

FRANCISCO MARCOS MARTÍN, JOAQUÍN SOLANA GUTIÉRREZ, EDER FALCÓN ROQUE, BERNARDO LATORRE MONTEAGUDO  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MONTES. UNIV. POLITÉCNICA DE MADRID

## Sistema híbrido termosolar–biomasa para generar energía eléctrica

Este artículo presenta el estudio de un sistema híbrido (solar–biocombustible sólido) para generar energía eléctrica. Es un sistema basado en energía solar termoeléctrica con almacenamiento en sales y biocombustible sólido procedente de cultivos energéticos forestales o leñosos de chopo, sauce, eucalipto o paulownia, en el centro-sur de España.

Las energías renovables (solar, eólica, hidráulica, geotérmica, energía de la biomasa, energía de las mareas, de las olas,...) se utilizan cada vez más en todo el mundo. Se usan para diversificar la oferta energética, obtener energía autóctona, generar trabajo en las zonas donde se consumen y para disminuir las emisiones de gases que forman el efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>.

Sin embargo, algunas de ellas, como la energía eólica, solar, hidráulica y geotérmica, son difíciles de almacenar. Por ello se precisa la utilización de los biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos que son posibles de ser almacenados. Los biocombustibles líquidos y gaseosos se obtienen

de biocombustibles sólidos y éstos pueden proceder de 1) biomasa herbácea o leñosa cultivada, 2) residuos de las industrias forestales, las industrias agroalimentarias, los residuos de los cultivos agrícolas, 3) residuos de los cultivos forestales y 4) la fracción leñosa de los residuos sólidos urbanos (RSU).

### Cultivos energéticos forestales o leñosos

Entre los estudios con cultivos energéticos forestales destacan los trabajos pioneros realizados en Estados Unidos por Stokes (1986)<sup>[1]</sup> y Harstough<sup>[2]</sup>. Este usó plantaciones de chopos (1992), eucaliptos (1999), pino ponderosa y otros pinos (1997)<sup>[2]</sup>. En la

Siracuse University of New York Abrahamson et al.<sup>[3]</sup>, Volk et al.<sup>[4]</sup> y Tharakan et al.<sup>[5]</sup> emplearon sauces y chopos, con densidades de 15.000 pies/ha hasta 18.500 pies/ha, y turnos de 3 años. Así plantaron 30 clones de sauce procedentes de Yugoslavia, Canadá, USA y Japón y 7 de chopo, con los que estudiaron la silvicultura, los impactos ambientales<sup>[3]</sup>, la composición química<sup>[4]</sup>, las técnicas de cosecha y el ciclo de nutrientes<sup>[6]</sup>. Las estaquillas de 25 cm fueron plantadas con una densidad aproximada de 18.500 plantas/ha. Entre 1995 y 1997, Labrecque et al.,<sup>[7]</sup> estudiaron en Canadá el uso de lodos de depuradora en cultivos de sauce y chopo con resultados esperanzadores. Estos autores utilizaron 12 clones de sauce y chopo con una densidad de 18.000 pies/ha, sin fertilización y con riego; obteniendo en 4 años, una producción de 72 ton ms/(ha-4 años), correspondiente 18 ton ms/(ha-año).

En Suecia Danfors et al.(1998)<sup>[8]</sup> estudian los aspectos selvícolas de los cultivos de sauce a turnos cortos. Los sauces también han sido estudiados por Wagenmakers (1991)<sup>[9]</sup>, Hansen (1991)<sup>[10]</sup>, Willebrand et al. (1992)<sup>[11]</sup>, Foster (1992)<sup>[12]</sup> y Bullard et

TABLA 1. TECNOLOGÍAS TERMOSOLARES Y HORAS EQUIVALENTES DE PRODUCCIÓN [23]

Tecnología	Horas equivalentes de producción
Cilindro parabólico sin almacenamiento	2.855
Cilindro parabólico con almacenamiento de 9 horas	4.000
Cilindro parabólico con almacenamiento de 7 horas	3.950
Cilindro parabólico con almacenamiento de 4 horas	3.450
Torre con vapor saturado	2.750
Torre con sales de almacenamiento	6.450
Fresnel	2.450
Stirling	2.350

al. (2002)<sup>[13]</sup> con plantaciones en East Anglia y Warwickshire (UK).

