

4

**BIOMASA, GASIFICACIÓN Y
RESIDUOS FORESTALES**

4.1 INTRODUCCIÓN.

Desde el descubrimiento del fuego, la biomasa ha sido la fuente de energía más importante para la humanidad. A mediados del siglo XIX se impone el uso de combustibles fósiles, por lo que la biomasa es sustituida por el carbón y más tarde por otras fuentes energéticas como el petróleo. El aprovechamiento de la biomasa decrece de forma progresiva presentando en la actualidad un reparto desigual como fuente de energía primaria. Mientras que en los países desarrollados es una de las energías renovables más extendida y fomentada, en los subdesarrollados es la principal fuente de energía primaria previéndose un fuerte aumento de la demanda energética en los próximos años.

En África, Asia y Latinoamérica la biomasa representa la tercera parte del consumo energético siendo la principal fuente de energía en el ámbito doméstico. No obstante, en la mayoría de casos, esta utilización masiva no se realiza mediante un uso racional y sostenible de los recursos lo cual acarrea problemas medioambientales, como la deforestación, la desertización, erosión del suelo, la reducción de la biodiversidad, etc.

La biomasa es uno de los pilares fundamentales para alcanzar niveles aceptables de producción de energía procedente de fuentes renovables. El aprovechamiento y la mejora del uso eficiente de la biomasa conducen a la generación de empleo, beneficios medioambientales y favorece el desarrollo en zonas rurales. Se podría considerar que el uso eficaz de esta fuente de energía permitiría el avance y progreso de los países y zonas subdesarrolladas, garantizando la sostenibilidad del medio ambiente, así como, la seguridad del abastecimiento energético de nuestra sociedad.

Los elementos básicos que integran los materiales biomásicos y los productos derivados, que constituyen una fase del ciclo biológico, son fundamentalmente carbono,

oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. La energía que puede obtenerse de la biomasa no es sino una forma de la energía solar que, mediante el proceso de fotosíntesis llevado a cabo por las plantas verdes y diversos microorganismos con pigmentos fotosintéticos, ha sido captada y transformada en energía de enlace químico.

La energía almacenada de esta forma en los tejidos que forman los organismos fotosintéticos es posteriormente trasladada a los animales a través de las cadenas tróficas de los ecosistemas acumulándose en los compuestos de reserva, azúcares y grasas de los seres vivos. La energía se libera al medio ambiente por procesos de oxidación de la materia orgánica (proceso exotérmico que implica la liberación de energía) similares a los que se producen durante los procesos de descomposición de los materiales biológicos residuales o muertos, si bien, se puede producir de una manera mucho más rápida en el tiempo a través de procesos de combustión.

Generalmente, la biomasa se presenta como material sólido aunque también lo hace en forma líquida. Los recursos biomásicos, tal y como se obtienen en origen, no suelen presentar las características adecuadas para su aplicación energética directa, por lo que han de someterse a procesos intermedios de adecuación para su posterior conversión en energía aprovechable.

Los factores que condicionan el consumo y el aprovechamiento de la biomasa como fuente energética se pueden dividir en cuatro grupos:

- Disponibilidad del recurso: Es el más importante ya que hace referencia a la posibilidad de acceso al recurso y la garantía de su existencia.
- Factores geográficos: básicamente las características climáticas de la zona.
- Factores energéticos: dependiendo fundamentalmente de los precios de otros combustibles o fuentes de energía, y de las necesidades de consumo.

- Tecnología y recursos técnicos disponibles: dependen del nivel técnico y económico del país o región donde se pretende aprovechar la biomasa.

En los últimos años el panorama energético mundial ha variado notablemente. El elevado coste de los combustibles fósiles y los avances técnicos, han posibilitado la aparición de sistemas de aprovechamiento de la biomasa cada vez más eficientes, fiables y limpios. Actualmente, la biomasa como energía renovable se considera una seria alternativa a los combustibles fósiles.

En Europa, el 54% de la energía primaria de origen renovable procede de esta fuente, sin embargo sólo supone el 4% sobre el total energético. En concreto, según los datos del Observatorio Europeo de las Energías Renovables, EurObserv'ER, en 2006 la producción de energía primaria debida a la biomasa se cuantificó en 78,4 millones de toneladas equivalentes de petróleo [51], de las cuales, 5,4 Mtep corresponden a la producción de biocarburantes, 5,3 Mtep al biogás, 5,3 Mtep proceden de residuos sólidos urbanos y 62,4 Mtep es la energía primaria que resulta de la biomasa sólida. La mayoría fue destinada a usos térmicos, producción de energía eléctrica y transporte. Francia encabeza la producción, seguida por los países escandinavos, que son considerados los auténticos líderes acorde con su número de habitantes, especialmente en la producción de energía eléctrica.

Sin embargo, el ritmo actual de crecimiento de la producción con biomasa hará imposible el cumplimiento de los objetivos establecidos por la Unión Europea, que los fija en 150 Mtep para 2010. Según ese ritmo actual, en dicha fecha se alcanzarán sólo 103,7 Mtep. Además, el crecimiento en el aprovechamiento de la biomasa no es proporcional al aumento de la demanda energética.

El diagnóstico de EurObserv'ER apunta a que si los países más habitados del continente y con importantes recursos forestales, como Francia, Alemania, España e Italia, intensifican sus esfuerzos en esta materia se puede cumplir los objetivos fijados.

No hay que olvidar que la biomasa ostenta la máxima responsabilidad en el incremento del peso de las energías renovables en el futuro desarrollo europeo.

Si todas estas buenas intenciones se concretan, la contribución de la biomasa a finales del siglo XXI podría alcanzar la cuarta parte de la producción mundial de energía.

Por todo lo anterior, el aprovechamiento de la biomasa como recurso energético en la generación de energía eléctrica cobra especial relevancia en la actualidad, siendo objeto de todo tipo de análisis, estudios y aplicaciones [35, 41, 91, 92, 132]. La evaluación del potencial de la biomasa como fuente de energía es el primer paso para su explotación, sobre todo, en países que disponen de extensas superficies agrícolas y/o forestales generadoras de residuos [68, 145].

El uso de la biomasa es prioritario en regiones donde no hay otras alternativas energéticas. Su utilización requiere la realización de un análisis técnico y económico exhaustivo, para que su aplicación revierta en el desarrollo socio-económico, generación de empleo, mejora medioambiental, etc. Generalmente, la biomasa se presenta de forma dispersa, por lo que para su aprovechamiento se deben tener en cuenta costes de recogida, tratamiento y transporte.

Se han presentado en diversas publicaciones sistemas de apoyo en la toma de decisiones para el aprovechamiento energético de la biomasa, tanto agrícola como forestal [117, 118, 122, 123]. Otras herramientas propuestas son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que nos ofrecen datos como la potencialidad energética, disponibilidad del recurso, accesibilidad y otros datos significativos [65, 102, 125, 126, 130, 139]. Un SIG se define como un sistema de hardware, software y bases de datos diseñados para recoger, almacenar, actualizar, manipular, analizar y reproducir datos con referencias geográficas. Un SIG puede combinar base de datos relacionales con interpretaciones espaciales y resultados, generalmente en forma de mapas.

