

ESTUDIO DE PELETS DE PAJA DE CEREALES PARA GENERAR CALOR EN USOS DOMÉSTICOS

Francisco Marcos Martín. Iván Relova Delgado (*).

Ensayos: Julián Ramonell Habanades.

Fotografías: Francisco Marcos Martín y Carlos Martín Palancar.

Cátedra de Termodinámica y Motores.

ETSI Montes de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.

fmarcos@montes.upm.es

* Universidad de Pinar del Río. Departamento de Producción Forestal. Cuba.

PALABRAS CLAVE: Pélet, paja, cereales.

Oh bosques y espesuras,
plantadas por la mano del Amado,
oh, prado de verduras,
de flores esmaltado,
decid si por vosotros ha pasado.
(San Juan de la Cruz, cántico espiritual)

INTRODUCCIÓN.

La paja de cereales, junto con la leña y el carbón vegetal, ha sido la fuente energética utilizada por la humanidad durante muchos siglos (Camps y Marcos, 2002). Los avances tecnológicos desplazaron estos biocombustibles sólidos y, 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.



Figura 1. Paja de cebada, brillando al Sol de la meseta castellana en la provincia de Salamanca, el 21 de febrero de 2004. Tras una nevada, el cielo, limpio siempre, está más limpio, si cabe aún, y la paja, fríbil y alargada resplandece como esmalte aúero, precioso.

Por otro lado, 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 influenciado por los combustibles fósiles (carbones minerales, petróleo y gas natural). Aparece entonces, con más fuerza cada día, la necesidad de buscar fuentes energéticas primarias que no contribuyan a un posible efecto invernadero, cuyas consecuencias pueden ser muy perniciosas para todos. No sólo a escala local sino también a escala global. Como señalaba D. Angel Ramos, en su entrada a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (28 de abril de 1993), la solidaridad y la prudencia deben ser la base de un comportamiento ético en los albores del siglo XXI, y añadía:

"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 hay está un principio de sabiduría y un norte ético para su comportamiento...." Y antes afirmaba: "Sin la Conservación, sin la consideración cuidadosa, respetuosa, solidaria, de las realidades naturales, incluidas las humanas, el desarrollo no será verdadero progreso".

Hace poco, el 13 de mayo de 2003, ingresaba D. José Aguilar Peris en la Real Academia Nacional de Medicina. Tan insigne maestro de termodinámicos (su libro de texto, probablemente, es el libro de texto de Termodinámica más leído en español) tituló el discurso de su ingreso en la Academia: "El efecto invernadero, el cambio climático, la crisis medioambiental y el futuro de la tierra" y en este discurso no duda en señalar "... es grave e 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 la tabla siguiente.

Previsiones energéticas 1999-2010 por origen y aplicación de la biomasa. IDAE.		
Producción	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 0,26tep/t)	350.000	5,83
Residuos agrícolas herbáceos (1.350.000ha x3,6t/ha x0,28tep/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

Los cultivos energéticos se presentan, según la tabla anterior, como gran alternativa. Han sido profusamente estudiados fuera de España, destacando los trabajos de Fosters (1992), Labrecque y otros (1995 y 1998), Danfors y otros (1998), Bullard y otros (2002), Tharakan y

otros (2003). En España sobresalen los estudios de San Miguel y otros (1992), Fernández (1997), Ciria (tesis doctoral no publicada) y Marcos y otros (2000 y 2001b). Estos cultivos además de producir energía fijan CO₂ (Fernández, 1997).

Sin embargo, en estos cuatro años transcurridos hemos observado el despegue y consolidación de la energía eólica a la vez que la biomasa apenas aumentaba.

Los problemas de generación de energía eléctrica con biomasa han sido estudiados en trabajos anteriores (Marcos, 1998) y apenas hay variación a los reseñados en ese año. Entre ellos destacan:

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 de Sangüesa (Navarra), montada por 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, si lo comparamos con una central térmica de carbón, fuel-oil o gas natural.

2) La biomasa tiene otros usos aparte de ser quemada para producir energía eléctrica. Por ejemplo, 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. No es lo mismo obtener astillas en un monte llano, sin obstáculos y con abundantes vías de saca que obtenerlos de un monte en pendiente, con abundantes obstáculos y sin apenas vías de saca. Ello hace que el inversor no tenga confianza en disponer de combustible a precio más o menos estable en los años que dura la vida media de la central térmica.

