



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Optimización probabilística de sistemas aislados
de la red eléctrica basados en fuentes renovables

Autor:

Carlos Rodríguez Barat

Director:

Rodolfo Dufo López

Escuela de Ingeniería y Arquitectura / Universidad de Zaragoza
2016



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. Carlos Rodríguez Barat

con nº de DNI 18173690-X en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado, (Título del Trabajo)

Optimización probabilística de sistemas aislados de la red eléctrica basados en fuentes renovables.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21 de Septiembre del 2016

Fdo: Carlos Rodríguez Barat

Optimización probabilística de sistemas aislados de la red eléctrica basados en fuentes renovables

RESUMEN

El objetivo de este trabajo se centra en la alimentación eléctrica de un repetidor de telefonía ubicado en el monte del Perdón, en la comunidad autónoma de Navarra.

Esta alimentación eléctrica se ha realizado mediante energías renovables, lo que ha llevado a diseñar un sistema híbrido adecuado para cumplir con los objetivos de consumo que dicho repetidor requería.

Una de las principales peculiaridades de este trabajo es que se ha realizado una optimización estocástica para considerar la variabilidad de los recursos. En primer lugar se ha realizado un estudio determinista y posteriormente se han realizado varios estudios estocásticos con objetivo de encontrar la solución que cumpliera con los requisitos impuestos y además lo hiciera de la forma más económica posible, todo ello realizado mediante el software iHOGA.

Una vez encontrada la solución óptima para alimentar el repetidor de telefonía, se ha realizado un pequeño estudio de sensibilidad económica en donde se han tenido en cuenta las posibles variaciones económicas que puede sufrir el mercado en cuanto a inflación esperada, interés de mercado o variaciones en precios de los componentes del sistema híbrido generado.

Como conclusión principal del trabajo, se deduce la importancia de la realización de optimizaciones estocásticas para considerar la variabilidad de los recursos y así dar una solución más exacta. Tras realizar un estudio probabilístico con 1000 iteraciones mediante el software iHOGA, se ha considerado como solución óptima al sistema híbrido formado por: 4 serie X 15 paralelo paneles fotovoltaicos aS112-Schott y dos generadores DC AIRX además de 24 baterías OPZS Hawker, un regulador de 235 A y un inversor STECA SOLARIX de 1800 VA.

Para finalizar se han realizado tres anexos en los que se explican de manera más detallada: las principales variables meteorológicas tenidas en cuenta para la optimización del sistema, las principales características de los componente que se han tenido en cuenta para la construcción del sistema híbrido y los cálculos matemáticos que el software iHOGA ha seguido para la obtención de la potencia generada por los diferentes elementos del sistema.

Índice

1. Introducción.....	Página 1
2. Sistemas híbridos aislados.....	Página 2
3. Optimización estocástica.....	Página 5
4. Caso de aplicación	Página 6
4.1. Variables meteorológicas.....	Página 6
4.2. Consumo típico.....	Página 8
4.3. Componentes del sistema.....	Página 9
4.4. Optimización determinista.....	Página 10
4.5. Optimización estocástica del caso de aplicación.....	Página 15
4.6. Análisis de sensibilidad.....	Página 20
5. Conclusiones.....	Página 28
6. Bibliografía.....	Página 29
7. Anexo 1.....	Página 30
8. Anexo 2.....	Página 34
9. Anexo 3.....	Página 38
10. Bibliografía anexos.....	Página 40

1. Introducción

El principal objetivo de este trabajo es realizar la optimización de sistemas renovables aislados de la red eléctrica (sistemas que incluyen energía solar fotovoltaica, eólica, baterías y combinaciones en sistemas híbridos). Esto se realiza habitualmente de forma determinista, sin considerar la variabilidad de los recursos y el consumo a lo largo de los años. En este trabajo, además de la resolución determinista, se va a realizar la optimización estocástica, considerando la variabilidad de la irradiación solar, la velocidad del viento, la temperatura y el consumo del sistema a estudiar mediante simulación de Monte Carlo.

El sistema a optimizar es el correspondiente al suministro eléctrico de un repetidor telefónico aislado de la red eléctrica situado en el 'Monte del Perdón' (Navarra), que va a ser alimentado por una combinación híbrida de energías renovables, considerándose la variabilidad de los agentes meteorológicos como se ha comentado anteriormente.



Fig. 1. Repetidor de telefonía en el Monte del Perdón

Además de estudiar la variabilidad de las variables ya comentadas, se va a realizar un análisis de sensibilidad para ver el efecto de la variación de distintas variables económicas, como el interés, la inflación y los precios de los componentes.

Para la realización del trabajo expuesto anteriormente se va a usar principalmente el software iHOGA [1].

2. Sistemas híbridos aislados

Los sistemas híbridos de generación eléctrica autoabastecidos, combinan distintas tecnologías de generación eléctrica para cubrir una determinada demanda energética.

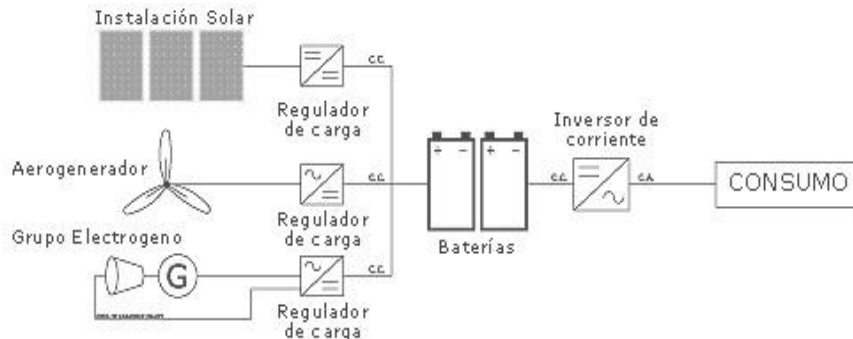


Fig. 2. Esquema de un sistema híbrido aislado [2]

Como se puede ver en la figura 2, los sistemas híbridos están generalmente compuestos por generadores diésel, paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y bancos de baterías, además de los reguladores de carga de las baterías y del inversor para poder obtener corriente alterna para el consumo. En algunos casos los reguladores y el inversor están integrados en un solo aparato denominado inversor-cargador o inversor bidireccional. Algunos sistemas híbridos no disponen de todas las fuentes energéticas, por ejemplo los sistemas fotovoltaico-eólicos, que no disponen de diésel. A continuación se pasará a explicar por separado, cada una de estas formas de generar energía.

Energía solar y paneles fotovoltaicos:

La energía solar es la que se aprovecha de la irradiación solar. Se pueden distinguir dos maneras de aprovechar esta energía de forma activa, mediante colectores solares o mediante placas fotovoltaicas para obtener electricidad (Fig. 3.)

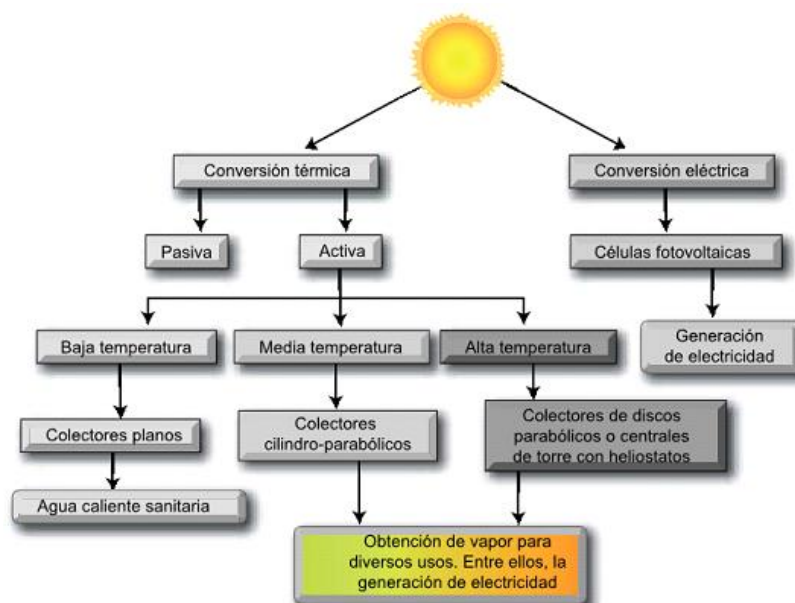


Fig. 3. Esquema sobre los posibles usos de la energía solar [3]

En concreto la energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente de la radiación solar gracias a células fotovoltaicas, o bien mediante la unión de metales y sustrato a cuyo conjunto se le denomina célula solar de película fina. Con este tipo de energía se pueden alimentar aparatos autónomos, abastecer lugares aislados de la red eléctrica o producir electricidad a gran escala a través de redes de distribución.

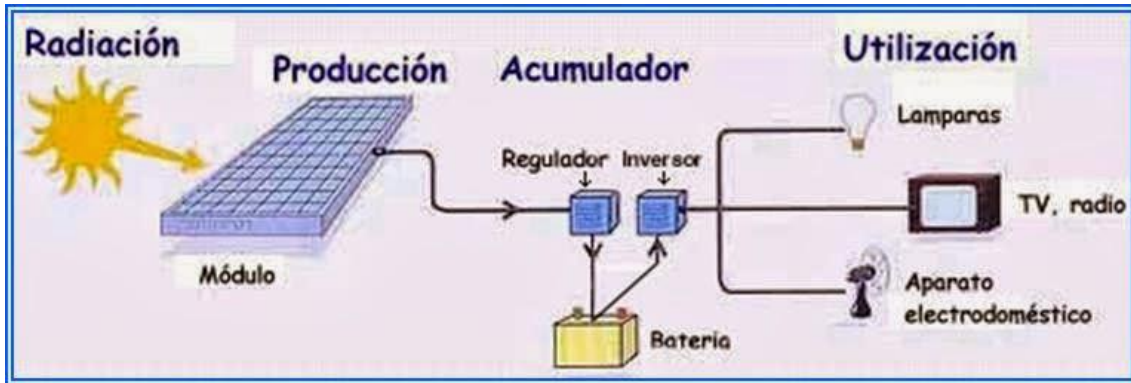


Fig. 4. Estructura general de un sistema de energía solar [4]

Otro aspecto importante es la orientación de las placas, en las zonas de Aragón y Navarra lo normal es una inclinación de unos 60 grados (aproximadamente el valor de latitud más 15°) con el objetivo de maximizar, en sistemas aislados, la producción en el mes peor (Diciembre, el mes con menor irradiación diaria media mensual). El azimut es también un parámetro a tener en cuenta (Fig. 5.), en el hemisferio norte siempre se toma 0° (quiere decir orientada al sur) para aprovechar al máximo la radiación solar.

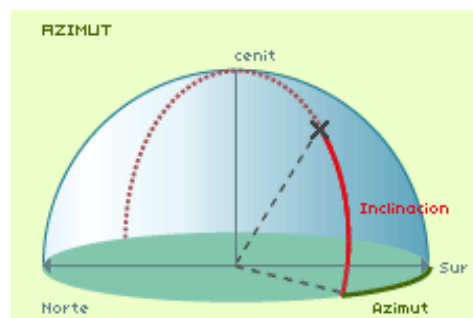


Fig. 5. Definición de Azimut [5]

Energía eólica y aerogeneradores:

Es la energía obtenida a partir del viento, y que posteriormente es convertida en otras formas útiles de energía para las actividades humanas. La energía eólica puede ser utilizada para producir electricidad con aerogeneradores conectados a las redes de distribución, aunque también sirve para abastecer a lugares aislados de la red eléctrica.



Fig. 6. Aerogeneradores de eje vertical, sin hélices y de eje horizontal [6]

Como se puede ver en la imagen anterior existen varios tipos de aerogeneradores diferentes, aunque los más usados en la actualidad y a los que se hará referencia en el resto del trabajo, son los aerogeneradores de eje horizontal de tres aspas.

Los pequeños aerogeneradores usados en sistemas aislados suelen incorporar su propio regulador de carga de las baterías.

En el anexo 3 se puede ver la forma de obtener la potencia en un aerogenerador. En el anexo 2 se pueden ver las curvas de potencia y principales características de una turbina.

Generador Diésel:

Un generador diésel se encarga de convertir el combustible diésel en electricidad. Un motor a diésel quema combustible para producir movimiento por el generador, y posteriormente ese movimiento se convierte en electricidad en el alternador. El motor y el generador eléctrico están conectados por un cigüeñal, para poder transferir el movimiento del motor al rotor generador.

Como se ha comentado, un uso habitual del generador diésel puede ser el de formar parte de un sistema híbrido, no es una fuente renovable pero puede ser un elemento de gran importancia ya que si se usa de forma adecuada, el tamaño de las baterías del sistema híbrido puede disminuir considerablemente. En general el generador diésel en el sistema híbrido puede significar una reducción del coste total de la energía (siempre que el diésel funcione pocas horas al año y suponiendo una inflación del precio del gasoil no muy elevada).

Así pues podemos concluir diciendo que los sistemas híbridos, al incluir varias fuentes de generación de energía, son en general más fiables que los sistemas que constan de una única fuente de generación y en algunos casos más económicos y menos contaminantes. Los sistemas aislados híbridos de generación de electricidad pueden incluir la fotovoltaica, la eólica y la minihidráulica (si bien se debe disponer de un salto hidroeléctrico, lo que no es habitual) y también fuentes no renovables, como el uso del generador diésel.

3. Optimización estocástica

Realizar una optimización estocástica se refiere a tener en cuenta las incertidumbres en las energías renovables y en la demanda. La velocidad del viento o la irradiación solar, son variables con una gran aleatoriedad que se debe de tener en cuenta al optimizar el sistema en cuestión.

El software iHOGA utiliza series horarias para la irradiación, temperatura, carga, etc., durante todo un año (8760 valores para cada serie de datos). Con estas series de datos, para cada combinación de componentes (número y tipo de paneles fotovoltaicos, el número y tipo de baterías, tipo de regulador fotovoltaico, tipo de inversor etc.) y las estrategias de control, el programa simula el funcionamiento del sistema.

