

ESTUDIO TÉCNICO Y DE RENTABILIDAD DE UN SISTEMA HÍBRIDO SOLAR EÓLICO PARA SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA GRANJA AVÍCOLA

Alfonso Bachiller Soler ^P, Pedro J. Martínez Lacañina,
Yolanda Pérez Moreno, Juan J. Cousinou Martínez, Lidia Hernández Molina

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se presenta como culminación de la modernización de una explotación agropecuaria que será destinada a la cría de pollos de engorde. La instalación está ubicada en la finca “La Jarandilla”, que se encuentra dentro del término municipal de Vejer de la Frontera (Cádiz), aproximadamente a 8 km de dicha localidad.

Por su localización, esta instalación presenta las características idóneas para realizar los estudios necesarios que determinen la viabilidad de implantar en la misma un sistema de producción eléctrica basado en el aprovechamiento de distintas fuentes de energía alternativas.

Así pues, el objeto principal del estudio es dotar a la edificación, ya existente, de las instalaciones necesarias para conseguir una completa autosuficiencia energética desde el punto de vista eléctrico. Para ello, se analizará un sistema híbrido eólico-fotovoltaico destinado a la generación y acumulación de energía eléctrica, partiendo siempre de la premisa de conseguir una instalación viable.

Los puntos más importantes en los que se ha centrado el proyecto han sido los siguientes:

- Estudio del proceso productivo.
- El dimensionado de las instalaciones necesarias para el desarrollo de una explotación avícola automatizada.
- La estimación de la necesidad energética a cubrir.
- El estudio del potencial energético de la zona en la que se encuentra la explotación, desde un punto de vista eólico y fotovoltaico.
- Dimensionado del sistema híbrido eólico fotovoltaico.
- Las consideraciones necesarias para un correcto mantenimiento de la instalación.
- Aspectos medioambientales que influyen en este tipo de explotación.
- Estudio económico de la inversión necesaria para implementar el sistema híbrido. Comparándola con los costes que supondría un suministro desde la red eléctrica de distribución.

2. PROCESO PRODUCTIVO

A la hora de diseñar un alojamiento para aves de engorde, hay que tener en cuenta una serie de aspectos que vienen principalmente limitados por el control ambiental de la instalación. No olvidando la necesidad de cubrir la demanda de agua y alimentos de los animales.

Como la superficie del recinto ya se encuentra determinada, este será el primer factor que limita el número máximo de aves que se pueden criar. La superficie mínima que necesita cada ave viene determinada por su morfometría (tamaño y edad) y por el espacio que necesita el animal en sus movimientos para su correcta evolución y mejor producción. A su vez, la densidad de animales en una nave de pollos para engorde (broilers) depende por tanto de su climatización, del equipamiento y del peso final que alcanzará el ave.

Siguiendo las recomendaciones de carácter europeo, no se deben superar los 34 kg/m², lo que equivale, para pollos de 2 a 2,5 kg (peso comercial en España) a una cantidad de 14 a 17 aves/m². Por otra parte la Real Escuela de Avicultura recomienda la utilización de unas densidades en función de la climatización de la nave y de la época del año según se observa en la siguiente tabla 1:

| BROILERS | | Ventilación natural (pollos/m ²) | Ambiente controlado (pollos/m ²) |
|----------|----------|---|---|
| | INVIERNO | 12-14 | 18-22 |
| | VERANO | 10-12 | 13-18 |

Tabla 1. Número máximo de pollos por m²

Teniendo en cuenta estas dos consideraciones, y sabiendo que la superficie útil del recinto es aproximadamente de 1.160 m², se estima lo siguiente:

- 20.400 animales (17,60 aves/m²) para las camadas de invierno y primavera.
- 14.800 animales (12,80 aves/m²) para las camadas estivales.

Otro aspecto importante es la determinación del número de camadas. En el caso de los pollos broilers, el tiempo medio de crianza por camada es de 7 semanas aproximadamente, aunque parte de la misma (un 25 %) será retirada pasadas 6 semanas, para de esta manera permitir un mejor desarrollo del resto y evitar un aumento del índice de mortalidad. Entre camada y camada se dejará un periodo aproximado de 10-14 días para la limpieza y desinfección de la zona de engorde.