¿POR QUÉ LOS PELETS DE PAJA DE CEREALES?

Cuando Doña Remedios nos animó a presentar una comunicación en las III Jornadas Abulenses de Energías Renovables pensamos en varios temas, pues no en vano ya llevamos trabajando con estas energías algunos años. Al final y, llevados por conversaciones anteriores mantenidas con D. Luis García Benedicto, del IDAE (Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía), que ha realizado últimamente varios viajes a Europa, y con D. Jesús Fernández, el "padre" de la biomasa en España, maestro de todos los que después intentamos hacer algo en este tema, la decisión fue estudiar la fabricación de pelets de paja de cereales.

Además, en nuestro laboratorio de los Biocombustibles de la Cátedra de Termodinámica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (Universidad Politécnica de Madrid) disponemos de paja de cereales en abundancia. Procede de un trabajo realizado para el IDAE hace ya dos años y que sirvió, gracias a la colaboración de AENOR (Asociación Española para la Normalización) y de CONFEMADERA (Confederación Nacional de Asociaciones de Fabricantes de utensilios de Madera), para promover el Comité Español de Normalización de Biocombustibles Sólidos. También aquí disponemos de los utensilios que posteriormente señalaremos en el apartado de materiales y métodos y que nos permitían fabricar pelets en laboratorio.

Los pelets son un biocombustible sólido densificado de forma cilíndrica y diámetro menor de 2,5 cm (Marcos, 2002). Su tamaño es menor que el de la briqueta (Marcos, 1994), que además no siempre tiene forma cilíndrica. En su uso como combustibles, los pelets presentan las siguientes

ventajas:

1.- Por tener menor tamaño que las briquetas su movimiento puede controlarse de forma electrónica (Marcos, 2001b). De tal manera que existen en el mercado sistemas totalmente automatizados de alimentación de hogares tanto para uso doméstico (una vivienda) como para los llamados "district-heating", es decir, calefacciones centralizadas. Es muy abundante la literatura europea que corrobora esta afirmación, para ello basta que el lector entre en la página web del IDAE (www.idae.es) y busque el programa europeo Bioheat, donde encontrará suficientes referencias bibliográficas de este tema.

2.- Frente a la paja de cereales empacada, leñas, astillas y carbón vegetal, los pelets (al igual que las briquetas) ocupan menos espacio en el transporte y en almacenaje pues su densidad es, como mínimo dos veces mayor. Aunque frente al carbón vegetal su poder calorífico superior anhidro es inferior (en J/kg).

Actualmente, en Castilla y León y como puede observarse en las dos fotografías adjuntas, la paja de cereales se recoge en pacas prismáticas (de aproximadamente 80 cm x 80 cm x 130 cm) o pacas cilíndricas (de aproximadamente 1,0 a 1,4 m de diámetro y 130 cm de longitud) o incluso mayores tamaños. Su densidad anhidra no supera los 0,4 kg/dm³. Sin embargo, los pelets de paja que han sido estudiados a continuación se ha procurado que tengan una densidad superior a 1,0 kg/dm³.



Figura 2. Paca prismática. Su densidad es menor que la de los pelets.



Figura 3. Paja cilíndrica. Su densidad es menor que la de los pelets.

3.- La utilización de paja de cereales residual, puede evitar incendios agrícolas o forestales provocados con la quema de rastrojos.

4.- La recogida de paja, su transporte, almacenaje y posterior modificación para la obtención de pelets crea trabajo en zonas rurales y mantiene una independencia energética; evitando el uso de otros combustibles derivados del petróleo o el gas natural.

Sin embargo también los pelets de paja presentan dos graves inconvenientes:

1.- La paja es un producto estacional, hay años en los que es abundante y otros en los que se dispone en menores cantidades. Ello es un problema a la hora de realizar cálculos econométricos de viabilidad de inversiones (VAN, TIR y pay-back). A pesar de ello, consideramos como un excelente trabajo el llevado a cabo por la empresa EHN en Sangüesa (Navarra), con su central térmica de paja que consume 160.000 t al año y con una potencia instalada de 25 MW eléctricos. Cuando pensamos en los pelets pensamos en un uso más doméstico, más sencillo, más cercano, como puede ser la producción de agua caliente para viviendas unifamiliares o para pequeños centros públicos (escuelas de municipios pequeños o de países en desarrollo, centros culturales en países en desarrollo, ayuntamientos, iglesias, pequeñas industrias, pequeñas comunidades de vecinos, "district-heating",...)