En general, los valores medios de irradiación, velocidad del viento y de carga varían de año en año, por lo que su distribución de probabilidad de dichos valores medios anuales suele seguir una curva de distribución Gaussiana. Por ejemplo, en la figura 7, la función de densidad de probabilidad (PDF) de la irradiación diaria promedio anual en un lugar específico se muestra en rojo, y en verde podemos ver la curva de Gauss, que mejor se ajusta a dicha distribución de probabilidad

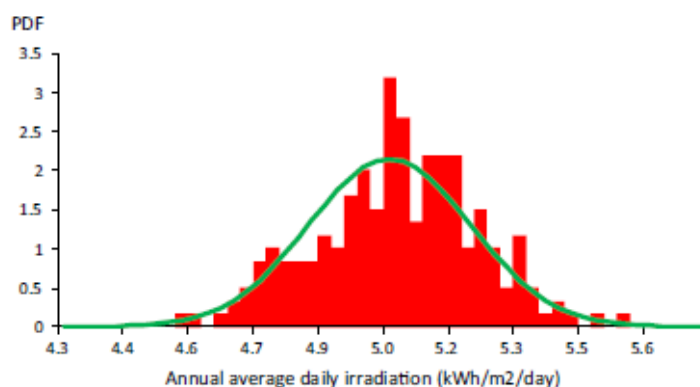


Fig. 7. Curva de Gauss [7]

En este caso, la media de la irradiación diaria promedio anual es 5 kWh / m2 / día, y la desviación estándar es de 0,2 kW h /m2 / día. Esto significa que en la mayoría de los años, la irradiación diaria promedio será de alrededor de 5 kWh / m2 / día; sin embargo, puede haber años con un mayor valor medio y otros con un valor medio más bajo. Por lo tanto, si conocemos la media y la desviación estándar de los valores medios de estas variables, se pueden llevar a cabo un análisis probabilístico mediante simulación de Monte Carlo, realizando diferentes combinaciones que siguen a las curvas de probabilidad de los valores medios de las diferentes variables.

El software simula el comportamiento de cada combinación de componentes y estrategia de control durante un año completo en intervalos horarios, extrapolando a la vida útil (habitualmente 25 años, coincidente con la vida estimada de los paneles fotovoltaicos). Los valores medios de las variables meteorológicas y el consumo se obtienen aleatoriamente siguiendo una distribución gaussiana (utilizando la media y desviación típica de los datos medidos o estimados). Una vez evaluado el comportamiento del sistema, se conoce si esa combinación de componentes puede cubrir la demanda, y en caso afirmativo se calcula el coste total actualizado del sistema (VAN), trasladando todos los flujos de caja al momento

inicial de la inversión, incluyendo los costes de adquisición, reposición y operación y mantenimiento. También se calcula el coste del kWh y otros resultados.

Mediante el método de Monte Carlo se repite la simulación n veces, obteniéndose los resultados (coste total neto actualizado, coste del kWh, etc.) en forma de distribuciones de probabilidad. De esta forma, el proyectista tiene más información que utilizando la optimización determinista, conociendo los valores medio, mínimo, máximo y desviación típica de las distintas variables de los resultados.

4. Caso de aplicación

4.1. Variables meteorológicas

El lugar concreto en el que se centra este trabajo es en el 'Monte del Perdón' también conocido como 'Erreniega' situado en la Comunidad Foral de Navarra. Se encuentra a una altitud de 1039 m y su latitud y longitud aproximadas son de $42,73^\circ$ y $-1,71^\circ$ respectivamente.



Fig. 8. Ubicación del Monte del Perdón [8]

La velocidad del viento a una altura de 10 metros sobre el terreno (altura a la que van a estar situados los bujes de los aerogeneradores), irradiación solar y temperatura son las variables meteorológicas que se van a obtener para poder cumplir con el objetivo del trabajo (en el anexo 1 se da más información acerca de estas variables meteorológicas). Estos datos han sido obtenidos, evidentemente, para la ubicación concreta del monte del Perdón en la comunidad autónoma de Navarra (MeteoNavarra.es [9]). Los datos horarios del año 2015 son los datos base que se utilizan en la optimización. Se han obtenido los valores medios de las distintas variables meteorológicas (irradiación, temperatura y viento) disponibles en dicha web y cuya distribución se puede ver en las figuras 9, 10 y 11. Para la irradiación y el viento se dispone de valores de 22 años mientras que para la temperatura solo hay datos de 16 años.

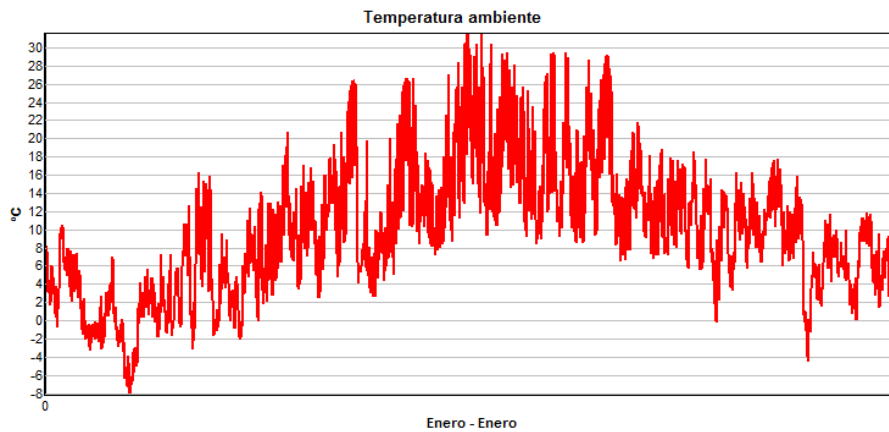


Fig. 9. Gráfica de los valores horarios de temperatura a lo largo del año

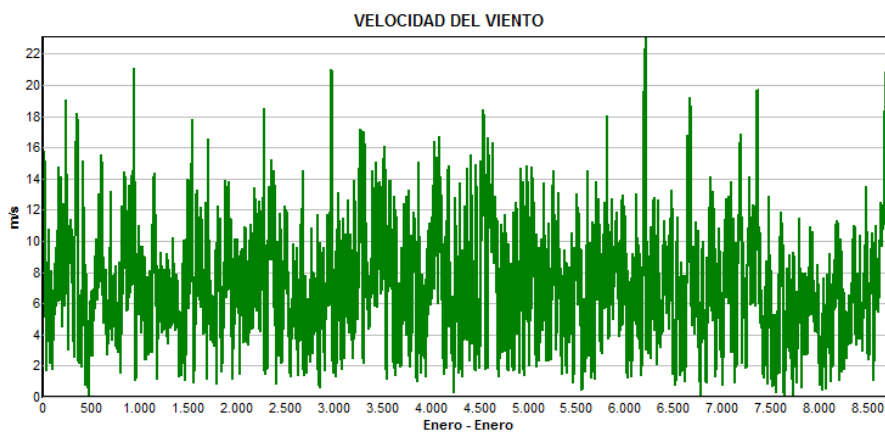


Fig. 10. Gráfica de los valores horarios de velocidad del tiempo a lo largo del año

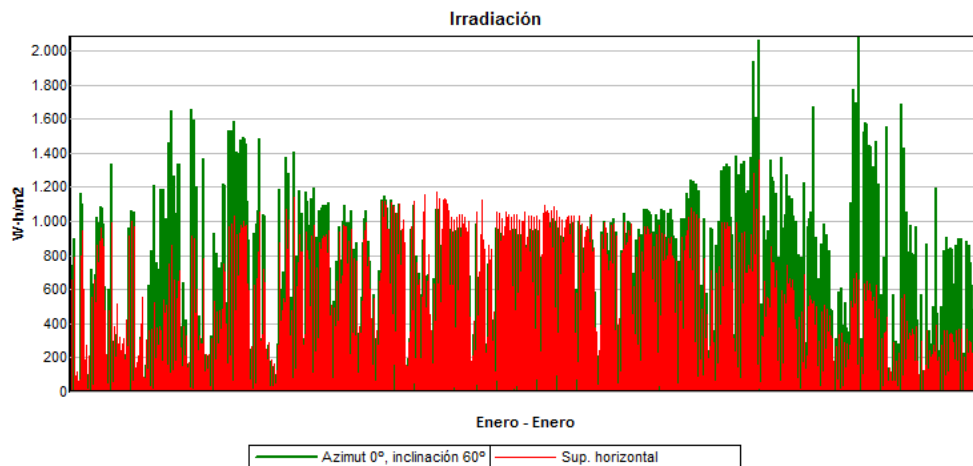


Fig. 11. Gráfica de los valores horarios de irradiación solar a lo largo del año

Hay que indicar que la media de los datos obtenidos sobre irradiación diaria media es 3.95 kWh/m^2 , pero este valor se refiere a la irradiación media sobre una superficie horizontal y en nuestro caso de estudio se necesita conocer el valor de esta irradiación sobre una superficie inclinada 60° y orientada al sur. Para ello se ha realizado la conversión de este dato de superficie horizontal a superficie inclinada de la siguiente manera, mediante el modelo de Hay, J. E., Davies, J. A [10] aplicándolo a la irradiación diaria media mensual y posteriormente realizando la media de los distintos meses para obtener la irradiación media anual:

$$I = R \times I_h$$

$$R = \left[1 - \frac{I_d}{I_h} \right] \times R_b + \frac{I_d}{I_h} \times \left[\frac{1 + \cos S}{2} \right] + \frac{\rho \times (1 - \cos S)}{2}$$

I = irradiación media diaria mensual sobre la superficie inclinada (KWh/m²); R = factor de conversión; I_h = irradiación media sobre plano horizontal (KWh/m²); I_d = radiación difusa diaria mensual (KWh/m²); R_b= relación entre media mensual de irradiación directa sobre superficies inclinada y horizontal; S= inclinación del panel respecto a la horizontal; ρ = reflectividad del suelo (suele tomarse 0,2 por defecto).

Tras realizar la conversión anteriormente indicada los valores medios anuales de las distintas variables meteorológicas quedan de la siguiente manera:

	Media	Desviación típica	Número de años
Irradiación diaria media sobre la superficie de los paneles (60º orientación sur)	5.16 kWh/m ²	0.186 kWh/m ²	22
Temperatura media	9.08 ºC	0.587 ºC	16
Velocidad del viento media sobre la altura de 10 m	8.30 m/s	0.685 m/s	22

Tabla. 1. Valores medios y desviaciones típicas de las variables meteorológicas

4.2. Consumo típico

El sistema híbrido que se va a dimensionar se realiza con el objetivo de satisfacer unos valores de consumo mínimo.

En el software iHOGA se han introducido unos valores de consumo típico provenientes de una estación real de telecomunicaciones y que han sido obtenidos del artículo “Fuel cell based power systems to supply power to Telecom Stations” [11], con un valor medio de consumo de aproximadamente 14,3 kWh/día. Se ha estimado una desviación típica de 0,4 kWh/día. La potencia máxima demandada en el año es 1083,13 W.

En la figura 12 se muestra el consumo horario estimado a lo largo del año, y en la 13 se muestra en detalle un mes concreto, en este caso Agosto.

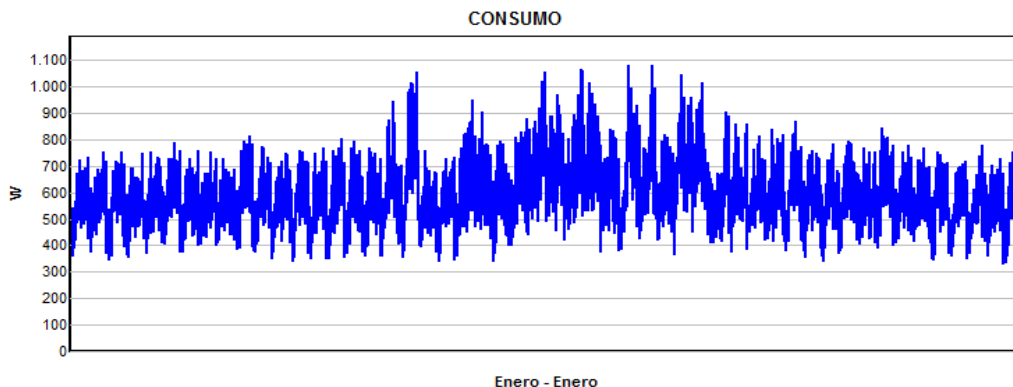


Fig. 12. Gráfica del consumo horario a lo largo del año.

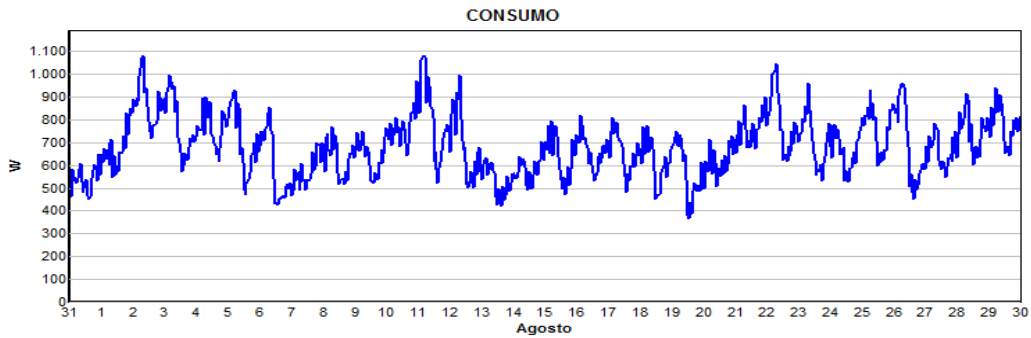


Fig. 13. Gráfica del consumo horario durante el mes de Agosto

4.3. Componentes del sistema

El sistema estudiado está formado por aerogeneradores (que incluyen su propio regulador de carga de las baterías), paneles fotovoltaicos, un conjunto de baterías, regulador PV de baterías y un inversor. A continuación se puede ver en la figura 14 obtenida del software iHOGA, los componentes enumerados anteriormente y la conexión entre ellos, desde la obtención de energía hasta el consumo de la misma.

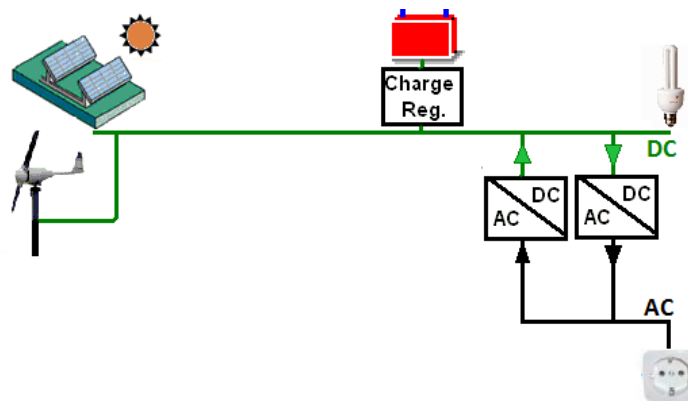


Fig. 14. Esquema del sistema híbrido estudiado

En el apartado ‘Sistemas híbridos aislados’ se han explicado de manera breve los tipos de componentes relacionados con la energía eólica y solar fotovoltaica así como algunas características de los aerogeneradores y placas solares. A continuación se van a explicar brevemente el resto de componentes que van a aparecer en el sistema: baterías, inversor y regulador.

Baterías solares:

Las baterías recargables más comunes que se pueden encontrar son de níquel-cadmio, de litio, baterías zebra y algunas de litio-azufre, si bien las de plomo-ácido son las más comunes en sistemas aislados estacionarios y por tanto las utilizadas en el sistema híbrido estudiado.