En España los pioneros en cultivos energéticos forestales fueron San Miguel et al.<sup>[14]</sup>, Marcos et al.<sup>[15,16,17]</sup>, Fernández<sup>[18]</sup> y Ciria Ciria<sup>[19]</sup> con chopos. Más tarde Iriarte<sup>[20]</sup> estudia el uso de olmos y Latorre et al.<sup>[21,22]</sup> el género paulownia. También dentro del programa marco de investigación "On-Cultivos" se están estudiando chopos y paulownias, en este programa participan más de un veintena de investigadores del INIA, CIEMAT, Universidad Politécnica de Madrid y diferentes empresas.

## Los sistemas híbridos de potencia eléctrica

Los sistemas híbridos para generar energía eléctrica utilizan dos o más fuentes de energía. Actualmente presentan un especial interés los sistemas híbridos que utilizan energías renovables. Una de estas energías es la energía solar termoeléctrica, que presenta un gran potencial en climas mediterráneos pero una difícil distribución debido a su irregularidad diaria y horaria, como se observa en la siguiente tabla<sup>[23]</sup>. La ausencia de producción nocturna hace aconsejable que se hibride con otra energía renovable que pueda manejarse a fin de atenuar las fluctuaciones temporales. El tipo de energía renovable que se complementa óptimamente con la energía termosolar es la energía eléctrica producida por la combustión de biocombustibles sólidos.

En las dos figuras siguientes se observa lo que es un sistema híbrido para generar energía eléctrica utilizando energía solar y un sistema de almacenamiento de ener-

## Los biocombustibles líquidos y gaseosos se obtienen de biocombustibles sólidos y éstos pueden proceder de 1) biomasa herbácea o leñosa cultivada, 2) residuos de las industrias forestales, las industrias agroalimenticias, los residuos de los cultivos agrícolas, 3) residuos de los cultivos forestales y 4) la fracción leñosa de los residuos sólidos urbanos (RSU)

gía. En la primera figura la potencia que se genera en todas las horas del día (y todos los días del año) es menor que la potencia nominal máxima del sistema solar. Parte de la energía eléctrica obtenida con el sistema solar es almacenada en sales y se utilizará después. Sin embargo, en la segunda figura la potencia que se genera durante todo el día (y todos los días del año) es la potencia nominal máxima del sistema solar.

### Sistema de híbrido: termosolar-biomasa

El cultivo de biomasa forestal se hibrida con una central solar termoeléctrica de 50

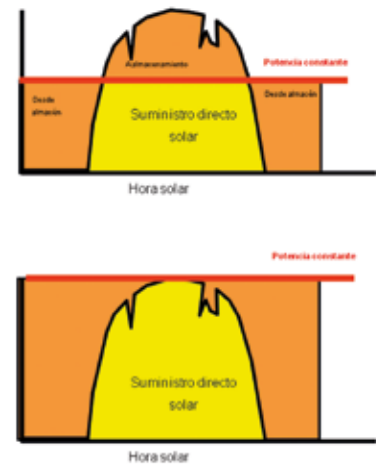


Figura 1. Hibridación parcial e hibridación total.

MWe (MegaWattios eléctricos). La hibridación es semi-total. Se supone que en el sistema termosolar se emplean sales fundidas para almacenar el calor solar cuando se oculta el sol. En el estudio se han considerado 10 alternativas de radiación solar (horas de sol) combinadas con dos alternativas de acumulación de energía en sales fundidas que atenúan las oscilaciones del sistema solar: "sales 1" que almacena en sales 2.400 horas al año y "sales 2" que



Fotografía n°1. Cultivo energético de chopo I-214 de dos años en Cabrerizos (Salamanca).

TABLA 2. RESULTADOS PARA EL SISTEMA SALES 1.