El tamaño y la ubicación de plantas de generación eléctrica que aprovechan la biomasa residual como combustible se puede obtener a partir de los datos disponibles en un SIG adecuado [162]. Mediante procesos de optimización iterativos se identifica la situación de la planta o plantas de aprovechamiento que se pretenden instalar, incluso definir la superficie agrícola o forestal necesaria para aportar la biomasa que demanda la planta energética. La optimización persigue minimizar los costes de producción de la energía eléctrica, dependientes directamente de los costes necesarios para la recogida, manipulación, tratamiento y transporte a planta de la biomasa residual.

España reúne condiciones adecuadas para el aprovechamiento biomásico, con diversas fuentes y tipos de biomasa, recursos, posibilidades y tecnologías apropiadas. La biomasa, su gasificación y los sistemas de generación eléctrica tienen mediante estas tecnológicas un amplio mercado potencial, además, fomentado e incentivado por las Administraciones Públicas. El mayor potencial de la biomasa está en las áreas rurales (agrícolas y forestales) lo que interviene de forma determinante en el desarrollo sostenible de estos territorios desfavorecidos.

4.2 BIOMASA

4.2.1 Definición

El concepto de biomasa ha sido definido de diferentes formas. A continuación se exponen algunas:

- El Consejo Mundial de la Energía define biomasa como la masa de materia orgánica, no fósil, de origen biológico [165].

- La Unión Europea en sus diversas directivas de fomento de las energías renovables define biomasa como la fracción biodegradable de los productos, residuos de la agricultura y ganadería, residuos forestales incluidos sus industrias, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales [37, 38].
- La definición propuesta por la Especificación Técnica Europea CEN TS 14588 [48] es la de todo material de origen biológico excluyendo la materia incluida en las formaciones geológicas y transformadas fósiles.

4.2.2 Características energéticas de la biomasa

El potencial energético de la biomasa, como el de cualquier otro combustible, se mide en función del poder calorífico del recurso, o bien, en función del poder calorífico del producto energético resultante de su tratamiento. A modo de ejemplo, la tabla 4.1 recoge el poder calorífico inferior, para distintos contenidos de humedad, de algunos de los recursos de biomasa más habituales.

Hablando en términos medios, el poder calorífico inferior (PCI) de la biomasa permite obtener aproximadamente 15000 kJ/kg (equivalente a poco más de 3500 kcal/kg y a 4 kWh/kg), el PCI del gasóleo es de 42000 kJ/kg y el de la gasolina es de aproximadamente 44.000 kJ/kg. Es decir, por cada tres kilogramos que no se aprovechan de biomasa, se desperdicia el equivalente a un kilogramo de gasolina. En la actualidad esto ocurre muy a menudo, la biomasa se elimina sin aprovechamiento por las molestias que produce y los obstáculos que ocasiona en las labores en las que se genera.

Tabla 4.1: PODER CALORÍFICO INFERIOR DE DIVERSOS PRODUCTOS

PRODUCTO	P.C.I. (kJ/kg) con humedad h%					
	h%	P.C.I.	h%	P.C.I.	h%	P.C.I.
Leñas y ramas forestales	0	19.353	20	15.006	40	10.659
Serrines y virutas	0	19.069	15	15.842	35	11.537
Orujillo de oliva	0	18.839	15	15.800	35	11.746
Cáscara de almendra	0	18.559	10	16.469	15	15.424
Cortezas coníferas	0	19.437	20	15.257	40	11.077
Cortezas frondosas	0	18.225	20	14.087	40	9.948
Poda de frutales	0	17.890	20	13.836	40	9.781
Paja de cereales	0	17.138	10	15.173	20	13.209
Vid (Sarmientos)	0	17.765	20	13.710	40	9.656
Vid (Ramilla de uva)	0	17.263	25	12.331	50	7.399
Vid (Orujo de uva)	0	18.894	25	13.543	50	8.193

4.2.3 Ventajas de la biomasa

El uso de la biomasa acarrea grandes ventajas sociales, económicas y medioambientales. Algunas ya se han comentado en la introducción de este capítulo. A continuación se detallan las ventajas más importantes:

- El dióxido de carbono emitido en el aprovechamiento energético de la biomasa es el que se ha necesitado para el crecimiento de la materia vegetal que la había generado. Por tanto, el uso de la biomasa no contribuye al incremento de CO₂ en la atmósfera y no produce efecto invernadero.
- Las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno, partículas y otras sustancias contaminantes son mínimas.

- El aprovechamiento energético de la biomasa contribuye a la diversificación energética.
- La implantación de cultivos energéticos en tierras abandonadas evita la erosión y degradación del suelo.
- El aprovechamiento de la biomasa forestal reduce el riesgo de incendios forestales y de plagas de insectos.
- Aumenta la seguridad energética y económica por la independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior.
- El aprovechamiento de algunos tipos de biomasa contribuyen a la creación de puestos de trabajo y mejora socioeconómica del medio rural.

4.2.4 Tipos de biomasa

Existen diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados como recurso energético. Atendiendo a su origen la biomasa se puede clasificar en:

1) Biomasa natural

Se produce de forma espontánea por la naturaleza sin intervención humana, por ejemplo, la biomasa que se genera por las podas naturales de los árboles. La utilización de estos recursos requiere de su adquisición y transporte hasta la planta de tratamiento, por lo que se hace imprescindible un estudio exhaustivo que garantice la viabilidad económica.

2) Biomasa residual seca

Se incluyen en este grupo los residuos generados en las actividades agrícolas y forestales, y en los procesos de transformación de la madera y las industrias

agroalimentarias. El orujillo, las podas de frutales, del olivo, el serrín, etc., son algunos ejemplos de este tipo de biomasa.

3) Biomasa residual húmeda

En este grupo se integran los vertidos biodegradables, es decir, las aguas residuales urbanas e industriales, residuos ganaderos, etc.

4) Cultivos energéticos

El único objetivo de estos cultivos es la producción de biomasa transformable en combustible. Ejemplo de cultivos energéticos son la colza, el cardo, el girasol, el miscanto, la patata, etc.

5) Biocarburantes

Realmente su origen se encuentra en la transformación de la biomasa residual húmeda (reciclado de aceites), de la biomasa residual seca rica en azúcares (trigo, maíz, etc.) o en los cultivos energéticos. No obstante, por sus especiales características y usos finales se considera en un grupo distinto a los anteriores. [124]

4.2.5 Sistemas de aprovechamiento energético de la biomasa

Existen diferentes sistemas tecnológicos para generar energía a partir de la biomasa. La elección entre uno y otro depende de las características de los recursos, cantidad disponible y del tipo de la demanda energética requerida. La mayoría de ellos son procesos mediante los cuáles se obtienen hidrógeno e hidrocarburos. Los sistemas que utilizan la biomasa residual como recurso energético se clasifican en:

◆ Sistemas basados en la combustión

Los equipos de combustión de biomasa actuales son tan eficientes, cómodos y competitivos como los que utilizan combustibles fósiles. Además, con tecnologías muy parecidas.

◆ *Sistemas basados en la gasificación:*

La acción del calor y la carencia de oxígeno producen, mediante la descomposición térmica del recurso, un gas combustible similar al gas natural u otros combustibles gaseosos convencionales. Estos sistemas se describen en el siguiente apartado.

◆ *Sistemas basados en la digestión anaerobia:*

En este proceso la materia orgánica del residuo húmedo, en ausencia de oxígeno, se degrada o descompone por la actividad de unos microorganismos, transformándose principalmente en un gas de alto contenido energético, *biogas*, cuyos componentes principales son el metano y el dióxido de carbono.

