

INFORMACIÓN TECNOLÓGICA

Ciclo energético integral del sector oleícola en la provincia de Jaén (España)

Full text available at core.ac.uk

Universidad de Jaén. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera.
Campus Las Lagunillas, s/n. 23071 Jaén. Telf. 953212367 Fax 953212870. E-mail: fcruz@ujaen.es

RESUMEN

Ciclo energético integral del sector oleícola en la provincia de Jaén

El orujo es el residuo sólido de la obtención del aceite de oliva por métodos físicos, generalmente por decantación centrífuga, de composición variable: 2 a 5% de aceite y 62 a 70% de humedad. El aceite residual del subproducto, seco previamente, se extrae con disolventes.

El residuo sólido de la extracción se denomina "orujo", compuesto por hueso, piel y pulpa, usándose principalmente como combustible, producción de formicas, carbón activo, abono orgánico, alimentación ganadera, etc.

La principal aplicación presenta diversos problemas, por cambios en los procesos de obtención de los aceites en los últimos años, perdiendo calidad el aceite residual y los subproductos.

Aunque existen diversos sistemas para resolver estos problemas, se presentan nuevas soluciones, mostrando sus ventajas económicas y medioambientales, frente a las existentes. Todo se enmarca en el entorno socioeconómico de la provincia de Jaén (España), mostrando datos energéticos y económicos de los procesos, incluso su influencia positiva y viabilidad.

PALABRAS-CLAVE: Ahorro energético - Co-generación - Sector oleícola.

SUMMARY

Integral energy cycle for the olive oil sector in the province of Jaén

Olive oil solid residue, "orujo", results from the extraction of olive oil through physical processes. With a variable composition, it is mainly used as a raw material to extract the residual oil that remains in the solid cake, prior to drying. The resulting solid is called "orujo", and has been mainly used as a solid fuel. Its use as a solid fuel presents some problems due to the changes in olive oil production methods which have resulted in lower quality residual olive oils and by-products. This paper presents the advantages and disadvantages of the current systems, in an attempt to solve those problems. Furthermore, this research presents new solutions compared to the existing ones from economic and environmental points of view. All these solutions are set within the socio-economic framework of the province of Jaén, in Spain.

KEY-WORDS: Co-generation - Energy savings - Olive oil sector.

1. INTRODUCCIÓN

Jaén es la provincia con mayor producción de aceite de oliva de España, y su economía depende fundamentalmente de este producto. De ahí la importancia de la eliminación de residuos, originados a partir de tres procesos mecánicos diferentes en la obtención de aceite de oliva en las "Almazaras": Sistema "clásico de prensas", Sistema continuo "de tres fases" (en desuso) y Sistema continuo "de dos fases" (muy extendido en la actualidad).

Mediante el sistema de "tres fases" se obtiene aceite y dos subproductos. El primero es el "orujo" (materia residual de las aceitunas, con una humedad del 40-50 % en peso), que se lleva a plantas donde se seca y posteriormente se extrae la pequeña cantidad del aceite de peor calidad que aún contiene. El otro subproducto es el "alpechín" (líquido con componentes químicos perjudiciales para el medio ambiente), que es posible eliminar mediante evaporación directa en balsas, sistemas de evaporación forzada o tratamientos químicos depuradores (Martínez, 1973).

Con el Sistema de "dos fases" sólo se obtiene un subproducto, denominado "alperujo", con similar composición que el "orujo" del proceso anterior, pero con mayor humedad (62-70% en peso), incorporando los constituyentes del "alpechín" (Martín, 1996). El proceso de secado es el mismo que con el anterior subproducto, pero debido a la mayor humedad, los secaderos deben ser redimensionados y utilizar temperaturas de gases de secado más altas, originando problemas de pérdida de calidad del aceite de orujo. El proceso de dos fases elimina los problemas asociados al "alpechín", pero los traslada a los secaderos, aumentando costes y bajando su rentabilidad.

En cualquier caso, los residuos que provienen de las almazaras, de dos o tres fases, o de prensas, se suelen mezclar antes del proceso de secado, recibiendo esta mezcla el nombre de "orujo", con independencia de su composición. Como regla general, una tonelada de aceite de oliva origina tres toneladas de orujos. Tras los procesos de secado y extracción aparece otro subproducto, denominado "orujo", con una humedad próxima al 10% (Cruz,

1975). La fracción seca de este "orujillo" está compuesta por piel (15-30%), hueso (30-45%) y sólidos finos de pulpa (30-50%). Se usa principalmente como combustible en el secado, aunque otras posibilidades son la producción de abonos orgánicos o de etanol (Ballesteros *et al.*, 2001). El "orujillo" no utilizado se almacena, planteando un problema importante su eliminación.

Este artículo presenta un estudio general para la mejora energética del sector del aceite de oliva, en cualquier comarca, a través de sistemas de generación distribuida, conformada por plantas de (co)generación en industrias del sector, aprovechando al máximo los subproductos que aparecen en dichas transformaciones. De esta forma, aparece un ciclo energético asociado a todos estos procesos, que comienza y finaliza en el árbol, particularmente asociado a la eliminación de residuos de dichas transformaciones.

2. FUNDAMENTOS

Sin discutir los procesos de obtención del aceite de oliva y del aceite de orujo, está claro que existen subproductos que es necesario eliminar y, aunque se utilicen grandes cantidades de "orujillo" para producir abonos, alimentación de ganado, o generar gases de secado, todavía queda un excedente de este material. La mejor solución será eliminarlo quemando dicho "orujillo" (directamente o previa transformación) u otras fuentes energéticas primarias convencionales (IDAE, 2001), generando electricidad en una planta de potencia. Así se acrecienta la diversificación energética, reduciendo la dependencia de fuentes de energía externas, implantando a su vez redes de generación distribuida a partir de estas plantas.

Aspectos legales

Se considerará en este caso el régimen especial de producción de energía eléctrica, posibilitando la viabilidad en instalaciones auto-productoras de electricidad. En España, este régimen especial considera los sistemas de cogeneración convencionales con combustibles fósiles, sistemas de generación que utilizan energías renovables (como biomasa, eólica e hidráulica) y sistemas de cogeneración para eliminación de residuos. Las plantas que pertenecen a este régimen especial pueden vender de dos formas sus excedentes eléctricos a la red (diferencia entre energía auto-producida y energía demandada en la industria): venderla a una empresa distribuidora, con un precio fijo proporcional a la denominada "tarifa regulada", o venderla libremente en el mercado, con precio de venta igual al de mercado, al que se suman un incentivo y una prima (RD 436/2004).