La crianza del pollo broiler se realiza sobre el suelo, ya que si se hiciera en baterías, las jaulas producirían heridas a los animales, con lo que se dificulta el desplume mecánico de los mismos y hace descender la calidad del producto. Sobre la solera de hormigón, al inicio de cada camada se extiende una cama de cáscara de arroz, denominada yacija, que servirá de suelo a las aves.

3. NECESIDADES ENERGÉTICAS

El diseño de las instalaciones se ha realizado de manera que sea posible utilizar la totalidad de las mismas o sólo la mitad. De esta forma únicamente será necesario poner en funcionamiento la mitad de los equipos durante las dos primeras semanas de cada camada; obteniendo, además, una mejor distribución de los polluelos, lo cual facilita un control térmico más adecuado.

Para el acondicionamiento del recinto se pueden dividir las instalaciones en dos grupos:

- Instalaciones para alimentación de las aves: comederos y bebederos.
- Instalaciones para control ambiental de la misma y su automatización:

ventilación, refrigeración, iluminación y la automatización para el control de todo el proceso.

El consumo eléctrico de estas instalaciones viene determinado por las necesidades energéticas (descanso, alimentación y ventilación) de las aves, las cuales son variables durante el periodo de crecimiento de las mismas. Es decir, el crecimiento de las aves es el que fija las necesidades de climatización así como el número de horas de funcionamiento de los motores de los comederos y bebederos. Además, se ha tenido en cuenta un factor global de rendimiento del 60% en concepto de pérdidas Joule en la instalación, auto-descarga de la batería y rendimiento del inversor y de la batería. En la figura 1 se muestra la curva de demanda de energía eléctrica de la granja avícola en el periodo de un año.

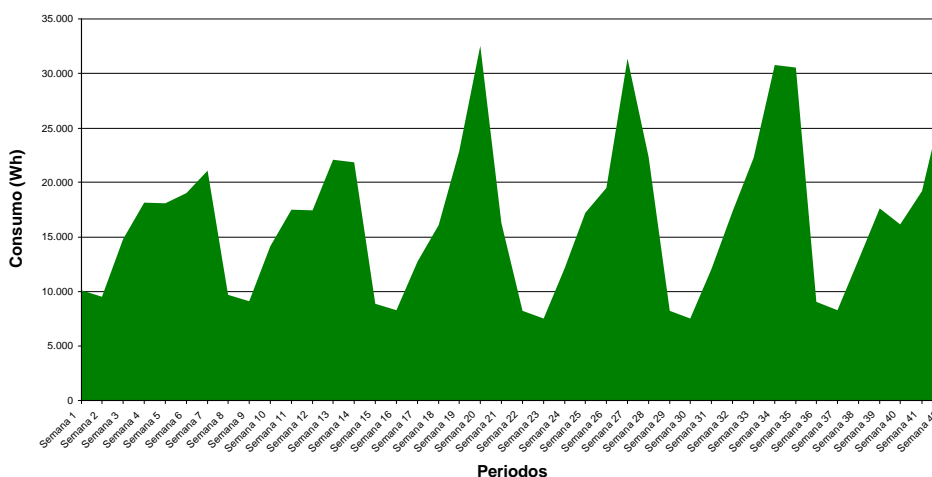


Figura 1. Necesidades energéticas en un año

Según se observa en la figura 1, solo se han considerado 42 semanas del año, que son aquellas en las que se produce engorde de las aves. Además, la curva de demanda presenta unos máximos debidos a la edad avanzada del ave y por tanto al aumento de las necesidades energéticas.

4. INSTALACIÓN HÍBRIDA SOLAR EÓLICA

Para muchos, hablar de diseño y dimensionado de sistemas fotovoltaicos eólicos queda reducido a calcular el número de paneles, aerogeneradores y el tamaño de la batería de acumuladores. Sin embargo, el concepto de diseño tiene que ser mucho más amplio y debe englobar todas aquellas tareas y especificaciones que se han de tener en cuenta para que el sistema funcione satisfactoriamente, con el menor coste y con la mayor fiabilidad técnica. En consecuencia, se tratará de encontrar la mejor solución de compromiso entre coste y fiabilidad. En el caso de esta explotación avícola, la fiabilidad será un factor clave, ya que, no puede quedar desabastecida de energía en ningún momento, pues las pérdidas económicas, derivadas del no funcionamiento de los equipos necesarios para que las aves tengan el ambiente de confort necesario, serían elevadas.

