

CAPÍTULO 6

Dendroenergía: biocombustibles sólidos derivados de la madera

Natalia Raffaelli

Consideraciones generales

La gran disponibilidad de recursos biomásicos en la Argentina constituye una alternativa interesante frente al desafío de diversificar la matriz energética nacional, especialmente a partir de fuentes renovables. La sanción de la Ley 27.191 en el año 2015 está en línea con ese objetivo, ya que ha buscado fomentar la participación de las fuentes renovables en la generación de energía eléctrica en el país, otorgando a la biomasa una gran relevancia (Ley 27.191, 2015).

A nivel mundial, alrededor de 2.400 millones de personas utilizan biomasa para sus necesidades de cocción y calefacción (FAO, 2017). Esto demuestra la gran dependencia frente a estos recursos, sobre todo en sus formas menos complejas, tales como la leña y el carbón. Paralelamente, la tecnología destinada a la transformación de la biomasa atraviesa un proceso de gran evolución y desarrollo, con mejoras en su rendimiento energético y su productividad, con la posibilidad de utilizarse en variadas aplicaciones, tanto domésticas, como comerciales e industriales, reemplazando parcial o totalmente a los combustibles fósiles.

Existen reconocidos beneficios a partir de la utilización de la biomasa con fines energéticos, ya que se trata de un recurso renovable, carbono neutral²², menos contaminante que los combustibles fósiles, que promueve la creación de empleo y el desarrollo local, y permite la reducción de residuos, entre otros (Antolin, 2006).

En este contexto, en Argentina, se reconoce que el potencial de aprovechamiento energético de la biomasa es bastante mayor a su actual utilización, y para optimizar esa posibilidad es necesario trabajar sobre el diagnóstico, análisis de situación, estudio de mercados, desarrollo y difusión de las tecnologías de uso y su aplicabilidad (FAO D.T. N°19, 2020). En este sentido, el sector forestal podría desempeñar un rol fundamental.

De acuerdo a ello, el presente capítulo desarrollará, inicialmente, conceptos generales vinculados a la biomasa, sus características y clasificación, para luego focalizar en particular sobre la biomasa foresto-industrial, sus rasgos más sobresalientes y sus posibilidades de aprovechamiento

²² La neutralidad de carbono hace referencia a un balance neto de cero emisiones de gases de efecto invernadero.

desde el punto de vista energético, abarcando los sistemas tecnológicos más utilizados en nuestro país y sus aplicaciones a nivel doméstico, industrial y comercial.

Clasificación de biomasa

Uno de los criterios para clasificar a la biomasa es según su origen de procedencia. Así encontramos:

- **Biomasa natural:** producida de forma espontánea en la naturaleza, sin la intervención del hombre, que presenta una forma, granulometría y contenido de humedad altamente variables. Un ejemplo característico es la biomasa proveniente de las podas naturales de los bosques.

- **Biomasa residual seca:** procede de subproductos sólidos, aparentemente sin utilización, generados a partir de las actividades agrícolas y forestales, en especial de sus industrias transformadoras, como la agroalimentaria y la maderera. Su contenido de humedad usualmente es menor al 60%. Por ejemplo, residuos de biomasa foresto-industrial como madera aserrada (Figuras 6.1 y 6.2), aserrín, viruta; cáscara de nuez, carozo de aceituna (Figura 6.3).



*Figura 6.1. Despunte y eliminación de defectos de tablas aserradas (Corrientes).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2016).*



Figura 6.2. Residuos foresto-industriales de aserradero (Machagai, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).



Figura 6.3. Residuos agro-industriales leñosos (La Rioja).
Fuente: propia (servicios a terceros realizado a empresa olivícola, 2019).

- **Biomasa residual húmeda:** procede de vertidos biodegradables formados por aguas residuales urbanas e industriales y también de residuos ganaderos. Su contenido de humedad suele superar el 60%. Por ejemplo, guano aviar, estiércol porcino, efluentes cloacales, efluentes industriales, entre otros (Figura 6.4).



Figura 6.4. Planta de tratamiento de efluentes industriales (Buenos Aires).
Fuente: propia (2019).

- **Cultivos energéticos:** se plantan exclusivamente con un fin energético, ya que su única finalidad es producir biomasa transformable en combustible y/o energía. Incluye cereales, oleaginosas, remolacha y cultivos lignocelulósicos, estos últimos también llamados plantaciones energéticas. Por ejemplo, las plantaciones de *Populus* spp. y *Salix* spp., especies de rápido crecimiento, que se prestan muy bien para este tipo de finalidad (Figura 6.5).



Figura 6.5. Madera triturada de ensayos clonales de *Salix* spp., plantación energética-EEJH.
Fuente: propia (2016).

Como se advierte, existen numerosas fuentes de biomasa pasibles de ser aprovechadas en variadas formas. En particular, el presente capítulo abordará con mayor énfasis la biomasa foresto-industrial, ya que constituye una temática afín a los cursos en los que se enmarca este trabajo.

Biomasa foresto-industrial

La actividad foresto-industrial genera un volumen significativo de biomasa residual mayoritariamente seca, factible de ser aprovechada con distintos fines. En Argentina, el rendimiento promedio en establecimientos de primera transformación, como los aserraderos, se estima a grandes rasgos en un 50%, equivalente en la actualidad a unas 2 millones de toneladas al año de residuos foresto-industriales, e incluye materiales en forma de costaneros, puntas, chips, aserrín y virutas (Figuras 6.6 y 6.7). Este conjunto de materiales lignocelulósicos representan un gran potencial biomásico para la producción de energía en nuestro país (MAGyP, 2019).



*Figura 6.6. Pila de chips de madera provenientes del aserrado de trozas-CTM.
Fuente: propia (2020).*



*Figura 6.7. Silo con residuos de carpintería (aserrín y viruta)-CTM.
Fuente: propia (2020).*

Las materias primas mencionadas pueden utilizarse para la producción de biocombustibles, ya sean líquidos, gaseosos o sólidos, o servir de plataforma para elaborar diferentes materiales y/o productos, asociado al concepto de biorrefinería²³. Ello se lleva a cabo a través de una serie de procesos tecnológicos que se desarrollarán más adelante en el presente capítulo. El aprovechamiento de estos recursos renovables posibilitará mejorar la rentabilidad de las actividades forestales, generar nuevos puestos de trabajo (“empleo verde”), diversificar las actividades que fomenten las economías regionales aprovechando su disponibilidad local, contribuir a la mitigación de los impactos ambientales, diversificar la matriz energética, integrar comunidades energéticamente vulnerables, y movilizar inversiones, entre otros beneficios.

Merece la pena establecer una diferencia en cuanto a las características de la biomasa residual de bosques y plantaciones comparados con los residuos foresto-industriales (FAO, 2019).

En general, los residuos provenientes de la cosecha forestal se caracterizan por encontrarse de forma dispersa en el terreno, y ello limita su aprovechamiento como fuente de energía. Su granulometría es muy heterogénea, con piezas de gran tamaño, mezcla de materiales leñosos y herbáceos, alto contenido de humedad, reducida densidad y presencia de elementos contaminantes, lo que dificulta su transporte, manipulación y procesamiento. Es por ello, que para poder aprovechar esta biomasa residual, es necesario efectuar un acondicionamiento que permita su valorización como combustible (Figura 6.8).

²³ Una biorrefinería es una estructura que integra procesos de elaboración de combustibles y productos químicos a partir de biomasa.



Figura 6.8. Residuos biomásicos post-cosecha en plantación de *Pinus spp.* (Misiones).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2016).

