

Maquinaria para aprovechamientos energéticos forestales

Motosierras, procesadoras, astilladoras, cosechadoras y empacadoras como máquinas principales

La leña, junto con la paja de cereales, el carbón vegetal y ciertos residuos agrícolas, forestales o ganaderos, ha sido la fuente energética utilizada por la humanidad durante muchos siglos. Los avances tecnológicos desplazaron estos biocombustibles sólidos. La revolución industrial, con el carbón mineral y, posteriormente, los combustibles derivados del petróleo y los gases licuados del mismo fueron los protagonistas de los balances energéticos en los países desarrollados. Sin embargo, en los países en vías de desarrollo la paja de cereales, la leña, el carbón vegetal y otros residuos orgánicos siguen siendo la fuente de energía de millones de personas.

Francisco Marcos Martín.

Cátedra de Termodinámica y Motores. ETSI Montes de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.

Los problemas ambientales ocasionados por el cambio de lugar del carbono, que pasa de la corteza terrestre a la atmósfera en forma de CO₂, están haciendo que se cuestione un modelo energético influido por los combustibles fósiles (carbonos minerales, petróleo y gas natural). Se plantea la necesidad de buscar fuentes energéticas alternativas que no contribuyan a un posible efecto invernadero. Como señalaba Ángel Ramos, en su entrada a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (28 de abril de 1993): «El hombre tiene un quehacer, un proyecto que realizar. Cuando ejerce su capacidad de leer y de incorporar los imperativos y las exigencias de las demás realidades, el proyecto y el mismo hombre se enriquecen, porque ahí está un principio de sabiduría y un norte ético para su comportamiento». También Aguilera Peris, en la Real Academia Nacional de Medicina, afirmaba, al hablar del efecto invernadero, que: «es irresponsable ignorar una catástrofe, cuyos indicios son ya reales, y esperar que por sí misma la amenaza desaparezca (se refiere al cambio climático)... ¿No podemos encontrar una respuesta apropiada a la seriedad del problema –como la que se adoptó en Montreal para la capa de ozono–, es decir, que sin arruinarnos haga factible mitigar el desastre que se avecina, con un desarrollo sostenible, en tanto que se pone en marcha la

explotación de las energías renovables y limpias?».

El Plan de Fomento de las Energías Renovables de España (IDAE, 1999) ponía especial interés en el uso de la biomasa como fuente de energía para el año 2010, considerando especialmente el uso de la misma para generar energía eléctrica, como se observa en el **cuadro I**.

Los cultivos energéticos se presentan, según el **cuadro I**, como gran alternativa. Han sido profusamente estudiados fuera de España, destacando los trabajos de Labrecque et al. (1995 y 1998), Danfors et al. (1998), Buillard et al. (2002). Con especies leñosas, en España, sobresalen los estudios de San Miguel et al. (1992), Ciria (tesis doctoral no publicada) y Marcos et al. (2000 y 2001). Estos cultivos, además de producir energía, fijan CO₂.

En estos cuatro años transcurridos hemos observado el des-

pegue y consolidación de la energía eólica a la vez que la biomasa apenas aumentaba. Especialmente la generación de energía eléctrica con biomasa presenta los problemas siguientes:

1) Para producir energía eléctrica se requieren grandes cantidades de biomasa. Pero, cuanto menor es la potencia instalada de la central, menor es el rendimiento de la misma y, por tanto, los análisis económicos son más desfavorables. La central eléctrica de Sangüesa (Navarra), montada por la empresa navarra EHN, tiene 25 MW eléctricos de potencia y requiere para su funcionamiento 160.000 toneladas de paja seca. Ello supone negociar la compra con muchos proveedores, lo que encarece los gastos de gestión del combustible.

2) La biomasa llamada "residual" tiene otros usos aparte de ser quemada para producir energía eléctrica. Por ejemplo, la paja

CUADRO I.