Los casos de instalaciones de cogeneración (convencionales o para reducción de residuos o lodos), deben alcanzar un rendimiento mínimo obtenido al combinar la producción eléctrica y el apro-

vechamiento de calor residual, denominado *rendimiento eléctrico equivalente*. Éste es una particularización del rendimiento térmico artificial (Horlock, 1997), que considera la energía suministrada en la planta de cogeneración (CHP) reducida en la misma cantidad que si una caldera con un 90% de rendimiento produjese el calor útil necesario.

Características útiles de la biomasa para eliminación por quemado

La valorización de residuos del sector oleícola estipula ciertas conversiones energéticas, según el tipo de subproducto e instalación. El "orujillo" tiene la misma composición que los "orujo", pero sin la fracción grasa (aceite de orujo) y su humedad está entre el 8% y 10%. El hueso es un componente del mismo, con proporción del 30 al 45% en peso, pero posee mayor poder calorífico y origina menos problemas que el "orujillo" en calderas (Cruz *et al.*, 1999). Este componente se puede recuperar mediante un sencillo sistema mecánico. Además, después del periodo de recolección, los árboles se podan, apareciendo residuos leñosos que presentan en su fracción seca un poder calorífico inferior (PCI) de 18.300 kJ/kg, con un 45% en peso de contenido de carbono y un 48% de oxígeno (IDAE, 2001).

La utilización directa de estos subproductos como combustibles en plantas de vapor, precisa disponer de ellos en las condiciones lo más secas posible, eliminando problemas de combustión y elevando su poder calorífico. Su alto contenido en oxígeno evita combustiones con elevados excesos de aire. Otra consideración es la diferencia del contenido de cenizas en ambos subproductos, ya que el "alperujo" contiene los compuestos del "alpechín", que generan escorias, apareciendo problemas de funcionamiento en los hogares (Cruz *et al.*, 1999).

También pueden utilizarse estos subproductos en sistemas de motores alternativos de combustión interna (MACI) y turbinas de gas (GT), transformándolos previamente en combustibles gaseosos o líquidos mediante procesos bioquímicos, como las fermentaciones metánica o alcohólica (Jiménez *et al.*, 1989), o termoquímicos, como la gasificación (García y Otero, 2000; Craig y Purvis, 1999), lo que conlleva una pérdida del poder calorífico del material original.

Generación Distribuida

El término "fuentes de generación distribuida" (DER) designa un conjunto de pequeños generadores, típicamente localizados en lugares estratégicos (industrias), donde la energía (eléctrica y térmica) es demandada (Lasseter *et al.*, 2002). Cuando diversas industrias relativamente próximas auto-producen sus demandas energéticas a través de sistemas de (co)generación, forman parte de la red de generación distribuida. El desarrollo de es-

tos sistemas presenta una oportunidad para un mercado energético diferente, aumentando el rendimiento de las instalaciones de producción energética, suponiendo reducciones importantes de emisiones de CO₂ en comparación con la producción eléctrica convencional (Strachan y Dowlatabadi, 2002)

Desde el punto de vista de la red eléctrica, la principal ventaja de estos sistemas es que constituyen una entidad controlada dentro del sistema general, operando como un generador y una carga agregada más (Lasseter *et al.*, 2002). Los principales factores técnicos a considerar son la seguridad de la red, su eficiencia, economía, estabilidad en la generación y el mantenimiento de la calidad del suministro dentro de los límites de tensión (Rogers, 1998). Si esta red se encuentra en un marco de concentración geográfica pequeño, los costes de mantenimiento se reducen cuando se gestionan globalmente.

En la provincia de Jaén existen en la actualidad (según datos facilitados por la Cámara de Comercio e Industria de la provincia de Jaén) 305 almazaras, distribuidas en una superficie de 13.496 km², con potencias eléctricas instaladas relativamente pequeñas (400 kW), y sus demandas de calor útil son similares a aquéllas. Por otra parte, existen 14 secaderos-extractoras de orujo con necesidades energéticas más elevadas, (1.000 kW de potencia eléctrica) y grandes cantidades de calor para el secado de "orujo", debido al flujo y temperatura de los mismos. Cada uno de estos centros podría actuar como centro de la red de generación distribuida, auto-produciendo sus demandas energéticas y aportando sus excedentes a la red eléctrica.

Indicadores y análisis energéticos

Para estimar las soluciones a aplicar, se estudiaron los datos particulares (IDAE, 1997) en dichas instalaciones, a través de encuestas remitidas a diferentes plantas, y cuyos resultados se muestran en la Tabla 1, donde hay que considerar:

- a) Energía primaria de combustibles: utilizados para satisfacer las demandas térmicas, en base al PCI (MJ/t o GJ/t)
- b) Demandas eléctricas: suministradas por la red eléctrica externa (kWh/t)

- c) Índice Energético (EnC): obtenido al sumar la energía de combustibles productores de calor (a) y la energía de combustibles para generar la demanda eléctrica (b) con rendimiento de 0,3. Representa el consumo real de energía primaria para atender todas las demandas energéticas de la industria (MJ/t o GJ/t)
- d) Índice Económico (EcC): relación entre las demandas energéticas y costes de las fuentes utilizadas. Cuanto mayor sea su valor, más baratos son los procesos en la industria (MJ/€ o GJ/€)
- e) Relación Calor-Electricidad, λ: Relación entre el calor útil y eléctrica demandados en la instalación. Ayuda a elegir la tecnología más acorde en cada caso (adimensional) (Horlock, 1997).

En la Figura 1 aparece un diagrama general de flujos de masa y energía en ambos tipos de instalaciones. Los datos representados tienen en cuenta valores medios estimados sobre las producciones de diferentes almazaras, algunas de las cuales utilizan el sistema de 2 fases (la mayoría), y otras el resto (3 fases y prensas).