Por el contrario, los residuos foresto-industriales están tipificados, se encuentran concentrados dentro de la industria, en sitios con accesos habilitados, con una logística montada y con un contenido de humedad, en general, inferior a los residuos obtenidos del bosque (Figuras 6.9 y 6.10). Ello ha permitido que se pueda apuntar a su reutilización, por ejemplo, a través de su incorporación como biocombustible en determinados procesos, y/o generando valor económico como subproductos, participando de una cadena que se encuentra en expansión.



Figura 6.9. Residuos gruesos de aserradero de *Prosopis spp.* (Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).



Figura 6.10. Residuos finos de transformación mecánica de madera de *Eucalyptus* spp. (Entre Ríos).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2019).

Las características y disponibilidad de la biomasa foresto-industrial determinarán sus posibilidades de aprovechamiento. Si bien toda biomasa es potencialmente susceptible de generar energía, para que esto sea factible es necesario que la misma sea técnica y económicamente accesible (Rearte, 2015).

Para considerar su uso energético como biocombustible, la biomasa deberá tener aptitud para ser transportada y almacenada, alimentar dispositivos y ser consumida en ellos para la generación de energía con medios existentes, disponibles y con adecuada eficiencia. Ello requerirá conocer sus propiedades, y que las mismas sean constantes y conocidas, por lo cual, es imprescindible su caracterización. En ocasiones, será necesaria una mayor clasificación granulométrica, una etapa de secado, u otro acondicionamiento. Con el fin de facilitar y reducir costos en el almacenamiento, transporte y alimentación, y aumentar la eficiencia en la combustión y en el aprovechamiento de la energía, generalmente es necesario lograr dos condiciones principales: la fluidización y la densificación energética. La fluidización intenta que el material sólido se comporte como un fluido, facilitando su manipulación y circulación en los equipos industriales, permitiendo la automatización. La densificación energética de la biomasa se deberá realizar ya que naturalmente, estos materiales presentan baja densidad y es necesario elevarla para que otorguen una concentración de energía adecuada y útil, además de disminuir los costos de transporte y facilitar su manejo.

Su pleno entendimiento conduce a transformaciones primarias y en ocasiones al desarrollo y/o modificación de equipos y maquinarias. Los resultados de las propiedades medidas permitirán al comprador seleccionar equipos y diseñar las instalaciones para garantizar la eficacia y eficiencia del proceso de generación energética.

En cuanto a la accesibilidad económica, es menester que el biocombustible tenga un costo por unidad de energía generada menor que otros combustibles, lo que definirá su eficiencia en

el proceso, y orientará el correcto diseño de los equipos. Este concepto además resulta variable, ya que depende no solo de los costos de producción y de la evolución del mercado de los bio-combustibles, sino principalmente de la variación de los precios de la energía, y por lo tanto de los precios de los combustibles fósiles.

Parámetros para caracterizar los residuos forestales

Existe una serie de parámetros mínimos indispensables que se utilizan para caracterizar a los residuos derivados de la actividad maderera, especialmente la foresto-industrial. Entre ellos se pueden mencionar:

- **Contenido de humedad:** la biomasa es un material biodegradable donde el nivel de humedad juega un rol principal. Es un factor determinante a tener en cuenta tanto para su acondicionamiento, su comercialización como así también su procesamiento y la tecnología seleccionada para su aprovechamiento. Asimismo, incide en la eficiencia de la producción energética. Su estimación generalmente se realiza en estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.11).



Figura 6.11. Determinación de contenido de humedad de aserrín y despuntes en estufa-LIMAD.

Fuente: propia (2019).

- **Granulometría:** las dimensiones de los distintos biocombustibles condicionan su manipulación y definen la posibilidad de su transporte, es decir, afectan el volumen estéreo²⁴ de los materiales. Paralelamente, ello se asocia a la posibilidad de fluidización de los mismos. Asimismo, determinan la superficie específica del biocombustible y eso también impacta en la modalidad de aprovechamiento energético.

- **Densidad:** este parámetro es variable según las especies y el tipo de madera. En general, aquella especie con mayor densidad generará un biocombustible con mayor poder calorífico (se asume que a mayor densidad del material, mayor densidad energética).

- **Poder calorífico (PC):** es la cantidad de energía por unidad de masa que desprende un combustible cuando se quema, y generalmente se expresa en kcal/kg o en MJ/kg. Suele diferenciarse el poder calorífico superior (PCS), que abarca el calor total desprendido de la combustión completa de una masa de combustible, incluyendo el calor generado por la condensación del vapor de agua presente en el material; y el poder calorífico inferior (PCI), que solo contabiliza el calor de oxidación del combustible, sin considerar el contenido de humedad que hubiera en el mismo.

- **Contenido de cenizas:** comprende el residuo sólido mineral que persiste tras una combustión total de la madera. Esta fracción puede provenir tanto de la composición natural del material, como de impurezas que pueda acarrear la madera durante su procesamiento. En general, el contenido de ceniza en la madera no es elevado (valores menores al 3-4%), pero su presencia puede determinar su aptitud para integrar determinados circuitos tecnológicos (Figura 6.12).



Figura 6.12. Determinación de contenido de cenizas en madera-LIMAD.
Fuente: propia (2019).

- **Contenido de elementos químicos:** el contenido de ciertos elementos químicos como el cloro, azufre y nitrógeno, pueden originar gases contaminantes durante la combustión, como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos órgano-clorados, y modificar la composición

²⁴ El volumen estéreo es el volumen de madera sólida apilada que estaría contenida en un cubo de 1 m de lado. Así, el volumen estéreo contiene volumen sólido y aire en proporciones variables.

química de las cenizas generadas. Sin embargo, cabe aclarar que estos elementos se presentan en mínimas concentraciones en la mayoría de las maderas.

Tipos de biocombustibles sólidos derivados de la madera

El término **dendroenergía** se refiere a la energía producida por la combustión de leña, chips leñosos, carbón vegetal, pellets, briquetas, y cualquier otro material derivado de la madera, ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso.

A continuación, se caracterizan los principales tipos de biocombustibles sólidos derivados de la madera.

Leña

Está constituida por madera generalmente trozada, proveniente de troncos o ramas, que se destina para hacer fuego. Es un material altamente higroscópico, y al momento de su corte puede tener un contenido de humedad elevado (mayor al 30-40%). La madera destinada a su utilización como leña normalmente atraviesa un periodo de estacionamiento que permite un oreado o secado al aire, hasta alcanzar un contenido de humedad en equilibrio con el ambiente circundante.

La leña ha sido el biocombustible más empleado por la humanidad a lo largo de la historia. Como en varios países en vías de desarrollo, su uso como fuente de energía para satisfacer necesidades de cocción y calefacción es hoy una alternativa muy presente en nuestro país, ya que se trata de un recurso que puede obtenerse y procesarse localmente, con relativa facilidad y bajo costo, sobre todo en zonas rurales (Figura 6.13). Si bien su utilización no requiere grandes destrezas ni equipamiento sofisticado, puede presentar ciertas desventajas tales como requerir un volumen significativo de almacenamiento previo, producir gran cantidad de humo que dificulta su utilización en ambientes cerrados, generar residuos sólidos (cenizas) que deben ser luego tratados, precisar alimentación continua de los artefactos para cocinar o calefaccionar, presentar dificultades de disponibilidad en centros urbanos, etc. (FAO, 2008).



Figura 6.13. Extracción de leña del monte nativo: entresaca y apilado de *Aspidosperma quebracho-blanco* y *Schinopsis balansae* (Santiago del Estero).