◆ *Sistemas basados en la pirólisis:*

La pirólisis se considera un proceso de combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno. Mediante este sistema de aprovechamiento se obtiene carbón, hidrocarburos e hidrógeno.

◆ *Sistemas productores de biocarburantes:*

Los biocarburantes se obtienen mediante transformaciones biológicas y físico-químicas de cultivos energéticos, especies vegetales oleaginosas (girasol, colza, etc.) y especies vegetales ricas en azúcares (trigo, maíz, caña de azúcar, remolacha, etc.). [124]

4.3 GASIFICACIÓN

La gasificación es una tecnología del siglo pasado que tuvo un desarrollo considerable antes y durante la II Guerra Mundial. Perdió importancia después de la guerra ocasionada por las ventajas y disponibilidad de los combustibles líquidos, derivados del petróleo. Es una tecnología que ha sufrido muchos altibajos a lo largo de su historia propiciados por su necesidad. En la actualidad, retoma de nuevo su

importancia por los elevados precios del petróleo, la contaminación medioambiental y los problemas que ocasionan la dependencia energética exterior.

Esta tecnología contribuye al aprovechamiento y conversión de energía descentralizada y a pequeña escala. El gas producido procede de un contenedor cilíndrico donde se producen los procesos termoquímicos a partir de la combinación de combustible y aire. Para ello, se disponen de tomas de entrada de combustible y aire y salida de los gases resultantes.

El diseño de un gasificador depende básicamente del combustible utilizado y de su destino, ya sean aplicaciones móviles (en sistemas de tracción) o estacionarias (generación de energía eléctrica). El sistema completo de gasificación consta, además del gasificador, de la unidad de purificación de los gases de salida y los quemadores.

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (biomasa) es transformado en un gas combustible de bajo poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua). Se trata de un proceso de oxidación parcial, es decir, la cantidad empleada de oxidante es inferior a la de un proceso de combustión completa. Se obtiene un gas combustible que se utiliza para la generación de energía mecánica, eléctrica o calorífica. El gas resultante a partir de la gasificación de los residuos orgánicos está compuesto por monóxido de carbono, hidrógeno, metano y otros gases inertes. Por tanto, el gas obtenido se puede utilizar como combustible en las pilas de combustible.

Se han llevado a cabo numerosos proyectos de investigación en la conversión de la biomasa, principalmente en los procesos de pirólisis, carbonización y gasificación. Se pueden encontrar numerosos trabajos recientes que desarrollan estos procesos [8, 34].

La pirólisis no es lo mismo que la gasificación [109], y se puede definir como la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno. Esta descomposición se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor. La pirólisis también aparece como paso previo a la gasificación y la combustión. Se puede considerar que comienza en torno a los 250 °C, llegando a ser prácticamente completa a los 500 °C, aproximadamente.

La elección del método para llevar a cabo el proceso de gasificación depende de varios factores como el tamaño, forma y características del residuo, el aprovechamiento de la energía del gas producido que vaya a hacerse y de las restricciones económicas. En principio, cualquier tipo de biomasa puede ser gasificada si su contenido de humedad es inferior al 35 %.

El gas producido es más versátil que la biomasa original pudiéndose utilizar con los mismos propósitos que, por ejemplo, el gas natural. Se considera un combustible relativamente libre de impurezas y, por consiguiente, emite menos contaminantes a la atmósfera en su utilización.

El aprovechamiento energético de este gas pobre se puede realizar en los siguientes sistemas: pila de combustible, turbina de gas, turbina de vapor, motor de combustión interna, generadores de calor, etc.

A continuación, se indican las cuatro fases principales de las que consta la gasificación:

- Secado, donde se vaporiza el agua que contiene la biomasa o el combustible de entrada.
- Eliminación de las sustancias químicas volátiles del combustible (“*devolatilization*”).

- Pirólisis, se realiza sin aire exterior, en esta fase la estructura molecular de la biomasa se descompone mediante una reacción exotérmica autosuficiente que genera una serie de gases compuestos ricos en carbono y una fracción sólida denominada carbón vegetal.
- Gasificación que incluye dos tipos de reacciones, de oxidación y de reducción. Durante la primera, el oxígeno reacciona con el carbono en la zona del gasificador donde el agente oxidante es introducido, produciendo CO₂. El CO₂ caliente entra en la zona de reducción donde, a través de varias reacciones en ausencia de oxígeno, se reduce, produciendo monóxido de carbono. Así mismo, otros gases son reducidos a CO y H₂.

Las principales reacciones que tienen lugar durante el proceso de la gasificación son las siguientes:



El agente gasificante puede ser tanto aire como oxígeno, aire enriquecido con oxígeno, vapor de agua o hidrógeno, de modo que se obtienen diferentes mezclas de gases que a su vez pueden tener diferentes utilidades.

El agente gasificante empleado influye en la composición del gas resultante de la gasificación. La utilización del oxígeno o vapor de agua como agente gasificante proporciona un gas de síntesis con mayor cantidad de hidrógeno que el que se obtiene

con aire. Sin embargo, el uso de aire supone la opción más económica [7, 100, 104, 119].

Los reactores o gasificadores que normalmente se utilizan para estos procesos son variados, y su elección depende de varios factores como pueden ser la granulometría del residuo, la humedad de este o la limpieza del gas requerida.

Las principales ventajas que presenta la gasificación frente a la combustión directa del recurso biomásico son el aprovechamiento versátil del residuo gasificado, en forma de calor, electricidad o como gas de síntesis, una eficiencia superior y la reducción del impacto ambiental.

Además de la gasificación se pueden distinguir otras etapas adicionales que complementan a ésta. En la figura 4.1 se esquematiza el proceso completo.

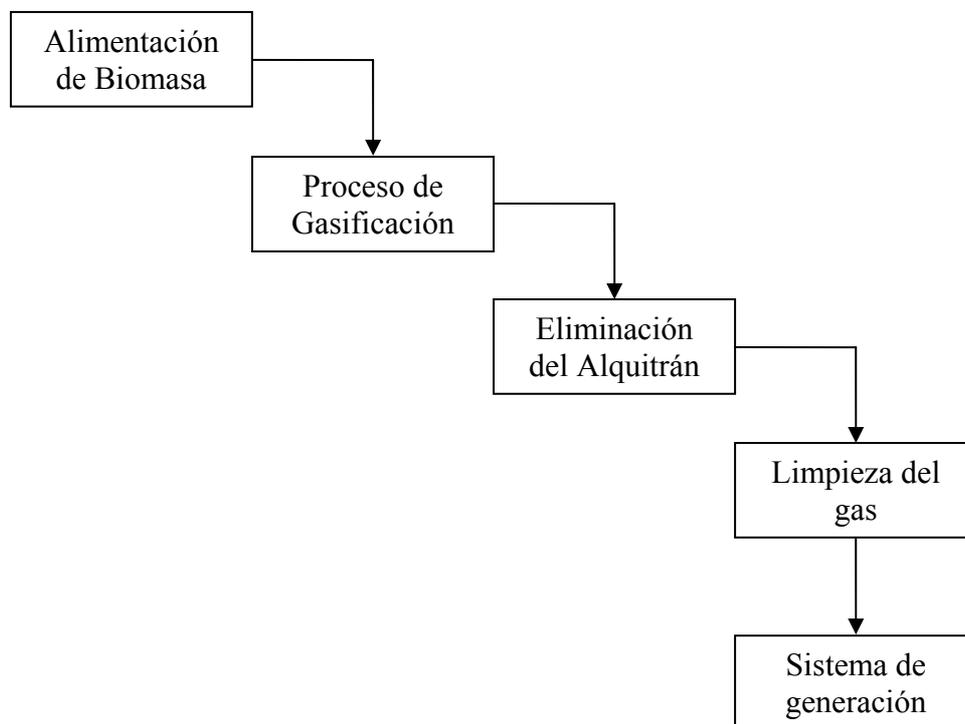


Figura 4.1: Esquema del proceso completo de la gasificación de la biomasa.