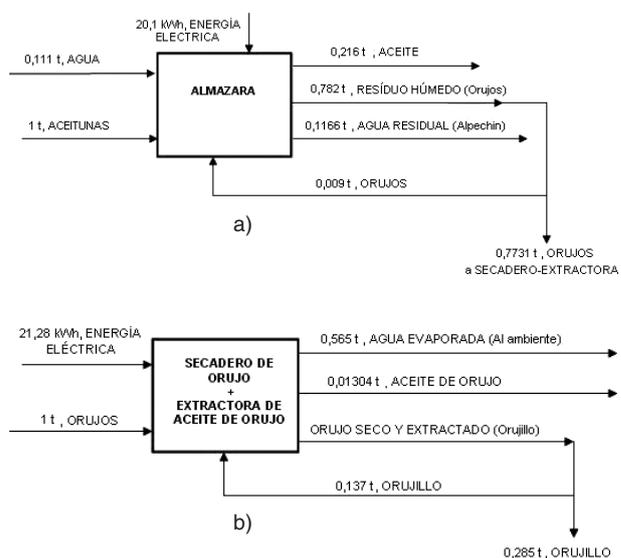


Figura 1
Flujos medios en almazaras (a) y secaderos-extractoras (b)

Tabla 1
Características energéticas en almazaras y secaderos-extractoras

Industria	Por t de sustancia	Energía de combustible (MJ/t)	Demanda eléctrica (kWh/t)	Índice energético "EnC" (MJ/t)	Índice económico "EcC" (MJ/€)	λ
Almazara	Aceituna	149,4	20,1	390,6	205,6	1,65
	Aceite	692	93	1.808		
Secadero-Extractora	Orujos	2.176	21,3	2.431,6	1.358,4	28,4
	Aceite de Orujo	166.871	1.633	186.472		

3. TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES. RESULTADOS INICIALES

Las posibles plantas de (co)generación analizadas son: Centrales termoeléctricas con turbinas de vapor (ST), Turbinas de gas (GT) y Motores alternativos (MACI) (Sala, 1994). Las plantas con turbinas de vapor están indicadas en industrias con alto “ λ ”, mucho mayor que 2 (Mateo, 1996). En una gran instalación, el ciclo de Rankine básico se modifica para aumentar la eficiencia, incorporando nuevos elementos como extracciones, calentamiento intermedio, etc. Si se aplica a almazaras y secaderos, puesto que también se pretende producir calor para la industria, se modificará la instalación de vapor, condensándolo a presión más alta que la atmosférica (sistema a contrapresión), de forma que su energía disponible es aceptable (Cruz *et al.*, 1999), o extrayendo cierta cantidad de vapor a presión intermedia (sistema de condensación con extracción) para su aprovechamiento posterior (López *et al.*, 2002 b). En estos casos se utilizarían como combustible tanto los orujos (no aconsejable), como el orujillo o el hueso.

Los MACI son los más adecuados para almazaras, con $\lambda < 2$, y las GT se aplican a instalaciones con $\lambda > 2$ (Mateo, 1996). Hasta ahora, sólo se utilizan MACI y GT en secaderos de orujo, utilizando los gases de escape de dichos motores para el secado, utilizando gas natural como combustible, por ser más sencillo y económico su mantenimiento que las centrales de vapor, y no poseer azufre en su composición (Cruz *et al.*, 1999). Aunque λ es muy alta en estas instalaciones (ver Tabla 1), las demandas térmicas se cubren aumentando el tamaño de la planta de potencia (aspectos legales permiten un potencia instalada eléctrica máxima de 25 MW). También se puede analizar la utilización de GT de combustión externa que use biomasa como combustible (Eidensten *et al.*, 1996), si bien las pequeñas potencias dan lugar a problemas en el rendimiento, actualmente en vía de resolución (Lasserter, 2001).

Aplicaciones en Almazaras

Las almazaras tienen unas necesidades térmicas para calentamiento del agua de diversos procesos, con una potencia eléctrica media instalada de 400 kW. Su λ varía de 0,75 a 2, y funcionan alrededor de tres meses al año, el mismo tiempo de recogida del fruto del olivo. La solución de cogeneración supone una pequeña planta de potencia que satisfaga estas demandas (Figura 2a), instalándose un MACI, produciendo pocos excedentes eléctricos y térmicos, siendo el sistema más eficaz para esta aplicación (López *et al.*, 2002a). Para aumentar la viabilidad de las instalaciones es necesaria la venta de excedentes. Por un lado, se puede incrementar la potencia instalada de forma que la energía eléctrica consumida mínima sea del 30% de la auto-producida. Por otro lado, los sistemas de “calefacción de distrito” (DH, *District Heating*) asociados a aquellos,

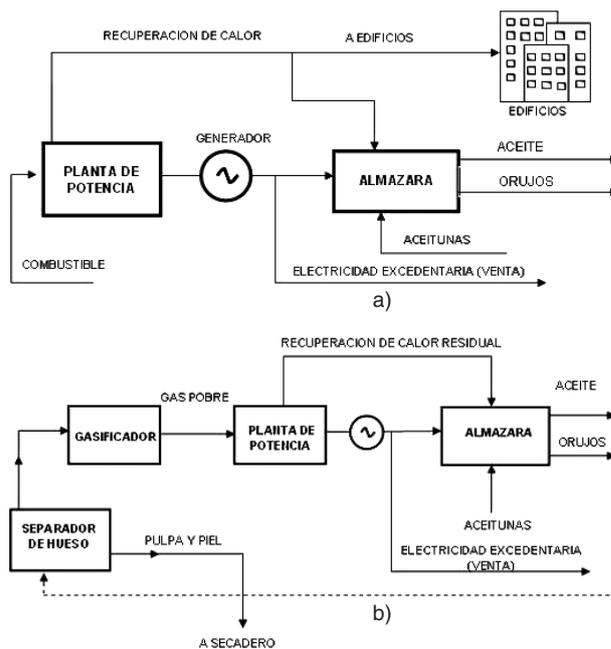


Figura 2
Esquema básico de (co)generación en almazaras con D.H. (a) y gasificación (b)

disminuyen las emisiones contaminantes respecto a la calefacción convencional. La distancia almazaras-edificios (casco urbano) supone pérdidas de calor y presión en el fluido de transporte y que habrá que considerar.