Fuente: propia (viaje de perfeccionamiento profesional para graduados, 2013).

Según datos del Anuario de Estadística Forestal, Especies Nativas 2016 (MAyDS, 2018), la extracción anual de madera para uso final como leña ronda aproximadamente el millón de toneladas a nivel nacional, y aquella leña destinada para carbón alcanza alrededor de dos millones de toneladas en total. Las provincias argentinas que han registrado el mayor uso de leña con estos fines se encuentran en el norte de nuestro país, en especial Chaco, Formosa, Salta, Santiago del Estero, Misiones y Corrientes, aunque debe recordarse que se trata de datos muy difíciles de sistematizar por el alto grado de informalidad de la actividad y la gran atomización de las comunidades que recurren a la leña como principal combustible.

La forma y tamaño de la leña, el porcentaje de corteza y su contenido de humedad son algunas de las variables físicas principales que influyen en su combustión (Figura 6.14). En general, posee forma cilindro-cónica, y la homogeneidad de los trozos influye en el peso del volumen estéreo, en el coeficiente de apilado y en la superficie específica, que servirá de contacto entre comburente y combustible (Camps & Marcos, 2002).



Figura 6.14. Apilado de leña de *Populus* spp. en un pequeño aserradero local (Berisso, Buenos Aires).
Fuente: propia (trabajo integrador de carrera de Ing. Ftal., 2019).

Chips de madera

Son pequeños pedazos de madera de forma plana, donde predomina el largo y el ancho sobre el espesor, provenientes del seccionamiento mecánico de la biomasa en partículas de dimensiones relativamente homogéneas, utilizando una herramienta filosa o cuchilla que realiza un corte limpio sobre el material, eliminando bordes fibrosos. Los chips de madera, en ocasiones llamados también astillas, presentan una longitud de 3 a 10 cm, un ancho de 2 a 6 cm, y un espesor generalmente menor a 2 cm (Figura 6.15).



Figura 6.15. Chips de madera de *Pinus spp.*
Fuente: propia (2016).

Pueden aprovecharse para este fin los subproductos de la industria maderera producidos por los aserraderos, carpinterías, fábricas de muebles, plantas de segunda transformación (elaboración de vigas, tableros, terciados, pisos), etc. Generalmente, son de bajo costo, pueden transportarse y almacenarse con mayor facilidad que la leña, y permiten ser dosificados de manera automática (Uasuf & Hilbert, 2012). Cabe destacar que el chipeado puede reducir de 5 a 7 veces el volumen del material a transportar, y tiene mayor aptitud para comercializarse. Uno de los usos principales de los chips de madera, además de su empleo en la fabricación de tableros y en la industria celulósica, apunta a la generación de energía térmica y eléctrica. El uso dendroenergético requiere una clasificación de calidad de los chips, para poder utilizarlos en determinados equipos (por ejemplo, calderas) de la manera más apropiada. Ello redundará en procesos de combustión más eficientes, en la prevención de fallas, deterioros o desgaste, y en la minimización de los costos operativos.

Pellets y Briquetas

Los pellets y briquetas de madera son biocombustibles derivados de un proceso de densificación. A partir del pasaje de los residuos lignocelulósicos de determinada granulometría (aserrín o molido) por una máquina de extrusión, se produce la autoaglomeración del material leñoso, afectada por la combinación de alta presión y elevada temperatura. El material se introduce en un extrusionador a tornillo o pistón, que lo comprime, a la vez que lo hace pasar por una boquilla agujereada o troquel, fusionándose en una masa sólida en forma de cilindro. Según salen por

los troqueles, una cuchilla corta los cilindros al tamaño deseado. Esto provoca un aumento de temperatura con consecuencias sobre los componentes químicos de la madera, produciéndose la fundición de la lignina que posibilita la adhesión del resto de los materiales.

Tanto los pellets como las briquetas conllevan un proceso común de fabricación que implica una compactación, con la diferencia en su tamaño final, la posibilidad de automatización de la tecnología seleccionada y su finalidad. Una línea de flujo estándar de producción de pellets y briquetas puede observarse en la Figura 6.16.

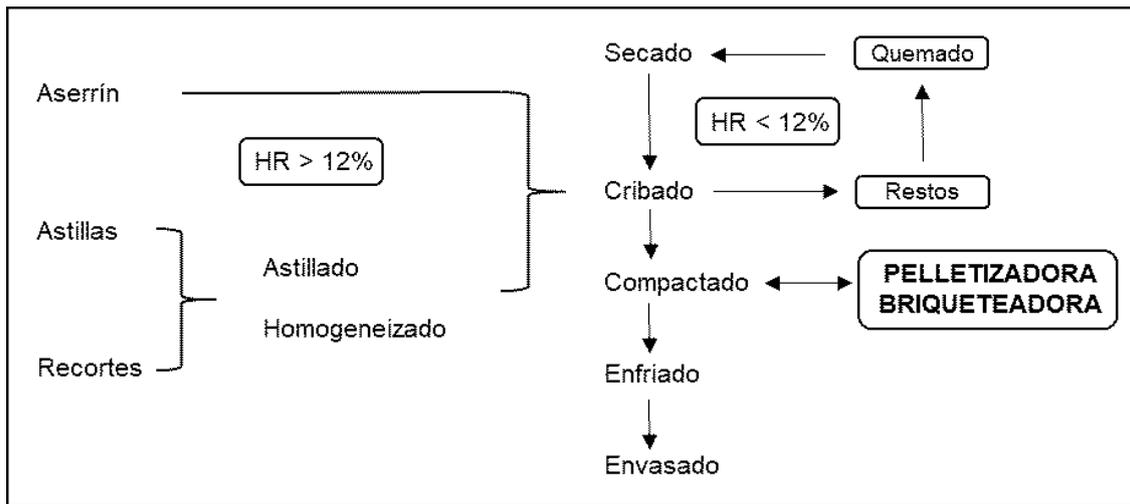


Figura 6.16. Línea de flujo para obtención de pellets y briquetas.

Fuente: adaptada de Camps & Marcos, 2002.

Los pellets (Figura 6.17) son productos estandarizados, cilíndricos, y de gran durabilidad. Son más densos que el material de origen (por ejemplo, un pellet de *Pinus elliottii* presenta una densidad de 1,1 a 1,2 g/cm³ cuando dicha madera normalmente posee una densidad de 0,50 a 0,55 g/cm³), y su tamaño normalmente oscila de 6 a 10 mm de diámetro, y de 10 a 40 mm de longitud. Poseen bajo contenido de humedad (menor al 10%) y bajo contenido de cenizas (generalmente, inferior al 1%). Al ser materiales producidos y comercializados bajo normativa, sus propiedades físico-químicas son relativamente constantes. Por su reducido tamaño y su forma cilíndrica, son fáciles de manipular, y permiten ser dosificados a través de sistemas mecánicos o neumáticos, ya que tienden a comportarse como un fluido. Suelen ser vendidos embolsados (por ejemplo, en sacos de 15 kg), o a granel (en bolsas *big bag* de hasta 1.000 kg).



*Figura 6.17. Pellets de aserrín de Pinus spp (Misiones).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2016).*

Las briquetas (Figura 6.18) se asemejan a los pellets en varias de sus características (humedad, contenido de cenizas, densidad), siendo su principal diferencia su mayor tamaño y su destino de utilización. Las briquetas pueden tener forma cilíndrica o presentar sección prismática (cuadrangular, hexaédrica, octogonal, etc.), y sus dimensiones oscilan entre 5 y 15 cm de diámetro o sección, y entre 40 y 80 cm de longitud. Este mayor tamaño condiciona su utilización, ya que al no comportarse como un fluido presenta complicaciones para integrar un circuito automatizado, y por ello son principalmente empleadas en el sector doméstico.