La estimación de la vida de las baterías de plomo-ácido se realiza considerando que el final de la vida se produce cuando la batería ha realizado un determinado número de ciclos completos de carga-descarga (Z_{IEC}), suministrados por el fabricante y definidos en la norma del comité electrotécnico internacional IEC [12].

Inversor:

Los inversores se encargan de transformar la corriente continua procedente de la instalación solar, en corriente alterna a la tensión adecuada para ser utilizada por la mayoría de aparatos eléctricos de consumo.

Existen varios tipos de inversores: los de onda senoidal pura o modificada, inversores solares de conexión a red o inversores de sistemas aislados.

Para el sistema híbrido estudiado en este trabajo, el inversor seleccionado es del tipo aislado de onda senoidal pura debido a sus adecuadas características.

Regulador:

Un regulador solar sirve para controlar el estado de las baterías, su estado de carga y la entrada y salida de corriente del panel solar para evitar sobrecargas en las baterías. De esta manera, el regulador permite alargar la vida útil de las baterías además de poder obtener información sobre la instalación del sistema.

Hay que comentar que dependiendo del tipo de optimización, los componentes elegidos son diferentes ya que hay una amplia gama de baterías, paneles fotovoltaicos, inversores etc. En el Anexo 2 se amplía la información de los componentes elegidos en los diferentes casos estudiados.

4.4. Optimización determinista

Una vez obtenidos los datos de las diferentes variables meteorológicas a lo largo de un año para la zona estudiada, se procede a resolver el problema de forma determinista para así obtener una primera aproximación del resultado final.

Lo que el programa iHOGA hace para la resolución determinista, es utilizar una sola serie de datos horarios de un año completo (8760 h) para cada variable meteorológica (irradiación, viento, temperatura) y para el consumo. Estas series horarias son obtenidas midiendo durante un año completo, en este caso el 2015, escaladas al valor medio de los datos de varios años. De esta forma el software utiliza una única serie horaria para cada variable, realizando la simulación horaria a lo largo de un año completo del comportamiento del sistema, estimando que el comportamiento de dicho año se repetirá durante los 25 años de vida útil del sistema. Por tanto no se considera la variabilidad que puede haber a lo largo de los años de las distintas variables meteorológicas y del consumo.

Antes de introducir estos valores medios se tienen que predefinir una serie de restricciones.

En primer lugar, solo se va a dar la opción de obtener resultados que consistan en aprovechar la energía solar y la eólica (además de baterías e inversores) ya que para el entorno del 'Monte del Perdón' se dan las características adecuadas para trabajar de esta manera. Además, se va a usar una estrategia de seguimiento de la demanda, lo que quiere decir que cuando la energía procedente de las fuentes renovables no es suficiente para satisfacer la demanda, el resto de energía la cubrirán las baterías.

En la figura 15 se pueden ver el resto de características que debe cumplir el sistema híbrido que se quiere obtener.

Si una combinación de componentes y estrategia no cumple cualquiera de las siguientes restricciones, iHOGA la descarta (se asigna a esa combinación coste infinito)

Energía No Servida por el sistema autónomo máxima permitida: % de la demanda anual
 (Esta Energía puede comprarse de la red AC si dicha red existe y además se permite la compra en la pantalla de Consumo)

Autonomía mínima (baterías+hidrógeno): días
 si hay Generador AC o Pila Comb. combustible externo o Compra E no servida a red AC se considerará que la autonomía del sistema es infinita)

Cap. nominal banco baterías (Ah) < x (Icc (A) del generador fotovoltaico + Intensidad (A bus dc) grupo aerogen a 14 m/s)
 si hay Generador AC o Pila Comb. combustible externo o Compra E no servida a red AC, no tener en cuenta esta condición)

Fracción renovable mínima: %

Coste actualizado de la energía máximo: €/kWh

Fig. 15. Características generales

Otro aspecto de los más importantes a considerar es el económico ya que lo que se busca es obtener un sistema híbrido que cumpla las especificaciones comentadas y además que sea lo más barato posible. Los parámetros económicos que se van a imponer tanto en este apartado como en el siguiente son los que aparecen en la figura 16.

PARÁMETROS ECONÓMICOS:

Intereses del mercado (precio del dinero): <input type="text" value="4"/> %	Tasa de descuento general (%):
Inflación esperada general (O&M...): <input type="text" value="2"/> %	1,96 %
Periodo de estudio: <input type="text" value="25"/> años	
Moneda: <input type="text" value="Euro (€)"/>	
Cableado, instalación y costes variables iniciales: <input type="text" value="800"/> € Fijo + <input type="text" value="2"/> % sobre C. inicial	

Préstamo (cuota constante, sistema francés):
Cantidad prestada: <input type="text" value="80"/> % del coste inicial de la inversión
Interés del préstamo: <input type="text" value="7"/> %
Duración del préstamo: <input type="text" value="10"/> años

Fig. 16. Parámetros económicos

Una vez se han introducido los datos anteriormente expuestos para obtener un sistema híbrido adecuado, hay que introducir los tipos de baterías, inversores, paneles fotovoltaicos y aerogeneradores que deseemos.

El programa iHOGA cuenta con una base de datos en la que se almacenan distintos tipos de paneles fotovoltaicos, aerogeneradores etc. Por lo tanto, de lo que se trata es de elegir unos cuantos de entre la gran multitud de elementos existentes, así el programa elegirá a su vez el más adecuado una vez haya realizado los cálculos pertinentes para obtener la solución más económica.

En cuanto a paneles fotovoltaicos, se ha dado a elegir al programa entre SCHOTTaSI12, SUNTECHSIP12 o la opción de no introducir paneles fotovoltaicos. Para baterías se han dado como opción HAWKER OPZS 3, 5, 12, 16 o 24 así como la opción de no contar con baterías. En cuanto a los aerogeneradores el AIRX o el WISHPER y también la opción de no introducir aerogeneradores. Finalmente para inversores se han dado a elegir entre contar con 1, 2, 3 o 4 STECASOLARIX 1200.

Paneles fotovoltaicos:

TIPO	SCHOTTaSI12	SUNTECHsIP12
Potencia (Wp)	100	130
Intensidad cortocircuito (A)	6,79	8,33
Precio (€)	110	335
Coste de operación y mantenimiento (€/año)	40	40

Tabla. 2. Características de los paneles fotovoltaicos

Posteriormente se podrá ver que el programa siempre elige 4 paneles en serie y un número determinado de paneles en paralelo entre 1 y 20. La razón de que siempre elija 4 en serie es porque la tensión nominal de cada uno de estos paneles es de 12V pero la del sistema tiene que ser de 48V, de esta manera 12V de cada panel por 4 paneles en serie daría los 48V de tensión nominal del sistema. La posibilidad de tener entre 1 y 20 ramas en paralelos significa que el software probará distintas posibilidades de tamaños de generador fotovoltaico, desde generador muy pequeño (una sola rama) hasta un generador de gran potencia (20 ramas), disponiendo así de una gran variabilidad de sistemas para poder obtener el óptimo.

Baterías:

TIPO	HAWKER OPZS 3	HAWKER OPZS 5	HAWKER OPZS 12	HAWKER OPZS 16	HAWKER OPZS 24
Capacidad (Ah)	180	270	1340	2240	3360
Precio (€)	127	178	412	664	1010
Costes de operación y mantenimiento (€/año)	50	50	50	50	50

Tabla. 3. Características de las baterías

Del mismo modo que ocurre con los paneles fotovoltaicos, el programa va a elegir siempre un número fijo de baterías en serie, en concreto 24. Esto es debido a que la tensión nominal de estas baterías es de 2V y por tanto para llegar a los 48V de tensión nominal del sistema se tienen que incorporar 24 baterías en serie. El estado de carga ("State of Charge", SOC) mínimo de las baterías permitido es el 20%, según las recomendaciones del fabricante.

Inversores:

TIPO	STECASOLARIX
Potencia (VA)	900
Precio (€)	650

Tabla. 4. Características de los inversores

Los inversores elegidos son de tensión nominal DC de 48 V y AC de 230 V.

Aerogeneradores:

TIPO	AIRX	WISHPER
Potencia máxima (W)	547	925
Precio (€)	945	2865
Costes de operación y mantenimiento (€/año)	50	85
Altura (m)	9	11

Tabla. 5. Características de los aerogeneradores

Los aerogeneradores considerados incluyen su propio regulador de carga de las baterías. Las curvas de potencia se muestran en las figuras 17 y 18.

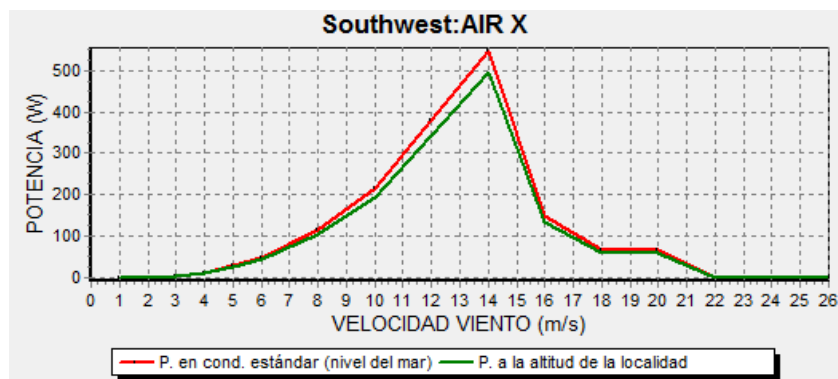


Fig. 17. Curva de potencia aerogenerador AIRX

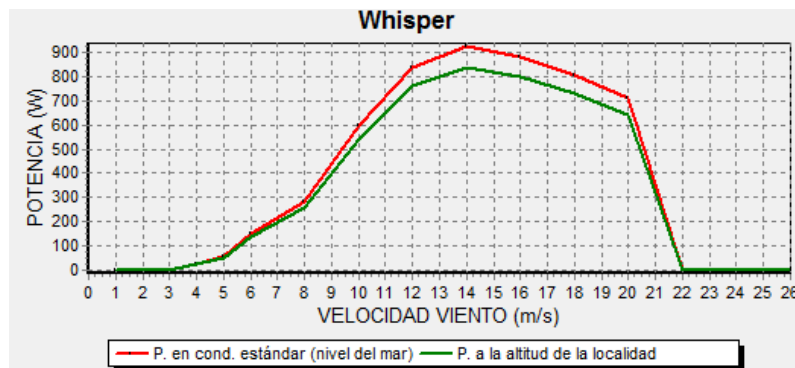


Fig. 18. Curva de potencia aerogenerador Whisper

Con todo esto, tras realizar la optimización determinista el resultado ha sido el siguiente:

Proyecto: Sin análisis de probabilidad. Config. nº 0

Tensión DC: 48 V. Tensión AC: 230 V

COMPONENTES

Paneles PV aSi12-Schott: ASI (100 Wp): 4 serie x 17 par. P total = 6,8 kWp, 60° inc.

Baterías OPZS-Hawker:TZS-16 (Cn=2240 A-h): 24 s. x 1 p. E total = 107,5 kWh (5 d.aut)

Sin Aerogeneradores

Sin Turbina Hid.

Sin Generador AC

Sin Pila Comb.

Sin Electrolizador

Inversor STECA:SOLARIX 1200X2, pot. nominal 1800 VA

Regulador PV baterías Genérico de 266 A

Sin Rectificador-cargador baterías

ESTRATEGIA DE CONTROL:

SEGUIMIENTO DE LA DEMANDA. SOC mín. baterías = 20 %

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES SUPERIOR AL CONSUMO: CARGA

Se cargan las Baterías con la potencia sobrante

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES INFERIOR AL CONSUMO: DESCARGA

Toda la potencia que falta deben suministrarla las baterías. Si no pueden, como no tienen apoyo, la energía que falte será Energía No Suministrada.

No existe Generador AC

No existe Pila de Combustible

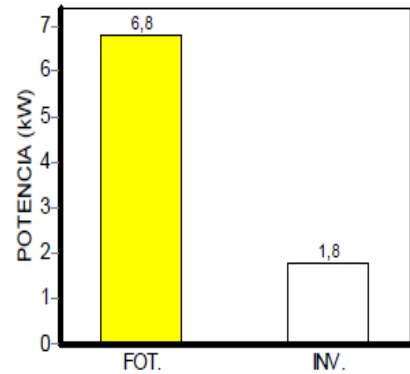


Fig. 19. Componentes del análisis determinista

Coste inicial de la inversión: 29419 €. Préstamo del 80 %, cuota anual: 3350,9 €. Coste combust. gen. AC 1º año: 0 €

COSTES PERIODO ESTUDIO (25 años) (VAN): (frente a caso de solo RED AC, 5216kWh/año, C.total (VAN) de 22253 €)

Coste Total del sistema (VAN): 46375 €. Coste actualizado de la energía suministrada: 0,36 €/kWh

Coste Grupo Fotovoltaico (VAN): 11772 €

Coste Banco Baterías (VAN): 23306 €

Coste Auxiliares (VAN): 4151 €

Coste Inversor (VAN): 2632 €

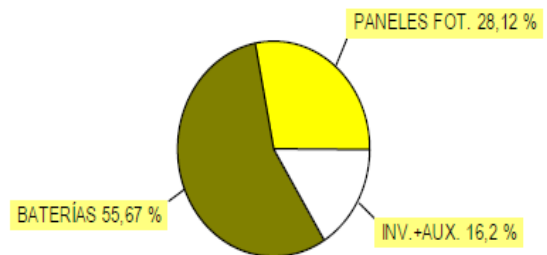


Fig. 20. Coste de los componentes del análisis determinista

Además el programa realiza un pequeño informe donde se observa el balance de energía que se da en el sistema híbrido obtenido y que como se puede ver, indica que el 100% de la energía suministrada es de forma renovable:

BALANCE DE ENERGÍAS DEL SISTEMA A LO LARGO DE 1 AÑO:

Energía Total Demandada: 5215 kWh/año. Cubierta por ren.100%

Energía No Servida: 0 kWh/año (0 % de la demandada)

Energía producida en Exceso: 3831 kWh/año

Energía generada por los Paneles Fotov.: 10241 kWh/año

Energía generada por los Aerogeneradores: 0 kWh/año

Energía generada por la Turbina Hid.: 0 kWh/año

Energía generada por el Generador AC: 0 kWh/año

Horas de funcionamiento del Generador AC: 0 h/año

Energía generada por la Pila de Combustible: 0 kWh/año

Horas de funcionamiento de la Pila de Comb.: 0 h/año

Energía consumida por el Electrolizador: 0 kWh/año

Horas de funcionamiento del Electrolizador: 0 h/año

Energía cargada en las baterías: 3809 kWh/año

Energía descargada desde las baterías: 3842 kWh/año

Vida de las baterías: 18 años

E. Eléctrica Vendida a Red AC: 0 kWh/año

E. Eléctrica Comprada a Red AC: 0 kWh/año

Emisiones totales de CO₂ : 546 kg CO₂/año; Emisiones solo del generador AC(debidas al consumo de 0 litro/año): 0 kg CO₂/año

H₂ vendido anual : 0 kg H₂/año // IDH: 0,6478. Empleos creados durante vida sistema: 0,2227

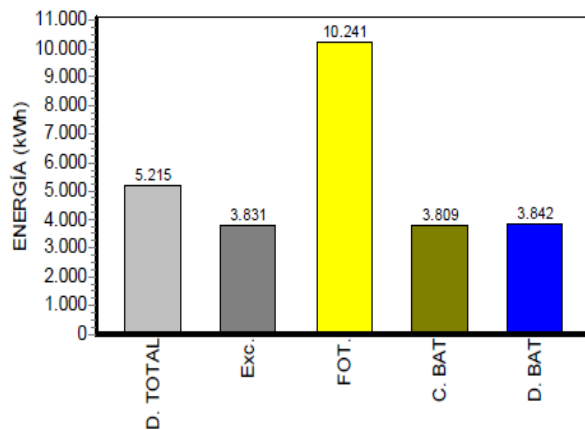


Fig. 21. Balance de energías del análisis determinista

Como conclusión diremos que tras realizar el análisis determinista, se obtiene un sistema compuesto por paneles aSi12-Schott (4 serie X 17 paralelo), inversor STECA SOLARIX 1200 X 2, baterías Hawker OPZS16, sin uso de aerogeneradores y un regulador PV de baterías de 266 A. También destacar que el coste total del sistema para el periodo estimado es de 46375 € (coste de la energía suministrada 0,36 €/kWh) y que la energía total demandada por el sistema es de 5215 kWh/año y es suministrada íntegramente por energías renovables.

