pasta:** las pulpas que se obtienen con pulpeado mecánico se usan principalmente para papel de periódico.
- **El uso de materiales reciclados:** el pulpeado de papel reciclado requiere menos electricidad por tonelada de pulpa aunque, generalmente, algo más que el pulpeado químico. Sin embargo, el uso de fibras recicladas elimina los requerimientos de electricidad en preparación de madera virgen.

El procesamiento de la yerba mate, el té y el tabaco

El proceso de cosecha de la yerba mate se inicia cuando los cultivos tienen dos o tres años de edad, entre los meses de febrero y octubre. Se cortan las ramas más finas con sus hojas y se colocan en ponchadas de yute o material plástico para transportarlas al secadero. Una vez allí, se depositan a granel sobre un piso de cemento cubierto, con capacidad para almacenar hojas por hasta diez horas, para evitar daños irreversibles en la materia prima que afectan la calidad final del producto.

El proceso se inicia con una etapa de sapecado, en la que se ponen en contacto las hojas verdes con el accionar de las llamas y el calor del fuego directo durante unos 20 a 30 segundos. Dentro de la hoja se forma vapor que le produce pequeñas ampollas que, al reventar, rompen su epidermis con un ligero crepitar. También se ha desarrollado un sapecado a vapor.

Durante esta etapa, las hojas entran con una humedad del orden del 60% y reducen su peso por evaporación en un 20%. El calor necesario para esta etapa proviene de la combustión de la leña en un hogar que asegure que los gases se pongan en contacto directo con la yerba con una temperatura de unos 600° C. Resulta muy importante el tipo de leña que se utiliza, puesto que la operación de sapecado es responsable de la calidad del sabor del producto final.

La operación de sapecado se realiza en un cilindro metálico giratorio de unos 3 m de diámetro y de 9 a 10 m de largo, en el que se ponen en contacto, en corriente directa, la materia prima y los gases calientes de combustión. El avance de la materia dentro del tambor se logra con la rotación y la ayuda de deflectores que, a su vez, facilitan el contacto íntimo yerba-gases. Durante esta etapa se consumen entre 0,18 y 0,28 kg de leña por cada uno de hoja verde. Esta cantidad varía con las condiciones de la materia prima, las instalaciones y el medio ambiente.

En muchos establecimientos, a ese proceso le sigue un presecado que se efectúa en un cilindro similar, donde la yerba sapecada se pone en contacto con una corriente de gases de combustión de

leña a unos 205 °C provenientes de un hogar. Las pérdidas de humedad son aquí de 10 a 11%, con un consumo de leña del orden de 0,05 a 0,08 kg por cada uno de hoja verde.

El producto resultante aún tiene un contenido de humedad que se reduce, hasta llegar a un 4 o 5%, en un secadero donde la yerba nuevamente se pone en contacto directo con los gases de combustión de leña, a una temperatura de 90 a 120 °C. En esta operación se elimina de 10 a 15% de humedad con un consumo de biomasa del orden de 0,05 a 0,08 kg de leña por cada uno de hoja verde.

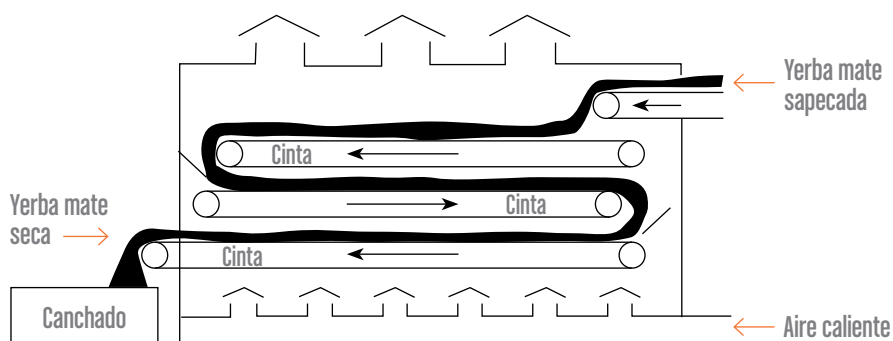
Los primeros secaderos, llamados “barbacuás”, contaban con un enrejado de varillas de madera bajo cubierta sobre el que se colocaba la yerba mate, y por la parte inferior y por convección natural se inyectaban los gases calientes provenientes de la combustión de leña. Tardaban 24 horas en realizar el secado, mientras que los modernos lo llevan a cabo en alrededor de tres horas.