*Figura 6.18. Briquetas de madera.
Fuente: propia (2016).*

Una característica importante de estos biocombustibles es su friabilidad, que indica la resistencia al golpeo sin desmenuzarse. Esto puede ocurrir durante el movimiento, al ser manipulados, o cuando impactan sobre una superficie (suelo, estufa). Además de la friabilidad en movimiento, se suele evaluar la friabilidad en combustión, medida como el tiempo que transcurre desde que un pellet o briqueta se desmenuza una vez encendido.

Industrialmente, el proceso de pelletización consiste en la compactación del material lignocelulósico, tal como se describió anteriormente; en esta ocasión, una prensa cilíndrica actúa, por extrusión, avanzando sobre el mismo. El émbolo de la prensa empuja el material, de granulometría y contenido de humedad específicos, sobre una matriz normalmente cilíndrica (anular) con orificios circulares, finalizando con la formación del pellet, que debe someterse a un enfriamiento antes de su envasado (Nojek, 2009). Usualmente, no se utilizan aditivos, porque el aumento de la temperatura durante el proceso es suficiente para provocar la fusión de la lignina, la cual actúa como aglutinante natural del material. Asimismo, la inclusión de aditivos podría encarecer el proceso y resultar contaminante al momento de la combustión (Figuras 6.19 y 6.20).



*Figura 6.19. Planta pelletizadora (Presidencia de La Plaza, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).*



Figura 6.20. Matriz anular perforada de máquina pelletizadora (Presidencia de La Plaza, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).

En el caso de las briqueteadoras, estas máquinas compactan biomasa finamente dividida y homogeneizada, ayudadas por el empuje de un pistón accionado por un motor, y se van cortando según la longitud deseada. Cabe mencionar que la fabricación de briquetas también puede ser realizada en forma manual, con un equipamiento más rudimentario, elaborando un producto de menor calidad, que asimismo puede ser utilizado en aplicaciones domésticas.

Carbón vegetal

Es el residuo sólido del proceso de pirólisis, el cual consiste en una descomposición termoquímica de la madera bajo condiciones controladas, en un ambiente cerrado. Durante dicho proceso, se administra la entrada del aire para evitar una combustión completa y que la madera acabe en cenizas. El carbón de leña se utiliza principalmente como combustible doméstico, para cocción y calefacción, sobre todo en países en desarrollo, pero también es importante a nivel industrial en áreas como la siderurgia, y puede servir como materia prima para la elaboración de carbón activado, un material de significativa utilidad en la industria farmacéutica, química, alimenticia, y para el tratamiento de efluentes y aguas residuales (FAO, 1983).

El carbón vegetal es un material inerte, con alta superficie específica, enriquecido en carbono, de estructura poco cristalina (a diferencia del grafito y el diamante), y de baja higroscopicidad (su contenido de humedad en equilibrio con el ambiente suele ubicarse por debajo del 10%). Su

poder calorífico es significativamente superior al de la madera (en promedio, 7.500 kcal/kg versus 4.200 kcal/kg, respectivamente). Su forma es variada, ya que depende del troceado original de la leña, pero suele partirse en prismas de tipo cúbicos cuando se someten a fuerzas disruptivas. Su color es negro y presenta cierto brillo debido a los líquidos piroleñosos que se depositan en sus caras (Figura 6.21). Suele clasificarse mediante una homogeneización a través de cribas o tamices, que separan las distintas fracciones granulométricas. Su densidad aparente es baja, oscila entre 0,2 y 0,5 g/cm³, dependiendo de la madera de origen, y debido a la gran cantidad de poros que posee, presenta una superficie por unidad de volumen muy elevada (160-450 m²/g) (Camps & Marcos, 2002).



Figura 6.21. Carbón vegetal elaborado en horno-CTM.

Fuente: propia (2017).

La producción y utilización de carbón en nuestro país es una práctica muy difundida, especialmente en las regiones del norte argentino, sobre todo a partir de maderas del bosque nativo. La actividad la desarrollan desde pequeños pobladores rurales, que encuentran en la carbonización un complemento para su economía de subsistencia, hasta grandes productores que apuntan a cubrir no solo el mercado nacional sino también el internacional (exportación a Europa, principalmente) (Kees *et al.*, 2017).

Normalización del mercado de biocombustibles sólidos en Argentina

En Argentina, desde el año 2018, a partir de un esfuerzo conjunto entre el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y referentes del ámbito académico, científico e industrial, se viene trabajando sobre normas

específicas acerca de biocombustibles sólidos que permitan dar un marco legal a la actividad, necesario para el incentivo de su uso, tanto residencial, comercial como industrial. La Norma IRAM-ISO 17225 (2019), en sus diferentes partes, apunta a clasificar las diversas biomásas que se encuentran en Argentina, destinadas a la generación de energía renovable, ya sea térmica o eléctrica. Incluye las definiciones de variados tipos de biocombustibles, desde los más simples como la leña y los chips de madera, hasta los más desarrollados tecnológicamente, como el pellet de madera y las briquetas en formatos comerciales, haciendo un especial enfoque en la materia prima y su correcta certificación, para ayudar a desarrollar el sector y dar confiabilidad a los usuarios, tantos industriales como hogareños mediante una mayor regularización.

La Norma IRAM-ISO 17225, *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y Clases de combustibles*, ha sido dividida en varias partes para su mejor organización, las cuales ya se encuentran publicadas y disponibles para su utilización.

Parte 1: Requisitos generales (2019).

Parte 2: Clases de pellets de madera (2020).

Parte 3: Clases de briquetas de madera (2020).

Parte 4: Clases de chips de madera (2020).

Parte 5: Clases de leña de madera (2020).

Parte 6: Clases de pellets de origen no leñoso (2020).

Parte 7: Clases de briquetas de origen no leñoso (2020).

Tal como lo señala en su texto la parte 1 de la norma, su objetivo es

(...) proporcionar principios claros e inequívocos de clasificación para los biocombustibles sólidos, que sirva como una herramienta para permitir el comercio eficiente de los biocombustibles y el buen entendimiento entre vendedor y comprador, así como una herramienta para la comunicación con los fabricantes de equipos. También va a facilitar los procedimientos de autorización administrativa y la presentación de informes (IRAM-ISO 17225-1, 2019, p.7).

Además de abarcar el estudio de los biocombustibles sólidos, el Comité responsable de esta tarea pretende avanzar con la normativa para la verificación técnica de los equipos de combustión que trabajarán con estos nuevos materiales y con aquellos que ya lo hacen a partir de biomasa como fuente de energía.

Tecnologías de aprovechamiento de los biocombustibles sólidos: transformaciones termoquímicas principales

Existen distintas tecnologías de aprovechamiento de los residuos foresto-industriales, utilizando diversos tipos de biocombustibles déndricos (algunos de ellos, ya descriptos precedentemente). En

este capítulo, se focalizará en algunas de ellas, principalmente de naturaleza termoquímica, orientadas a las posibilidades concretas de aplicación en nuestro país.

Combustión

La combustión es un método termoquímico en el cual la madera o sus derivados son oxidados por completo, formando CO_2 y vapor de agua, y liberando calor. En este caso, el combustible (madera) en presencia de un comburente en exceso (aire) reacciona ante la aplicación de una energía de activación (chispa), produciendo energía térmica, que puede ser utilizada tanto para fines domésticos (cocción o calefacción) como comerciales o industriales (procesos de secado, generación de energía mecánica, eléctrica, etc).