4.5. Optimización estocástica del caso de aplicación

En este apartado se va a proceder a realizar la optimización estocástica del sistema que se está tratando en este trabajo.

Mediante el programa iHOGA se van a realizar varios análisis de probabilidad. En primer lugar se va a resolver el problema realizando 100 iteraciones, esto quiere decir que el programa cogerá al azar (siguiendo las distribuciones gaussianas de los valores medios de las distintas variables meteorológicas y del consumo, con su media y distribución típica) 100 valores medios de cada variable que serán los valores medios utilizados en las 100 simulaciones. Es decir, se simulará de forma horaria el comportamiento del sistema a lo largo de un año, igual que se realizaba en la optimización determinista, pero se repetirá 100 veces dicha simulación horaria a lo largo de un año, cada vez con distintos valores medios (obtenidos al azar según la curva de probabilidad) para las distintas series de datos de consumo y de variables meteorológicas. De esta manera se obtendrá un resultado de sistema híbrido que cumpla las especificaciones que se desean y que son las mismas que las introducidas en el apartado anterior, si bien los resultados (coste total en €, coste de la energía en €/KWh, duración de las baterías en años, etc.) serán curvas de distribución para cada variable, que se parecerán a gaussianas de las que los datos más importantes serán su media y su distribución típica. Tras repetir este procedimiento con 500, 1000, 2000 y 5000 iteraciones se ve que, como era de esperar, el resultado varía considerablemente hasta llegar al caso de 1000 iteraciones, de ahí en adelante el sistema híbrido óptimo es prácticamente igual. Esto quiere decir que con 1000 iteraciones la variabilidad de la simulación de Monte Carlo es adecuada y por tanto no es

necesario utilizar más iteraciones. Por tanto a partir de ahora se tomará este caso de 1000 iteraciones como el caso base.

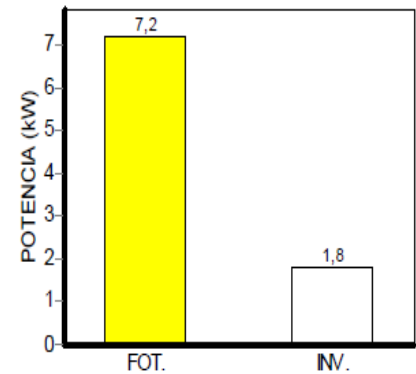
Informe obtenido con 100 iteraciones:

Proyecto: prob100. Generación nº 15

Tensión DC: 48 V. Tensión AC: 230 V

COMPONENTES

- Paneles PV aSi12-Schott: ASI (100 Wp): 4 serie x 18 par. P total = 7,2 kWp, 60° inc.
- Baterías OPZS-Hawker.TZS-16 (Cn=2240 A·h): 24 s. x 1 p. E total = 107,5 kWh (5 d.aut)
- Sin Aerogeneradores
- Sin Turbina Hid.
- Sin Generador AC
- Sin Pila Comb.
- Sin Electrolizador
- Inversor STECA:SOLARIX 1200X2, pot. nominal 1800 VA
- Regulador PV baterías Genérico de 284 A
- Sin Rectificador-cargador baterías



ESTRATEGIA DE CONTROL:

SEGUIMIENTO DE LA DEMANDA. SOC mín. baterías = 20 %

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES SUPERIOR AL CONSUMO: CARGA

Se cargan las Baterías con la potencia sobrante

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES INFERIOR AL CONSUMO: DESCARGA

Toda la potencia que falta deben suministrarla las baterías. Si no pueden, como no tienen apoyo, la energía que falte será Energía No Suministrada.

No existe Generador AC

No existe Pila de Combustible

Fig. 22. Componentes para el caso de 100 iteraciones

Coste energía: medio 0,37 €/kWh. Desv. típica: 0,011

COSTE MEDIO ENERGÍA ACTUALIZADO (moneda/kWh)

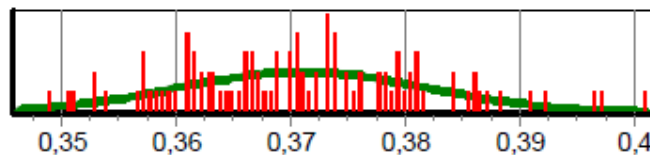


Fig. 23. Gráfico del coste de la energía para el caso de 100 iteraciones

Se puede ver que el programa ha tendido en cuenta la aleatoriedad de los valores en esta gráfica en la que aparece el coste de la energía con una desviación típica de 0,011 para este caso realizado con 100 iteraciones.

Informe obtenido con 500 iteraciones:

Proyecto: Prob500. Generación nº 15

Tensión DC: 48 V. Tensión AC: 230 V

COMPONENTES

Paneles PV aSi12-Schott: ASI (100 Wp): 4 serie x 19 par. P total = 7,6 kWp, 60° inc.
Baterías OPZS-Hawker:TZS-16 (Cn=2240 A-h): 24 s. x 1 p. E total = 107,5 kWh (5 d.aut)
Sin Aerogeneradores
Sin Turbina Hid.
Sin Generador AC
Sin Pila Comb.
Sin Electrolizador
Inversor STECA:SOLARIX 1200X2, pot. nominal 1800 VA
Regulador PV baterías Genérico de 299 A
Sin Rectificador-cargador baterías

ESTRATEGIA DE CONTROL:

SEGUIMIENTO DE LA DEMANDA. SOC mín. baterías = 20 %

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES SUPERIOR AL CONSUMO: CARGA

Se cargan las Baterías con la potencia sobrante

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES INFERIOR AL CONSUMO: DESCARGA

Toda la potencia que falta deben suministrarla las baterías. Si no pueden, como no tienen apoyo, la energía que falte será Energía No Suministrada.

No existe Generador AC

No existe Pila de Combustible

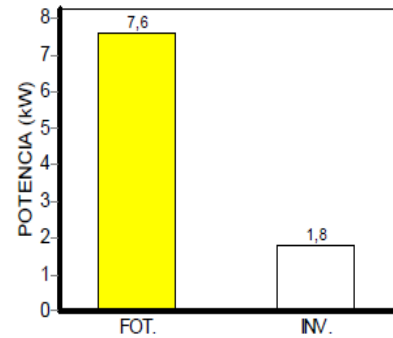


Fig. 24. Componentes para el caso de 500 iteraciones

Coste energía: medio 0,37 €/kWh. Desv. típica: 0,012

COSTE MEDIO ENERGÍA ACTUALIZADO (moneda/kWh)

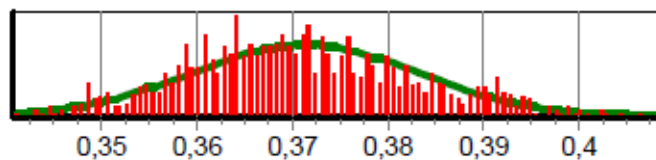


Fig. 25. Gráfico del coste total para el caso de 500 iteraciones

En este caso se puede ver el gráfico correspondiente al coste total (VAN) con una desviación típica de 135,9. De este modo queda claro que el software iHOGA ha tenido en cuenta la aleatoriedad de los valores también para este caso de 500 iteraciones.

Informe obtenido con 1000 iteraciones:

Proyecto: prob1000. Generación nº 15

Tensión DC: 48 V. Tensión AC: 230 V

COMPONENTES

Paneles PV aSi12-Schott: ASI (100 Wp): 4 serie x 15 par. P total = 6 kWp, 60° inc.

Baterías OPZS-Hawker:TZS-16 (Cn=2240 A-h): 24 s. x 1 p. E total = 107,5 kWh (5 d.aut)

2 Aerogen. DC AIR X (546,8 W a 14m/s). P. total 1,093 kW

Sin Turbina Hid.

Sin Generador AC

Sin Pila Comb.

Sin Electrolizador

Inversor STECA:SOLARIX 1200X2, pot. nominal 1800 VA

Regulador PV baterías Genérico de 235 A

Sin Rectificador-cargador baterías

ESTRATEGIA DE CONTROL:

SEGUIMIENTO DE LA DEMANDA. SOC mín. baterías = 20 %

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES SUPERIOR AL CONSUMO: CARGA

Se cargan las Baterías con la potencia sobrante

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES INFERIOR AL CONSUMO: DESCARGA

Toda la potencia que falta deben suministrarla las baterías. Si no pueden, como no tienen apoyo, la energía que falte será Energía No Suministrada.

No existe Generador AC

No existe Pila de Combustible

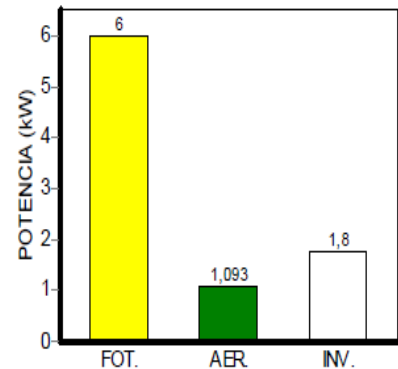


Fig. 26. Componentes para el caso de 1000 iteraciones

Como se puede ver en los informes anteriores, la diferencia entre el caso de 100 y de 500 iteraciones es mínima, únicamente se ve reflejada en el número de paneles solares que son necesarios y en el regulador PV.

En el caso del informe obtenido para 1000 iteraciones hay una diferencia significativa con el resto, y es que se introducen 2 aerogeneradores AIRX. Esto es debido a que, al aumentar el número de datos que son tenidos en cuenta por el programa, este contabiliza un número mayor de valores altos de velocidad del viento que hacen que sea factible y más económico introducir aerogeneradores y reducir el número de paneles solares.

Como ya se ha comentado, si se realiza de nuevo el procedimiento con 2000 y 5000 iteraciones, el resultado obtenido es el mismo que el obtenido para 1000. Por tanto podemos considerar a partir de ahora este informe como el resultado óptimo para la optimización estocástica del sistema híbrido.

A continuación se pueden ver algunos valores importantes y sus correspondientes gráficas que indican el valor medio y la desviación típica de varios parámetros de los cuales se ha tenido en cuenta su aleatoriedad en la realización del informe 'Probabilidad 1000 iteraciones'

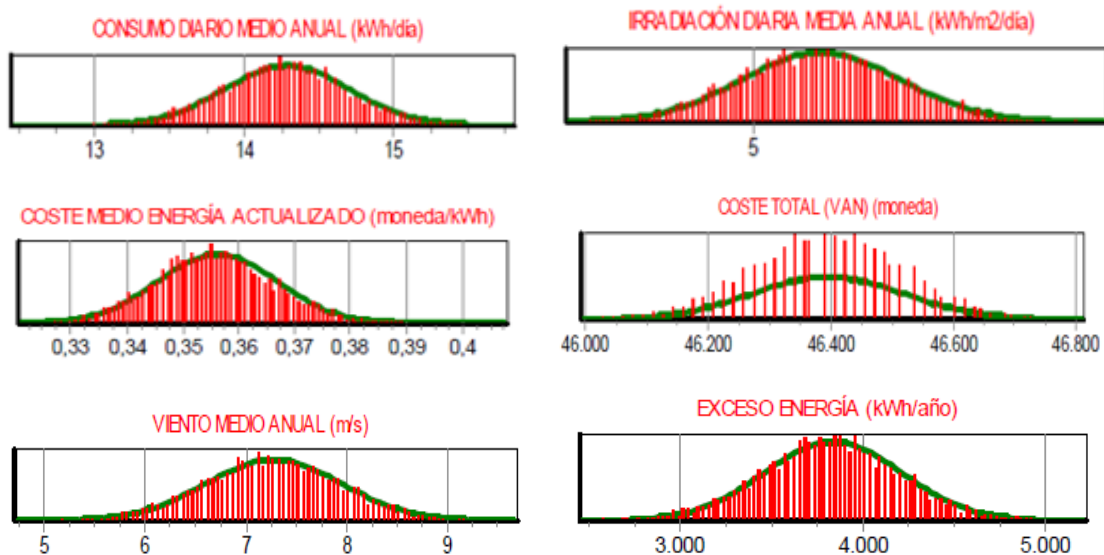


Fig. 27. Gráficas indicadoras de la aleatoriedad de los principales parámetros

	Media	Desviación típica
Consumo diario medio anual (kwh/día)	14,29	0,42
Irradiación diaria media anual (kwh/m2/día)	5,16	0,18
Viento medio anual (m/s)	7,27	0,68
Coste total VAN (€)	46375	123
Coste medio energía actualizado (€/kwh)	0,36	0,011
Exceso de energía (kwh/año)	3836	376,5

Tabla. 6. Valores medios y desviaciones típicas para el caso con 1000 iteraciones

Tras la realización de este estudio, llegamos pues a una solución óptima consistente en 4 serie X 15 paralelo paneles fotovoltaicos aSI12-Schott y dos generadores DC AIRX además de las baterías OPZS Hawker, el regulador de 235 A y el inversor STECA SOLARIX de 1800 VA, que hemos obtenido tras realizar un estudio probabilístico con 1000 iteraciones mediante el software iHOGA.

4.6. Análisis de sensibilidad

Uno de los aspectos más importantes de cualquier proyecto es el económico. Por eso en este apartado se realiza un estudio de sensibilidad económica para observar las diferentes variaciones que se producen en el sistema híbrido al modificar los datos económicos. Este estudio se realiza para el caso de optimización estocástica con 1000 iteraciones ya que con este estudio se obtenía la solución óptima, como se ha comentado en apartados anteriores.