Como resultado de los estudios de viabilidad realizados, cabe destacar que es necesaria una ayuda de la Administración para su puesta en marcha, debido principalmente, al consumo de combustible fósil y la estacionalidad de la producción de aceite (tres o cuatro meses al año), que hacen difícil su rentabilidad. Este tipo de instalación puede funcionar sólo durante la operación de la “almazara”, a causa de limitaciones legales (López *et al.*, 2002a).

Sin embargo, futuras soluciones pueden ayudar a su viabilidad. Primero, la disposición del subproducto como un combustible más eficiente, por medio de procesos de gasificación o digestión anaerobia, cuyas posibilidades son elevadas. Recientemente, se han realizado estudios de gasificación de residuos leñosos (Ollero *et al.*, 2003), y de ambos (residuos de poda y de aceituna) en quemadores y gasificadores de lecho fluido (Arvelakis *et al.*, 1999), aunque los de tipo “*downdraft*” son más adecuados en esta aplicación (Tinaut *et al.*, 2000; Ortega *et al.*, 2004). Hay un incremento de la humedad del residuo final de la almazara (orujo) debido a la eliminación del mismo de una fracción sólida (hueso) que proporciona el combustible de la planta de potencia. La Figura 2b presenta un esquema básico simplificado de esta instalación.

El coste de esta alternativa supone ajustar al máximo las potencias a instalar tanto en el grupo motogenerador como en el gasificador. Legalmente, la planta puede funcionar independientemente

de la producción de aceite, ya que el combustible es de origen renovable. Si, con todo, el grupo funcionara todo el año con hueso u orujillo, el subproducto que va a los secaderos llevaría mucha menos materia sólida que la permisible, dando lugar a orujos mucho más húmedos y con menor contenido graso. Esto acarrearía que, a la larga, la almazara sería penalizada (mayor coste de retirada de residuos) por la poca calidad de sus orujos. Para evitar estos problemas, el funcionamiento del grupo fuera de campaña puede hacerse a partir de residuos leñosos gasificados del olivar. Puesto que el centro de producción eléctrica (situado en la almazara) estaría cerca del centro de producción de aceituna (olivos), los costes de transporte se verían reducidos drásticamente frente a otras soluciones centralizadas (Anónimo, 2001).

Si se utiliza alguna otra tecnología (plantas de vapor o GT), existirá una gran cantidad de excedente térmico no utilizable en la propia industria. En estos casos, el bajo rendimiento relativo interno de turbomáquinas y su poco uso en pequeñas potencias, supone una desventaja para su puesta en marcha. Actualmente, también existen investigaciones prometedoras en el campo de la automoción para el uso de (GT) de pequeñas potencias (Craig y Purvis, 1999), que auguran posibles utilizaciones de éstas en almazaras.

La Tabla 2 presenta un estudio básico respecto a los datos generales de la Tabla 1, para 1 tonelada de aceituna tratada en almazara, donde aparecen aspectos energéticos y económicos relacionados con la utilización de estas tecnologías en dichas industrias, además de la cantidad de subproductos que en cada caso se venderán a los secaderos.

La cogeneración convencional supone el consumo de combustibles fósiles, como gasóleo o gas natural. Si bien existe ahorro energético y económico respecto a la situación inicial en las almazaras, la dependencia exterior del combustible hace que su viabilidad dependa, no solo de la producción de aceituna, sino de los precios de estos combustibles. Debe vender el máximo de excedentes térmicos posibles, con limitaciones legales en tamaño y consumo de energía. Aportará más cantidad de orujo a secadero, ya que no necesita combustible para sus procesos térmicos.

Por otro lado, la tecnología de gasificación utiliza un residuo, revalorizándolo como combustible. Su disponibilidad depende de la producción de aceituna, y supone la independencia energética del exterior y un mayor ahorro económico. Puesto que también pueden utilizar residuos leñosos como combustible, la cantidad de "orujos" hacia los secaderos es algo menor que antes, sin variar la calidad del material.

Las inversiones precisas en ambas soluciones serán las mismas aproximadamente, debiéndose a que la potencia eléctrica instalada en el primer caso debe ser muy superior a la demandada (para vender cuantos más excedentes eléctricos posibles durante la campaña), aumentando los costes de la planta. En el segundo caso, la potencia eléctrica instalada quedará ajustada a la demanda de campaña (autoconsume en campaña y vende el resto del año), pero el coste se incrementa por el equipo de gasificación, lo que hace que para la potencia instalada, ambas soluciones tengan una inversión final parecida. El último caso supone una alternativa más rentable, y el tiempo de retorno de la inversión se reduce a valores razonables (4 ó 5 años).

Tabla 2
Estudio técnico-económico general de soluciones en almazaras

Solución (por cada t de aceituna)	Situación Convencional	Cogeneración con DH (A.1)	Generación con Gasificación (A.2)
Energía eléctrica auto-producida (kWh)	0	67	80,4
Consumo de combustible en almazara (MJ)	149,4 (subproducto)	603 (fósil)	1.754 (subproducto)
Consumo de energía primaria total (MJ)	390,6	603 (fósil)	1.754 (subproducto)
Consumo de energía primaria de origen fósil sin (co)generación para igual producción energética útil (MJ)	241,2	1.124,6	964,8
Ahorro de energía primaria de origen fósil (MJ) respecto a situación convencional con igual producción eléctrica y térmica	0	521,6	964,8
Energía eléctrica vendida a red (kWh)	0	46,9	60,3
Calor útil vendido con DH (MJ)	0	270	0
Coste de energías y operación (€)	1,9	8,96	2,17
Precio de venta de energía (€)	0	7,66	3,91
Beneficio - Ahorro bruto (€)	0	0,6	3,64
Orujos hacia secaderos (toneladas de orujos)	0,773	0,782	0,677

Aplicaciones en Secaderos-Extractoras de Orujo

En estas plantas, con los gases calientes (450-800°C) primero se secan los orujos, que después se extraen obteniendo aceite de orujo. Las demandas energéticas se indican en la Tabla 1, donde las demandas térmicas son mucho mayores que las eléctricas, debido al proceso de secado, resultando λ muy elevada. Las alternativas frente a la situación convencional que se dan se pueden esquematizar de la siguiente forma:

- a) Cogeneración con secado y extracción (Figura 3a). Una instalación de cogeneración, normalmente con MACI (aunque puede incluir GT), genera energía eléctrica, aprovechándose los gases de escape para el secado del orujo, con la posibilidad, además, de generar vapor a media presión que se utiliza en la extractora. En todo caso, su utilización implica el consumo de combustibles con bajo contenido en azufre, pues los gases de escape entran en íntimo contacto con el aceite del orujo que se va a extraer. De esta forma, el combustible convencional utilizado sería el gas natural, lo que implica no eliminar en el secadero el subproducto sobrante del proceso de extracción. Estas soluciones se imponen en Andalucía desde hace algún tiempo (Colinet, 1999).