El secadero moderno es un edificio de mampostería, de unos 4 m de ancho por 35 a 40 m de largo y 10 m de altura. En el interior, hay tres cintas de malla metálica en tres niveles, y cada una ocupa todo el ancho y el largo del edificio. Los gases calientes se inyectan por la parte inferior y la yerba se carga en la cinta superior en capas de 30 a 70 cm. Esta cinta avanza en forma continua y descarga en la que se encuentra inmediatamente por debajo con movimiento en dirección opuesta. A su vez, la segunda cinta vuelca la yerba sobre la tercera, que se encuentra inmediatamente sobre las salidas de gases calientes. Mediante esta disposición, el producto es sometido a la menor temperatura al ingreso y a la máxima a la salida; los gases con un alto contenido de humedad abandonan el secadero por registros colocados en el techo del edificio (Gráfico 25).

La industria de la alimentación

La dendroenergía puede aplicarse al secado de granos y de semillas mediante una operación simple en un secador de lecho fijo. El costo inicial para instalar este sistema de secado está al alcance de la gran mayoría de los agricultores, ya que es más bajo que el de un secador comercial. Otro aspecto

Gráfico 25. Esquema de un secadero moderno de yerba mate



Fuente: Elaborado por el autor.

interesante es la versatilidad de este tipo de secadores, puesto que sirven para diferentes granos y semillas: café, poroto o frijol en vaina, maíz en mazorca, yuca en trozos y maní, y también pueden utilizarse para curar bulbos de ajo y cebolla.

El secador de lecho se compone de las siguientes partes:

- cámara de secado;
- piso de lámina o chapa metálica perforada;
- cámara de distribución del aire con expansión gradual;
- ventilador para mover el aire;
- horno de calentamiento.

La construcción de cada componente, en su mayor parte, es de albañilería. La cámara de secado se encuentra sobre una chapa perforada, en la que se coloca el material que se va a secar. Sus dimensiones varían en función de la cantidad de granos a colocar. En Brasil, por lo general, se los ubica en una capa de 0,40 a 0,60 m de altura, ya que en una pila de altura superior el secado puede no ser uniforme.

Para calentar el aire puede utilizarse cualquier tipo de horno o quemador, del que dependen los combustibles que se emplean, que pueden ser subproductos agrícolas, leña, derivados del petróleo, gas

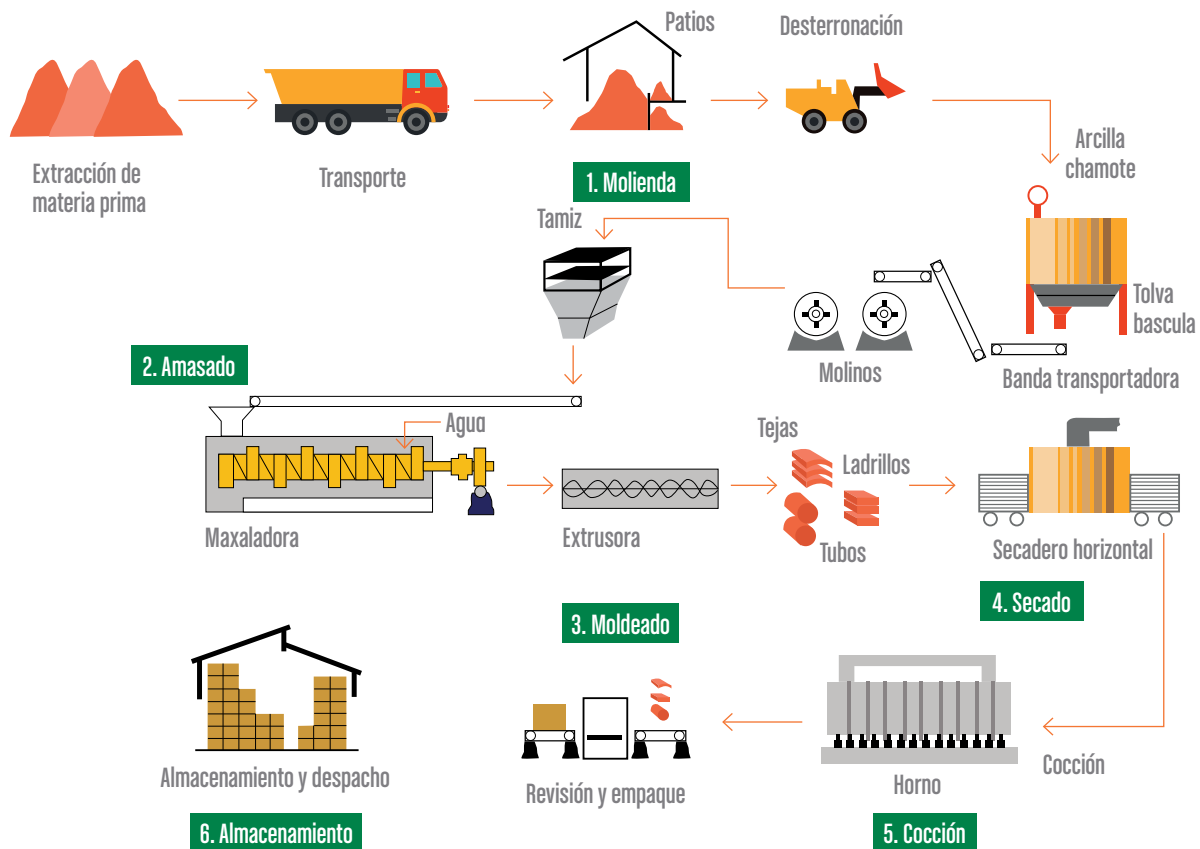
metano o propano. En Brasil, donde está prohibida la quema de combustibles derivados del petróleo para secar productos agrícolas, se emplea mayoritariamente leña. En los países con problemas de deforestación se recomienda utilizar otros productos, como cascarilla de arroz, paja o residuos de mazorcas.