PARÁMETROS ECONÓMICOS:		Préstamo (cuota constante, sistema francés):	
Intereses del mercado:(precio del dinero)	<input type="text" value="4"/> %	Tasa de descuento general (%):	1,96 %
Inflación esperada general (O&M...):	<input type="text" value="2"/> %	Cantidad prestada:	<input type="text" value="80"/> % del coste inicial de la inversión
Periodo de estudio	<input type="text" value="25"/> años	Interés del préstamo:	<input type="text" value="7"/> %
Moneda:	<input type="text" value="Euro (€)"/>	Duración del préstamo:	<input type="text" value="10"/> años
Cableado, instalación y costes variables iniciales:	<input type="text" value="300"/> € Fijo + <input type="text" value="2"/> % sobre C. inicial		

Fig. 29. Datos económicos

Como se puede ver a la derecha de la figura 29, se solicita un préstamo (sistema francés) a 10 años para obtener el 80% de la cantidad que se necesita para la realización del proyecto. Pero los parámetros que se van a variar en este estudio de sensibilidad son los correspondientes al interés del mercado y la inflación esperada, que van a repercutir de manera directa en la tasa de descuento general.

La inflación esperada hace referencia al crecimiento esperado del precio de los bienes y servicios y el interés del mercado se refiere a la tasa que define el costo de un capital por periodo (precio del dinero). Por otro lado, la tasa de descuento representa el descuento al flujo de dinero esperado en el futuro, de manera que si la inflación esperada y el porcentaje de interés del mercado son iguales, la tasa de descuento general será prácticamente nula.

En primer lugar se ha realizado el estudio del sistema híbrido con unos valores de interés del mercado del 4% y de inflación esperada generada del 2%, dando un valor de tasa de descuento del 1,96%. Con estos datos se han obtenido los siguientes resultados:

Coste inicial de la inversión: 28505 €. Préstamo del 80 %, cuota anual: 3246,8 €. Coste combust. gen. AC 1º año: 0 €
COSTES PERIODO ESTUDIO (25 años) (VAN): (frente a caso de solo RED AC. 5216kWh/año, C.total (VAN) de 22253 €)

Coste Total del sistema (VAN): 46180 €. Coste actualizado de la energía suministrada: 0,35 €/kWh

Coste Grupo Fotovoltaico (VAN): 10479 €

Coste Banco Baterías (VAN): 23306 €

Coste Aerogeneradores (VAN): 4927 €

Coste Auxiliares (VAN): 452 €

Coste Inversor (VAN): 2632 €

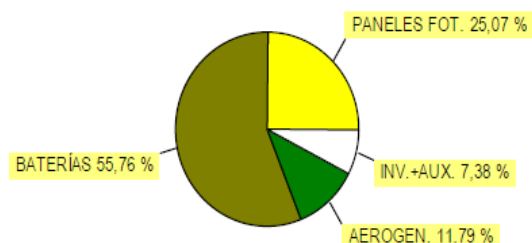


Fig. 30. Costes para interés de mercado e inflación de 4% y 2% respectivamente

A continuación se realizan los estudios para los que el porcentaje de interés de mercado y el porcentaje de inflación esperada son de 6% y 2% y 4% y 4% respectivamente. Los resultados son los siguientes (obteniéndose el mismo sistema híbrido en todos los casos):

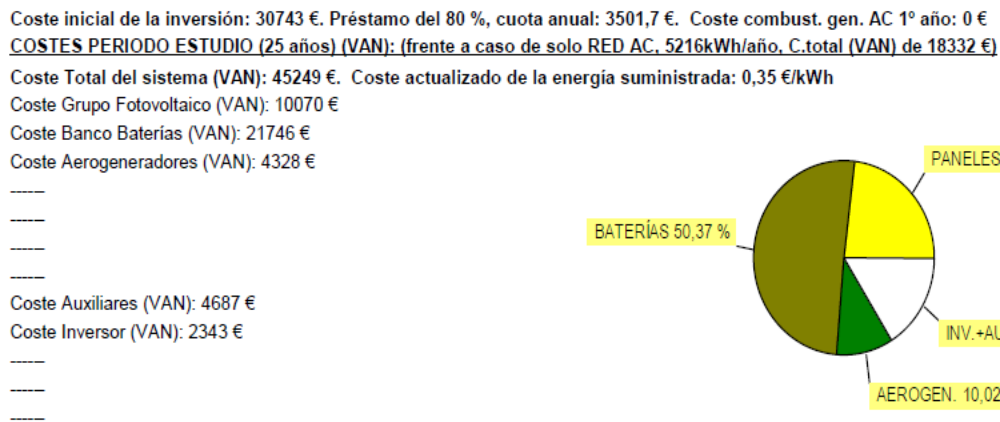


Fig. 31. Costes para interés del mercado e inflación del 6% y 2% respectivamente

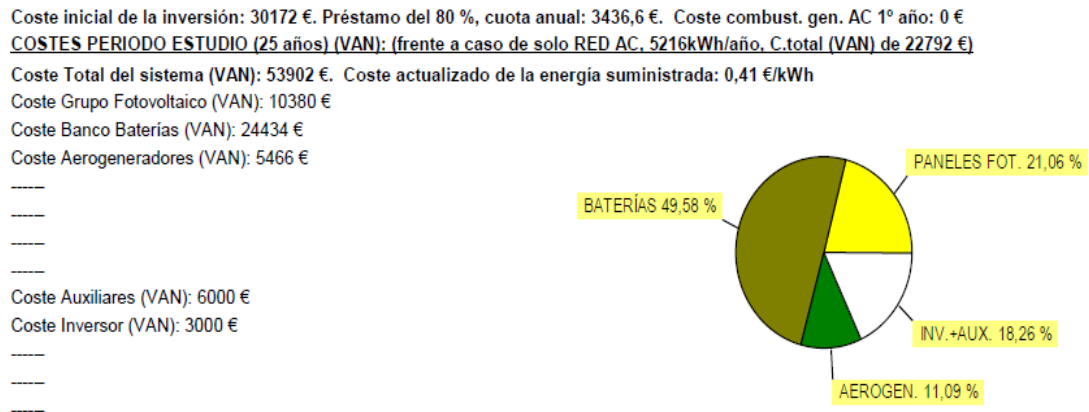


Fig. 32. Costes para interés del mercado e inflación del 4 %

La opción más económica de las tres estudiadas es la segunda (6% y 2%) ya que en este caso el valor de la tasa de descuento es la mayor de todas debido a la gran diferencia entre la tasa de interés del mercado y la inflación esperada. Una tasa de descuento elevada hace que los costes de reposición y mantenimiento que se producen a lo largo de los años, al trasladarlos al momento inicial de la inversión (para calcular el coste total neto actualizado) se vean reducidos y por tanto el coste total neto actualizado se reduzca.

Después de este pequeño estudio en el que se ha demostrado que las condiciones más adecuadas económicamente se dan para una tasa mayor de descuento general, se van a realizar variaciones en los precios de los diferentes componentes del sistema híbrido para una tasa de descuento general de 1,96% que se ha considerado la más aproximada a la situación real. Así pues se ha decidido disminuir el precio en un 80% (disminución exagerada, pero valiosa para ver la tendencia de los resultados) de los paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y baterías pertenecientes al sistema híbrido obteniendo los resultados que aparecen a continuación:

Disminución de precio en los paneles fotovoltaicos:

COMPONENTES

Paneles PV SiP12-Suntech:ST-130 (130 Wp): 4 serie x 14 par. P total = 7,28 kWp, 60° inc.

Baterías OPZS-Hawker:TZS-16 (Cn=2240 A-h): 24 s. x 1 p. E total = 107,5 kWh (5 d.aut)

Sin Aerogeneradores

Sin Turbina Hid.

Sin Generador AC

Sin Pila Comb.

Sin Electrolizador

Inversor STECA:SOLARX 1200X2, pot. nominal 1800 VA

Regulador PV baterías Genérico de 239 A

Sin Rectificador-cargador baterías

ESTRATEGIA DE CONTROL:

SEGUIMIENTO DE LA DEMANDA. SOC mín. baterías = 20 %

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES SUPERIOR AL CONSUMO: CARGA

Se cargan las Baterías con la potencia sobrante

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES INFERIOR AL CONSUMO: DESCARGA

Toda la potencia que falta deben suministrarla las baterías. Si no pueden, como no tienen apoyo, la energía que falte será Energía No Suministrada.

No existe Generador AC

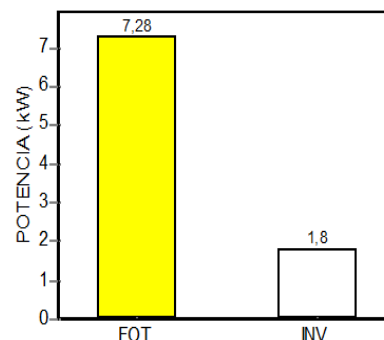


Fig. 33. Componentes en el caso de disminución de un 80% en el precio de los paneles

Coste inicial de la inversión: 24225 €. Préstamo del 80 %, cuota anual: 2759,3 €. Coste combust. gen. AC 1º año: 0 €

COSTES PERIODO ESTUDIO (25 años) (VAN): (frente a caso de solo RED AC, 5216kWh/año, C.total (VAN) de 22253 €)

Coste Total del sistema (VAN): 43357 €. Coste actualizado de la energía suministrada: 0,33 €/kWh

Coste Grupo Fotovoltaico (VAN): 8384 €

Coste Banco Baterías (VAN): 23306 €

Coste Auxiliares (VAN): 5266 €

Coste Inversor (VAN): 2632 €

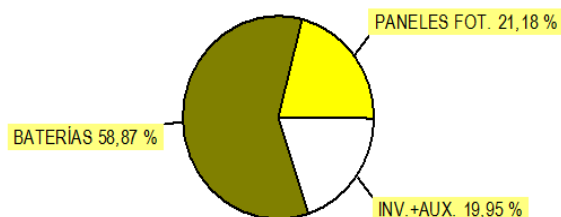


Fig. 34. Costes con una disminución de un 80% en el precio de los paneles

Tras realizar una disminución del 80% en el precio de los paneles fotovoltaicos, el primer detalle importante que se aprecia es que el número de los paneles ha disminuido en relación al número de los mismos obtenido para el caso que se había considerado óptimo. Esto sucede debido a que la potencia de los nuevos paneles seleccionados para este caso es de 130Wp, el software iHOGA ha decidido elegir estos paneles (hasta ahora no considerados por su elevado precio) para satisfacer las restricciones de consumo debido a la brusca reducción del precio de los mismos. Otro dato importante es que ya no se cuenta con aerogeneradores, circunstancia bastante lógica debido a lo económico que ahora resulta instalar los paneles fotovoltaicos. El coste total del sistema asciende a 43367 €, no es una reducción excesivamente brusca ya que el mayor impacto económico es debido a las baterías y el precio de estas se ha mantenido constante.

A continuación se pueden ver las gráficas en las que aparecen los valores medios y la desviación típica del consumo anual y del coste de la energía (Fig. 35).

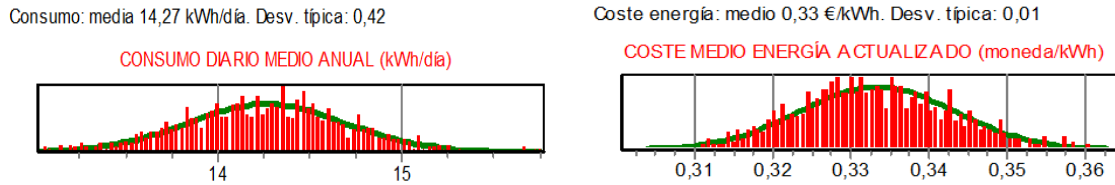


Fig. 35. Demostración de aleatoriedad en los parámetros de consumo y coste de la energía

Disminución de precio en las baterías:

COMPONENTES

Paneles PV aSi2-Schott: ASI (100 Wp): 4 serie x 19 par. P total = 7,6 kWp, 60° inc.
 Baterías OPZS-Hawker: TZS-16MY (Cn=2240 A·h): 24 s. x 1 p. E total = 107,5 kWh (5 d. aut)
 1 Aerogen. DC AIR X (546,8 W a 14m/s). P. total 0,546 kW
 Sin Turbina Hid.
 Sin Generador AC
 Sin Pila Comb.
 Sin Electrolizador
 Inversor STECA: SOLARIX 1200X2, pot. nominal 1800 VA
 Regulador PV baterías Genérico de 300 A
 Sin Rectificador-cargador baterías

ESTRATEGIA DE CONTROL:

SEGUIMIENTO DE LA DEMANDA. SOC mín. baterías = 20 %

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES SUPERIOR AL CONSUMO: CARGA

Se cargan las Baterías con la potencia sobrante

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES INFERIOR AL CONSUMO: DESCARGA

Toda la potencia que falta deben suministrarla las baterías. Si no pueden, como no tienen apoyo, la energía que falta será Energía No Suministrada.

No existe Generador AC

No existe Pila de Combustible

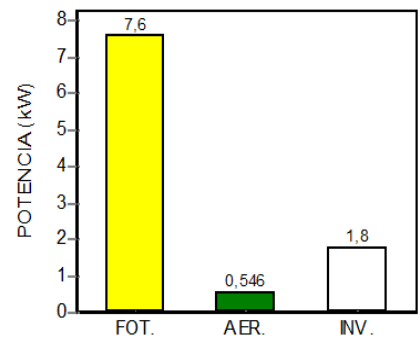


Fig. 36. Componentes en el caso de disminución de un 80% del precio en las baterías

Coste inicial de la inversión: 18779 €. Préstamo del 80 %, cuota anual: 2139 €. Coste combust. gen. AC 1º año: 0 €

COSTES PERIODO ESTUDIO (25 años) (VAN): (frente a caso de solo RED AC, 5216kWh/año, C.total (VAN) de 22253 €)

Coste Total del sistema (VAN): 33760 €. Coste actualizado de la energía suministrada: 0,26 €/kWh

Coste Grupo Fotovoltaico (VAN): 13064 €

Coste Banco Baterías (VAN): 7952 €

Coste Aerogeneradores (VAN): 2463 €

Coste Auxiliares (VAN): 4658 €

Coste Inversor (VAN): 2632 €

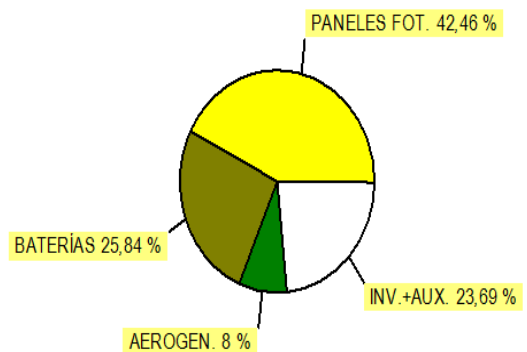


Fig. 37. Costes con disminución de un 80% en el precio de las baterías

Como se puede ver en las imágenes anteriores, la disminución en el precio de las baterías apenas ha causado variaciones en la selección de componentes del sistema híbrido. Esto es debido a que una de las restricciones era que el sistema debía contar con 5 días de autonomía, por tanto la reducción en el precio de las baterías no ha hecho que aumentara el número de las mismas ya que esa restricción ya se cumplía en el caso considerado como ‘caso óptimo de 1000 iteraciones’.