Como se mencionó previamente, el material disponible para ser utilizado a fin de producir energía mediante la combustión puede presentarse en distintas formas tales como leña, astillas o chips, materiales densificados y/o carbón vegetal.

A nivel residencial, los dispositivos para generar energía por combustión son variados. Abarcan desde cocinas a leña y/o carbón, braseros, hornos de barro o ladrillos de distinta escala, hasta estufas hogares, salamandras, estufas rockets, estufas a base de pellets o briquetas, entre otros.

Industrialmente, los procesos se llevan a cabo en equipos denominados **calderas**. La caldera es un dispositivo diseñado para generar vapor, normalmente de agua (Figura 6.22). El vapor se produce a partir de una transferencia de calor a un fluido en estado líquido, que al calentarse cambia de fase. De esta manera, el potencial energético del combustible se convierte en energía térmica, que posteriormente se transmite a un medio en el que pueda ser útil (FAO D.T. N°21, 2020).



Figura 6.22. Caldera de biomasa alimentada con residuos foresto-industriales (Entre Ríos).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal, 2019).

Los elementos básicos de una caldera industrial son el horno u hogar, y el quemador. En ella se asegura la mezcla íntima del combustible y el comburente, la admisión de cantidades suficientes de aire para quemar por completo la biomasa, una temperatura apropiada para encender

la mezcla, y un tiempo de residencia adecuado para que la combustión sea completa. El quemador incinera el material para generar una llama, la cual transmite el calor producido a un circuito de agua que puede ser usado para los procesos industriales que lo requieran, incluyendo calefacción, agua sanitaria, etc. Normalmente, se trabaja con exceso de oxígeno, y se alcanzan temperaturas que varían entre 800 y 1.100°C.

A continuación se presenta la estructura general de una caldera alimentada a biomasa, donde se identifican las secciones correspondientes al ingreso del biocombustible, el control de la regulación del aire, la zona de generación de calor y su transferencia al circuito de agua (Figura 6.23).

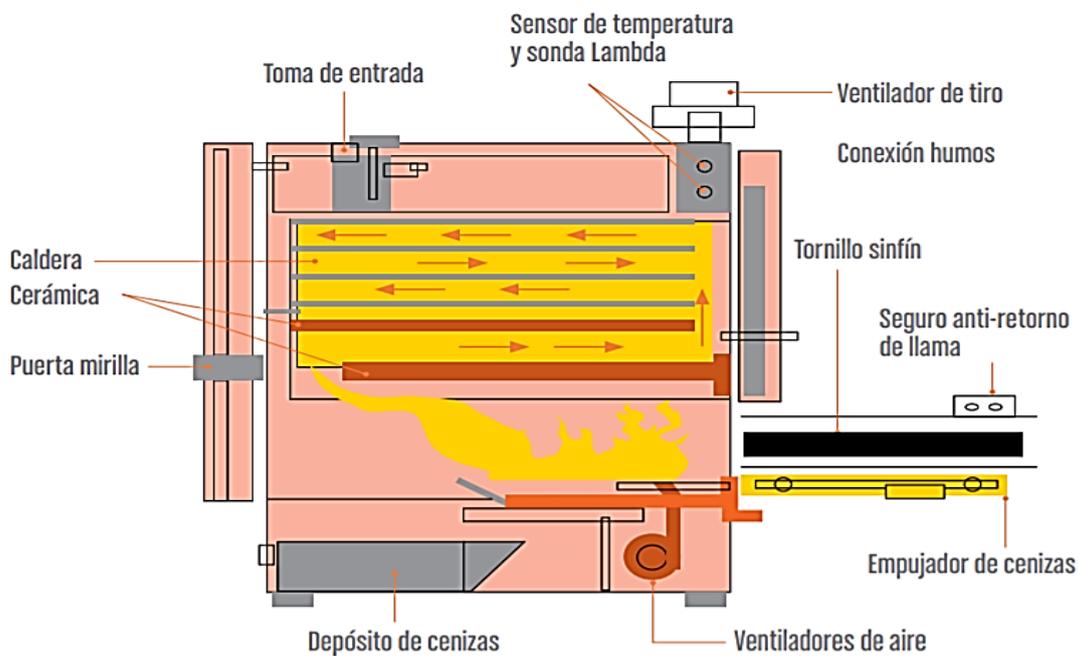


Figura 6.23. Estructura de una caldera de biomasa.
Fuente: Hildebrandt Gruppe (extraída de FAO DT N°21, 2020).

Existen algunos factores que afectan al proceso, entre ellos:

- Grado de humedad de la biomasa. Idealmente, la biomasa leñosa debe presentar un contenido de humedad inferior al 15%, para optimizar los rendimientos.
- Granulometría y densidad. Cada equipo indica las características deseadas del combustible, las cuales influyen sobre el proceso.
- Contenido de azufre. En el caso de la madera, es mínimo, por lo cual las emisiones gaseosas de óxidos de azufre no son significativas.
- Poder calorífico del combustible. Dependerá del tipo de biocombustible, los cuales aportarán distintos niveles de densidad energética.

En la combustión directa se desprenden gases procedentes de la propia combustión, que deben ser asimismo quemados mediante la introducción de aire secundario para disminuir las emisiones a la atmósfera; además se generan escorias o cenizas como consecuencia del contenido mineral de la biomasa y las impurezas del residuo, sumado a la energía producida. Esta

última puede ser empleada en diversas aplicaciones, como la generación de vapor, la cogeneración (vapor + electricidad), su utilización en hornos industriales, etc.

En el mercado, se encuentran distintos modelos de calderas. Entre los más difundidos, están aquellos donde el horno cuenta con una cámara revestida por material refractario que contiene en su interior una parrilla, combinada con una cámara de combustión que permite la quema de gases, trabajando a temperaturas de 1.000°C. Además de la tecnología con parrilla, se encuentran calderas de lecho fluidizado, pudiéndose utilizar tanto en plantas térmicas como termoeléctricas alimentadas con biomasa. Trabajan a menor temperatura, aproximadamente 800°C, y eso disminuye el nivel de emisiones de óxidos de nitrógeno y la formación de escorias. Son más eficientes que los modelos de parrilla y admiten mayor variabilidad en cuanto al contenido de humedad y granulometría.

La combustión de biomasa presenta algunos beneficios frente al empleo de combustibles fósiles:

- Disminución de las emisiones de azufre y nitrógeno.
- Disminución de las emisiones particuladas.
- Disminución de las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos.
- Disminución de las emisiones de CO₂, desacelerando el efecto invernadero.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas y/o forestales sin otro destino.
- Posibilidad de utilización de tierras abandonadas o desertizadas con cultivos energéticos.
- Independencia energética.
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales y fomento de “empleos verdes”.

En nuestro país, se vienen desarrollando proyectos que apuntan a la reutilización de la biomasa leñosa residual proveniente de la actividad forestal, empleándola como biocombustible para alimentar calderas industriales instaladas en centrales térmicas, para la generación de energía eléctrica. Tal es el caso de variados emprendimientos desarrollados en nuestro territorio, entre los que se destacan los de la región del noreste argentino. Uno de los proyectos más significativos se ubica en la localidad de Virasoro, provincia de Corrientes (Figura 6.24), donde se ha construido la central térmica a base de biomasa más grande e importante de Argentina, con capacidad de producir 40 MW de energía limpia a partir de residuos de *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp. de plantaciones locales, que será inyectada a la red eléctrica del sistema interconectado nacional.