PREVISIONES ENERGÉTICAS 1999-2010 POR ORIGEN Y APLICACIÓN DE LA BIOMASA. IDAE.

	tep	%
Residuos forestales (150.000 ha/a x 3 tep/ha)	450.000	7,5
Residuos agrícolas leñosos (875.000 ha x 1,5 t/ha x 0,26 tep/t)	350.000	5,83
Residuos agrícolas herbáceos (1.350.000 ha x 3,6 t/ha x 0,28 tep/t)	1.350.000	22,50
Residuos industrias forestales y agrícolas	500.000	8,33
Cultivos energéticos	3.350.000	55,84
TOTAL	6.000.000	100,00
APLICACIONES		
Térmicas	900.000	15
Eléctricas	5.100.000	85
TOTAL	6.000.000	100



Foto 1. La motosierra llega donde es capaz de llegar una persona y, por tanto, es más versátil que las procesadoras.

de cereales puede emplearse para alimento del ganado y la corteza de pino es muy utilizada en jardinería que puede pagarla a precios más altos que una central térmica.

3) Los costes de obtención de biomasa, como pueden ser los de residuos forestales de monte, son difíciles de evaluar y muy variables. Así, no es lo mismo obtener astillas en un monte llano, sin obstáculos y con abundantes vías de saca, que obtenerlas de un monte en pendiente, con abundantes obstáculos y sin apenas vías de saca. Esto hace que el inversor no tenga confianza en disponer de biocombustible a precio más o menos estable en los años que dura la vida media de la central térmica.

Uno de los problemas es la evaluación de los residuos forestales y la cuantificación de los costes de su aprovechamiento. López, Izquierdo, García, Marcos y otros (2003) y Pérez y Esteban (2004) ponen de manifiesto en sus trabajos la necesidad de empleo de herramientas informáticas y a la vez reconocen la dificultad de llevar a cabo estas cuantificaciones.

Maquinaria empleada en los aprovechamientos energéticos forestales

En el **cuadro II** se hace una clasificación de la maquinaria empleada en los aprovechamientos energéticos forestales.

Todas las máquinas del **cuadro II** se han empleado tradicionalmente en el aprovechamiento

CUADRO II.		
MAQUINARIA EMPLEADA		
	Acciones	Tipo
Motosierra	Cortar	
Procesadora	Cortar	De ruedas
	Procesar	De orugas
Astilladora	Astillar	De disco
		De tambor
Seccionadora	Seccionar	
Cosechadora-astilladora forestal	Recoger	
	Cortar	
	Astillar	
Empacadora forestal	Densificar	

de residuos forestales, excepto las cosechadoras-astilladoras forestales y las empacadoras forestales que han sido especialmente diseñadas para producir astillas con fines energéticos o con fines industriales. En este artículo no nos referiremos a la motosierra que se emplea para apear, desramar y tronzar y nos centraremos en las otras máquinas que son más específicas de los aprovechamientos energéticos forestales.

es distinto en cada tipo de máquina. Hay algunas que sólo desraman, aunque lo más normal es desramar y tronzar, es decir, cortar las ramas a dimensiones pre-determinadas. Son máquinas muy evolucionadas y que trabajan tanto sobre trenes de ruedas como sobre cadenas. Sobre ruedas hay máquinas de tres ruedas, aunque lo habitual es que lleven cuatro ruedas. El chasis puede ser rígido o articulado (Marcos, 1997).

Las procesadoras forestales

Las procesadoras forestales son máquinas que cortan (apean) los árboles y posteriormente los procesan. Son las máquinas que sustituyen a la motosierra cuando las condiciones de pendiente, resistencia del terreno y rugosidad del terreno lo permiten. La motosierra llega donde es capaz de llegar una persona y, por tanto, es más versátil que las procesadoras (**foto 1**). El procesado

Las astilladoras

El objetivo de estas máquinas es producir astillas que se pueden emplear con fines energéticos o con otros fines industriales. La obtención de astillas es un aprovechamiento forestal que se puede realizar en el monte (instalaciones móviles o semi-móviles) o en instalaciones fijas fuera del monte. Las fases de que puede constar son:

apeo, con o sin desramado, la saca del residuo, la carga de astilladora y el astillado en monte.