Estas etapas adicionales acondicionan el gas para su utilización en el sistema de aprovechamiento energético. La eliminación del alquitrán generado en el gasificador y la limpieza de impurezas, tales como compuestos alcalinos, partículas, compuestos con nitrógeno, carbono o azufre, son indispensables para obtener un gas aceptable para el buen funcionamiento del sistema de generación empleado (turbina de gas, motor de combustión, interna, pila de combustible, etc.)

4.3.1 Gasificadores

Existen diferentes tipos de gasificadores, su principio de funcionamiento es aplicable tanto a combustibles convencionales como para la biomasa [9]. No obstante, la capacidad de procesamiento, el tamaño del sistema de generación de energía en su conjunto, la calidad deseada del gas a obtener y el tipo y las características del recurso biomásico empleado son factores que deciden su elección. Los gasificadores que se suelen emplear en la gasificación de la biomasa son fundamentalmente los siguientes:

- Gasificadores de corriente ascendente o tiro directo.
- Gasificadores de corriente descendente o tiro invertido.
- Gasificadores de lecho fluido.

Todos los gasificadores pueden trabajar a presión atmosférica o por encima de ésta. Si bien, el tamaño se reduce cuando funcionan a presión, el gasto energético es mayor para conseguir la compresión de los gases.

4.3.1.1 Gasificadores de corriente ascendente o tiro directo

El tipo de gasificador más antiguo y sencillo es el de tiro directo o gasificador ascendente [52]. En la figura 4.2 se muestra el esquema de funcionamiento. La entrada de aire se realiza por la parte inferior y los gases producidos salen por la parte superior. Las distintas fases se suceden tal y como se observa en la figura 4.2.

Las ventajas que presenta este gasificador son la simplicidad, las bajas temperaturas de salida del gas, alta eficiencia y la posibilidad de funcionar con diversos tipos de biomasa.

Por contra, los principales inconvenientes son el riesgo de escape de oxígeno, la posibilidad de situaciones explosivas peligrosas y el alto contenido de hidrocarburos en el gas obtenido, sobre todo alquitrán, éste es arrastrado por la corriente del gas.

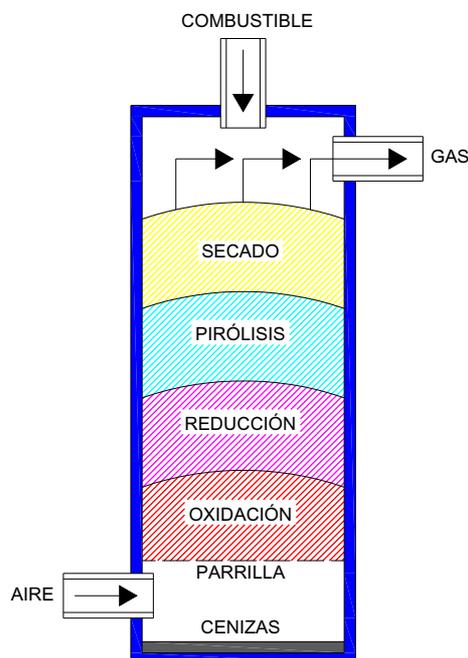


Figura 4.2: Gasificador de corriente ascendente o tiro directo.

4.3.1.2 Gasificadores de corriente descendente o tiro invertido

En los gasificadores de tiro invertido o de corriente descendente el problema del alquitrán se soluciona. El combustible y el gas se mueven en la misma dirección. El gas producido sale por la parte inferior. Su funcionamiento se muestra esquemáticamente en la figura 4.3.

Los hidrocarburos y alquitranes producidos en el proceso atraviesan un lecho incandescente de carbón vegetal transformándose en hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano, lográndose en cierta medida la descomposición de aquellos. De ahí que la principal ventaja de los gasificadores de tipo invertido radique en la posibilidad de producir un gas bajo en alquitrán [52].

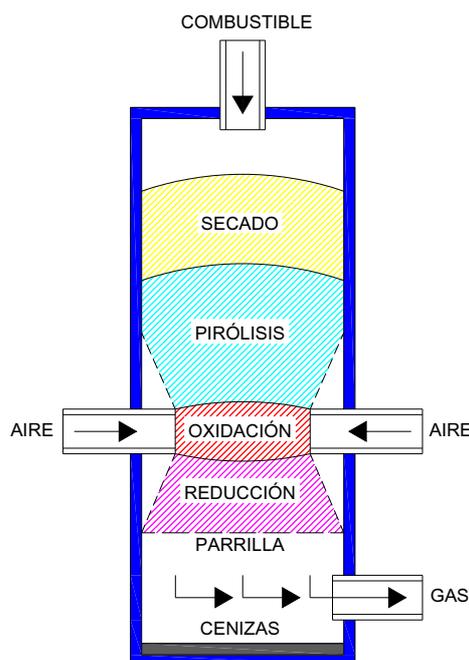


Figura 4.3: Gasificador de corriente descendente o de tiro invertido.

Los inconvenientes de estos gasificadores, comparándolos con los de tiro directo, son: una eficiencia más baja, necesitan utilizar combustibles preparados, forman más escoria, no existe intercambio interno de calor y el gas producido es más pobre. Los gasificadores de corriente descendente son apropiados en sistemas con potencias inferiores a 1 MW.

4.3.1.3 Gasificadores de lecho de fluido

El gasificador de lecho de fluido se ilustra esquemáticamente en la figura 4.4. El agente gasificante se introduce en el gasificador a través de un lecho de partículas

sólidas con el objeto de que éstas se mantengan en suspensión. El combustible se introduce por la parte inferior del gasificador, se mezcla con el lecho calentándose hasta alcanzar la temperatura del lecho. Como consecuencia, el combustible se piroliza obteniéndose una mezcla elevada en gases. En la siguiente fase se produce una nueva gasificación y reacciones para la transformación de los alquitranes producidos previamente. Se suele disponer de un ciclón que mediante su acción centrífuga separa las partículas suspendidas en el gas reduciendo el escape de alquitrán.

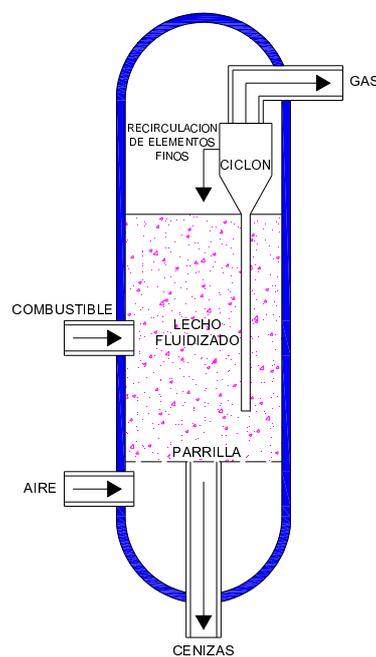


Figura 4.4: Gasificador de lecho de fluido.