Figura 6.24. Planta de producción de energía eléctrica a base de biomasa (Virasoro, Corrientes).
Fuente: FRESA (2020)²⁵.

Pirólisis

La carbonización de la madera consiste en la transformación del material leñoso en carbón, bajo la sola influencia de la temperatura controlando la entrada del aire, descomposición térmica llamada pirólisis.

Durante la pirólisis, que exige prácticamente la ausencia de oxígeno, la madera atraviesa distintas etapas, que van modificando la estructura y composición química del material inicial, para dar finalmente paso a los productos resultantes; los mismos pueden presentarse en estado sólido, líquido y gaseoso, en diversas proporciones según las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso. Mientras la fase sólida obtenida se denomina carbón, los gases volátiles expulsados pueden condensarse generando un biocombustible líquido llamado *bio-oil*, además de liberarse gases no condensables. Generalmente, los rendimientos de carbonización en métodos discontinuos oscilan entre 20% y 30% de residuo sólido en función del peso seco de la madera.

Normalmente, si la pirólisis se conduce muy lentamente con tiempos de reacción que llevan días, se optimiza la producción del producto sólido, en este caso, el carbón. Por el contrario, si la reacción ocurre en tiempos muy breves (segundos, minutos), con temperaturas que no superan los 650°C y enfriamientos rápidos, se favorece el rendimiento de líquidos (*bio-oil*). Finalmente, con temperaturas superiores y tiempos de residencia altos, se favorece la producción de gases (Marcos Martín, 1989).

En cuanto a las etapas que atraviesa la madera durante el proceso de carbonización, llevado a cabo en dispositivos denominados hornos, se identifican distintos estadios que se describen a continuación.

²⁵ <https://www.fresa.com.ar/planta>

En una primera fase, la madera sufre una deshidratación, que dependerá de su contenido de humedad inicial. Esto ocurre una vez superados los 100°C en el horno y progresa a la par que aumenta la temperatura. La eficiencia mejorará si se efectúa un pre-secado y/o se trabaja con madera estacionada previamente. Esta primera etapa avanza hasta que la temperatura del horno alcanza alrededor de 250-280°C. La energía necesaria proviene de la combustión parcial de parte de la madera cargada en el horno, y es una reacción endotérmica. El producto resultante hasta ese momento se denomina **madera torrificada** y se verifica una impactante cantidad de humos, predominantemente de color blanco espeso, en línea con la producción de vapor de agua. Luego, si la temperatura continúa ascendiendo hasta los 350°C, la madera comienza espontáneamente a fraccionarse, produciendo carbón junto con vapor de agua, ácido acético, metanol, acetona, entre otros, y el color del humo vira hacia el amarillo. A mayores temperaturas (rango de 400-500°C) se liberan compuestos químicos más complejos, como alquitranes, y gases no condensables (hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono). En esta etapa la reacción libera energía, es decir, es exotérmica. Visualmente, se verifica la producción de humos de colores azulinos, menos densos, que evolucionan hasta volverse transparentes. En esa instancia, queda sólo el residuo sólido carbonizado, llamado carbón vegetal, enriquecido en carbono fijo en niveles que pueden alcanzar un 70-80%.

Resulta interesante verificar el efecto de la temperatura sobre el rendimiento y composición del carbón vegetal remanente, como se demuestra en la siguiente curva (Figura 6.25). Entre los 500 y 600°C se suele verificar el equilibrio deseado entre la calidad del carbón resultante y el rendimiento económicamente aceptable de la actividad, punto donde se interrumpe la entrada de aire al horno para finalizar la reacción.

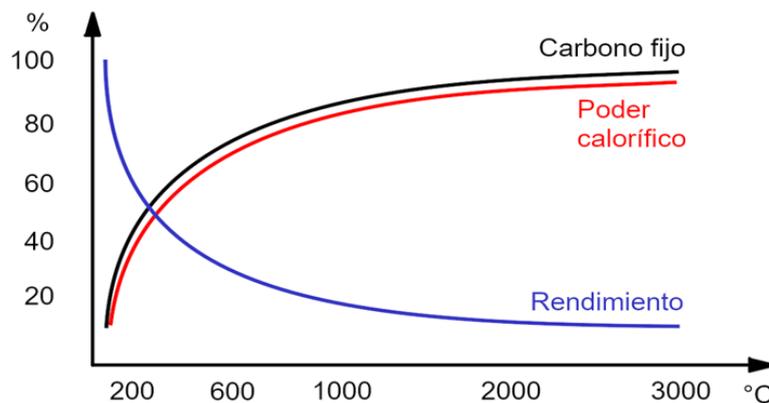


Figura 6.25. Curvas de rendimiento y calidad energética durante una carbonización típica.
Fuente: propia (2020).

El carbón vegetal tiene diversas aplicaciones, ya sea como combustible o como insumo industrial. En Argentina, el proceso emplea principalmente maderas de latifoliadas, provenientes en su gran mayoría de bosques nativos. Entre los usos domésticos del carbón vegetal están las aplicaciones gastronómicas (cocción) y de calefacción, mientras que el uso industrial se ve en actividades tales como el secado de otros productos (secaderos de madera, de té, de yerba mate, etc.), en la industria cementera y en la siderúrgica, entre otros. Vinculado a esta última

actividad, nuestro país ha tenido históricamente una de las mayores producciones de carbón vegetal de alta calidad para su uso exclusivo en la industria siderúrgica instalada en la provincia de Jujuy, hoy discontinuada.

El conocimiento de la técnica de carbonización permite elaborar un material de mayor poder calorífico que la leña, biocombustible muy difundido en varias comunidades rurales y semi-rurales de nuestro país. Se realiza a través de métodos de relativamente bajo costo, adaptables según las posibilidades de cada usuario, ya sea para destino propio (gastronomía o calefacción), y/o para proporcionar un producto factible de generar un ingreso monetario que complemente la economía familiar.

Existen diversos tipos de hornos de carbonización, que conllevan variados grados de complejidad, inversión y tecnología. Se pueden clasificar en base a la barrera de separación entre la madera y el exterior (por ejemplo, tierra, ladrillos, cemento, acero, etc.); en función del calor empleado para secar y calentar la leña (autoencendido de la propia madera u otra fuente); o según si el proceso se realiza en forma continua o discontinua (*batch*).

Los métodos más sencillos son los **artesanales**, que precisan sólo de herramientas como hachas, machetes, rastrillos y palas, requiriendo tiempos para obtener el carbón vegetal superiores a un mes, según las condiciones climáticas y la experiencia del operador. En estos casos, la barrera física es la tierra, o una combinación de tierra y paja. Entre los de tipo artesanal encontramos la “**parva**” y la “**fosa**” (Figuras 6.26 y 6.27). La **parva** se construye desde el nivel del suelo, debidamente asentado, hacia arriba, colocando las trozas más grandes en la base, cruzadas entre sí, y apoyando sobre ellas el resto de la madera a carbonizar en forma de pila cónica. En su centro, se deja una chimenea por la cual se inicia el encendido y luego la estructura se aísla con tierra y paja. La **fosa** requiere excavar el suelo y dentro de ese espacio introducir la madera a carbonizar, para luego aislarla tapándola con tierra, y/o, en ocasiones, con una tapa de chapa. En ambos métodos, si bien la calidad del carbón obtenido resulta irregular (aunque mejor en la parva que en la fosa), la habilidad del carbonero es fundamental.