2.- La paja tiene unos usos "muy nobles" como son los relacionados con el sector alimenticio que no deben abandonarse y que son más importantes, en muchos casos, que los energéticos. Es decir, la paja es un alimento para el ganado y también se usa como cama de ganado. En este segundo uso, la paja una vez que se ha mezclado con los orines y excrementos del ganado y, por tanto, ha mejorado su contenido en N se ha usado como un abono o "compost" de muy buena calidad. Aún está en nuestros ojos la imagen del labrador-ganadero castellano retirando de la cuadra de vacas la basura, para después cargarla en el carro de mulas, después en el remolque y esparcirla en la tierra sembrada de trigo, cebada, avena, garbanzos, lentejas, ... En esta línea de trabajo, las cenizas que se obtienen al quemar los pelets pueden ser añadidas como abono en terrenos cultivables o en parques y jardines públicos o privados.

MATERIALES Y MÉTODOS

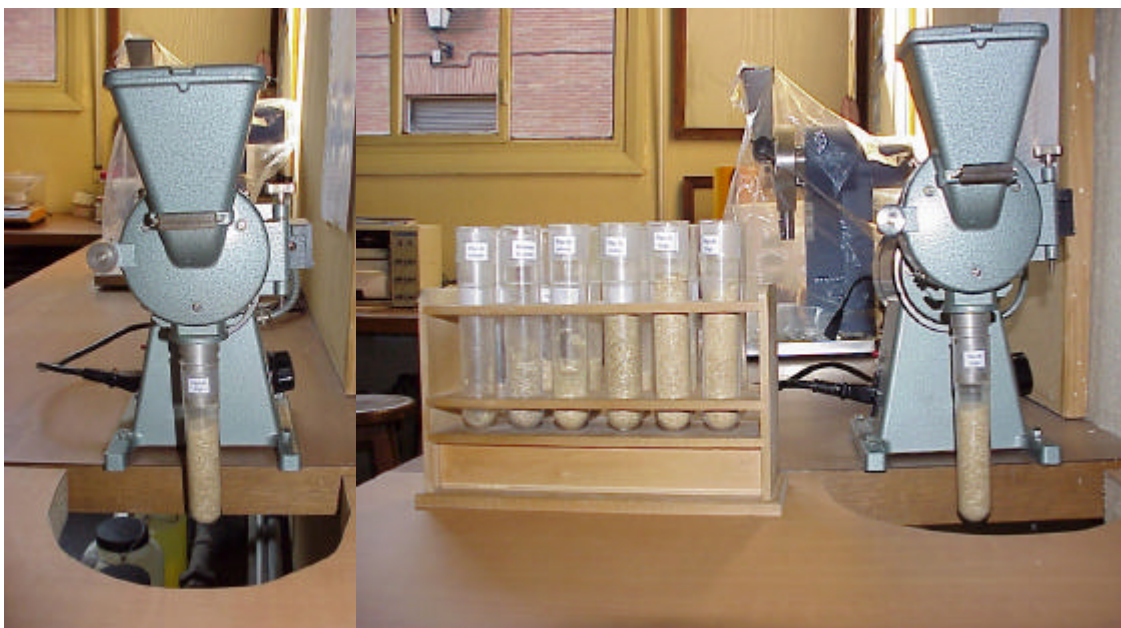
La materia prima para elaborar los pelets ha sido paja de trigo, cebada y avena procedente de Sangüesa (Navarra). Fue recogida para su caracterización energética por Fausto Gómez de Agüera Gallarzo y Francisco Marcos Martín.



Figura 3. Paja de cebada en el laboratorio para su posterior transformación en pélet.

A continuación se fabricaron pelets siguiendo la metodología siguiente:

1.- Se trituro la paja de cereales en un martillo eléctrico, que dispone de una criba con perforaciones de diámetro 3 mm. Con ello se homogeneizó el tamaño de la paja y se facilitó el proceso de peletizado,



Figuras 5 y 6. Martillo de criba de 3 mm utilizado en el laboratorio para preparar la materia prima (paja de cereales) antes de ser peletizada. En la fotografía de la derecha se observan las probetas

llenas de paja ya triturada.