2. Fase de transporte, que consiste en el transporte de la astilla al centro consumidor o a la planta de almacenamiento y/o astillado.

3. Fase de planta de astillado en la que hay un astillado en planta y un movimiento y clasificación de la astilla en planta.

En el apeo se usan motosierras y procesadoras. En la fase de saca se pueden emplear trineos, skidders, autocargadores, cables teledirigidos o un cable de dirección convencional. La carga la realiza a veces la misma astilladora. El astillado en monte lo efectúa la astilladora. Por último, el transporte de la astilla se realiza en containers de muy distintos tamaños dependiendo de la pendiente, densidad de vías de saca, disponibilidad de vehículos, cantidad de astilla y distancia de transporte. El astillado en planta (que en muchos casos no aparece) se realiza con astilladoras fijas similares a las empleadas en fábricas de elaboración de la madera. El movimiento de la astilla en planta suele realizarse con tornillos sinfín o con cintas transportadoras de goma. La clasificación de la astilla en planta se realiza con cribas de distintas luces. El astillado en planta lo realizan las empresas de pasta de papel, las empresas fabricantes de tableros (de partículas y de fibra) y los aserraderos que astillan sus residuos y después venden las astillas a las fábricas de pasta o de tableros.

Los equipos utilizados para la obtención de astillas son diferentes si el aprovechamiento se refiere a troncos completos de gran diámetro, a residuos y troncos de pequeño diámetro o si se refiere a una plantación energética formada por troncos de pequeño diámetro e hileras. En primer lugar, nos vamos a referir a los utilizados en el caso de residuos.

Las astilladoras pueden clasificarse según el mecanismo astillador, la forma de transporte de

la máquina, la forma de alimentación del material, la forma de accionamiento o la forma de salida de la astilla (Marcos, 1997) (**cuadro III**).

En cuanto al mecanismo de astillado, éste puede ser de disco o de tambor. Ambos mecanismos se utilizan en las astilladoras móviles de campo, siendo más frecuente observar astilladoras de disco. El astillado de tambor consta de un tambor en el que van incrustadas tres o cuatro cuchillas cortantes (**figura 1**). Al girar el tambor, giran las cuchillas y se obtienen las astillas. Como el tambor es más pesado que el disco, este sistema de astillado se prefiere en instalaciones fijas, ya que en astilladoras móviles supone transportar un peso mayor.

El astillado de disco consiste en un disco al que van unidas mediante tornillos dos, tres o cuatro cuchillas. El tronco incide generalmente de forma perpendicular u oblicua al disco; éste gira y al girar arrastra a las cuchillas que cortan el residuo produciendo las astillas. Si la astilla no es del tamaño deseado, no pasa por la criba y vuelve a ser cortada por la cuchilla.

Son astilladoras de instalación fija las que se utilizan en las plantas de astillado para obtener (en la mayor parte de los casos) astillas que se destinarán a la producción de tableros de partículas o a la producción de pasta celulosa.

CUADRO III.	
CLASIFICACIÓN DE LAS ASTILLADORAS	
Por el mecanismo astillador	De disco; De tambor.
Por la forma de transporte	Colgadas; Arrastradas; Automotrices.
Por la forma de alimentación	Autocargables; Carga manual.
Por la forma de accionamiento	Con motor propio: Motor térmico; Motor eléctrico.
Por la forma de salida de la astilla	A la toma de fuerza. Por gravedad; Forzada.

lósica. De este tipo de máquinas no nos ocuparemos en el presente artículo.