Figura 6.26. Parva tradicional.
Fuente: Hermoso de Mendoza (2021)²⁶.

²⁶ <https://www.sasua.net/estella/articulo.asp?f=carboneros&n=Carboneros>



Figura 6.27. Fosa de carbonización con tapa.
Fuente: Canul Tun (2013).

La producción en Argentina se realiza predominantemente en **hornos semi-industriales**, tales como el horno de ladrillo y barro, conocido como “**media naranja argentino**” (Figuras 6.28 y 6.29). Son frecuentemente vistos en explotaciones del norte argentino, especialmente en las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Formosa, a partir de maderas como *Aspidosperma quebracho-blanco* (quebracho blanco), *Schinopsis balansae* (quebracho colorado chaqueño) y *Prosopis* spp. (algarrobos). Son hornos fijos, que admiten un alto volumen de madera y suelen instalarse en predios cercanos a los bosques nativos que abastecen estos equipos. Las explotaciones comerciales, destinadas a la venta nacional y/o internacional de carbón, se realizan a una escala considerable, empleando una serie de hornos alineados, que normalmente miden entre cinco y ocho metros de diámetro, y pueden albergar un volumen bruto que supera los cien metros cúbicos. El ciclo completo, que incluye el tiempo de carga, carbonización, enfriado y descarga, puede abarcar entre seis y diez días, dependiendo de cuestiones climáticas, rendimiento seleccionado, y destreza del operador.



Figura 6.28. Serie de hornos de ladrillo “media naranja argentino” (Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).



Figura 6.29. Hornos de ladrillo “media naranja argentino” en producción (Santiago del Estero).
Fuente: propia (viaje de perfeccionamiento profesional para graduados, 2013).

Una alternativa tecnológica de manufactura nacional son los hornos cilíndricos de acero, conocidos como “**hornos TPI**” (por las siglas en inglés de su desarrollador, *Tropical Products Institute*), aptos para la producción de carbón vegetal a partir de madera de bosques o desechos de aserradero. El CTM cuenta con un horno de estas características, emplazado en la Estación Experimental de Los Hornos (Figura 6.30). La unidad está constituida por dos cilindros de chapa de acero inoxidable, encastrables, de 2,3 metros de diámetro por 0,90 metros de altura, finalizando en una tapa cónica con 4 boquillas para escape de humos; posee adicionalmente 8

canales inferiores (humeras) sobre los que se montan alternadamente 4 chimeneas que permiten la entrada y salida controlada del aire. Cuenta con una capacidad de 6 a 7 m³ de madera (≈3.000 kg) y un rendimiento aproximado del 20-25%, alcanzando una temperatura en el interior del horno de 500 a 600°C.



*Figura 6.30. Horno TPI en funcionamiento-CTM.
Fuente: propia (2018).*

Respecto al proceso productivo, la carbonización en horno cilíndrico metálico TPI atraviesa una serie de etapas, descritas brevemente a continuación (Raffaeli, 2016):

- Armado y ensamblado del horno: el primer anillo del horno se monta sobre las 8 humeras dispuestas radialmente en el suelo, que debe estar limpio y apisonado.

- Carga del material leñoso y cierre mediante colocación de la tapa y chimeneas: se carga la madera generalmente en disposición radial desde el suelo hasta el nivel del primer anillo, y luego se monta el segundo cilindro para continuar la carga hasta completar la altura de la unidad. Se termina colocando la tapa cónica dejando destapadas inicialmente las boquillas superiores para permitir el escape de los humos preliminares (Figura 6.31).

- Encendido desde la base del equipo y puesta en marcha: se prende con la ayuda de pequeñas ramas secas introducidas por debajo del anillo inferior, comenzando por la zona opuesta a la dirección principal de los vientos predominantes, y luego se continúa de forma circular alrededor de la base. Una vez encendido en su totalidad, se cierran las boquillas superiores de la sección cónica colocando las tapas provistas.

- Monitoreo y alternancia de chimeneas para facilitar la circulación pareja del aire dentro del horno: se verifica la progresión de los humos a lo largo del proceso, controlando su caudal y coloración. Las 4 chimeneas móviles van rotando su posición en la base del horno cada 8 a 10 horas, de manera de permitir la correcta y pareja circulación de aire dentro del equipo.

- Enfriado y apertura del horno: para abrir el horno, se debe verificar el completo enfriamiento de la unidad, a fin de evitar posibles incendios espontáneos provocados por la entrada abrupta del aire si aún persisten focos encendidos (Figura 6.32).

- Descarga y embolsado del material: el horno se desarma y se procede al acopio del carbón en bolsas resistentes.



*Figura 6.31. Montaje, carga y cierre del horno TPI-CTM.
Fuente: propia (2018).*



*Figura 6.32. Carbonización finalizada en horno TPI-CTM.
Fuente: propia (2016).*

Normalmente, la duración del proceso abarca de 4 a 6 días, dependiendo de la marcha de la carbonización, nivel de vientos de la zona, condiciones climáticas, experiencia del operario, etc. El horno metálico transportable suele necesitar un escaso mantenimiento, tales como su guardado bajo techo mientras no está en uso para prevenir la corrosión oxidativa y evitar el riesgo de

deformación a fin de asegurar el correcto encastre entre anillos por más tiempo; su vida útil alcanza unos diez años utilizándolo en forma regular.

Finalmente, existen **hornos de tecnología industrial**, de funcionamiento continuo y alimentación automática, de alto rendimiento, asentados en grandes instalaciones fijas, que pueden trabajar con leña o astillas de grandes dimensiones, y que producen carbones de alta uniformidad, excelente calidad y elevados porcentajes de carbono fijo (superiores al 80%). Tal es el caso del “**horno Lambiotte**”, de origen francés. Una de sus grandes ventajas es que es posible recuperar los líquidos piroleñosos a partir de los volátiles condensables, y los gases pueden ser re-quemados para mantener la temperatura de carbonización, que en este tipo de horno es superior a la del horno media naranja argentino o el TPI. Cabe aclarar que en Argentina este tipo de horno no está disponible.

Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico por el cual la biomasa es transformada en un gas combustible, a altas temperaturas (800-1.200°C), en una atmósfera pobre de oxígeno, insuficiente para lograr una combustión completa. Ese gas obtenido, normalmente llamado gas pobre, gas de síntesis o *syngas*, está compuesto por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono, metano, y otros hidrocarburos, además de residuos sólidos, comúnmente denominados *char* o carbonilla. Los gases combustibles constituyen aproximadamente un 40% del volumen total del gas. En términos de suministro de aire para que se lleve a cabo la reacción, se podría caracterizar a la gasificación como un punto intermedio entre la combustión y la pirólisis.

Como el gas de síntesis producido por la gasificación es, una vez purificado, una sustancia inflamable y combustible, se puede utilizar para alimentar motores de gas o turbinas, para producir energía eléctrica con variada eficiencia. A su vez, la carbonilla resultante se puede comercializar como enmienda de suelo, material base para producir carbón activado, briquetas, o aditivos en distintas industrias, por ejemplo, la cementera. Además de destinarlo a combustión, el gas de síntesis puede actuar como materia prima para la producción de otros combustibles (metanol, etanol, etc.) u otros productos químicos (amoníaco, ácido acético, etc.).

Los sistemas de gasificación para producción de energía eléctrica constan en general de tres sectores principales: la línea de preparación y acondicionamiento de la materia prima (biomasa celulósica, como la foresto-industrial), la línea de gasificación propiamente dicha (incluye el gasificador, equipos de lavado y enfriado de gases, motores de combustión interna y sistemas de ultra enfriado), y la línea de filtrado de gases y tratamiento de aguas de proceso (Rearte, 2015).