Lo que sí que se puede apreciar es una gran disminución en el coste total del sistema, 33760 € por los 46180 € del sistema óptimo, dato que deja claro el gran peso económico de las baterías en el sistema híbrido.

A continuación se pueden ver las gráficas en las que aparecen los valores medios y la desviación típica del consumo anual y del coste total (Fig. 38).

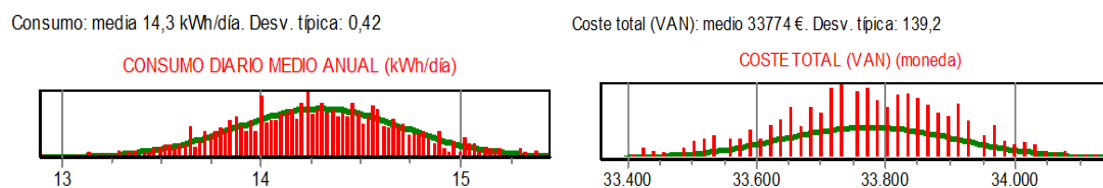


Fig. 38. Demostración de la aleatoriedad en los parámetros de consumo y coste total

Disminución de precio en los aerogeneradores:

COMPONENTES

Paneles PV aSi12-Schott: ASI (100 Wp): 4 serie x 8 par. P total = 3,2 kWp, 60° inc.
 Baterías OPZS-Hawker: TZS-16 (Cn=2240 A·h): 24 s. x 1 p. E total = 107,5 kWh (7 d.aut)
 3 Aerogen. DC Whispermy (925 W a 14m/s). P. total 2,775 kW
 Sin Turbina Hid.
 Sin Generador AC
 Sin Pila Comb.
 Sin Electrolizador
 Inversor STECA: SOLARIX P1200, pot. nominal 900 VA
 Regulador PV baterías VICTRON: BLUE MPPT 150/70X3 de 210 A
 Sin Rectificador-cargador baterías

ESTRATEGIA DE CONTROL:

SEGUIMIENTO DE LA DEMANDA. SOC mín. baterías = 20 %

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES SUPERIOR AL CONSUMO: CARGA

Se cargan las Baterías con la potencia sobrante

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES INFERIOR AL CONSUMO: DESCARGA

Toda la potencia que falta deben suministrarla las baterías. Si no pueden, como no tienen apoyo, la energía que falte será Energía No Suministrada

No existe Generador AC

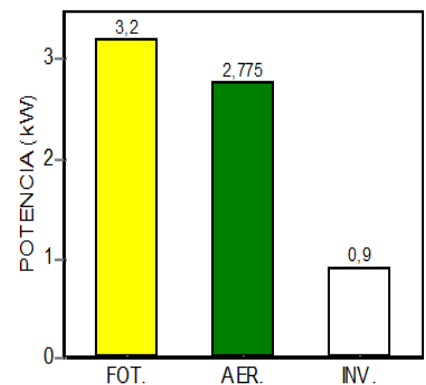


Fig. 39. Componentes en el caso de disminución en un 80% de los aerogeneradores

Coste inicial de la inversión: 25989 €. Préstamo del 80 %, cuota anual: 2960,2 €. Coste combust. gen. AC 1º año: 0 €
COSTES PERIODO ESTUDIO (25 años) (VAN): (frente a caso de solo RED AC, 3650kWh/año, C.total (VAN) de 17063 €)

Coste Total del sistema (VAN): 43036 €. Coste actualizado de la energía suministrada: 0,47 €/kWh

Coste Grupo Fotovoltaico (VAN): 5955 €

Coste Banco Baterías (VAN): 23306 €

Coste Aerogeneradores (VAN): 3061 €

Coste Auxiliares (VAN): 5266 €

Coste Inversor (VAN): 1426 €

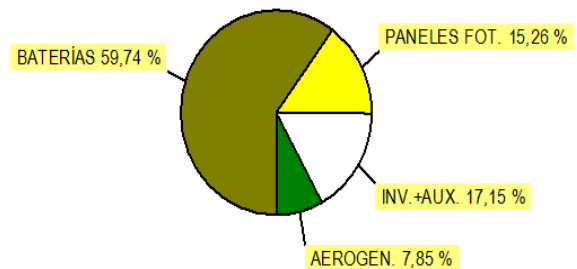


Fig. 40. Costes con disminución de un 80% en el precio de los aerogeneradores

Como se puede ver, tras la disminución en el precio de los aerogeneradores, el software iHOGA los ha considerado en mayor medida, contando con 3 de ellos y disminuyendo así, el número de paneles solares para alimentar al sistema. El coste total del sistema teniendo en cuenta esta reducción en el precio de los aerogeneradores es de 43036 € como se puede ver en la figura 40.

A continuación se puede ver la gráfica en la que aparecen el valor medio y la desviación típica del coste de la energía (Fig. 41).

Coste energía: medio 0,47 €/kWh. Desv . Típica: 0,012



Fig. 41. Demostración de la aleatoriedad en el parámetro del coste de la energía

La razón por la que se ha decidido hacer esta disminución en el precio de los componentes, ha sido para que nos podemos hacer una idea de cómo variaría el resultado ante un posible descenso en el precio de estos elementos, ya que esta disminución de precio parece bastante probable en un futuro cercano debido al progresivo aumento de instalaciones renovables.

El sistema híbrido óptimo, hasta ahora siempre ha contado con paneles solares fotovoltaicos y aerogeneradores. A continuación vamos a plantear la opción de alimenta únicamente con energía eólica al repetidor estudiado, impidiendo al software usar paneles fotovoltaicos para cumplir con los objetivos.

Coste inicial de la inversión: 40015 €. Préstamo del 80 %, cuota anual: 4557,8 €. Coste combust. gen. AC 1º año: 0 €
COSTES PERIODO ESTUDIO (25 años) (VAN): (frente a caso de solo RED AC, 5216kWh/año, C.total (VAN) de 22253 €)
Coste Total del sistema (VAN): 70525 €. Coste actualizado de la energía suministrada: 0,54 €/kWh

 Coste Banco Baterías (VAN): 23306 €
 Coste Aerogeneradores (VAN): 33286 €

 Coste Auxiliares (VAN): 5266 €
 Coste Inversor (VAN): 2632 €

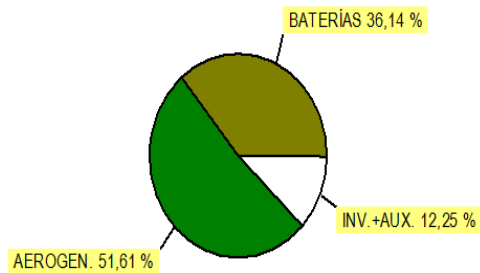
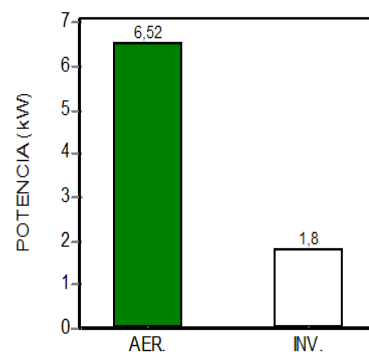


Fig. 42. Costes para el caso en el que únicamente se tienen en cuenta aerogeneradores

COMPONENTES

Sin Paneles Fotov.
 Baterías OPZS-Hawker: TZS-16 (Cn=2240 A·h): 24 s. x 1 p. Etotal = 107,5 kWh (5 d.aut)
 2 Aerogen. DC Southwest: Whisper500 (3260 W a 14m/s). P. total 6,52 kW
 Sin Turbina Hid.
 Sin Generador AC
 Sin Pila Comb.
 Sin Electrolizador
 Inversor STECA: SOLARX 1200X2, pot. nominal 1800 VA
 Regulador PV baterías VICTRON: BLUE MPPT 150/70X3 de 210 A
 Sin Rectificador-cargador baterías



ESTRATEGIA DE CONTROL:

SEGUIMIENTO DE LA DEMANDA. SOC min. baterías = 20 %

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES SUPERIOR AL CONSUMO: CARGA

Se cargan las Baterías con la potencia sobrante

SI LA POTENCIA PRODUCIDA POR LAS FUENTES RENOVABLES ES INFERIOR AL CONSUMO: DESCARGA

Toda la potencia que falta deben suministrarla las baterías. Si no pueden, como no tienen apoyo, la energía que falte será Energía No Suministrada

No existe Generador AC

Fig. 43. Componentes para el caso en el que únicamente se tienen en cuenta aerogeneradores

Como se puede ver en la figura 42, el coste total del sistema es el más elevado de los vistos hasta ahora (70525€), esto es debido a que al no haber placas solares en el sistema de alimentación, el programa ha tenido que elegir aerogeneradores de mayor potencia para poder llegar a cumplir los objetivos de consumo (DC Southwest500). La principal conclusión que se puede sacar de este último estudio es que no es una buena idea alimentar únicamente mediante energía eólica al repetidor de telefonía ya que esto encarecería en gran medida el proyecto. A continuación se puede ver en la figura 44 el coste medio y la desviación típica de la energía.

Coste energía: medio 0,54 €/kWh. Desv. típica: 0,017

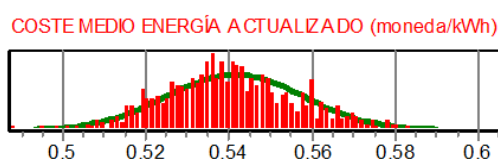
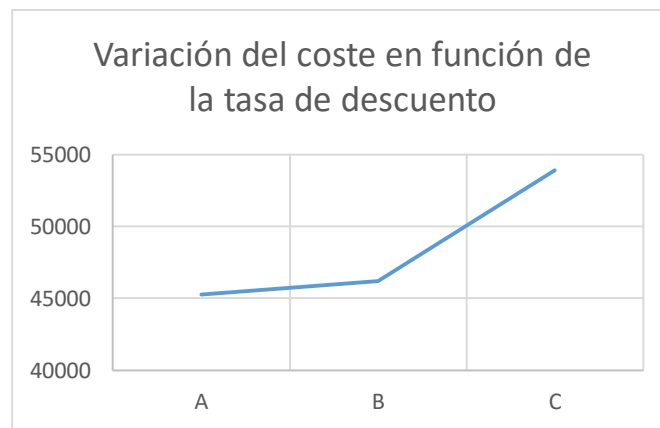


Fig. 44. Demostración de la aleatoriedad en el parámetro de coste de energía

A continuación y como resumen final de este pequeño estudio de sensibilidad económica, se pueden ver unas tablas y gráficas en la que aparecen los resultados obtenidos tras realizar las diferentes variaciones en los parámetros económicos y en los precios de los componentes del sistema, de manera que se pueda apreciar de mejor manera las tendencias en los resultados en función de las variaciones efectuadas:

Referencia	Interés de mercado	Inflación esperada	Coste total (VAN)	Desviación típica (VAN)
A	6%	2%	45249 €	125
B	4%	2%	46180 €	123
C	4%	4%	53902 €	126,2

Tabla. 7. Resumen de los parámetros económicos



Graf. 1. Variación del coste en función de la tasa de descuento

	Nº aerogeneradores	Nº baterías	Nº placas solares	Coste total (VAN)	Desviación típica (VAN)
Caso 1000 iteraciones sin variaciones	2	24s X 1p	4s X 15p	46180 €	123
Disminución del precio en las placas solares	0	24s X 1p	4s X 14p	43367 €	135
Disminución del precio en las baterías	1	24s X 1p	4s X 19p	33760 €	139,2
Disminución del precio en los aerogeneradores	3	24s X 1p	4s X 8p	43036 €	135,2
Uso únicamente de aerogeneradores	2	24s X 1p	0	70525 €	130

Tabla. 8. Resumen de los casos estudiados en el análisis de sensibilidad

5. Conclusiones

Tras haber realizado esta optimización probabilística de un repetidor de telefonía en el monte del Perdón mediante el software iHOGA, podemos sacar varias conclusiones.

En primer lugar hay que indicar la importancia de hacer un estudio mediante optimización estocástica, ya que al contrario que de la forma determinista, de esta manera se tiene en cuenta la variación de los valores medios anuales en los agentes meteorológicos y en el consumo, lo que hace que el estudio sea más preciso y fiable. EL diseñador dispone de resultados probabilísticos de las distintas variables (coste total, coste del KWh, vida de las baterías, etc.), es decir, se conoce de las distintas variables de resultados no solo el valor medio esperado, sino también la desviación típica, y los valores mínimos y máximos. Así puede justificar, ante su posible cliente, lo que se espera del comportamiento del sistema óptimo elegido, con su distribución de probabilidad asociada para los distintos resultados.

Un aspecto importante es el tiempo y la exactitud con la que se puede llevar a cabo este estudio probabilístico. Se ha podido ver en el apartado 'Optimización estocástica del caso de aplicación' que el software iHOGA llega a la solución óptima después de alrededor de 1000 iteraciones, lo que indica que se llega al sistema híbrido adecuado tras no demasiado tiempo de cálculo. Más iteraciones en la simulación de Monte Carlo no suponen mejora en el análisis de probabilidades. El sistema híbrido óptimo en el caso estudiado está compuesto de los siguientes elementos: 4 series X 15 paneles fotovoltaicos y dos generadores DC AIRX además de las baterías OPZS Hawker, el regulador de 235 A y el inversor STECA SOLARIX de 1800 VA.

También ha quedado claro que la prioridad en todo momento es encontrar el sistema más económico posible. Como se ha podido ver cuándo se ha disminuido el precio de los aerogeneradores, el software iHOGA los ha contabilizado para la solución óptima del sistema híbrido.

Tras realizar el análisis de sensibilidad económica ha quedado claro que la prioridad en todo momento es encontrar el sistema más económico posible. Esto ha quedado claro cuándo se ha disminuido el precio de los aerogeneradores y el software iHOGA los ha contabilizado para la solución óptima del sistema híbrido.

Otra conclusión a la que se ha podido llegar es que el coste total actualizado del sistema híbrido es menor cuanto mayor es la tasa de descuento. Además se ha visto que las baterías son el componente más caro y que alimentar al repetidor únicamente con aerogeneradores es la opción menos recomendable debido al elevado coste que supone.