2.- Se elaboraron pelets, de aproximadamente 1 gramo de masa (valores entre 0,8 gr y 2,0 gr), utilizando una prensa manual como la de la figura. El diámetro de los pelets es de 1,21 cm y su longitud variable, entre 1,50 cm y 1,66 cm (medidos con un calibre).



Figuras 6 y 7. Prensa manual utilizada en el laboratorio para fabricar pelets de paja de cereales. Pelets de paja de cebada, preparados para su posterior ensayo.

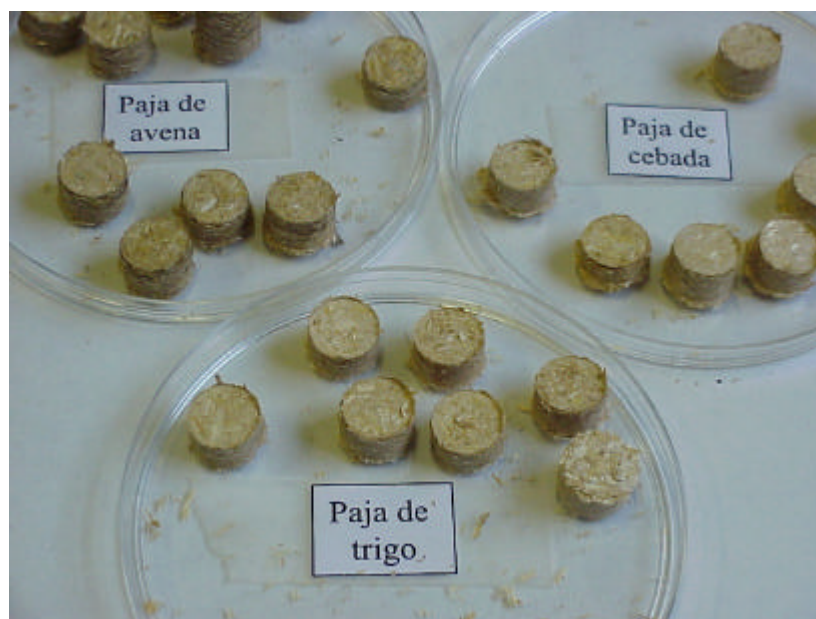


Figura 8. Pelets de paja de cereales, obtenidos con la metodología reseñada en el texto.

Supondremos que la calidad del pélet:

1.- Aumenta con su poder calorífico superior anhidro. Es decir, a igualdad de masa y humedad (0%), cuanto mayor es la energía desprendida en la combustión mejor es el pelet.

2.- Aumenta con su densidad. Es decir, cuanto más denso es un pelet los costes de transporte y almacenamiento son menores.

3.- Disminuye con su contenido en materia mineral. Es decir, cuanto más materia mineral tenga el pelet su combustión producirá más cenizas que habrá que retirar. Este dato será comentado con más detalle posteriormente.

4.- Disminuye con su humedad. Como ocurre con todos los biocombustibles sólidos.

5.- Disminuye con su friabilidad. Según la Real Academia un material es friable "cuando se desmenuza fácilmente" Es decir, cuando más friables es un pelet peor será su calidad.

Con estas premisas, se define el índice de calidad energética del pelet (Marcos, o.c), que se utilizará para comparar los tres tipos de pelets fabricados (de paja de trigo, de cebada y de avena) y se propone emplear la fórmula siguiente:

$$ICP_M = (K_1 \cdot PCS_0 + K_2 \cdot D + K_3 \cdot (1-M)) / ((1-H_h) \cdot FR)$$

El ICP_M es adimensional. A mayor valor, mejor es el pélet. Donde:

- $K_1 = 1/4.500$, en kg/kcal. En kg/MJ su valor es 1/18,810.

PCS_0 es el poder calorífico superior anhidro, en kcal/kg

- $K_2 = 1$, en dm^3/kg .

D es la densidad, en kg/dm^3

- $K_3 = 1$, adimensional.

M es el tanto por uno en materia mineral.

- H_h es a humedad en base húmeda, adimensional, en tanto por uno.

- FR es la friabilidad, adimensional, en tanto por uno medida como: $FR = N_f / N_i$, donde N_f y N_i son, respectivamente el número de pelets al final y al inicio del ensayo, dejando caer los pelets desde una altura de un metro en el mismo suelo en todos los casos a ensayar.