Estas plantas presentan la ventaja de vender sus excedentes eléctricos, ayudando a su rentabilidad el pago de una prima por energía vendida excedente. Sin embargo, pasan a depender del suministro energético de un combustible convencional, que en estos casos debe ser gas natural (pues no contiene azufre), resultando su viabilidad comprometida si el precio de este combustible varía al alza. Además, al no quemar su propio subproduc-

to, genera una gran cantidad de excedentes de aquél. Para salvar este último inconveniente, se podrían vender los sobrantes del residuo a una planta de generación con biomasa. Sin embargo, aparecen de nuevo limitaciones legales (CNSE, 2000), prohibiendo que un subproducto pueda utilizarse en dos instalaciones acogidas al régimen especial. Para superar estas dificultades, se puede utilizar una planta con turbina de vapor (ST) en la propia instalación. El orujillo o hueso servirán como combustibles, produciendo el vapor necesario para la generación eléctrica y para la extracción del aceite de orujo, y sirviendo los excedentes térmicos para precalentar los gases de secado, necesitando quemar menos para alcanzar aquellos la temperatura necesaria (450°-800°C) (López *et al.*, 2002b).

- b) No realizar secado ni extracción (Figura 3b). El orujo pasaría directamente a la central, quemándose por vía húmeda, donde posee un 3 % de materia grasa. Aunque ésta aumenta el PCI del combustible, su elevada humedad reduce drásticamente la energía aprovechada, necesitando sistemas especiales de quemado, como una caldera de lecho fluido (Morillo, 2000), no sin presentar problemas de funcionamiento. Esta solución supone los mismos efectos que una central de biomasa y elimina la posibilidad de extraer aceite de orujo de este subproducto, con el consiguiente perjuicio económico para el sector.

A la hora de determinar la solución más eficaz, los esfuerzos deben centrarse en mejorar el proceso de secado y obtención de subproducto con condiciones más favorables, además de las ya indicadas en almazaras (transformación en combustibles más idóneos como biogás y aumento de rendimientos en turbinas de vapor de baja potencia). La Tabla 3 presenta, de forma general respecto a los datos de la Tabla 1, diferentes soluciones de este tipo de industrias.

De las soluciones anteriores, aquella que utiliza una ST mejora con creces la viabilidad económica respecto a los MACI, para potencias instaladas superiores a 3 MW, independizándola del aporte de fuentes externas. Los datos mostrados ajustan al máximo el consumo de subproducto en el secadero y no existirán sobrantes a central de biomasa.

Respecto a la utilización de cogeneración con combustibles fósiles, suponen las mismas ventajas e inconvenientes que en almazaras: ahorro energético global por un lado, y estacionalidad y precio de combustible fósil, por otro. La inversión puede variar bastante según la potencia instalada. Para este caso, se permite un límite de 25 MW eléctricos, sin asumir el autoconsumo del 30 % de la producción eléctrica. Proporciona un gran beneficio económico por venta de excedentes eléctricos, aunque la estacionalidad del periodo de secado (4 a 9 meses anuales) limita su viabilidad.

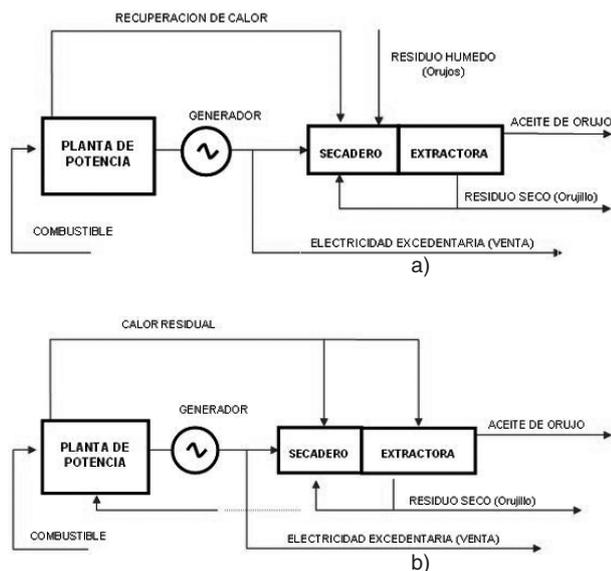


Figura 3

Esquema básico de (co)generación con combustible fósil (a) y biomásico (b) en secadero-extractora

Tabla 3
Estudio técnico-económico de soluciones en secaderos-extractoras

Solución (por 1 t de orujo entrante)	Situación convencional	Cogeneración MACI (B.1)	Generación con ST, (B.2)
Energía eléctrica auto-producida (kWh)	0	520,6	251,5
Consumo de combustible en secadero (MJ)	2.176 (subproducto)	5.628,6	6.703 (subproducto)
Consumo global de energía primaria (MJ)	2.431,6	5.628,6	6.703
Energía primaria sin (co)generar (MJ) de origen fósil para igual producción energética útil	255,6	6.247,54	3.018
Ahorro de energía primaria de origen fósil (MJ) respecto a situación convencional con igual producción eléctrica y térmica	0	1.315,3	3.018
Energía Eléctrica vendida a red (kWh)	0	499,3	230,2
Coste de energías y operación (€)	1,79	26,54	2,51
Venta de excedentes de energía (€)	0	25,16	14,9
Beneficio - Ahorro brutos (€)	0	0,42	14,2
Residuo sobrante (toneladas de orujillo)	0,285	0,378	0

Central Eléctrica de Biomasa

Estas instalaciones tienen una potencia media instalada superior a 10 MW, quemando orujillo (de almazaras y secaderos próximos) en sus calderas (Sancho y García, 2001). El esquema de la instalación es similar al de la Figura 3b. Su rendimiento global es del 22 % (Menéndez, 2001), que disminuye al reducir la potencia instalada, limitación impuesta por la disponibilidad de combustible biomásico residual.