En cuanto al acondicionamiento de la materia prima, los residuos foresto-industriales deberán adecuarse según su humedad, densidad y granulometría. El contenido de humedad resulta fundamental, ya que afecta directamente el rendimiento de los equipos. En determinadas ocasiones, la biomasa requerirá un secado previo a la gasificación. Respecto a la granulometría, se prefiere trabajar con elementos cuyo tamaño oscile entre el de un chip y el de un taco o despunte,

evitando las virutas y el aserrín, ya que estos pueden obturar el sistema del gasificador. En este caso, las fracciones más finas encontrarán mejor destino en el proceso de densificación para la producción de pellets y/o briquetas.

Durante las reacciones de gasificación, producidas dentro del reactor o gasificador, ocurren cuatro procesos definidos, que son responsables de la descomposición térmica de la biomasa: secado, pirólisis, combustión y reducción (Estrada & Zapata Meneses, 2004). La biomasa suele introducirse por la zona superior del equipo y va tomando aire del ambiente en cantidades controladas, para garantizar su oxidación parcial y producir el gas. De esta manera, un kilogramo de biomasa se convierte en 2,5 a 3,0 m³ de gas, con un poder calorífico de 1.000 a 1.300 kcal/m³, compuesto mayoritariamente de: nitrógeno (45-55%), monóxido de carbono (15-20%), hidrogeno (15-20%), dióxido de carbono (8-12%), y metano (1-4%). Luego ese gas deberá ser enfriado y filtrado para poder adecuarse a los requerimientos de los motores o turbinas que los emplean como combustible.

Existen distintos tipos de gasificadores: de lecho fijo, de cama fluidizada, de cama fluida circulante, de lecho arrastrado, y de cama de mezcla. El desarrollo de cada diseño no es objeto de este capítulo, aunque quizás sea interesante mencionar que en nuestro país la tecnología no ha madurado aún a nivel industrial o de gran escala. Es por ello que predominan los equipos de tipo lecho fijo, de corriente descendente (*downdraft*), de baja escala, cuya producción eléctrica es menor a 1 MW, que producen un gas limpio, con menor contenido de alquitrán, de buen octanaje, apropiado para introducir en motores de combustión interna. Un ejemplo de estos gasificadores se encuentra en la planta demostrativa del Parque Industrial de Presidencia de La Plaza, Chaco, instalado por el INTI, con tecnología proveniente de la India y adaptada a la biomasa y contexto local (Figuras 6.33 y 6.34).



Figura 6.33. Planta de gasificación de residuos madereros (Presidencia de La Plaza, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).



Figura 6.34. Gasificador de madera de lecho fijo downdraft (Presidencia de La Plaza, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).

La tecnología de gasificación es una estrategia limpia de reducción de residuos y producción tanto de energía eléctrica como de combustibles líquidos, que ha sido utilizada desde hace más de cien años en el mundo entero, y que particularmente en nuestro país posee un amplio margen para crecer y desarrollarse (Knoef, 2005; FAO D.T. N°21, 2020).

Consideraciones finales

La obtención de combustibles a partir de recursos renovables con la intención de sustituir a los derivados de materiales fósiles, en particular, los vinculados al aprovechamiento de los residuos agropecuarios, forestales y sus industrias, debiera constituir el horizonte de desarrollo del sector energético. Encarar esta tarea presentará una buena oportunidad de diversificación de la matriz energética nacional.

Los modelos de producción de energía a partir de biomasa forestal son diversos en cuanto a concepto, tecnología y escala, y ofrecen varios tipos de soluciones energéticas que contribuyen a disminuir la dependencia de los recursos no renovables. La valorización de la biomasa forestal y foresto-industrial, y la constitución de un mercado para estos recursos energéticos, es posible

si se crean los instrumentos necesarios de apoyo a la actividad. Ello deberá ser acompañado por una política de precios de los combustibles alternativos, una normalización de las características de los dendrocombustibles, junto a la seguridad y garantía de su suministro. Esto requiere de una adecuada articulación entre los actores productivos y los implementadores de políticas energéticas, que redundará en un mayor desarrollo del sector con el consecuente crecimiento económico del país.

Referencias

- Antolín, G. (2006). La gestión y el aprovechamiento de los residuos en la industria de la madera. Cuaderno Tecnológico N°2. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial-Unión Europea.
- Camps, M.; Marcos, F. (2002). *Los Biocombustibles*. Barcelona, España: Ed. Mundi-Prensa.
- Canul Tun, S.A. (2013). *Rendimiento y calidad del carbón vegetal elaborado en horno tipo fosa con subproductos forestales de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. y *Lonchocarpus castilloi* Standl en Campeche* (Tesis de Maestría). Recuperada de Universidad Autónoma de Nueva León, Facultad de Ciencias Forestales. México.
- Estrada, C.A.; Zapata Meneses, A. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica*, Año X(25), 155-159.
- FAO. (1983). Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Estudio FAO Montes N°41. Roma. ISBN 92-5-301328-1.
- FAO. (2008). Bosques y Energía. Cuestiones Clave. Estudio FAO Montes N°154. Roma. ISBN 978-92-5-305985-0.
- FAO. (2017). The charcoal transition: Greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods. Rome. ISBN 978-92-5-109680-2.
- FAO. (2019). Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo. Colección Informes Técnicos N°7. Buenos Aires. ISBN 978-92-5-132013-6.
- FAO. (2020). Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N°19. Buenos Aires. ISBN 978-92-5-132488-2.
- FAO. (2020). Introducción a la dendroenergía. Colección Documentos Técnicos N°21. Buenos Aires.
- IRAM-ISO 17225. (2019). *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y Clases de combustibles*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Kees, S.M.; Michela, J.F.; Skoko, J.J. (2017). Rendimientos y costos de la fabricación de carbón elaborados por pequeños productores del oeste chaqueño. Informe Técnico INTA: C.R. Chaco-Formosa, E.E.A. Sáenz Peña, E.E.A. Santiago del Estero. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Knoef, H. (2005). *Handbook of biomass gasification*. Holanda: BTG Biomass Technology Group BV.

- Ley 27.191 (2015). *Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica*. Poder Legislativo Nacional. República Argentina. 23 de Septiembre de 2015.
- Marcos Martín, F. (1989). *El carbón vegetal-propiedades y obtención*. España: Ed. Mundi-Prensa.
- MAyDS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación). (2018). Anuario de Estadística Forestal, Especies Nativas 2016. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2016_-_anuario_de_estadistica_forestal_de_especies_nativas.pdf
- MAGyP (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación). (2019). Plan Estratégico Forestal y Foresto-Industrial 2030. Programa de Sustentabilidad y Competitividad Forestal. Disponible en: <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/sycf/publicacion-forestales-11-diciembre-2019.pdf>
- Nojek, J.P. (2009). *Pellets de madera: una fuente de energía renovable* (Tesis de grado). Recuperada de Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA). Buenos Aires, Argentina.
- Raffaeli, N. (2016). Elaboración de carbón vegetal en horno metálico transportable. *Revista Contacto Rural* N°3, 14-15.
- Rearte, M. (2015). Gasificación de Biomasa en Sistemas *Downdraft*. Documento INTI VRB302-1501. Chaco, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Uasuf, A.; Hilbert, J. (2012). El uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina. Informe Técnico, Año 1 N°3. Castelar, Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.