N	Sistema Solar + Sales			Tiempo Horas	Masa tn, h=25%	Biomasa para sales		
	Horas					Superficie Ha	Radio Calculado y radio real	
	Solar	Sales 1	Sales 2					
1	2.800	2.400	2.442	3.560	194.668	9.733	5.566	22.265
2	2.900	2.400	2.458	3.460	189.200	9.460	5.487	21.950
3	3.100	2.400	2.458	3.260	178.264	8.913	5.326	21.306
4	3.200	2.400	2.473	3.160	172.796	8.640	5.244	20.977
5	3.250	2.400	2.475	3.110	170.062	8.503	5.203	20.810
6	3.300	2.400	2.478	3.060	167.327	8.366	5.161	20.642
7	3.350	2.400	2.477	3.010	164.593	8.230	5.118	20.473
8	3.400	2.400	2.480	2.960	161.859	8.093	5.075	20.302
9	3.450	2.400	2.482	2.910	159.125	7.956	5.032	20.130
10	3.500	2.400	2.485	2.860	156.391	7.820	4.989	19.956

TABLA 3. RESULTADOS PARA EL SISTEMA SALES 2

N	Sistema Solar + Sales			Biomasa para sales				
	Horas			Tiempo Horas	Masa tn, h=25%	Superficie Ha	Radio Calculado y radio real	
	Solar	Sales 1	Sales 2					
1	2.800	2.400	2.442	3.518	192.372	9.619	5.533	22.133
2	2.900	2.400	2.458	3.402	186.029	9.301	5.441	21.765
3	3.100	2.400	2.458	3.202	175.092	8.755	5.279	21.116
4	3.200	2.400	2.473	3.087	168.804	8.440	5.183	20.733
5	3.250	2.400	2.475	3.035	165.960	8.298	5.139	20.558
6	3.300	2.400	2.478	2.982	163.062	8.153	5.094	20.377
7	3.350	2.400	2.477	2.933	160.383	8.019	5.052	20.209
8	3.400	2.400	2.480	2.880	157.485	7.874	5.006	20.026
9	3.450	2.400	2.482	2.828	154.641	7.732	4.961	19.844
10	3.500	2.400	2.485	2.775	151.743	7.587	4.914	19.657

almacena en sales entre 2.442 y 2.485 horas al año). La biomasa considerada tiene un PCI anhidro de 4500 kcal/kg, el cultivo se realiza en la zona Sur de España, recolectándose en Castilla-La Mancha y en Extremadura.

Entendemos por "radio real", el radio que es 4 veces el radio obtenido en la superficie necesaria, pues se supone que entre los cultivos forestales hay espacios ocupados por otros cultivos agrícolas y por otros usos urbanos o industriales.

## Resultados y conclusiones

En las tablas siguientes se presentan los resultados de la simulación realizada. En la misma aparece la superficie necesaria, el radio teórico y el radio real (i.e., el radio teórico multiplicado por 4), de un cultivo energético de paulownia o de chopo, con el mostrado en la fotografía nº 1. Se utiliza el radio real pues se supone que sólo 1/16 del territorio se destina a cultivo energético, los otros 15/16 se dedican a otros usos: cultivos, usos urbanos, unos industriales,

carreteras y caminos, producción de energía termoeléctrica, etc...

Los resultados se presentan en función de las horas de sol que aprovecha el sistema termoeléctrico y de los dos supuestos de almacenamiento de sales fundidas antes citados.

El gráfico siguiente presenta la superficie de cultivo forestal necesaria frente a las horas de sol para la simulación con acumulación en sales "Sales1", es decir, las sales almacenan energía durante 2.400 horas al año. A mayor insolación y más horas de almacenamiento en sales, como era de esperar, menor es la masa de cultivos forestales necesaria y, por tanto, la superficie. Sin embargo, un mayor almacenamiento en sales puede suponer mayores costes de inversión ◀