4. CICLO ENERGÉTICO INTEGRAL DEL SECTOR OLEÍCOLA

Descripción del ciclo

Una vez analizado cada tipo de instalación y sus posibles aplicaciones, se describe el ciclo energético que implica a todas las industrias y procesos asociados a la aceituna. Tiene como origen al olivar, y más tarde, se obtienen dos tipos de aceite ("aceite virgen" en almazaras y "aceite de orujo" en secaderos-extractoras), además de producir energía eléctrica y calor útil aprovechable. Finalmente, aparece un abono orgánico como consecuencia de los residuos sobrantes (no valorado en este estudio), cerrando el ciclo nuevamente en el olivar (Figura 4).

Partiendo del cultivo en campo, se lleva la aceituna a la almazara donde se molture y obtienen el aceite y sus subproductos/residuos. Un motor térmico opera con combustible fósil o biomásico, para generar energía eléctrica y térmica, que satisface las demandas de la industria. Las energías sobrantes de los procesos se venderán a la red eléctrica y a la población próxima (calor por DH). El subpro-

ducto restante se llevará a la extractora, en donde se unirá al que procede de diversas almazaras de la zona.

En el secadero, se utilizará otro motor térmico para generar energía eléctrica (que cubre la demanda aportando a la red sus excedentes), y cuyos gases secan el orujo húmedo de almazara. Otra alternativa es utilizar una central de vapor, donde se utiliza orujillo o hueso como combustible, precisándose además gran cantidad del mismo en el horno del secadero. Las cantidades del residuo final variarán dependiendo de la solución seleccionada.

En las dos situaciones anteriores, hay que indicar que el motor térmico será diferente según las características del combustible, apareciendo residuos de las operaciones llevadas a cabo, parte de los cuales podrán sufrir procesos de compostaje,

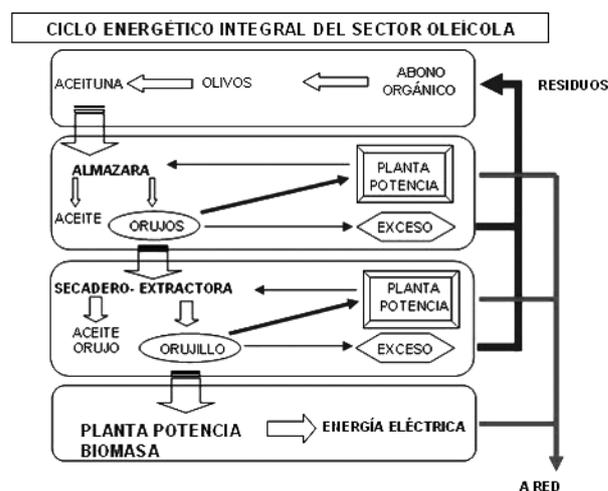


Figura 4
Esquema del ciclo energético integral en el sector oleícola

Tabla 4
Escenarios energéticos posibles del sector oleícola en la provincia de Jaén

Solución (por 1 t de aceituna recolectada)	Sin CHP	A.1 +B.1 +C (1)	A.2 +B.1+ C (2)	A.1+B.2 (3)	A.2+B.2 (4)
Consumo de energía primaria en plantas localizadas del sector (MJ)	2.270,4	9.702,1	9.632,5	5.845	6.292,9
Consumo de combustibles fósiles (MJ)	438,8	4.460,16	3.339,7	603	0
Consumo de combustible biomásico (MJ)	1.831,6	5.241,93	6.292,9	5.242	6.292,9
Energía Eléctrica aportada a red (kWh)	0	698	624,3	226,9	216,2
Consumo global de energía primaria de forma convencional a partir de combustibles fósiles para igual producción energética útil (MJ)	438,8	9.141,9	7.906,5	3.484,7	3.008,3
Ahorro de energía primaria de origen fósil respecto a situación convencional con igual producción energética útil (MJ)	0	4.681,75 (51%)	4.566,8 (58%)	2.881,7 (82,7%)	3.008,3 (100%)
Beneficio – Ahorro en sector (€)	0	15,22	16,3	11,7	13,2

retornando al olivar como abono orgánico. Finalmente, los residuos finales de varios secaderos y almazaras llegan a una central térmica de biomasa con ST.

Resultados y discusión

Una vez analizados los diversos casos para cada industria y obtenidos los resultados previos indicados en las Tablas 2 y 3, que a su vez se deducen de la Tabla 1, se realiza un estudio energético global para el ciclo energético integral, dependiendo de la combinación de soluciones. Todos estos resultados se han hecho con respecto a 1 t de aceituna recolectada, de la cual se obtienen 0,21 t de aceite de oliva, y el orujo resultante se lleva a un secadero. En estas últimas instalaciones, se obtienen 13 kg de aceite de orujo por cada tonelada de orujo entrante. Los resultados que la Tabla 4 presenta corresponden a:

- Soluciones donde existirán instalaciones de cogeneración en almazaras con combustibles convencionales (A.1) y gasificación de orujo o hueso (A.2), auto-produciendo su demanda y vendiendo excedentes energéticos. En el primer caso, se utilizan combustibles fósiles, con un coste mayor de compra energética. Su rentabilidad económica, sin embargo peligró, al depender del precio de aquellos combustibles. En el segundo, existen solo costes de operación y mantenimiento, con lo que el beneficio-ahorro económico es elevado, si bien su inversión es mucho más elevada que la solución anterior.
- Más tarde, se analiza el caso de los secaderos con dos alternativas: en la primera se presenta una cogeneración con MACI (B.1) y la segunda, donde se instalarían centrales de vapor utilizando orujillo (o hueso) como

combustible, tanto principal en la caldera de vapor, como auxiliar en el secado (aplicación B.2). La demanda eléctrica estará cubierta y sus excedentes vendidos, obteniendo beneficios económicos. Finalmente, el resto del subproducto se vende a una central de biomasa. Son instalaciones equivalentes a las (A.1) y (A.2).

- Planta de biomasa, si es posible su uso (C).