En el gasificador de lecho de fluido no se producen variaciones internas de temperatura evitando la formación de productos líquidos, se obtiene un gas con pocas impurezas y con una composición de salida controlada.

La principal ventaja de los gasificadores de lecho de fluido es su capacidad de funcionamiento para diferentes tipos de biomasa aunque se puede necesitar una trituración previa del material sólido para obtener una buena fluidización.

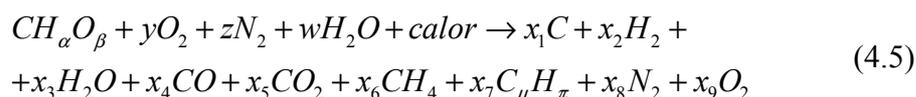
Los inconvenientes de este tipo de gasificador son la combustión incompleta del carbono y la mala respuesta a los cambios de carga, por lo que requiere disponer de adecuados equipos de regulación y control. [52]

El gasificador de lecho de fluido es el más apropiado, capacitado y reúne más ventajas para su utilización en aprovechamientos de biomasa para la generación de energía eléctrica, y sobre todo, en producción a gran escala de varios MW [100, 104, 119]. Atendiendo a la velocidad de fluidización se pueden clasificar en: gasificadores de lecho de fluido burbujeante (velocidad de fluidización en el rango de 1 a 2 m/s) y de lecho de fluido circulante (velocidad de fluidización mayor de 5 m/s).

4.3.2 Gas resultante

La composición del gas resultante del proceso de gasificación depende, fundamentalmente, del agente gasificante empleado, del tipo de residuo (en el caso de residuos agrícolas y forestales de la especie predominante de la cual se generan) y sus características de entrada en el gasificador (composición, tamaño, humedad, densidad, etc.), de la temperatura y la presión de funcionamiento del gasificador, de la velocidad de calentamiento, del tiempo de permanencia de los gases en el gasificador, etc. Finalmente, se obtiene una mezcla estable de gases formados por H₂O, H₂, CO₂, CO, CH₄, N₂, otros hidrocarburos, etc.

El proceso de la gasificación de la biomasa residual procedente de cultivos, aprovechamientos forestales o residuos madereros viene dado por la siguiente relación estequiométrica:



Donde $CH_{\alpha}O_{\beta}$ representa a la biomasa (se consideran despreciables los contenidos de cloro y azufre); y , z y w se corresponden con el número de moles de oxígeno, nitrógeno y agua; x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 , x_7 , x_8 y x_9 son el número de moles de carbono, hidrógeno, agua, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, otros hidrocarburos, nitrógeno y oxígeno, respectivamente.

El nitrógeno de salida se corresponde prácticamente con el de entrada que forma parte del aire utilizado como gasificante. El gas combustible producido que sirve para su aprovechamiento energético se compone principalmente de H_2 , CO_2 , CO y CH_4 . Las turbinas de gas, los motores de combustión interna y las pilas de combustible son los principales sistemas de generación que utilizan estos gases como combustible.

A modo de ejemplo, en la tabla 4.2 se muestran los resultados experimentales obtenidos en [59] mediante la gasificación de una serie de residuos.

Tabla 4.2: COMPOSICIÓN DEL GAS EN MOLES EN %

<i>Tipo de Residuo</i>	<i>Moles en %</i>				
	<i>H2</i>	<i>CO</i>	<i>CO2</i>	<i>CH4</i>	<i>Otros hidrocarburos</i>
Residuos del pino	24,92%	34,01%	23,79%	12,81%	4,46%
Residuos del eucalipto	15,66%	40,56%	21,65%	18,00%	4,14%
Cáscara de arroz	12,38%	34,15%	37,61%	10,96%	4,89%
Cáscara de nueces	22,87%	37,15%	22,49%	13,81%	3,68%

La temperatura de operación del gasificador (800 °C), el caudal de agente gasificante (aire), la presión, la velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia de los gases en el gasificador fueron los mismos para cada uno de los residuos empleados. Por tanto, en igualdad de condiciones de funcionamiento, la composición final del gas resultante depende exclusivamente del residuo biomásico utilizado (su

composición inicial, su procedencia, el tipo de especie vegetal predominante, en su caso, humedad, características energéticas, etc.).

4.4 RESIDUOS FORESTALES

La biomasa forestal se genera en los procesos productivos vinculados a los aprovechamientos forestales. De ella una parte se utiliza como materia prima para su transformación (madera, corcho, etc.) y otra se puede utilizar como combustible. La biomasa forestal es residual y se genera en diferentes puntos:

- 1) Residuos generados directamente en las explotaciones forestales, denominados residuos forestales.
- 2) Residuos generados en aserraderos e industrias de tableros (primera transformación).
- 3) Residuos generados en industrias de segunda transformación como la industria del mueble, carpinterías, papelerías, etc.

A los residuos de los puntos 2) y 3) se les denomina biomasa residual industrial o residuos industriales. La figura 4.5 aclara esta distinción y clasifica los distintos tipos de biomasa forestal.

Los residuos generados en la industria de aserrado, tableros, pasta y segunda transformación, son materiales generalmente de buena calidad energética, con alto poder calorífico, alta densidad y baja humedad, y además están concentrados en los puntos de producción de las diferentes empresas. No se consideran residuos forestales aunque su procedencia inicial sea el monte. Mediante un sistema de recogida y transporte bien organizado estos residuos son ampliamente utilizados, bien para la producción de energía calorífica o en plantas de generación de energía eléctrica.

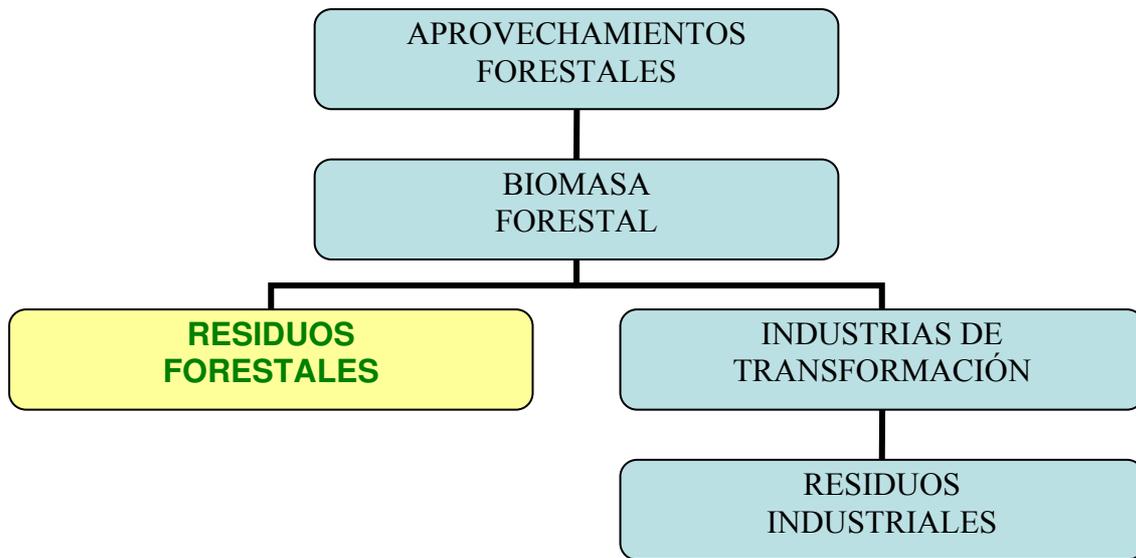


Figura 4.5: Clasificación de la biomasa forestal.