6. Bibliografía

- [1] <http://personal.unizar.es/rdufo/index.php?lang=es>
- [2] <http://www.ecoener.es/solar-fotovoltaica-hibridos.php>
- [3] http://www.rider.fing.ucr.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=2
- [4] <http://fotovoltaica-energia.blogspot.com.es/>
- [5] <http://news.soliclima.com/divulgacion/energia-solar/introduccion-a-la-energia-solar-fotovoltaica>
- [6] https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica
- [7] “Dufo-López, I.R. Cristóbal Monreal. J.M. Yusta-Loyo. Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation. Renewable Energy 94 (2016) 280-293”
- [8] <https://www.google.es/maps/place/Sierra+del+Perd%C3%B3n>
- [9] <http://meteo.navarra.es/estaciones/estacion.cfm?IDestacion=28>
- [10] Hay, J. E., and J. A. Davies, "Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface," in Proceedings, First Canadian Solar Radiation Data Workshop, J. E. Hay and T. K. Won, eds., Toronto, Ontario, Canada, 1978.
- [11] <https://www.researchgate.net/publication/273534771> “Fuel cell based power systems to supply power to Telecom Stations”
- [12] “IEC 60896-1:1987 Stationary lead–acid batteries. General requirements and methods of test. Vented types”
Modificada posteriormente en una norma europea EN:
“EN 60896-11:2003. Stationary lead–acid batteries. General requirements and methods of test. Vented types. General requirements and methods of tests”

7. Anexo 1

Como se ha comentado a lo largo del trabajo, las variables meteorológicas que se deben tener en cuenta para optimizar un sistema híbrido de las características del estudiado son la irradiación solar, la velocidad del viento y la temperatura.

Irradiación solar:

España es un país que por su localización geográfica es propicio para la instalación de placas solares ya que la irradiación solar es bastante alta en determinadas zonas, como se puede ver en el siguiente mapa:

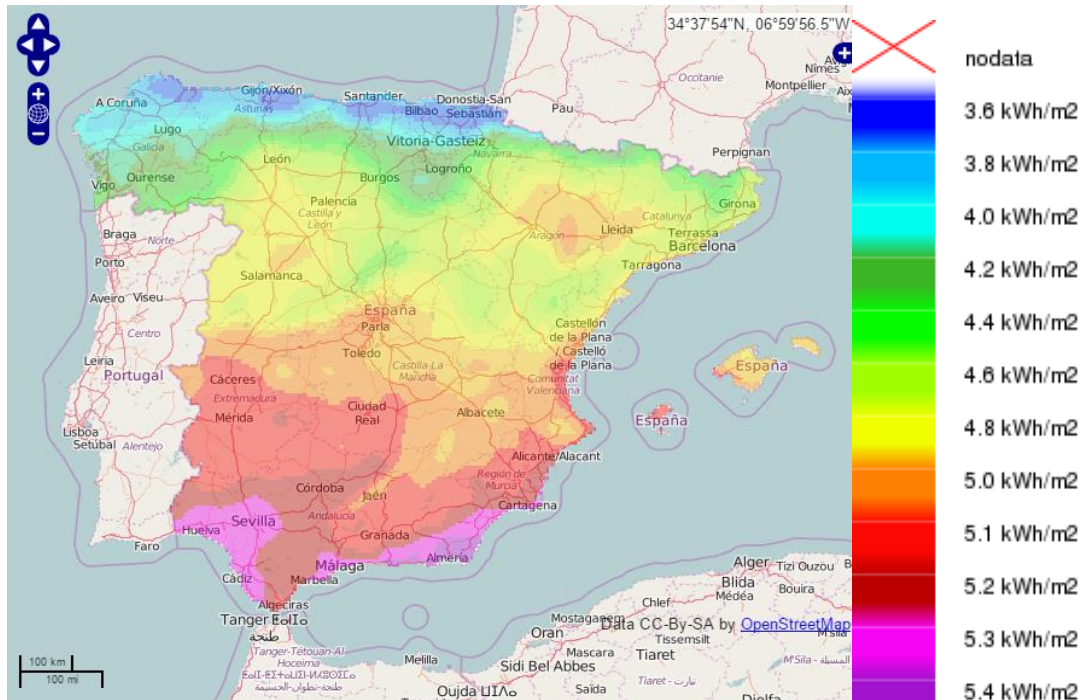


Fig. 1.1. Mapa de la irradiación global promedio en España [1]

Se aprecia que la irradiación incidente sobre una superficie en la zona sur de la comunidad de Navarra es de alrededor de 4,8 KWh/m², valor más que suficiente para ser aprovechado mediante la colocación de placas solares fotovoltaicas. Estos valores se refieren a irradiación global horizontal que es la suma de la irradiación directa horizontal y la difusa horizontal. Por irradiación solar directa horizontal se entiende que es la que incide directamente sobre un plano horizontal. La irradiación horizontal difusa se mide como la irradiación total proveniente del espacio que cae sobre una superficie horizontal menos la irradiación directa que incide sobre la misma superficie.

Otro aspecto importante es el de la inclinación de las placas solares. Como se ha comentado en el trabajo, la inclinación habitual para la zona de Navarra es de 60 grados, esto es debido a la localización geográfica ya que dependiendo de la zona los rayos del sol incidirán más perpendicularmente o menos sobre las placas solares.

Velocidad del viento:

Evidentemente la velocidad del viento está directamente relacionada con la cantidad de energía que se puede obtener de un aerogenerador, cuanto mayor sea la velocidad mayor será esta energía.

No es fácil estudiar el viento ya que dependiendo del lugar en el que nos encontremos puede haber grandes variaciones en su velocidad y dirección de actuación. En la siguiente imagen se puede ver la gran cantidad de vientos que pueden aparecer según la ubicación.

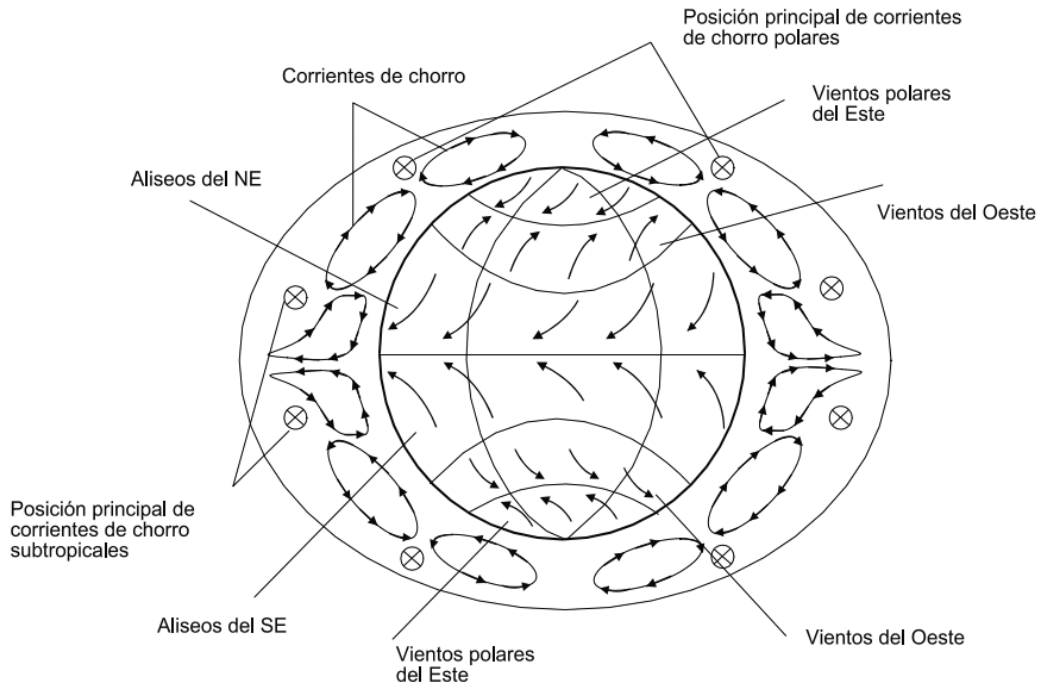


Fig. 1.2. Tipos y dirección de los vientos [2]

Estos vientos se producen debido a que la incidencia de la irradiación solar es mayor en el ecuador que en otras zonas, esto hace que haya grandes diferencias de temperatura y por tanto la atmósfera terrestre tiende a suavizar estas variaciones de temperatura mediante la generación de viento.

La velocidad del viento es mayor cuanto mayor es la distancia de la superficie terrestre (la orografía influye en la reducción de la velocidad), por esta razón los aerogeneradores tienen una altura elevada generalmente.

Se puede aplicar la siguiente expresión para calcular la velocidad del viento a cualquier altura:

$$V(z) = V_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

Donde α es el coeficiente de rugosidad, Z son las alturas y V son las velocidades del viento.

España también es un país propicio para la instalación de aerogeneradores ya que en ciertas zonas de su geografía el viento actúa fuertemente dando lugar a grandes cantidades de energía que puede ser aprovechada.

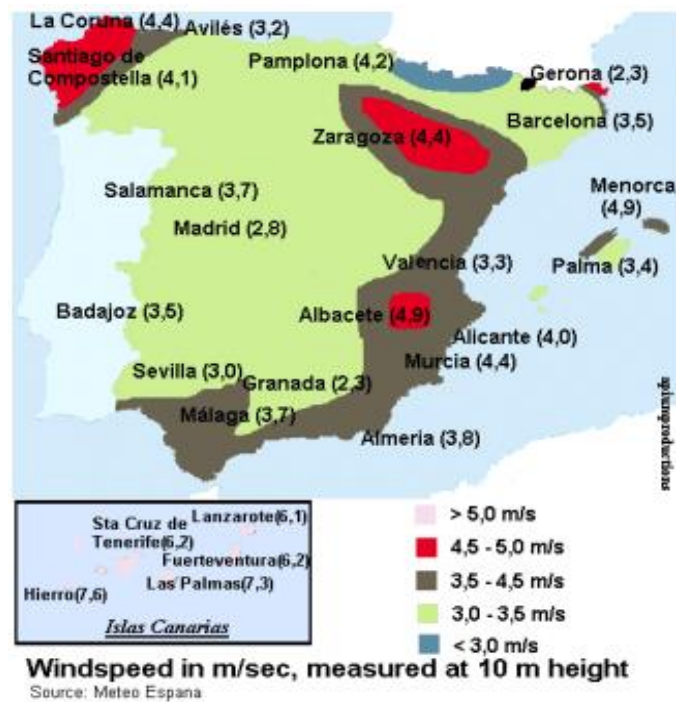


Fig. 1.3. Mapa de las velocidades del viento en España [3]

Una velocidad del viento demasiado elevada haría el efecto contrario al deseado y perjudicaría la generación de potencia en los aerogeneradores, estos generalmente se paran por cuestiones de seguridad. A continuación se puede ver una gráfica con varias curvas de potencia de los aerogeneradores en donde se aprecia la variación de generación de potencia en función de la velocidad del viento.

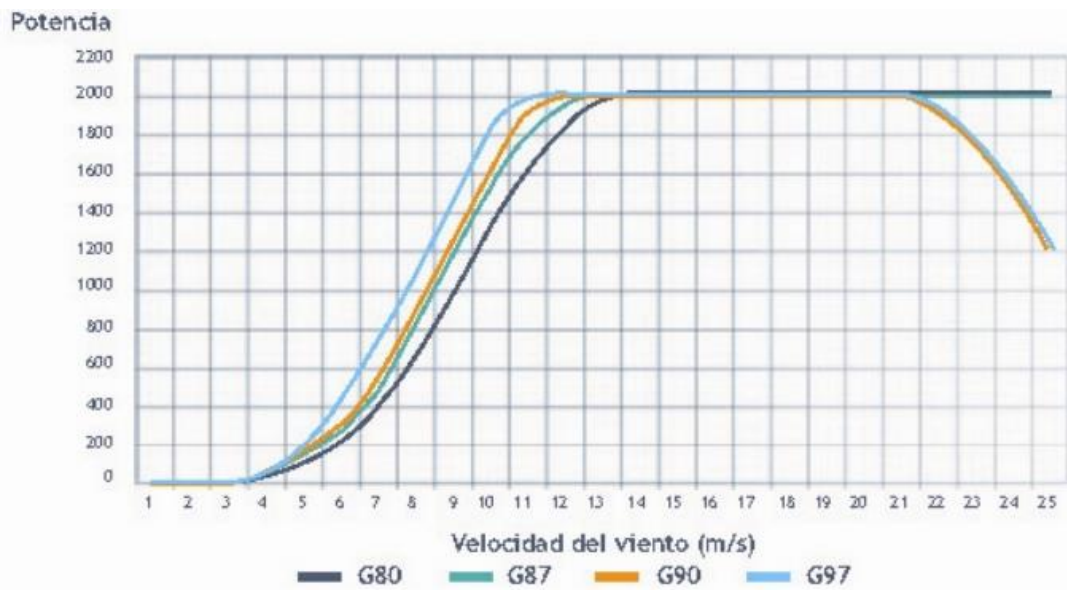


Fig. 1.4. Ejemplo de curvas de potencia [4]

Temperatura:

Aunque a priori no lo parezca, la temperatura es un factor muy importante a la hora de hablar de energías renovables.

La temperatura afecta la producción del aerogenerador debido a que cuanto mayor es la temperatura menor es la densidad del aire, lo que implica menor potencia eléctrica generada por el aerogenerador (ver Anexo 3).

Por otro lado, un aumento excesivo en la temperatura también disminuye la potencia eléctrica generada por una placa solar fotovoltaica (ver Anexo 3). Esto es debido a que al aumentar la temperatura, la tensión del circuito eléctrico disminuye unos milivoltios por cada grado que aumenta la temperatura. Esta característica se puede apreciar en la siguiente gráfica:

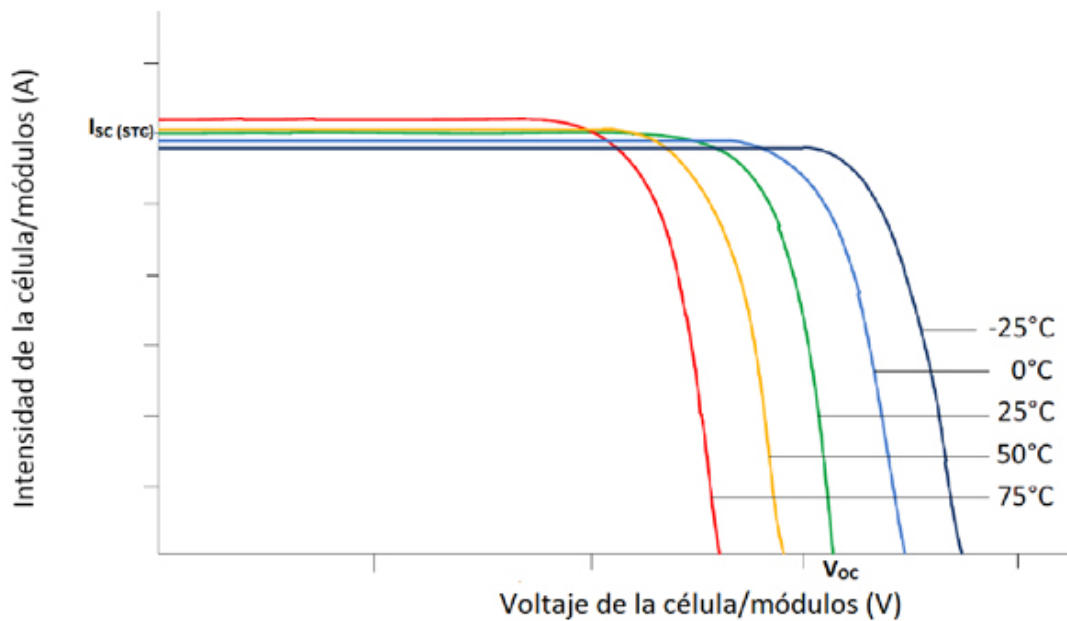


Fig. 1.5. Influencia de la temperatura en la intensidad [5]

La temperatura también es un aspecto influyente en la vida útil de las baterías que forman el sistema híbrido. Cuanto más caliente esté la batería, las reacciones químicas se producirán más rápido proporcionando por tanto un mayor rendimiento, pero al mismo tiempo la velocidad de las reacciones químicas no deseadas aumenta, lo que implica una reducción en la vida útil de las baterías.