4.1 Consideraciones preliminares

Siguiendo las recomendaciones de la Junta de Andalucía relativas al diseño de instalaciones eólicas fotovoltaicas, la dotación mínima está formada por un conjunto de paneles fotovoltaicos, un conjunto de aerogeneradores, un equipo

regulador, un conjunto de acumuladores, un convertidor de corriente continua-alterna (inversor), así como un punto de conexión-eléctrica por si fuese necesario en caso extremo la aportación energética de un grupo electrógeno.

La tensión de trabajo en corriente continua de la instalación viene condicionada por el nivel de electrificación. Siguiendo las recomendaciones del IDAE (Tabla 2), la tensión de trabajo elegida es de 48 V.

| Potencia (Wp) | Tensión CC (V) |
|-----------------|----------------|
| < 400 | 12 |
| 400 a 5.000 | 24-48 |
| > 5.000 | 48-110 |

Tabla 2. Elección de la tensión de corriente continua

Las instalaciones de energía solar fotovoltaica por su carácter autónomo han de ser dimensionadas para que proporcionen energía interrumidamente durante todo el año, esto obligaría a calcular el número de módulos necesarios para cubrir la época del año, en la cual la relación entre consumo energético y potencial energético fuera más desfavorable. Sobrando gran cantidad de energía en otros meses del año, y encareciendo considerablemente el proyecto.

Por otro lado la energía eólica a pesar de ser más barata que la fotovoltaica es de arriesgada aplicación en sistemas autónomos por la discontinuidad con la que es suministrada.

Aprovechando que los periodos anuales de menor insolación suelen ser los de mayor potencial eólico, parece evidente que combinar las dos fuerzas es una solución segura y lógicamente más barata para sistemas autónomos de electrificación.

De esta manera se consigue abaratar el coste del kW instalado, debido a que actualmente el coste de la unidad de potencia instalada con energía fotovoltaica es del orden de un 50% más cara que la instalada mediante aerogeneradores.

Por otra parte, el hecho de utilizar una doble fuente de energía permite aumentar la fiabilidad en la continuidad de suministro eléctrico, con lo cual el subsistema de acumulación se podrá dimensionar considerando que el número de días de autonomía necesarios será inferior al que se sería necesario si solo se contará con una fuente energética, lo cual lógicamente también abarata los costes de la instalación, en los cuales el peso del conjunto de baterías necesarias tiene un peso específico muy importante.

4.2 Descripción de la instalación

El sistema generador estará compuesto por una parte de un conjunto de módulos fotovoltaicos y por otra de aerogeneradores, estos dos subsistemas serán los encargados de transformar tanto la radiación solar, como la fuerza del viento en electricidad.

El número de **aerogeneradores** y de **paneles solares** se han calculado [Ortega, Censolar] teniendo en cuenta no sólo los datos metereológicos del lugar sino

también la curva de demanda energética a lo largo del año. Ambos factores presentan fluctuaciones importantes y en consecuencia ha sido necesario adaptarlos correctamente para obtener el mayor rendimiento posible de la instalación.

En la figura 2 aparece representado el esquema básico de la instalación, donde se pueden identificar cada uno de los equipos más importantes que intervienen en la conversión de energía.

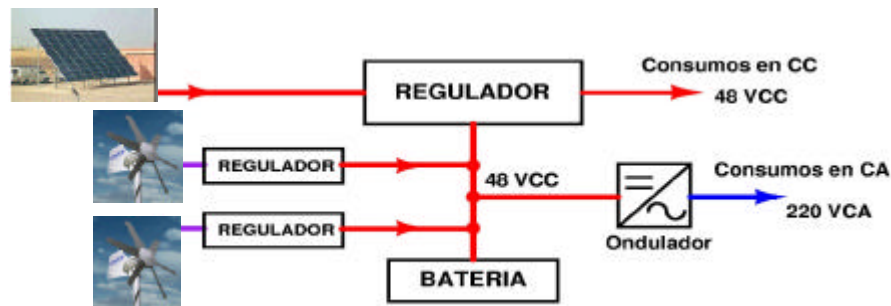


Figura 2. –Esquema básico de la instalación híbrida Solar-Eólica

Si las condiciones de viento y/o de irradiación solar son las adecuadas, los aerogeneradores y/o los paneles fotovoltaicos generarán la energía eléctrica necesaria para satisfacer la demanda eléctrica de la granja. Si existe sobrante de producción eléctrica, este es absorbido por la **batería**, a menos que ésta se encuentre plenamente cargada, en cuyo caso se impide el paso de corriente mediante los **reguladores de carga**. Éstos además tienen las siguientes funciones:

- Evitar sobrecargas a la batería, que puedan producir daños irreversibles al sistema.
- Impedir la descarga de la batería a través de los paneles y los aerogeneradores en los periodos de escasa radiación solar y viento.
- Asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficiencia.

Así pues, un buen sistema de regulación no sólo permite aprovechar al máximo la energía suministrada por las placas fotovoltaicas y los aerogeneradores, sino que también es esencial para garantizar una buena protección y utilización de las baterías.

Parte de la demanda de energía eléctrica se realiza en corriente continua (bombas de agua) mientras el resto se realiza en corriente alterna. En consecuencia, es necesario instalar un **inversor** que convierta la corriente continua a 48 V en corriente alterna a 220 V, para la utilización de los aparatos eléctricos diseñados para trabajar con este tipo de corriente.

En los periodos donde las condiciones climáticas sean desfavorables desde el punto de vista de irradiación solar y viento, la energía eléctrica es extraída de la batería, disminuyendo esta su nivel de carga. El tipo de batería mas adecuado para este tipo de aplicaciones es el de ciclo profundo ya que puede entregar, lenta pero constantemente, su energía en forma continuada durante varios años sin problemas. Puede soportar un promedio de 2000 ciclos, donde cada ciclo es una carga y descarga al 80% de su capacidad. La capacidad de la batería se ha

dimensionado para una autonomía máxima de la instalación de 3 días, considerando la situación más desfavorable, es decir el día en donde se produzca la máxima demanda. Cumpliendo en consecuencia los requisitos exigidos por el organismo competente para poder obtener la correspondiente subvención. El número de elementos y equipos, así como sus características más relevantes, que conforman la instalación son los siguientes:

- 36 paneles fotovoltaicos de una potencia máxima de 110 W/ud a una tensión de 17,4 V. Conectados en nueve grupos en paralelo de 4 paneles en serie cada uno de ellos para obtener los 48 VCC nominales.
- 2 aerogeneradores con generador trifásico de imanes permanentes de 1 kW/ud de potencia nominal para una velocidad del viento de 11 ms^{-1} . Llevan incorporado su propio regulador, que además de convertir la corriente alterna trifásica en corriente continua, cumplen las funciones propias de un regulador de carga.
- 1 batería de plomo ácido estacionaria de 3320 Ah de capacidad nominal, formada por 24 elementos de 2 V cada uno de ellos.
- 1 regulador de carga de 48 V de tensión de trabajo, con una intensidad máxima en la línea de carga y en la de consumo de 75 A respectivamente.
- 1 inversor de onda senoidal pura de 4,2 kVA. El rango de tensión de entrada es $40\div 64 \text{ VCC}$, siendo 220 VCA y 50 Hz la tensión y frecuencia nominal de salida.

4.3 Producción de energía eléctrica

Para evaluar la producción de energía eléctrica, se utilizaron los datos históricos capturados por la estación meteorológica que la Conserjería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía tiene situada en Vejer de la Frontera.

Para que los valores sean lo más reales posibles se realizaron las medias semanales de los dos últimos años de la velocidad media del viento para cada uno de los periodos de cría de cada camada. Las medidas tomadas por el anemómetro de la estación meteorológica están realizadas a una altura de 1,8 m, lo cual será importante para poder calcular la energía producida por cada aerogenerador, ya que la velocidad del viento a la altura a la que se instalará el aerogenerador (13 m) es mayor.