Si un pélet tiene PCS_0 de 4.500 kcal/kg, una densidad de $1 kg/dm^3$ y su contenido en materia mineral es 0 y su humedad es 0, siendo su friabilidad 1, entonces el índice de calidad toma el valor 3. Cuanto mayor sea la calidad de un pelet, mayor será el valor de su índice de calidad. Los pelets de madera existentes en la actualidad en el mercado español tienen valores cercanos a 3.

La metodología empleada para obtener los valores de las 5 variables antes citadas ha sido:

Variable	Metodología	
PCS ₀	Ensayos en laboratorio en bomba calorimétrica adiabática Comprobación con los datos de la página web www.ecn.nl/phyllis	
Densidad	Ensayos de laboratorio, precisión en la pesada 0,001 gr	
Materia mineral	Paja de trigo	Registros números 972, 1028, 1903, 1304 y 2248 de la página web www.ecn.nl/phyllis y comprobación con la publicación : "Straw quality for its combustion in a strw-fire power plant" (Biomass & Bioenergy 21 (2001): 249-258)
	Paja de cebada	Registros números 432, 1094, 1096 y 1131 de la página web www.ecn.nl/phyllis y comprobación con la publicación : "Straw quality for its combustion in a strw-fire power plant" (Biomass & Bioenergy 21 (2001): 249-258)
	Paja de avena	Registro número 2275 de la página web www.ecn.nl/phyllis y comprobación
Humedad	Ensayos de laboratorio, precisión en la pesada 0,001 gr	
Friabilidad	Ensayos de laboratorio	

Para comparar la calidad de estos pelets de paja con otro tipo de pelets, se determinó también el índice de calidad de dos pelets de madera, y se calculó el valor medio de los mismos.



Figura 9. Medición de la densidad: medición con calibre de 0,01 cm de precisión del diámetro del pélet.



Figura 10. Medición del poder calorífico. Preparación de probeta para ser introducida en bomba calorimétrica adiabática IKA C-4000 y obtener su poder calorífico superior.

RESULTADOS

Los resultados de los ensayos realizados se recogen en la tabla siguiente.

En esta misma tabla también aparecen los datos referidos a los pelets de madera, de los que se ha tomado su valor medio.

		Paja de cereales				Madera
Variable	Unidad	Trigo	Cebada	Avena	Medio	Medio
PCS ₀	kcal/kg	4.867	4.752	4.506	4.708	4.732
Densidad	kg/dm ³	1,095	1,051	1,079	1,075	1,075
Materia mineral	% 1	0,077	0,050	0,050	0,045	0,035
Humedad	% 1	0,078	0,047	0,054	0,060	0,060
Friabilidad	% 1	1,352	1,259	1,759	1,457	1,06
ICP _M	Adimensional	2,492	2,548	1,822	2,287	2,751
ICP _M relativo(*)	Adimensional	1,368	1,398	1,000	-----	-----

(*) Se toma como referencia el ICP_M de la avena.

Como se observa en la tabla el mejor índice de calidad lo presentan los pelets de cebada (2,548), los de avena son los de peor calidad (1,759), debido fundamentalmente a que su friabilidad es baja. Los pelets de paja de trigo presentan un índice de calidad ligeramente inferior al de los

pelets de paja de cebada (2,492).

Además, los pelets de paja, como esperábamos, presentan un índice de calidad más bajo que los pelets de madera; ello es debido a que su friabilidad es menor. Este resultado era esperado ya que las especies de madera de coníferas tienen resina que en el proceso de peletización actúa como aglomerante. Por otro lado, las especies de madera de frondosas tienen, en algunos casos, gomas y mucílagos que también actúan como aglomerantes.

Para mejorar el índice de calidad de paja de cereales se propone añadir un aglomerante no contaminante (harina de trigo duro o harina de trigo blando entre un 2% y un 5% en masa seca, ligeramente humedecida para facilitar la acción compactadora) o aumentar la presión de la prensa peletizadora.

CONCLUSIONES

1.- El mejor índice de calidad lo presentan los pelets de cebada (2,548), los de avena son los de peor calidad (1,759).

2.- Los pelets de paja de trigo presentan un índice de calidad ligeramente inferior al de los pelets de paja de cebada (2,492).