La industria del ladrillo y la cerámica

El proceso de fabricación de ladrillos o cerámicas rojas, como tejas para la construcción, requiere calor para la cocción, que es la fase más importante y delicada porque confiere a la pieza las propiedades deseadas. Este puede ser aportado mediante dendroenergía. Las técnicas de fabricación pueden ser tradicionales de forma artesanal, mediante hornos de producción intermitente, o mediante hornos de proceso continuo (Gráfico 26).

Cuando el mineral arcilloso ha alcanzado temperaturas entre 150 y 200 °C, el agua ligada desaparece totalmente, empezando la descomposición de los hidratos de silicio de hierro, al igual que los silicatos de alúmina. Al alcanzar una temperatura entre 450 y 550 °C, la arcilla comienza a perder el agua combinada, se descompone y la materia orgánica se quema. Entre los 700 y los 800 °C, se forma una pasta resultante de la mezcla de sílice, alúmina, óxidos de hierro, calcio y magnesio. Desde los 800 °C hasta los 1 000 o 1 100 °C tiene lugar la cochura propiamente dicha.

Gráfico 26. Proceso moderno característico de fabricación de ladrillos



Fuente: Elaborado por el autor.

En la etapa de enfriamiento, la temperatura debe descender desde el nivel de cocción hasta la normal, de manera paulatina, en la zona de 500 a 600 °C, ya que la conversión del beta al alfa cuarzo de los ladrillos puede originar contracciones o fisuras en el producto final. Además, el descenso paulatino de la temperatura (especialmente, en los hornos cerrados) es importante para conseguir la adecuada dureza, tenacidad y coloreado de las piezas vitrificadas.

Se utilizan diversos tipos de hornos en la fabricación de ladrillos, baldosas y tejas de arcilla, entre los cuales se destacan el horno de fuego dormido, el árabe, el tipo baúl, el de llama invertida, el Hoffman y el túnel.

En el caso del horno de fuego dormido artesanal tradicional, una vez que los ladrillos de adobe están

secos, se procede a armarlo. Se comienza a levantar en terrenos llanos y firmes con los propios adobes, hasta llegar a una altura de aproximadamente 4 metros. Primero, se arman los túneles, en los que se coloca la leña que es el combustible primario para dar las calorías necesarias para el encendido del resto de la leña o el carbón vegetal o mineral para la cocción.

Una vez armado del horno, que adquiere la forma de un trapecio, se debe esperar a que sople el viento para prenderlo. Luego, se alimentan los túneles con leña, durante 12 horas, tiempo en el que se enciende la que se encuentra en las primeras filas de adobes. Por último, se tapan los túneles y el proceso continúa por sí solo. Este proceso dura aproximadamente 7 días, hasta que el fuego alcanza la parte superior del horno, cuando terminan de cocinarse los ladrillos.