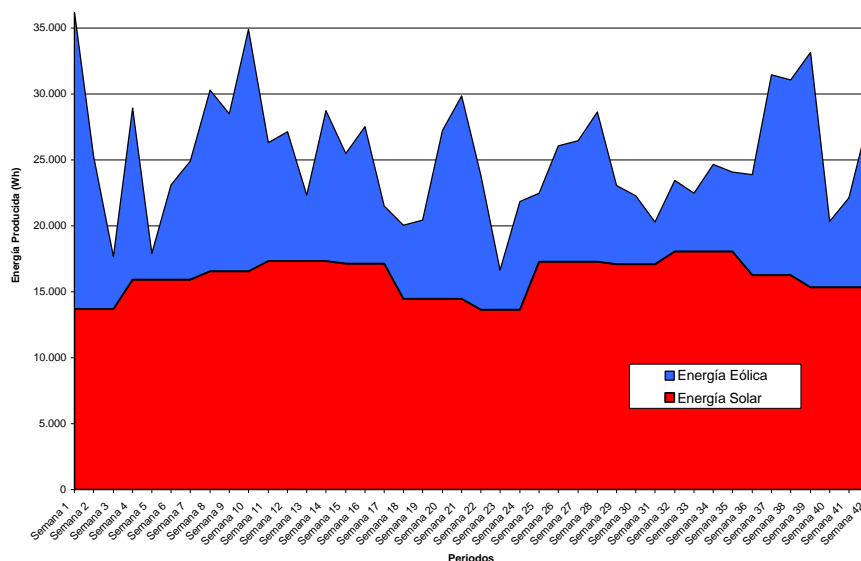


Figura 3. –Evolución anual de la Producción de energía eléctrica

Por otro lado, tras comprobar su concordancia con los históricos, se utilizaron los niveles medios de radiación solar que la propia Conserjería determina para esta zona de la provincia de Cádiz.

En la figura 3 se observa la energía máxima que son capaces de suministrar los paneles fotovoltaicos y los aerogeneradores a lo largo del año.

5. BALANCE ENTRE DEMANDA Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En la figura 4 se compara la energía máxima que se puede obtener de los paneles y de los aerogeneradores frente a la demanda de energía eléctrica.

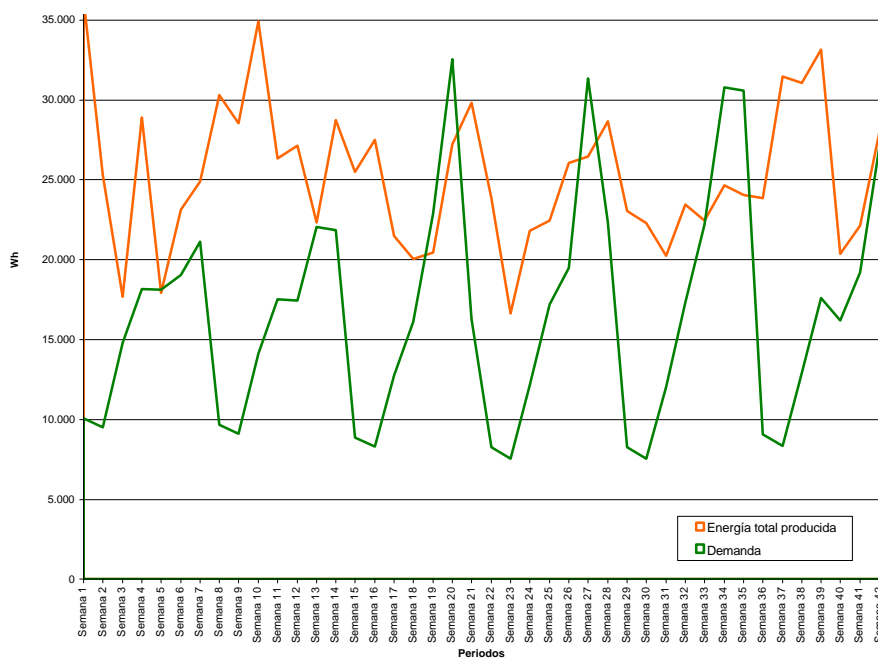


Figura 4. – Evolución anual de la Demanda y de la Producción de energía eléctrica

Como se aprecia en la figura 4, hay semanas donde la demanda no es satisfecha y por tanto habrá que considerar la energía que proporciona la batería. Como la batería ha sido diseñada para una autonomía de 3 días en las condiciones más desfavorables, implica que con la batería va a ser posible suplir el déficit de energía que se produce en determinadas semanas.

6. MANTENIMIENTO

Las operaciones de mantenimiento son necesarias para evitar los problemas derivados del mal funcionamiento o rotura de los equipos [Navarro], así como para mantener la eficiencia de toda la instalación, lo cual conlleva un aumento de su vida útil.