Las astilladoras móviles son las conocidas como "astilladora clásica" (**foto 2**). Los principales datos técnicos de una astilladora móvil muy usada en España son:

- Capacidad de astillado : 30-70 m³/hora.
- Potencia de motor Diesel: 130-180 kW.
- Apertura de boca de alimentación: Ancho: 560 mm-680 mm. Alto: 420 mm-530 mm.
- Capacidad del contenedor: 15-

20 m³.

- Peso aproximado del equipo: 7.000 kg.

Un ejemplo de astilladora móvil montada sobre camión es aquél en el que la toma de fuerza para los mecanismos propios de la astilladora (disco astillado, grúa de carga y sistema de alimentación) es totalmente independiente del sistema motriz del camión.

Sin embargo, las astilladoras móviles más utilizadas son las de tipo arrastrado. Un tractor agrícola de 45 a 74 kW es el que anima

el disco astillado de estas máquinas (su diámetro oscila entre 800 y 1.100 mm). El número de cuchillas por disco es dos, tres o cuatro. La astilladora de la **foto 3** tiene una boca de entrada por disco de 290 x 250 mm con una producción de astillas de 25 m³/h y un peso aproximado de 1.800 kg. Estos datos concretos nos dan una idea aproximada de este tipo de astilladoras. Cuando la boca de alimentación

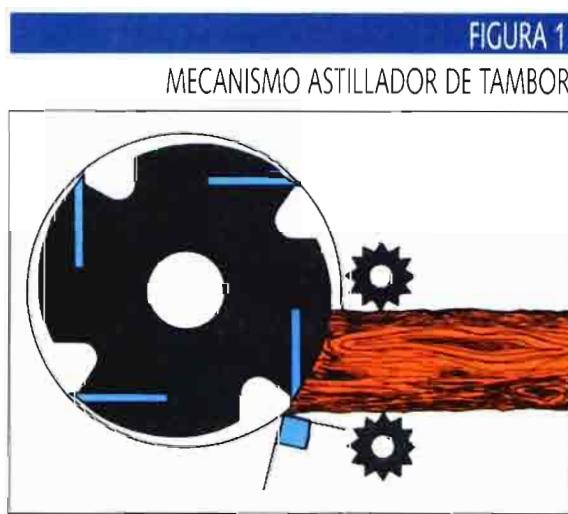


Foto 2. Planta de astillado móvil.

es pequeña, se ha observado (en la provincia de Ciudad Real) que se cambia dicha boca por otra de mayores dimensiones que permiten aprovechar mejor el funcionamiento de la máquina evitando tiempos muertos en el astillado.

En ciertos casos se emplean modelos menos pesados (7.000 kg), pero también de menor producción (15 m³/h). Estas astilladoras van montadas en la parte trasera de un tractor agrícola de 40 a 60 CV (30 a 45 kW aproximadamente); la boca de alimentación es de 290 x 250 mm y el sistema de astillado, similar al de las de mayor tamaño.

Sistemas de alimentación de la astilladora

La alimentación de las astilladoras puede ser manual o mecánica. La alimentación manual presenta la ventaja de requerir bajos costes de inversión (pues no se necesita ninguna grúa) pero puede resultar, a medio o largo plazo, más cara. De todos modos, debe pensarse que a veces se ha justificado el astillado con fines energéticos como una actividad para dar empleo a mano de obra barata, con lo que se ha preferido utilizar astilladoras de alimentación manual.

La alimentación mecánica suele realizarse con una pluma o grúa. Presenta el inconveniente de la inversión inicial y las ventajas de la rapidez, rendimiento y menor mano de obra. Otro inconveniente es que exige una correcta planificación en el aprovechamiento y que el residuo esté perfectamente amontonado para evitar los tiempos muertos de desplazamiento de la grúa. La empresa Vaersa (en la Comunidad Valenciana) emplea este tipo de sistema de alimentación cuando se utilizan grandes máquinas.