Los residuos forestales que en esta Tesis se consideran se generan en las operaciones silvícolas y aprovechamientos madereros realizados directamente en el medio forestal y no son extraídos habitualmente, por no ser convertibles en subproductos, pero que pueden ser utilizados como combustible orgánico.

Las actuaciones en las que se forman los residuos forestales se planifican previamente, siendo necesarias para la sostenibilidad del espacio forestal. Estas actuaciones o actividades forestales son:

- Los tratamientos silvícolas para mejora de las masas forestales, tales como claras, clareos, podas, selección de rebrotes, etc. [157].
- Cortas finales de pies maderables. En éstas se producen cantidad de residuos compuestos por copas, ramas, despuntes, hojas y acículas.
- Prevención de incendios. Para ellos se realiza limpieza de monte, cortafuegos, limpieza de matorrales, etc. [13].

En la tabla 4.3 se muestra los residuos generados en cada uno de las actividades forestales [49].

Tabla 4.3: RESIDUOS GENERADOS EN ACTIVIDADES FORESTALES

TIPO DE ACTIVIDAD	TIPO DE MONTE	RESIDUOS QUE GENERA
Tratamientos silvícolas - Clareos o primeras claras - desbroces de sotobosque - Podas - cortas de policía.	Estos tratamientos se realizan en montes cuyo principal aprovechamiento es la madera: pinares, hayedos, robledales	- Árboles de pequeñas dimensiones $D_n < 7$ sin interés comercial. - Árboles secos y enfermos. - Ramas de poda. - Biomasa del estrato arbustivo y de especies arbóreas secundarias.
Aprovechamientos madereros - Claras y Cortas finales	Las claras se realizan en los montes madereros densos. Las cortas finales se realizan en todos los montes arbolados madereros.	- Copas (ramas y rabeones). - Copas (ramas y rabeones) pies secos o sin interés. - Destoconado (choperas, etc).
Incendios, vendavales, nevadas y grandes plagas	Pinares, zonas de montaña	- Árboles quemados o secos sin interés comercial.
Cosecha y desbroce de matorrales - Repoblaciones. - Pastizales.	Especies invasoras heliófilas de las familias: leguminosas, ericáceas, cistáceas, etc.	- Biomasa de la parte aérea de la planta.
Otros - Prevención de incendios. - Apertura de caminos, líneas eléctricas, cortafuegos, etc.	Varios.	Varios

La intensidad con la que se generan los residuos depende fundamentalmente de:

- La especie forestal, intervalo de edad y tratamiento a realizar. Por ejemplo las claras se realizan en intervalos diferentes en una especie u otra, y además varía en función de la edad de cada planta o conjunto.

- La planificación de las intervenciones impuesta por la Administración a través de los Planes de Ordenación Forestales.

Los tratamientos hasta ahora normales y más comunes de esta biomasa residual son la quema controlada y el acordonado del material en el monte. En raras ocasiones se trituran o astillan quedándose en la mayor parte de los casos el material disperso por la zona de corta, abandonándose y, en cierta medida, favoreciendo su incorporación al suelo. En las regeneraciones artificiales se suelen realizar desbroces o trituración in situ de los residuos con el fin de facilitar las labores de plantación.

La recogida de estos residuos para su aprovechamiento supone un coste adicional aunque elimina los costes que acarrea la quema controlada de éstos que es obligatoria en la mayoría de los países, incluida España.

El abandono de los residuos forestales en el monte supone un alto impacto ambiental. El elevado volumen de biomasa sobrante tiene una lenta descomposición, permaneciendo largo tiempo en el lugar. En la época calurosa estos residuos sufren un secado aumentando la probabilidad de ser focos con alto riesgo de incendio. Además, dificulta la movilidad de la fauna existente y puede suponer la aparición de plagas [73].

Los residuos forestales nunca han sido aprovechados como fuente energética. Razones técnicas, económicas y sociales han propiciado esta inutilización. Por ello, la explotación de estos residuos requiere de la optimización de los procesos de extracción, transporte y transformación. Sin embargo, en la actualidad, para proyectos que utilicen la biomasa forestal como combustible, se hace necesario e imprescindible el apoyo institucional mediante incentivos a la inversión y primas adicionales por la generación y venta de energía eléctrica.

El aprovechamiento energético de los residuos debe de tener viabilidad técnica y económica, y ser ecológicamente sostenible, es decir, debe quedar supeditado al correcto manejo de las masas y operaciones forestales. Esto obliga a realizar trabajos

silvícolas, podas, clareos y claras, no siempre rentables económicamente. El aprovechamiento energético de los residuos forestales originados en estas labores puede rentabilizar estas tareas [161].

4.5 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE LOS RESIDUOS FORESTALES

En el aprovechamiento de la biomasa forestal residual se distinguen las siguientes fases, una vez realizados los trabajos silvícolas que dan lugar a los residuos:

- 1) Recogida y apilado del residuo forestal.
- 2) Acondicionamiento del residuo para su transporte.
- 3) Transporte y almacenamiento.

La situación de los residuos para su recolección o recogida depende básicamente del tipo o tipos de trabajos silvícolas que se han realizado (podas, claras, clareos, selección de rebrotes, limpieza, etc.) y de los medios y maquinaria que se han empleado. Asimismo, los medios de corta dependen no sólo de las labores realizadas sino también del tipo de vegetación existente, accesibilidad y pendiente del terreno. Las máquinas más utilizadas son procesadoras y motosierras manuales.

En la mayor parte de los casos los residuos quedarán extendidos de forma dispersa. Para optimizar la recogida de estos restos se hace necesaria la integración de las operaciones de recolección y concentración de los residuos [93, 107].

Para la concentración de los residuos se pueden utilizar los siguientes métodos:

◆ Con tractor autocargador.

Utilizado en montes de buena accesibilidad, baja pendiente y superficie poco abrupta. El tractor autocargador se va desplazando por la parcela para la recogida y posterior concentración de los residuos. Estos son apilados a los lados de la pista forestal en una zona de acopio o cargadero.



Figura 4.6: Autocargador recogiendo residuos forestales.

◆ Con tractor de arrastre.

Se utiliza en montes más abruptos con elevadas pendientes. La concentración de los materiales debe realizarse recurriendo a sistemas de extracción por cable. Los operarios, de forma generalmente manual, realizan la concentración de residuos atándolos al cable y arrastrándolos con el tractor hasta el lugar apropiado.



Figura 4.7: Tractor de arrastre.

◆ Con caballería.

En zonas de inaccesibilidad para las máquinas forestales, con pendientes superiores al 50 %.

◆ Manuales.

Por la acción exclusiva del hombre, en zonas especiales, como procedimiento auxiliar y complementario.

El uso de un método u otro depende fundamentalmente de las características del terreno, trabajo forestal realizado, el tipo de residuos generados y su situación posterior a las operaciones de corta.