6.1. Paneles fotovoltaicos

El mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas no es muy problemático, al carecer éstas de partes móviles. No obstante, esto no implica que se descuide su mantenimiento ya que su elevado coste, implica reparaciones de elevado coste en caso de deterioro. El principal parámetro que condiciona el mantenimiento de estos elementos es la suciedad que ocasiona el polvo y otros agentes, como los residuos industriales y los procedentes de las aves. Éstos crean una cubierta traslúcida sobre la cara superior (transparente) de los paneles que reduce la

eficiencia de los mismos. Otro parámetro también básico del mantenimiento preventivo es de prestar especial atención a que ningún objeto, como árboles próximos, ya sea de forma circunstancial o permanente proyecte sombras sobre los paneles. Los procesos [Roldán] que abarca este mantenimiento son:

- Limpieza superficial de los paneles.
- Inspección visual que detecte degradaciones internas.
- Control de la estanqueidad de los paneles.
- Control del estado de las conexiones eléctricas y del cableado.
- Control de sus características eléctricas.

6.2. Acumuladores

Los ciclos de carga y descarga a los que se ve sometido el conjunto de baterías llevan asociados una cierta evaporación del electrolito. Por consiguiente, sin un adecuado mantenimiento, los procesos químicos que ocurren en el interior de los acumuladores provocan la paulatina degradación de éstos. Las operaciones [Roldán] más usuales son:

- Medida de la densidad del electrolito.
- Comprobación del nivel del electrolito y su relleno, si fuese necesario.
- Comprobación de la tensión sin carga de los elementos del acumulador.
- Revisión del estado de los terminales. Se procederá a la limpieza de los posibles depósitos de sulfato y a cubrir con vaselina neutra todas las conexiones.

El local destinado a las baterías debe mantenerse con una temperatura entre los 15° y 30°C para un óptimo funcionamiento. En caso que no se puedan conseguir siempre estas temperaturas, por lo menos habrá que evitar la humedad y las condensaciones dentro de la habitación. Para ello es preciso airear y revisar las paredes en busca de posibles focos de humedad y garantizar que las ventanas destinadas a su correcta ventilación están libres de cualquier barrera que impidan una ventilación adecuada.

6.3. Aerogeneradores

Las operaciones de mantenimiento [Roldán] implican una inspección visual minuciosa y una comprobación de los ajustes (pares de apriete) y del estado de lubricación de los elementos incluidos en la correspondiente revisión programada. Desde el punto de vista de mantenimiento y seguridad, los componentes críticos incluidos en la correspondiente revisión programada son: Palas, buje, eje principal, soportes de ejes, corona de orientación y torre.

6.4. Equipos de regulación, control y adaptación de corriente.

Éstos son unos equipos de alta fiabilidad, los propios fabricantes aseguran que el mantenimiento de los mismos es mínimo, ahora bien, no se puede olvidar que tanto el regulador como el inversor son aparatos electrónicos sofisticados, y que por lo tanto precisan de un mantenimiento periódico [Roldán].

Se comprobará las conexiones eléctricas (revisar el estado y apriete de todos los bornes) y el cableado, debiéndose verificar las juntas de todos los equipos.

También se comprobará la tensión de ajuste del regulador a la temperatura del local en donde va colocado. Si se tiene que cambiar esta tensión de referencia, se realizará de acuerdo con las especificaciones facilitadas por el fabricante, o bien, se sustituirá el equipo por otro hasta que sea reparado y tarado en el taller.

En cuanto a mediciones se debe realizar la verificación de niveles de parámetros de estado estable de los equipos, los más importantes serían:

- Perfil de tensión de línea a línea en el inversor y en el regulador
- Niveles de corriente del regulador y del inversor
- Potencia real y potencia aparente a la salida del inversor
- Factor de potencia de entrada
- Factor de potencia de salida

7. IMPACTO AMBIENTAL

La energía solar fotovoltaica y la energía eólica son fuentes de energía renovables, lo que significa que es inagotable a escala humana, al contrario de lo que ocurre con las llamadas energías convencionales.