Para facilitar la alimentación al sistema astillado, es usual observar en algunas astilladoras dos rodillos rugosos o dentados. Estos rodillos no siempre son metálicos; en algunas ocasiones son dos ruedas o rodillos de

goma. En cuanto a la salida de la astilla, ésta puede ser por gravedad o por un ventilador. La salida por gravedad es más económica, pero no puede dirigirse. La salida por ventilador consume más potencia, pero se puede dirigir el destino final de la astilla, lo cual puede ser necesario en ciertos casos.

El control del tamaño de la astilla se efectúa mediante una criba metálica cuadrada. La astilla tiene tres dimensiones: largo, ancho y grosor. El grosor se controla principalmente mediante la separación de la cuchilla con el disco o con el tambor. El largo y ancho de la astilla son controlados por la situación de la cuchilla respecto al disco o tambor y la luz de la criba. El largo de la astilla siempre será igual o menor a la mayor dimensión de la luz de la criba (que es la diagonal de la misma); normalmente, el largo de la astilla es menor que la luz de la criba.

Hasta el momento nos hemos ceñido a modelos clásicos de astilladoras móviles. Existen otros conceptos diferentes de máquinas astilladoras-cosechadoras que fueron especialmente diseñadas en los últimos años. El primer modelo al que haremos referencia es el modelo español denominado B3 y fabricado por la desaparecida empresa Biomasa SA. Esta cosechadora-astilladora trabajó en los montes de Navarra y Soria (Lubia). Fue denominada "Máquina agrícola impulsada por tractor, recogedora-astilladora". La máquina va colocada delante del tractor, con lo que recuerda en cierto modo a una cosechadora agrícola de cereales.

El residuo es sacado e hilado (puesto en línea o hilera) y la máquina lo recoge y astilla, cargándolo en un depósito que va situado detrás del tractor agrícola. Los datos más reseñables de esta máquina son los siguientes:

- Longitud total de trabajo: 1.830 mm.
- Longitud total en circulación: 1.830 mm.
- Anchura total en trabajo: 2.220 mm.

- Anchura total en circulación: 2.220 mm.
- Altura total en trabajo: 1.500 mm.
- Altura total en circulación: 1.500 mm.
- 2 ruedas delanteras locas, de apoyo.
- Peso mínimo en vacío: 2.000 kg.
- Potencia del vehículo portante: tractor de 120 CV.
- Velocidad máxima admisible: 25 kg /hora.
- Toma de fuerza principal: seis estriás a 1.000 rpm.

Matson y Winsauer estudiaron un método de aprovechamiento energético de recursos forestales en Tomahawk (Wisconsin). El proceso ensayado por los americanos, en esencia utiliza tres máquinas: una siller-buncher (cosechadora) para cortar, un autocargador para la saca y una astilladora autocargable montada sobre camión que carga la astilla en otro camión equipado con una "gran caja" para el transporte. Debido a que la astilla es de muy baja densidad, se pueden transportar grandes volúmenes con poco peso y por esto llamamos "gran caja" al elemento de transporte colocado en el camión.

Este método es muy eficiente en montes llanos y en plantaciones energéticas, con cortas a hecho. Estas dos circunstancias aparecen en escasos montes españoles. Sin embargo, la solución es útil en el hipotético caso de plantaciones con especies de crecimiento rápido en terrenos agrícolas abandonados y que puedan ser regados.

Otro modelo interesante, entre los citados por diversos autores, es el presentado en Inglaterra que empleaba una cosechadora situada delante del tractor agrícola de 70 CV (52 kW) que recuerda al modelo B3 español. La velocidad de trabajo es de 4 km/hora, su peso en vacío de 1.900 kg y únicamente recoge biomasa (no astilla), formando



Foto 3. Astilladora móvil.

no pueden entrar en terrenos poco resistentes.