Una vez el material está concentrado, el siguiente proceso es el del acondicionamiento del residuo para su transporte. La baja densidad aparente de la biomasa forestal residual dificulta y encarece su manipulación y transporte. Por esta razón, las tecnologías de recogida se basan en la formación de unidades de alta densidad

mediante el astillado o la comprensión de los residuos [93, 107, 148]. Se distinguen básicamente tres opciones:

1) *Astillado con astilladoras transportables.*

Las astilladoras transportables son máquinas que van montadas sobre camiones, y realizan el astillado en una posición fija en la pista forestal. Con el empleo de una grúa de pinzas se colocan los residuos en la plataforma de alimentación. A medida que se va astillando, mediante un sistema de descarga continuo las astillas se depositan en contenedores de transporte independientes, que posteriormente, son transportados con camiones adecuados a la planta de aprovechamiento energético.



Figura 4.8: Astilladora transportable.

2) *Astillado con astilladoras móviles.*

Las astilladoras móviles son tractores capaces de desplazarse por el interior de las explotaciones hasta el lugar donde se encuentran los residuos, por tanto, no es necesario el uso de tractor autocargador para una concentración previa. Se pueden

distinguir una amplia gama de modelos en el mercado. Estas astilladoras poseen un depósito propio para el almacenamiento temporal de la astilla producida. Cuando este depósito se llena se procede a su vaciado en contenedores de acopio situados en las pistas forestales, por tanto la máquina debe interrumpir el astillado y desplazarse a distancias variables hasta los contenedores cada vez que termina un ciclo. Los contenedores se cargan en camiones para su transporte hasta planta.



Figura 4.9: Astilladora móvil.

3) Empacado.

Las empacadoras de residuos forestales son máquinas que permiten la compresión, enrollado y atado de los residuos formando balas o pacas cilíndricas de dimensiones establecidas [28].

El empacado resuelve problemas logísticos que el aprovechamiento de los residuos forestales plantea. El aumento de la densidad aparente de los residuos provoca la reducción de los costes de transporte, facilita la manipulación y optimiza el almacenamiento por tiempo indefinido.

Los residuos se concentran previamente mediante tractores autocargadores o de arrastre en los laterales de la pista forestal o en el cargadero, lugares accesibles para la empacadora. La alimentación de las mismas se realiza a través de una pinza adaptada propia de la máquina que deposita los materiales en el dispositivo de compresión, donde, tras el aumento de la densidad, los materiales quedan ligados mediante una cuerda plástica, formando las pacas con forma cilíndrica.

Las pacas son dispuestas, mediante la grúa de pinzas, en pilas, a la espera de un camión de transporte convencional a planta. Antes de su aprovechamiento energético, las pacas son astilladas en astilladoras estáticas instaladas de forma permanente en la planta.



Figura 4.10: Empacadora forestal Valmet.

En cualquiera de los sistemas anteriormente mencionados, los residuos transportados a la planta de aprovechamiento se almacenan al aire libre en zona prevista para tal fin y antes de su utilización como combustible son sometidos a procesos de secado, astillado y molienda. Posteriormente, y dependiendo de la tecnología a emplear pueden ser sometidos a procesos de gasificación, combustión, etc.

Los sistemas de extracción expuestos anteriormente no son eficaces al 100 %, se producen pérdidas en la manipulación de los residuos por la variedad de formas y tamaños de éstos. Esto provoca que una gran cantidad de residuos se quede en el monte. No obstante, esto no es malo ya que los restos contribuyen con su descomposición al aporte de materia orgánica al suelo.

El tráfico y uso de maquinaria para extraer la biomasa forestal provoca la erosión y pérdida del suelo. Por ello, se han de utilizar técnicas apropiadas y minimizar los pasos de la maquinaria en pistas, calles, vías, etc.

4.6 EVALUACION DE LA BIOMASA FORESTAL RESIDUAL

4.6.1 Métodos de estimación de los residuos forestales

Para estimar la biomasa y evaluar su potencial existen dos métodos:

- *Estimación Directa:* que utiliza valores medios de peso de los residuos forestales generados en las parcelas de muestreo donde se han llevado a cabo intervenciones silvícolas de prueba. La estimación de los residuos por unidad de superficie es la suma de cada uno de los residuos producidos por los distintos tratamientos silvícolas en cada árbol del muestreo, densidad de la masa e intensidad de intervención. Finalmente, se realiza una valoración media energética.
- *Estimación Indirecta:* Consiste en la utilización de ecuaciones obtenidas de acuerdo a muestras de especies tipo y con el apoyo de los datos inventariados.

Los residuos que se generan anualmente dependen de las actuaciones que se llevan a cabo en los montes. Las operaciones de silvicultura son diferentes para cada

estado de la masa forestal. La intensidad con la que se realizan estas actuaciones se rige básicamente por el tipo de especie forestal, la edad y el tipo de tratamiento, siendo muy posible que a una planta, o en una parcela, los tratamientos se hagan en períodos de diez o veinte años [157].

Todas estas tareas o tratamientos vienen regulados por los Planes de Ordenación de los Montes en los que se definen los tipos de trabajos a realizar cada año, en que zonas o parcelas, y siempre siguiendo criterios técnicos y de sostenibilidad forestal, de acuerdo a la densidad de vegetación, tipo de especies, su edad, diámetro, etc.

Determinada la cantidad de residuos obtenidos en función de la tecnología de extracción utilizada se debe de realizar un análisis físico y químico de los residuos para obtener información sobre el poder calorífico, tamaño, humedad, calidad, etc. La disponibilidad de estos datos permite la optimización de los procesos de secado, astillado, transporte, etc.

La humedad es muy importante desde el punto de vista del aprovechamiento energético, pues es el factor que más influye en el poder calorífico de la biomasa, junto con el tipo de residuo y especie. Cuanto mayor es la humedad menor es el poder calorífico y mayor el peso del transporte. En el instante de la corta, los residuos pueden alcanzar hasta un 80 % de humedad. La biomasa va perdiendo agua en función del tiempo, condiciones ambientales y tratamientos de secado.

Para afrontar el estudio y puesta en marcha de un proyecto para el aprovechamiento energético de los residuos forestales hay que tener claro que durante la vida útil del sistema de aprovechamiento, difícilmente se repetirá la extracción de residuos en una misma parcela o zona, al menos cuando se le practique un solo tratamiento silvícola.

4.6.2 Evaluación de la biomasa residual forestal

La evaluación de la biomasa y de las opciones tecnológicas de su recogida y tratamiento se han de realizar en base a criterios técnicos, económicos y energéticos. Para la valoración del proyecto en su conjunto se ha de tener en cuenta que el potencial de biomasa se obtiene en valores medios anuales por superficie de producción. Esto no quiere decir, que todos los años se obtengan residuos en una superficie determinada.

Se pueden distinguir diferentes niveles de evaluación de la biomasa correspondiente a los residuos forestales:

1) Biomasa potencial:

La biomasa potencial es toda la biomasa teórica que se puede obtener. No se considera ningún tipo de condicionante. Depende de la densidad de la vegetación, el tipo o las especies existentes, la edad media de la vegetación, los diámetros y las alturas de ésta y de la superficie o masa forestal a tratar anualmente según la planificación y ordenación del monte.

2) Biomasa disponible:

La biomasa disponible excluye de la potencial, la biomasa que no se puede obtener por razones no técnicas: la existencia de restricciones medioambientales, la propiedad de los terrenos y la competencia del aprovechamiento forestal.

3) Biomasa utilizable:

La biomasa utilizable es la disponible excluyendo aquella que no se puede recoger y/o transportar debido a las limitaciones técnicas. Depende

fundamentalmente de la maquinaria y sistemas de extracción utilizados (para la elección de éstos se deben de realizar trabajos de campo prácticos), la pendiente y características del terreno y la accesibilidad que es directamente proporcional a la densidad de caminos y pistas forestales.