Las crisis energéticas de 1973 y de 1980 [Ley del sector eléctrico] marcan el comienzo del aprovechamiento eólico y solar como fuentes de energía. Hoy día, la creciente preocupación por los problemas ambientales ha incrementado el interés de estas fuentes de energía, ya que el uso de energías limpias implica ausencia de combustión, no existiendo emisión a la atmósfera de contaminantes, como humos, cenizas, óxidos de nitrógenos, dióxidos de azufre y carbono. La gran mayoría de las aplicaciones mediante este tipo de energías, se localiza en el ámbito local, por lo que al realizar la generación de electricidad en el mismo sitio que el consumo, no es necesaria la creación de infraestructuras de transporte energético, como pistas, cables, postes. Es decir, se evita el impacto derivado de su empleo.

Podemos decir, que en conjunto los aspectos medioambientales relacionados con el empleo de energía solar fotovoltaica y eólica son muy positivos, produciéndose efectos beneficiosos de cara al entorno, tanto por la comparación con otras posibles soluciones de abastecimiento energético como directamente por los beneficios generados en las propias aplicaciones.

8. RENTABILIDAD DE LA INSTALACIÓN

Hay tres razones fundamentales por las que el futuro propietario de una instalación como la descrita, se decida a acometer la instalación:

- a) Uso de energías renovables y no contaminantes.
- b) Lograr una autosuficiencia respecto a los suministros de energía tradicionales.
- c) Obtener un beneficio económico.

Salvo excepciones, la tercera razón es la que prima a la hora de tomar la decisión. Por tanto, es necesario evaluar la inversión que se produce con la instalación descrita usando la energía del sol y del viento frente a la necesaria si se lleva a cabo con un suministro de energía eléctrica convencional. Como la instalación es de nueva construcción habrá que considerar la inversión diferencial.

En este caso concreto, para acometer un suministro de energía eléctrica convencional es necesario recurrir a la construcción de una línea de alta tensión de unos 4 km aproximadamente con un coste estimado de 39.000 euros. El coste anual de la factura eléctrica sería de 2.045 euros, el cual representa a su vez el ahorro que se produciría anualmente si el propietario se decidiera por la instalación híbrida.

El coste total de la instalación solar eólica con todos y cada uno de los equipos descritos en el artículo asciende a unos 69.000 euros, de los cuales son subvencionados un 40 %, de forma que el desembolso necesario es de 41.400 euros. Por tanto, la inversión diferencial es de 2.400 euros. El coste del mantenimiento anual se ha estimado en un 2% del total de la instalación solar eólica, es decir 1.380 euros.

Para poder evaluar correctamente y comparar las cantidades que intervienen en el estudio de rentabilidad de una instalación es preciso tener en cuenta que éstas tendrán distinto valor en función del momento en el que se generan.

Considerando una tasa de inflación del 2 % y un tipo de interés financiero del 4 %, el **plazo de retorno** de la inversión sería de 5 años aproximadamente.

Otro parámetro importante en la selección de inversiones es la **tasa interna de rentabilidad** (TIR), que no es más que el tipo de interés que tendría que existir para que la inversión realizada, una vez llegado al final de su vida útil, hubiera producido el mismo beneficio que una capitalización con dicho tipo de interés. Estimando una vida útil de la instalación de 20 años, el TIR resultaría del 24 %.

Estos resultados muestran que la instalación híbrida solar eólica propuesta en este artículo puede ser atractiva para su aplicación en la nueva granja avícola, ya que, por un lado a partir del quinto año ya quedaría amortizada, y por otro lado al final de su vida útil estimada su rentabilidad es muy superior a lo que se puede obtener hoy en día en el mercado financiero.

REFERENCIAS

- Ortega, M., Energías renovables. Ed. Paraninfo.*
Censolar. Instalaciones de energía solar. ProgenSA.
Ley del Sector Eléctrico. Ley 54/1997, de 27 de noviembre.
Navarro, L. y otros. Gestión integral de mantenimiento. Marcombo, 1997.
Roldán Vitoria, J. Manual de mantenimiento de instalaciones. Paraninfo, 1997.

CORRESPONDENCIA

Alfonso Bachiller Soler, Pedro J. Martínez Lacañina

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Universitaria Politécnica
Universidad de Sevilla
c/ Virgen de Africa, 7
41011 Sevilla

Tfno: +34 95 455 28 31 / +34 95 455 38 31 Fax: +34 95 428 27 77
e-mail: abslhm@us.es , pedroj@us.es