La densidad de vías de saca (medida en metros lineales de vía de saca por hectárea) también condiciona de forma importante los aprovechamientos forestales y la elección del tipo de astilladora más idóneo.

Pero no son las astilladoras las únicas máquinas que pueden ser utilizadas para obtener combustibles a partir de la madera. Existe una gran familia de máquinas que reciben nombres muy variados (descuartizadoras, picadoras) y que lo que hacen es seccionar los troncos en trozos más pequeños, pero estos trozos son mayores que las astillas.

El modelo más sencillo es el de una cuña rompedora que se coloca en la parte trasera de un tractor agrícola y que se hinca en los troncos rompiéndolos por la penetración de la cuña en su centro. En otros casos es una plataforma sobre la que se coloca el tronco (suele ser el tocón) y que lo acerca contra una reja afilada que lo rasga en dos mitades.

Hay otros modelos más sofisticados, como el de la máquina picadora que secciona, corta y apila. Se presenta en dos versiones: la primera requiere un tractor de 15 kW, produciendo 3 m³/hora y admitiendo un diámetro máximo de la madera a cortar de 135 mm; la segunda es mayor, pues requiere un tractor de 25 kW, produciendo 4 m³/hora y admitiendo madera de hasta 185 mm. La máquina se acciona desde la toma de fuerza del tractor. El sistema de corte consta de dos partes: un disco con cuchillas para cortar el tronco según un plano perpendicular al eje y unas hachas para picar el tronco. La madera picada recuerda a la clásica leña y cada día es más solicitada en los chalets de las poblaciones periféricas a los grandes núcleos urbanos.

manojos de 300 kg. Los rendimientos han sido bastante altos (0,25 ha/hora).

El primer factor a tener en cuenta es si la superficie a aprovechar será una plantación energética o se aprovecharán únicamente los residuos. Si es una plantación energética, la corta es a hecho y debe recurrirse a sistemas muy mecanizados similares a los indicados como "modelos más modernos" en este artículo. Si, como es más habitual, se trata de un aprovechamiento de residuos (podas, clareos, claras, restos finales de una corta), se recurre a astilladoras móviles arrastradas o suspendidas.

El segundo factor a tener en cuenta es la pendiente del terreno, que condiciona el método de saca y la maquinaria empleada en la misma. Con bajas pendientes el autocargador es la máquina ideal, con pendientes más pronunciadas debe recurrirse al skidder.

Otros dos factores propios del terreno, como la rugosidad medida por el número y tamaño de obstáculos que se encuentra la máquina en su movimiento y la resistencia del suelo, también condicionan el tipo de máquina a emplear: máquinas muy pesadas



FIGURA 2.



FIGURA 3.



FIGURA 4.

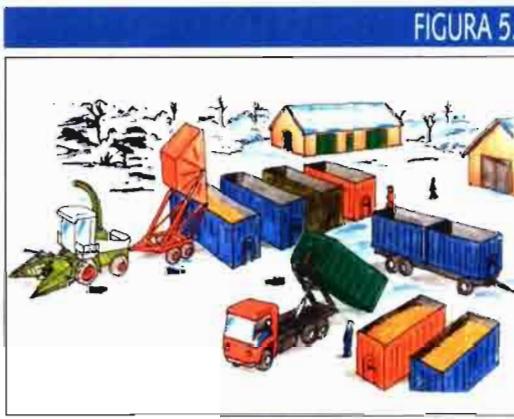


FIGURA 5.

Para hacernos una idea de las relaciones peso/potencia/capacidad de estas máquinas, presentamos el **cuadro IV**, referido a varios modelos de la casa Vermeer. La capacidad es el diámetro máximo del árbol astillado. La capacidad medida en t/h es muy variable, pues depende de varios factores, como son:

- Humedad de la biomasa a astillar.
- La homogeneidad de tamaño.
- La habilidad del operario.

Por este motivo no se facilita ese dato.