Se puede observar como las soluciones que conllevan cogeneraciones con consumo de combustibles fósiles (A.1 y B.1) originan un ahorro energético importante a nivel global, respecto a la misma producción eléctrica y térmica si se hiciera de forma convencional. Sin embargo, la estacionalidad en su funcionamiento y el precio fluctuante de los combustibles fósiles hacen que supongan inversiones de riesgo. No eliminan el problema de dependencia energética, incluso lo complican, pues aunque teóricamente no requieren el suministro eléctrico, sí dependen de dichos combustibles en la localización de las industrias.

Por otro lado, las soluciones en que sólo se consumen residuos del olivar (A.2, B.2 y C) suponen un ahorro económico mayor al eliminar la necesidad de combustibles fósiles, además de incentivar la diversificación e independencia energética. Por contra, y debido al menor rendimiento de los sistemas de producción energética con biomasa, es necesaria mayor cantidad de combustible que, en cualquier caso, evita la utilización de los de origen fósil.

Todas estas propuestas suponen casos extremos en los que siempre se realizarían sólo dichos tipos de instalaciones. En ninguna de estas soluciones se han estimado cantidades para su conversión en abonos orgánicos, para demostrar las enormes posibilidades de producción de energía utilizando todos los productos como combustibles. Las soluciones propuestas permiten una indepen-

dencia energética a estas industrias, y pueden suministrar a la red una cantidad considerable de energía. Los datos de los últimos años indican que, al menos, se recolectan dos millones quinientas mil toneladas al año de aceituna, asegurando un aporte mínimo anual a la red de 540 GWh. Para el año 2003, se han recogido casi 3 Mt (según datos de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía), aumentando este potencial a valores de entre 650 y 2.100 GWh, frente a 2.400 GWh de demanda eléctrica anual en esta provincia (datos facilitados por Sevillana-Endesa, Delegación Provincial de Jaén); se puede concluir así que, más de un cuarto de la demanda eléctrica provincial, podría ser suministrada mediante sistemas que consumen exclusivamente el residuo biomásico de estas industrias, frente a otras soluciones alternativas con combustibles fósiles que permitirían una red que aporta el 88% de dicha demanda. En cualquier caso, el ahorro en el consumo de energía primaria fósil para producir el mismo aporte eléctrico es superior al 50% de la situación actual, a partir de centrales eléctricas convencionales. Todos estos escenarios supondrían mejoras sustanciales en el sector, consiguiendo los siguientes objetivos:

- a) Eliminación de un residuo problemático.
- b) Diversificación energética y mayor independencia externa.
- c) Descentralización de la producción eléctrica, disminuyendo las emisiones contaminantes.
- d) Mayor empleo especializado en las zonas implicadas.

A partir de todo lo expuesto, las incertidumbres que se pueden encontrar en torno a esta situación son:

- a) Subvenciones en inversión. Estas instalaciones necesitan de inversiones elevadas con un tiempo de retorno que en ocasiones puede llegar a ser elevado, por lo que es necesaria la implicación de la administración.
- b) Subvenciones en explotación. La eliminación de residuos con producción eléctrica está primada por el Estado, y debe continuar así, para permitir la viabilidad de estos tipos de instalaciones, que difícilmente competirían en el mercado liberalizado eléctrico actual sin dichas ayudas.
- c) El estudio energético mostrado se ha realizado considerando la utilización de todo el subproducto como combustible. De esta forma, al utilizar parte o fracciones de aquél, en otras aplicaciones tales como abonos orgánicos, la producción eléctrica será menor a la estimada aquí. Sin embargo, esto podría compensarse al utilizar residuos de la poda del olivar, los cuales habría que comprar aparte, precisándose un estudio específico.
- d) Consumo de combustibles y emisiones. A primera vista, el hecho de auto-producir las necesidades eléctricas y térmicas a través

de sistemas de generación biomásicos, supone una reducción en nuevas emisiones de CO₂, además de producir menor cantidad de óxidos de azufre, comparados con combustibles fósiles. Sin embargo, otros contaminantes como los óxidos de nitrógeno, se seguirían formando cuando el combustible se quema en MACI o GT, debido a las elevadas temperaturas en su combustión.

- e) Localización de industrias y costes de transporte entre ellas. Actualmente, las almazaras deben pagar el transporte del residuo a las tractoras, sin recibir nada a cambio. Cuanto mayor sea el camino a recorrer, mayor coste se trasladará a la planta de potencia, afectando a la viabilidad de estas soluciones.
- f) El papel de las compañías eléctricas. La industria oleícola conoce el proceso de producción de aceite, pero no el de generación de electricidad. El personal especializado en producción eléctrica podría ser aportado por aquellas compañías, minimizando costes a través de los sistemas de generación distribuidos posibles.

5. CONCLUSIONES

Se presentan las soluciones más idóneas para realizar un completo sistema de producción de energía eléctrica mediante una red de generación distribuida, acompañado por un aprovechamiento de calores residuales para el sector del aceite de oliva en la provincia de Jaén (España). Las plantas de potencia que utilizan biomasa proporcionan independencia energética, eliminando desastres económicos en el sector, actualmente muy deteriorado. Por el contrario, las soluciones con combustibles fósiles aportan un elevado ahorro energético, aunque los problemas de viabilidad se presentan por el precio de los combustibles y la estacionalidad en las producciones de los diferentes aceites.

Los resultados presentados en la Tabla 4 representan casos extremos de utilización de estas tecnologías. Cada industria debe ser analizada separadamente, para determinar cual es su solución ideal. No sólo deben analizarse energéticamente, sino también su emplazamiento y comunicaciones, para determinar que solución de las anteriores es la más adecuada, de forma que el ciclo energético de la aceituna se lleve a cabo de la forma más eficaz posible. Esto supondrá aprovechar al máximo la energía de los subproductos residuales, reduciendo en lo posible la dependencia energética del exterior y las emisiones contaminantes, eliminando el problema de acumulación de residuos y aumentando la productividad de las zonas oliveras.

Actualmente, existen CHP con MACI o GT en secaderos y plantas de potencia de biomasa, pero debe desarrollarse el resto de aplicaciones realmente, como la (co)generación en almazaras con combustibles fósiles o gasificación y cogeneración en secaderos con centrales térmicas de vapor, me-

tanización del combustible, o utilización de TG de baja potencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Cámara de Comercio e Industria de la Provincia de Jaén por aportar información sobre los productores de aceite en la provincia y su ayuda respecto a las encuestas realizadas, cuyos resultados se presentan aquí.