## Bibliografía citada

- [1] Stokes, B.J., Frederick, D.J., Curtin, D.T., 1986. Field trials of a short rotation biomass feller buncher and selected harvesting systems. *Biomass* 11:185-204.
- [2] Hartsough, B.R., Drews, E.S., McNeel, J.F., Durston, T.A., Stokes, J.B., 1997. Comparison of mechanized systems for thinning ponderosa pine and mixed conifer stands. *Forest Products Journal*, 47(11/12):59-68.
- [3] Abrahamson, L.P., Robison, D.J., Volk, T.A., White, E.H., Neuhauser, E.F., Benjamin, W.H., Peterson, J.M., 1998. Sustainability and environmental issues associated with willow bioenergy development in New York (U.S.A.). *Biomass and Bioenergy* 15:17-22.
- [4] Volk, T.A., Abrahamson, L.P., Nowak, C.A., Smart, L.B., Tharakan, P.J., White, E.H., 2006. The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. *Biomass and Bioenergy* 30: 715-727.
- [5] Tharakan P.J., Volk T.A., Abrahamson L.P., White, E.H., 2003. Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones and harvest age. *Biomass and Bioenergy*, 25:571-580.
- [6] Adegbiidi, H.G., Biggs, R.D., Volk, T.A., White, E.H., Abrahamson, L.P., 2003. Effect of organic amendments and slow-release nitrogen fertilizer on willow biomass production and soil chemical characteristics. *Biomass and Bioenergy*, 25(4):389-98.
- [7] Labrecque, M., Teodorescu, T.I., Daigle, S., 1995. Effects of wastewater sludge on growth and heavy metal bioaccumulation in two *Salix* species. A biological purification system. *Plant and Soil*, 171(2):303-316.
- [8] Danfors, B., Ledin, S., and Rosenqvist, H. 1998. Short-Rotation Willow Coppice Growers' Manual. Swedish Institute of Agricultural Engineering, Uppsala, Sweden.
- [9] Wagenmakers, P., 1991. The future is square. Intensifying searching for an optimum cultural technique. *Fuiteelt-den-Haag*, 81:17-19.
- [10] Hansen, E.A., 1991. Poplar woody biomass yields: a look to the future. *Biomass and Bioenergy*, 1(1):1-7.
- [11] Willebrand, E., Ledin, S., Verwijst, T., 1993. Willow coppice systems in short rotation forestry; the influence of plant spacing and rotation length on the sustainability of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 4(5):323-331.
- [12] Foster, C., 1992. Wood fuel production from short rotation coppice. *Vegetation management in forestry, amenity and conservation areas. Aspects of applied biology* 29:233-239.
- [13] Bullard, M.J., Mustill, S.J., McMillan, S.D., Nixon, P.M.I., Carver, P., Britt, C.P., 2002. 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 Bioenergy* 22:15-25.
- [14] San Miguel, A., San Miguel, J., Sabas Yagüe, S., 1992. Talleres de chopo a turno corto. Décimo Novena Sesión de la Comisión Internacional sobre el Álamo. Zaragoza.
- [15] Marcos Martín, F., 1985. Cultivos energéticos forestales. V Conferencia sobre Planificación, Ahorro y Alternativas Energéticas. Zaragoza.
- [16] Marcos Martín F., Izquierdo Osado I., Jesús Ruiz Castellano. 2000. Cultivos energéticos de chopos. *Revista Forestal Española*, 26:4-14.
- [17] Marcos Martín F., Inés Izquierdo Osado. 2005. Sostenibilidad de los cultivos energéticos leñosos. *Revista Energética XXI*, 45:22-24.
- [18] Fernández, J., 1980. La agricultura como productora de energía. *Ingeniería Química*, Noviembre, 23-32.
- [19] Ciria Ciria, P., 1998. Efecto del turno de corta y de la densidad de plantación sobre la productividad de diversos clones de chopo en condiciones de corta rotación. Tesis doctoral. ETSI de Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.
- [20] Iriarte Cerdán, L., 2008. Caracterización del Olmo de Siberia (*Ulmus pumila* L.) como cultivo energético. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- [21] Latorre Montgeagudo, B., Marcos Martín, F., Pascual Castaño, C., Izquierdo Osado, I., 2009. Cultivos energéticos de Paulownia. *Revista Agricultura*. 2009.
- [22] Latorre Montgeagudo, B., Marcos Martín, F., Solana Gutiérrez, J., Pascual Castaño, C., Izquierdo Osado, I., 2011. Energy feedstock characteristics of Paulownia sp. in Spain. *Aspects of Applied Biology*, 112:257-262.
- [23] Torres Rodríguez, M.R., 2011. ¿Operar una planta termosolar... ciencia o arte? *Revista Energética XXI*, 111:82-24.



Figura 2. Relación entre superficie de cultivos forestales (eje vertical) y las horas de sol anuales (eje horizontal).