3.- Debido a su friabilidad, los pelets de paja, presentan un índice de calidad más bajo que los pelets de madera. Esto se puede mejorar mediante el añadido de un aglomerante no contaminante.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Peris J. 2003. *El efecto invernadero, el cambio climático, la crisis ambiental y el futuro de la tierra*. Real Academia Nacional de Medicina.

Bullard M.J., Mustill S.J., McMillan S.D., Nixon P.M.I, Carver P., Britt C.P. Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp. -1. Yield response in two morphologically diverse varieties. *Biomass and Bioenergy*. 2002; 2002; 22:15-25.

Camps M., Marcos F. 2002. *Los biocombustibles*. Madrid: Mundi-Prensa.

Danfors B, Ledin S., Rosenqvist H. 1998. Short rotation willow coppice. Growers manual. Swedish National Energy Administration - European Commission DG XVII and DG XII. Suecia.

Fernández González J. 1997. *La biomasa como energía alternativa para reducir el CO₂ atmosférico*. En Homenaje a D. Angel Ramos Fernández. ETSI de Montes. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Academia de Ingeniería. pág. 1265-1286. Madrid.

Fernández González J. 2000. *Posibilidades de producción de biomasa en España con cardo (Cynara cardunculus L.)* ALTENER Ministerio de Ciencia y Tecnología. IDAE. Madrid.

Fernández González J. 2003. *Biomasa. Energías Renovables para todos*. Energías Renovables - Iberdrola. Madrid.

Hernández Allica J, Mitre A.J. y otros. 2001. *Straw quality for its combustion in a straw-fire power plant*. Biomass & Bioenergy 21 (2001): 249-258.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía .2000. *Plan de Fomento de las Energías Renovables en España*. IDAE - Ministerio de Industria. Madrid. 2000.

Labrecque M., Teodorescu, T.I. and Daigle S. 1998. *Early performance and nutrition of two willow in short-rotation intensive culture fertilized with wastewater sludge and impact in soil characteristics*. Journal Forest Research. 1998; 28:1621-1635.

Marcos Martín F. 1994. *Pelets y briquetas*. Rev. AITIM. 171:54-62. Madrid.

Marcos Martín F. y otros. 1998. *Xiloenergética: conceptos básicos y limitaciones*. En: Energía de la biomasa. Universidad de Córdoba. Córdoba.

Marcos Martín F. 2001a. *Biocombustibles sólidos de origen forestal*. Ed. AENOR. Madrid.

Marcos Martín F., Izquierdo Osado I., García Robredo F. et al. 2001b. *Ordenación de talleres de chopo F214 a turnos muy cortos con fines energéticos*. I Congreso Nacional de Agroingeniería. Valencia.

Ramos Fernández A. 1993. *¿Por qué la conservación de la naturaleza?* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

San Miguel Ayanz A. y Montoya J.M. 1984. *Resultado de los cinco primeros años de producción de talleres de chopo en rotación corta (2-5 años) en Aranjuez*. Inst. Nac. de Inv. Agrarias. Madrid.

Tharakan P.J., Volk T.A., Abrahamson L.P., White E.H. 2003. *Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age*. Biomass and Bioenergy 25:571-580.

Página web www.ecn.nl/phyllis

AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación es el fruto de algunos años de trabajo: más de diez. Y en esos diez años han sido muchas las personas que han colaborado, gracias a todas ellas. Pero sobre todo ha sido la respuesta a Doña Remedios, que vive en Navalunga (Ávila), a Don Francisco del Río Fernández (que es un entusiasta doctor, médico de familia de verdad, amante del espermatozoide humano), a Don José María Ardoy Carrillo y Don Adolfo García Garikotxea (los padres y responsables de la Agencia Provincial de la Energía de Ávila). Ellos cuatro ocuparán, ya para siempre, una parcelita de nuestro corazón por su entusiasmo, su sinceridad, su calidad humana, su capacidad de acogida y el cariño que nos demostraron en esas tan familiares como acogedoras III Jornadas Abulensas de Energías Renovables. Gracias a ellos y a la revista Era Solar por difundir nuestras investigaciones. A nuestros alumnos de la clase de 3º de Industrias Forestales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid) que ayudaron a fabricar pelets y con los que realizamos los cálculos finales.