Es posible estimar la cantidad mínima de energía (esto es, de combustible) que se necesita para quemar un kilogramo de ladrillo, a una atmósfera de presión y con valores típicos de humedad del 3%, temperatura ambiente de 20 °C y temperatura de sinterización de 1000 °C (Cuadro 8).

El horno tipo Clamp es el tradicional de fuego dormido; el Escocés es similar aunque mejorado, y el Hoffmann es de proceso continuo de alta producción.

La energía teórica total requerida para quemar un kilogramo de ladrillo en las condiciones típicas asumidas es:

$$Q \text{ total} = 0,81 \text{ MJ/kg}$$

La diferencia se debe a la eficiencia de cada tipo de horno.

La experiencia en la Argentina

En el caso de las grandes industrias de producción rural, el uso de leña se circunscribe a procesos de secado y generación de vapor. Generalmente, las técnicas y equipos utilizados para la combustión de leña son de baja eficiencia y requieren una elevada cantidad de combustible para sostener los procesos productivos. Esta circunstancia motiva a la industria a buscar soluciones para reducir gastos de operación y mejorar sus utilidades financieras.

Las papeleras y la industria de la madera han encarado la modernización del aprovechamiento energético de la biomasa que resulta de sus propios procesos. En ambos casos, el proceso de cogeneración de vapor y electricidad resulta en excelentes niveles de eficiencia con saldos exportables a la red pública.

En el proceso de secado de la yerba mate se han analizado propuestas para hacer más eficiente el uso de la biomasa renovable. En la provincia de Misiones, a partir de 2015, no se puede usar leña de especies nativas, por lo que se evalúa el uso de la biomasa y del chip de leña y cómo afectan al sabor de la yerba estos cambios.

Un criterio similar se ha aplicado en el secado del té, ensayando el quemado de aserrín, con un apoyo fundamental por parte del Instituto Nacional de Yerba Mate (INYM). La idea fue aprovechar un material generalmente de descarte de la industria

Cuadro 8. Energía específica consumida al calor necesario para quemar un kilogramo de ladrillos

Tecnología	Energía específica que quema (MJ/kg)	Horno típico
Simple	3,5 a 8,0	Clamp
Media	2,3 a 6,5	Escocés
Alta	1,0 a 2,5	Hoffman

Fuente: Elaborado por el autor.

forestal, para bajar los costos y la dependencia de un recurso cada vez más escaso, como la leña.

Si bien es posible utilizar cualquier tipo de aserrín, existen algunos condicionantes al momento de la carga en los gasificadores. El aserrín tiene entre 3 y 4% de humedad, pero funciona bien hasta con 12%.

En la localidad misionera de Campo Viera, el grupo Los Colonos, productor de verduras de manera agroecológica, instaló un secadero que funciona con energía renovable, como alternativa sustentable para aprovechar los excedentes de la huerta. Con el apoyo del INTA y de la Facultad de Arte y Diseño de la Universidad Nacional de Misiones, el secadero funciona con energía solar y biomasa. Con el secado, se obtiene una ganancia cercana al 50%, sin considerar las pérdidas que se evitan al no desechar el remanente de una jornada de feria.

El secadero es un pequeño recinto cerrado con una placa solar absorbente en el sector posterior que aprovecha la inclinación natural del terreno. A su vez, tiene un horno para biomasa, que es una cavidad en la parte inferior de la estructura. Sobre esta fuente de calor, se coloca una capa de piedras que actúa como acumulador térmico, de modo tal que la temperatura se mantenga por un tiempo prolongado. El aire ingresa mediante unas aberturas en la parte inferior, aumenta su temperatura al pasar por las piedras calientes, asciende, entra a la cabina de secado entre las bandejas y sale húmedo por la chimenea metálica.