Las cosechadoras-astilladoras forestales

La misión de este tipo de máquinas, cada día más utilizadas, es cortar o recoger y astillar.

Empezaremos hablando de las máquinas empleadas para recoger y astillar. Destaca el modelo denominado B4. Esta máquina, situada por delante de un tractor agrícola, recoge el residuo, que previamente ha sido apilado. A continuación tritura esta

biomasa y la envía, astillada, a un contenedor que se sitúa detrás del tractor.

Hay cosechadoras-astilladoras especialmente diseñadas para los cultivos energéticos leñosos. Se utilizan sobre todo con chopos, como las que aparecen en propuestas de Marcos, Izquierdo et al. (2001b), o de sauces propuestas por Danfors, Ledin et al. (1998) y Tharakan, Volk, Abrahamson et al. (2003). Pero también podría ser empleada con otras especies leñosas que se planten a turnos muy cortos (menos de cinco años). En las **figuras**

2, 3 y 4 se pueden observar estas máquinas, que bien cargan en el tractor agrícola (**figura 2**) o cargan las astillas en contenedores (**figuras 3 y 4**). Estos contenedores se cargan posteriormente en trailers de camión (**figura 5**).

Las ventajas de emplear chopos o sauces (ambas salicáceas) son:

1.- Tanto sauces como chopos son especies de crecimiento rápido, produciendo mucha biomasa en dos, tres o cuatro años.

2.- La madera de sauce y chopo es una madera blanda, con lo que la energía que se invierte en

cortarla es baja.

3.- La madera de sauce y chopo tiene muy bajos contenidos en azufre, nitrógeno y cloro, por lo que su combustión es limpia.

La primera máquina que queremos señalar es la de la casa Claas. Esta cosechadora se emplea tanto para la cosecha de maíz como para la cosecha de varas o tronquitos de chopo y sauce. Es el modelo Jaguar. El cabezal cortador que se emplea al cosechar chopos o sauces es distinto del empleado para cosechar maíz.

Las empacadoras forestales

La densidad de la biomasa forestal es baja, por lo que es conveniente su compactado (Marcos, 1994) para poder disminuir los costes de transporte. El valor de la densidad depende mucho de la humedad. Datos de Gómez Moya, Gracia López y Puelles Casenave señalan 200-300 kg/m³. El compactado se puede hacer en fábrica, obteniéndose los pellets y briquetas, que llegan a tener densidades superiores a 850 kg/m³ (Camps y Marcos, 2002). Pero el compactado también puede realizarse en campo y nos vamos a ocupar a continuación de las máquinas que lo realizan.

En el mercado español se han presentado algunos modelos de empacadoras forestales que están siendo estudiadas. Su rentabilidad es variable pues, como ocurre con las astilladoras, depende mucho de las condiciones del terreno (pendiente, resistencia del terreno, rugosidad del terreno), de la cantidad de vías de saca y de residuos a aprovechar por hectárea y de la ramosidad de estos residuos y su tamaño y distribución de tamaños.

Las pacas formadas suelen ser de forma cilíndrica, recordando a las pacas cilíndricas de paja, aunque también hay máquinas que lo único que hacen en transportar los residuos con una gran grapa sin llegar a compactarlos. ■

CUADRO IV.
RELACIÓN PESO/POTENCIA/CAPACIDAD DE DISTINTOS MODELOS DE PICADORAS

Modelo	Peso, kg	Potencia, kW	Capacidad, cm	Sistema
BC625	780	15-19	15	Disco dos cuchillas
BC935	1.660	26-37	23	
BC1000	1.910	66	25	Tambor dos cuchillas
BC1230A	2.567	63-101	30	Disco cuatro cuchillas
BC1250A	2.873	63-84	30	
BC1600A	2.068	63-94	15	Tambor cuatro cuchillas
BC1800A	3.193-3.393	82-127	46	
BC2000	5.715	149	51	