Se han llevado a cabo diversas entrevistas y consultas a expertos y técnicos en esta materia y la conclusión a la que se ha llegado es que el factor determinante es la densidad de caminos y pistas forestales que permiten tener un mayor grado de accesibilidad en la recogida y extracción de la biomasa forestal. Este factor está directamente vinculado con la pendiente y la orografía del terreno.

La densidad de caminos y de pistas forestales, es decir, los metros lineales medios por unidad de superficie forestal, determinan la superficie aprovechable o área de extracción de la cual se obtiene la biomasa utilizable. Suponiendo una distancia media a los lados del camino o pista forestal, la superficie vendría dada por el producto de los metros lineales y la distancia lateral en la que la biomasa se puede aprovechar de forma factible.

Todos estos datos son específicos para cada superficie y requieren de un profundo estudio forestal. Una vez realizado, se pueden obtener mediante medición directa utilizando herramientas SIG. En función de los factores antes mencionados, para obtener la biomasa utilizable se aplicarían coeficientes de utilización.

4.6.3 Formulación para el aprovechamiento de la biomasa utilizable

La biomasa residual potencial anual de un sistema productivo o parcela se expresa como:

$$BRP_i = \sum_j R_j \quad (4.6)$$

Donde:

- $BRP_i \equiv$ biomasa residual potencial anual obtenida en un sistema o parcela i . [toneladas / año].
- $R_j \equiv$ cantidad de residuos obtenidos de una determinada operación forestal j (clara, clareo, poda, corta, etc.) [toneladas / año].

Se tiene que tener en cuenta que las operaciones o tratamientos silvícolas se realizan para cada actividad y sistema con periodicidades variables que dependen de varios factores (recursos forestales, tipos densidad y edad de las especies, riesgos de incendios, industrias forestales, etc.) [160]. Por ello, R_j es la cantidad de residuos que se producen en una intervención forestal dividida por el número de años que transcurren para realizar de nuevo esa actividad. Y el valor de BRP_i es el correspondiente a la biomasa anual media de un espacio forestal.

La cantidad de residuos forestales potenciales que se producen también viene dada de la forma siguiente:

$$BRP_i = S_i \cdot D_i \quad (4.7)$$

Donde:

- $D_i \equiv$ densidad superficial de la biomasa residual potencial anual obtenida en un sistema o parcela i . [toneladas / km^2].
- $S_i \equiv$ superficie del sistema productivo elegido [km^2].

A efectos del aprovechamiento, la biomasa utilizable es la más importante, ya que es la que se va a usar como combustible en la planta. Viene dada por:

$$BRU_i = U_i \cdot S_i \cdot D_i = U_i \cdot \sum_j R_j \quad (4.8)$$

Donde U_i es el coeficiente de utilización o aprovechamiento que indica la relación entre la biomasa finalmente utilizable y la potencial existente en la zona de estudio o parcela i .

Como ya se ha indicado anteriormente, la biomasa residual utilizable depende de la eficiencia de los sistemas de extracción utilizados, las características y pendiente del terreno y su accesibilidad [103]. A excepción del primero, todos los demás factores están directamente relacionados con la densidad de caminos y pistas forestales. Por ello, el coeficiente U_i de un sistema determinado es función, principalmente, de la densidad de caminos, pistas y carreteras (metros lineales por unidad de superficie), superficie productiva de residuos próxima a las vías y de la eficacia y adaptabilidad de la maquinaria o sistemas de extracción elegidos.

Los costes anuales de recogida de los residuos forestales para la parcela i vienen dados por:

$$CR_i = CRu_i \cdot U_i \cdot S_i \cdot D_i \quad (4.9)$$

Donde CRu_i es el coste de recogida de residuos unitario en un sistema o parcela i [€/tonelada]. CRu_i se obtiene una vez realizado los ensayos de prueba, análisis de tiempos y costes del sistema de extracción elegido. Su valor también depende de la amortización de la maquinaria y equipamiento utilizado para la recogida de los residuos, los seguros del equipamiento, la mano de obra empleada en la recogida, acopio y manejo de la maquinaria, el mantenimiento de los equipos, las reparaciones necesarias por averías, el desgaste de los neumáticos, el consumo de combustible, el transporte de la maquinaria y equipamiento a la zona o parcela, los gastos financieros derivados de la adquisición, etc.

Los costes anuales del transporte a planta de la biomasa recogida en la parcela i vienen dados por:

$$CT_i = CTu_i \cdot U_i \cdot S_i \cdot D_i \cdot dist(p, i) \quad (4.10)$$

Donde:

- $CTu_i \equiv$ Coste de transporte unitario de la biomasa recogida en el sistema productivo o parcela i . [$\text{€} / \text{km} \cdot \text{tonelada}$].
- $dist(p, i) \equiv$ Distancia real de transporte de los residuos entre la parcela de recogida i y la parcela destino p .

CTu_i se obtiene una vez realizado los ensayos de prueba y análisis de costes para el transporte. Su valor depende además de la amortización de los vehículos de transporte de los residuos, los seguros de los vehículos, la mano de obra correspondiente al conductor y la empleada en la carga y descarga del vehículo, el mantenimiento de los vehículos, las reparaciones necesarias por averías, el desgaste de los neumáticos, el consumo de combustible, los gastos financieros derivados de la adquisición, etc.

Las ecuaciones anteriores utilizan variables que son necesarias conocer para resolver la optimización de un sistema de generación eléctrica alimentado con residuos forestales. Los parámetros que se utilizan en esta Tesis deben estar referenciados geográficamente y se obtienen de bases de datos o Sistemas de Información Geográfica realizados al efecto y que han requerido un estudio exhaustivo de las operaciones forestales, los factores geográficos, técnicos, medioambientales, las infraestructuras disponibles, accesibilidad, permisos, etc. Estos datos hacen referencia a cada una de las parcelas que componen la región de estudio y son los siguientes:

- $S_i \quad \equiv$ Superficie de la parcela i .
- Tipo de residuo generado, su composición y características energéticas, dependientes de la vegetación o especie predominante en cada una de las parcelas. Estos datos se adaptarán y precisarán de acuerdo al modelo del sistema de generación que se desarrolla en los siguientes capítulos.

- U_i \equiv Coeficiente de utilización de la parcela i . Se aplica a la biomasa potencial para obtener la biomasa utilizable.
- D_i \equiv Densidad neta de biomasa utilizable que se recoge de la parcela i .
- PCI_i \equiv Poder Calorífico Inferior de la biomasa obtenida en la parcela i .
- $dist()$ \equiv Distancias reales a través de carreteras, caminos o pistas forestales entre parcelas.
- CRu_i \equiv Coste unitario de recogida de la biomasa en la parcela i .
- Datos geográficos de la situación del trazado de las líneas eléctricas, como por ejemplo, posición de los nudos de conexión, distancias de cada parcela al punto de enganche más próximo, etc.

Por último, el proyecto de aprovechamiento energético de los residuos forestales en una región, debe estar avalado, concertado, planificado y coordinado, junto con lo establecido en los llamados Planes de Ordenación de los Montes, Inventario Forestal u otra normativa similar que regule las operaciones forestales a realizar durante un período de tiempo, la Administración y la entidad encargada de realizar tales labores forestales.