Bibliografía

- Asociación de Desarrollo Rural Mariñas-Betanzos.** 2012. *Manual para la promoción del uso de biomasa como energía térmica en Galicia*. Proyecto de Cooperación Territorios Rurales Comprometidos en la lucha contra el cambio climático.
- Beljansky, M.** 2013. *Tecnologías disponibles para la generación de energía a partir de la biomasa*. 4.º Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú (Argentina). Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA) (disponible en http://www.probiomasa.gob.ar/pdf/Beljansky_Tecnologias_generacion_energia_biomasa.pdf).
- Biomass Users Network (BUN-CA).** 2002. *Manuales sobre energía renovable: Biomasa*. Fortalecimiento de la capacidad de energía renovable para América Central. San José de Costa Rica (disponible en <http://www.bionica.info/biblioteca/BUN-CA2002Biomasa.pdf>).
- Ceballos, J.** 2011. *Aspectos de la generación de calor por combustión de desechos foresto-industriales densificados*. Buenos Aires. INTI.
- FAO.** 2002. *Regional Wood Energy Development Programme*.
- FAO.** 2004. "Terminología unificada sobre bioenergía (TUB)". *Terminología de los dendrocombustibles sólidos*. Roma.
- FAO.** 2009. *Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina*. WISDOM Argentina. Informe final. Buenos Aires.
- FAO.** 2017a. *Sustainable Woodfuel for food security*. Roma (disponible en <http://www.fao.org/3/a-i7917e.pdf>).
- FAO.** 2020. *Actualización del balance de energía derivada de biomasa en Argentina*. WISDOM Argentina. Informe final. Buenos Aires.
- Geodem.** s/f. *Manual para el aprovechamiento energético de la biomasa forestal*. Xunta de Galicia - Unión Europea (disponible en http://www.geodem.es/PDFs/MANUALES_CASTELLANO/M_Biomasa.pdf).
- Hildebrandt Gruppe.** 2015. *¿Cómo funciona una caldera de biomasa?* (disponible en hildebrandt.cl/como-funciona-una-caldera-de-biomasa/).
- International Energy Agency (IEA).** 2014. *World Energy Outlook 2014, Executive Summary* (disponible en https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2014_weo-2014-en).
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).** 2007a. *Energía de la biomasa*. Manuales de energías renovables. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España (disponible en http://dl.idae.es/Publicaciones/10374_Energia_de_la_biomasa_A2007.pdf).
- IDAE.** 2007b. *Biomasa: Cultivos energéticos*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España (disponible en https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_cultivos_energeticos_07_4bd9c8e7.pdf).
- IDAE.** 2007c. *Biomasa: Gasificación*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España (disponible en http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf).
- IDAE.** 2009. *Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios*. Madrid (disponible en https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10920_Instalaciones_Biomasa_Term_edificios_2009_b6fe691f.pdf).
- Menéndez, J.E. y J.A. Hilbert.** 2013. *Cuantificación y uso de biomasa de residuos de cultivos en Argentina para bioenergía*. Buenos Aires. INTA (disponible en http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-cuantificacion_y_uso_de_biomasa_de_residuos_de_c.pdf).
- Ministerio de Energía de Chile.** 2014. *Guía práctica para el buen uso de la leña: leña seca - leña eficiente*. Santiago de Chile (disponible en http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/Documentos/Guia_buen_uso_de_la_lena.pdf).

Morales Calvo, G. 2008. "Los residuos biomásicos: algunos ejemplos de aprovechamiento integral". En Rodríguez Jiménez, J.J. (dir.): *Hacia un uso sostenible de los recursos naturales*. Sevilla. Universidad Internacional de Andalucía (disponible en <http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/2522/08morales.pdf?sequence=1>).

Moreno Casco, J., R. Moral Herrero, J.L. García Morales, J.A., Pascual Valero, M.P. Bernal Calderón. 2014. *Residuos Agrícolas*. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa.

Secretaría de Energía. 2008. *Energías Renovables. Energía Biomasa*. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Buenos Aires (disponible en http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf).

Uasuf, A. y J. Hilbert. 2012. *El uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina*. Buenos Aires. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_uso_de_biomasa_forestal_para_bioenergia.pdf).

Wolf, F y E. Fogel. 1985. *Manual para la producción de carbón vegetal con métodos simples*. Universidad de Nueva León. México (disponible en <http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020118342/1020118342.PDF>).

INTRODUCCIÓN A LA DENDROENERGÍA

N.º 21

COLECCIÓN DOCUMENTOS TÉCNICOS

Organización de las Naciones Unidas
para la Alimentación y la Agricultura (FAO)

www.fao.org

ISBN 978-92-5-133159-0



9 789251 331590

CB0619ES/1/09.20