BIBLIOGRAFÍA

Anónimo. 2001. Energía de la Biomasa en España. Previsiones y estimaciones. *Energía* **27** (161) 90-96.

Arvelakis S, Gehrmann H, Beckmann M A, Koukios EG. 2003. Agglomeration problems during fluidized bed gasification of olive oil residue: evaluation of fractionation and leaching as pre-treatments. *Fuel* **82** (10) 1261-1270.

Ballesteros I, Oliva JM, Saez F, Ballesteros M. 2001. Ethanol production from lignocellulosic byproducts of olive oil extraction. *App. Biochemistry & Biotechnology* **91** (3) 237-252

CNSE. 2000. Informe sobre la consulta de la Junta de Extremadura sobre la clasificación de instalaciones de tratamiento de residuos. *Informe de la Comisión Nacional del Sistema Eléctrico (CNSE)*. Ministerio de Economía.

Colinet JM. 1999. Valorización de residuos del Sector Oleícola. *Encuentro del sector de almazaras y extractoras de aceite*. Jaén. Mayo, 1999.

Craig JD, Purvis CR. 1999. A small scale biomass fuelled gas turbine engine. *J. of Eng. for G.T. & Power* **121** (1) 64-67.

Cruz E. 1975. El secado de orujo graso. *Técnica Industrial*. Marzo/Abril, 85-100.

Cruz F, Mata J, Palomar J.M. 1999. Aprovechamiento energético del orujo. *Infopower* **18**, Julio/Agosto, 48-49

Eidensten L, Yan J, Svedberg G. 1996. Biomass externally Fired Gas Turbine Cogeneration. *J. of Eng. for GT & Power* **188**, 604-609

García P, Otero J. 2000. Gasificación de biomasa: Descripción de las tecnologías. *Energía* **26** (1) 61-70.

Horlock JH. 1997. Cogeneration. Combined heat and power, Krieger, Florida.

IDAE. 1997. Indicadores energéticos. Sector de fabricación de aceites y grasas vegetales. *Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE)*, Ministerio de Economía. Madrid.

IDAE. 2001. Optimización del Consumo de Energía en el Sector del Aceite de Oliva. *Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE)*, Ministerio de Economía. Madrid.

Jiménez L, Valera M, Anaiz J. 1989. Procesos de conversión de biomasa residual en energía. III. Proceso de obtención de biogás, *Energía* **15** (6) 105-109.

Lasseter R, Akhil A, Marnay C, Stevens J, Dagle J, Guttromson R, Meliopoulos S, Yinger R, Eto J. 2002. Integration of Distributed Energy Resources. The CERTS Microgrid Concept. *Consortium for Electric Reliability Technology Solutions*, Office of Power Technology of the US, Dep. of Energy, April 2002.

Lasseter R. 2001. Microgrids (distributed power generation). *Power Eng. Society Winter Meeting*. IEEE, Vol. 1, 28 Jan-Feb, 146-149.

López R, Cruz F, Ortega A, Palomar JM, Montoro V, García JA. 2002. Aprovechamiento óptimo de la energía residual de instalaciones de cogeneración en almazaras. *Anales de Ingeniería Mecánica* **14** (3) 1346-1349.

López R, Cruz F, Ortega A, Montoro V, Palomar JM, Peña AD. 2002. Instalación de cogeneración en extractora de aceite de orujo con ST. *Anales de Ingeniería Mecánica* **14** (3) 1368-1371.

Martín F. 1996. Producción de aceite mediante sistemas continuos de 2 fases. Instituto de la Grasa (CSIC). Sevilla.

Martínez J. 1973. Manual de Elaiotecnia, Librería Agrícola Española, Madrid

Mateo, N. 1996. Cogeneración: Selección de alternativas y estudios de viabilidad. *Energía* **22** (3) 57-62

Menéndez E. 2001. Energía de la Biomasa en España: 3.- La biomasa como vector energético y de empleo. *Energía* **27** (161) 45-52.

Míguez JL. 1994. Producción Industrial del Calor, Tórculo Ediciones, Santiago de Compostela.

Morillo F. 2000. Proyecto Vetejar: Aprovechamiento energético de los subproductos del sector del olivar. *Energía* **26** (3) 55-61.

Ollero P, Serrera A, Arjona R, Alcantarilla S. 2003. The CO₂ gasification kinetics of olive residue. *Biomass and Bioenergy* **23** (2) 151-161.

Ortega A, Palomar JM, Cruz F. 2004. Elaboración integral de las aceitunas con autogeneración de electricidad, comparada con el sistema actual de obtención del aceite de oliva virgen. *Grasas y Aceites* **55** (3) 304-312.

Ortega A, Palomar JM, Cruz F, Mata JE, Montoro V. 2001. Separación de parte del hueso contenido en el orujo de aceituna húmedo a la salida del decantador centrífugo. *Alimentación: equipos y tecnología* **20** (163) 105-116.

RD 436/2004, de 12 de marzo (Ministerio de Economía), por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. *Boletín Oficial del Estado* de 27 de marzo (75) 13217-13238.

Rogers WJS. 1998. Grid Connection of Embedded CHP Plants. *Developments in Combined Heat and Power into the Millennium*. (Ref. No 1998/226) IEEE Colloquium, 20 May, 1998. 4/1-411.

Sala JM. 1994. Cogeneración. Aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos, Publicaciones de Universidad del País Vasco, Bilbao.

Sancho A, García MB. 2001. El orujillo de aceituna como materia prima para la producción de energía eléctrica. Aplicación a las plantas de Enemansa y la Loma. *Energía* **27** (3) 55-68.

Strachan N, Dowlatabadi H. 2002. Distributed generation and distribution utilities. *Energy Policy* **30**, 649-661.

Tinaut FV, Giménez B, Horrillo A, Díez A, Lapuerta M. 2000. Predicción de las prestaciones de un motor de combustión interna alternativo que utiliza como combustible gas pobre procedente de gasificación. *Anales de Ingeniería Mecánica* **13** (3) 2041-2046

Recibido: Abril 2005
Aceptado: Julio 2005