Por tanto lo más adecuado para el mayor rendimiento global del conjunto híbrido es una temperatura intermedia, no demasiado fría (para evitar la creación de pequeñas partículas de hielo) ni demasiado caliente (para mejorar el rendimiento de placas fotovoltaicas y aumentar la vida útil de las baterías).

8. Anexo 2

En este anexo aparecen los principales componentes que se han evaluado en el trabajo con sus fichas técnicas y principales características:

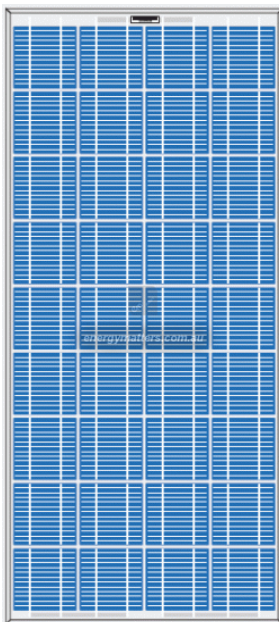
Paneles fotovoltaicos SCHOTT aSI12 de 100 Wp:



Modelo	ASI 81
Voltaje Nominal	12 V
Potencia máxima	98,8 Wp
Vmáxima	19V
Imax	5,49A
V abierto	23,99V
Icorto circuito	6,00 A
Dimensiones	1108x1308x50 mm
Peso	19 kg

Fig. 2.1. Paneles SCHOTT [1]

Paneles fotovoltaicos SUNTECH SIP12 de 130Wp:



Electrical Characteristics	
Cell	Multicrystalline silicon solar cells 156mmx156mm
No of cells and connections	36 (4x9)
Open-circuit voltage - Voc	22 V
Optimum operating voltage -Vmp	17. V
Short-circuit current - Isc	8.09 A
Optimum operating current - Imp	7.47 A
Maximum power at STC -Pmax	130 Wp
Operating temperature	-40 °C to +85°C
Maximum system voltage	1000 V DC
Mechanical Characteristics	
Dimensions	1482 x 676 x 35 mm
Weight	12 kg
Temperature Coefficients	
NOCT	45 °C ± 2 °C
Short circuit current temperature coefficient	(0.055 ± 0.01) % / K
Open circuit voltage temperature coefficient	-(75 ± 10) % / K
Peak power temperature coefficient	-(0.47 ± 0.05) % / K
Power tolerance	± 5 %
Output	
Cable	LAPP(4.0mm ²)
Lengths	750mm(-) and 750mm(+)
Connection	MC Plug Type IV

Fig. 2.2. Paneles SUNTECH [2]

Aerogenerador Whisper



WHISPER 100	
Rotor Diameter	7 ft (2.1 m)
Weight	47 lb (21 kg) box: 74 lb (22.56 kg)
Shipping Dimensions	51 x 20 x 13 in (1295 x 508 x 330 mm)
Mount	2.5 in schedule 40 (6.35 cm) pipe
Start-Up Wind Speed	7.5 mph (3.4 m/s)
Voltage	12, 24, 36, 48 VDC
Rated Power	900 watts at 28 mph (12.5 m/s)
Turbine Controller	Whisper controller
Body	Cast aluminum/marine option
Blades	3-Carbon reinforced fiberglass
Overspeed Protection	Patented side-furling
Kilowatt Hours Per Month	100 kWh/mo at 12 mph (5.4 m/s)
Survival Wind Speed	120 mph (55 m/s)
Warranty	5 year limited warranty

Fig. 2.3. Aerogenerador Whisper [3]

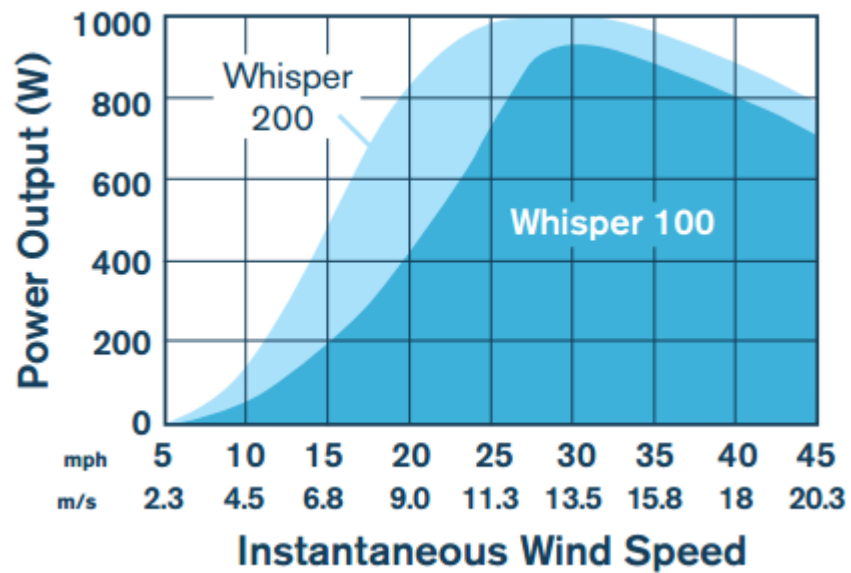


Fig. 2.4. Curva de potencia del aerogenerador Whisper [3]

Aerogenerador AIRX:



Rotor Diameter	46 in (1.15 m)
Weight	13 lb (5.85 kg)
Shipping Dimensions	27 x 15 x 9 in (686 x 38 x 228 mm) 17 lb (7.7 kg)
Mount	1.5 in schedule 40 pipe 1.9 in (48.26 mm) OD
Start-Up Wind Speed	8 mph (3.58 m/s)
Voltage	12, 24, and 48 VDC
Rated Power	400 watts at 28 mph (12.5 m/s)
Turbine Controller	Microprocessor-based smart internal regulator with peak power tracking
Body	Cast aluminum (Marine is powder coated for corrosion protection)
Blades	3-Carbon fiber composite
Overspeed Protection	Electronic torque control
Kilowatt Hours per Month	38 kWh/mo at 12 mph (5.4 m/s)
Survival Wind Speed	110 mph (49.2 m/s)
Warranty	3 year limited warranty

Fig. 2.5. Aerogenerador AIRX [4]

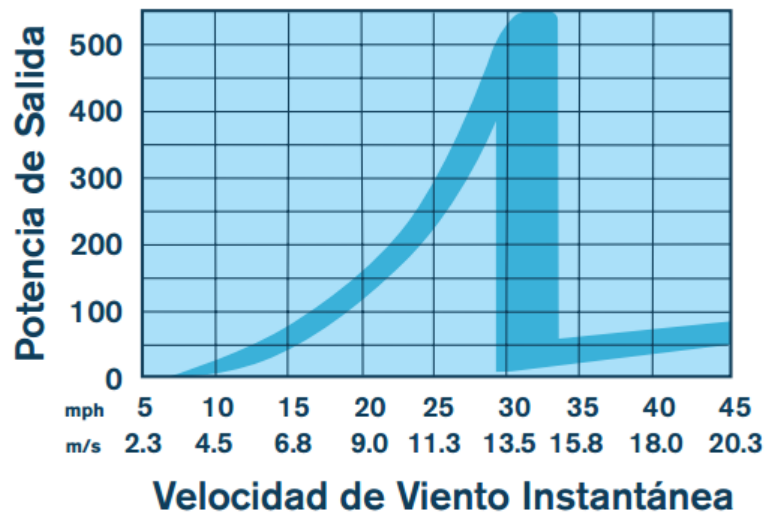


Fig. 2.6. Curva de potencia del aerogenerador AIRX [4]

Baterías Hawker OPZS:



Fabricante: Hawker
 Modelo: Enersys TZS-12
 Referencia OPzS: 12 OPzS 1500
 Capacidad en Ah 10h (1,80V): 1770
 Capacidad en Ah 120h (1,85V): 2335
 Capacidad en Ah 240h (1,85V): 2440
 Dimensiones: 275x210x829mm
 Peso en seco: 64,2 Kg
 Peso llenado: 91 Kg
 Volumen acido: 21,6 L.

Fig. 2.7. Baterías Hawker [5]

Inversor Steca Solarix 1200:



Weight (KG)	10
Manufacturer	Steca
Battery Voltage	48
Inverter Type	Inverter
Inverter with Solar Charge Controller	No
Surge Output	3000
Continuous Output	900
AC Output Phases	1
Standard Warranty Length	5
Delivery Time Europe (Est)	7-10 working days

Fig. 2.8. Inversor Solarix [6]

9. Anexo 3

En este apartado se va a explicar el proceso seguido por el programa iHoga para obtener la potencia generada por los diferentes elementos que componen el sistema híbrido [1]

Generador fotovoltaico:

La potencia del generador fotovoltaico para el sistema de seguimiento de máxima potencia (MPPT) se calcula de la siguiente manera:

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \cdot \frac{G_{h_yearY}(t)}{1\text{kWh/m}^2} \cdot f_{mm} \cdot f_{dirt} \cdot \mu_{wire_PV} \cdot f_{temp}$$

Donde P_{STC} es la potencia de salida en condiciones estándar (Wp), $G_{h_yearY}(t)$ (kWh/m^2) es la irradiación sobre los paneles fotovoltaicos durante la hora t del año Y , f_{mm} es el desajuste de la potencia, f_{dirt} es el factor de reducción por suciedad, μ_{wire_PV} es la eficiencia del cable conductor y f_{temp} es el factor de reducción de la temperatura calculado de la siguiente manera:

$$f_{temp} = 1 + \frac{\alpha}{100} (T_c(t) - 25)$$

Donde α es el coeficiente de la temperatura de alimentación y T_c es la temperatura de la célula fotovoltaica que se calcula como:

$$T_c(t) = T_a(t) + \left(\frac{NOCT - 20}{0.8} \right) \cdot \frac{G_{h_yearY}(t)}{1\text{kWh/m}^2}$$

Donde T_a es la temperatura ambiente en grados centígrados y NOCT es la temperatura de la célula fotovoltaica en condiciones nominales.

Aerogenerador:

Hay varios factores que, aunque no lo parezca, influyen de manera directa o indirecta en la generación de potencia en un aerogenerador:

- La temperatura: afecta de forma indirecta, las diferencias de presión hacen que el viento sople y la temperatura está directamente relacionada con la presión.
- La densidad del viento es también importante ya que no únicamente es importante la velocidad de este viento para generar energía, sino también su consistencia.
- La humedad puede afectar de forma significativa en la densidad del aire, por tanto también es importante tenerla en cuenta.
- Un frío excesivo también influye de manera negativa ya que esto implica la formación de pequeños cristales de hielo que no favorecen el comportamiento óptimo del sistema de generación de energía.

Generalmente el fabricante suele dar una curva de potencia acorde con las condiciones estándar a nivel del mar, por lo tanto hay que recalcularla para las condiciones en las que se vaya a trabajar.

La presión atmosférica a la altura del nivel del mar puede calcularse de la siguiente manera:

$$P = P_o \left(1 - \frac{L \cdot H}{T_o} \right)^{\frac{gM}{RL}}$$

Donde P_o es la presión estándar a nivel del mar (101325 Pa), T_o es la temperatura a la altura del nivel del mar (288 K), L es la tasa de variación de la temperatura con respecto a la altura (0,0065 K/m), g es la aceleración de la gravedad, R es la cte del gas ideal y M es el peso molecular del aire seco.

Para calcular la potencia de la turbina a una altura H y a una temperatura T , se puede multiplicar la potencia de salida a nivel del mar por la relación de densidades del viento con las diferentes condiciones:

$$\frac{\rho}{\rho_o} = \left(1 - \frac{L \cdot H}{T_o} \right)^{\frac{gM}{RL}} \cdot \frac{T_o}{T}$$

Además sabemos que la expresión para el cálculo de la potencia en un aerogenerador se puede reducir a lo siguiente

$$Pot = \frac{1}{2} \cdot A \cdot V^3$$

Donde A es el área que atraviesa la masa de aire y V es la velocidad de esa masa de aire.

Por otro lado, si la altura del centro de la turbina es diferente a la altura del anemómetro con el que se ha medido la velocidad del viento, la velocidad del viento a la altura deseada se puede obtener de la siguiente manera:

$$W_{HUB_h_yearY}(t) = W_{h_yearY}(t) \cdot \frac{\ln \frac{z_{hub}}{z_0}}{\ln \frac{z_{anem}}{z_0}}$$

Este valor se utiliza como entrada en la curva de potencia a la altura de ubicación H y a la temperatura T para obtener la potencia generada por la turbina eólica.

10. Bibliografía Anexos

Anexo1:

- [1] <http://www.adrase.com/>
- [2] <https://www.uclm.es/>
- [3] <http://ptcentre.net46.net/documents/img/windmapes.gif>
- [4] <https://moodle2.unizar.es/add/> “Asignatura Energías Renovables”
- [5] <http://www.energias-renovables.com/>

Anexo2:

- [1] <http://www.efimarket.com/media/pdf/SCHOTT%20Capa%20fina.pdf>
- [2] <http://www.soltecnica.es/p/es/paneles-solares-fotovoltaicos/suntech-power.php>
- [3] <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/SOUTHWEST-WINDPOWER-WHISPER100-WHISPER200-WHISPER500-ficha-EN.pdf>
- [4] [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/SOUTHWEST-WINDPOWER-AIRX-LAND-AIRX-MARINE-400W-12-24-48V-ficha-EN%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/SOUTHWEST-WINDPOWER-AIRX-LAND-AIRX-MARINE-400W-12-24-48V-ficha-EN%20(1).pdf)
- [5] <http://solaronline.es/tienda/es/baterias-estacionarias/105-tzs-12-bateria-modulo-hawker-12-opzs-1500-2v-.html>
- [6] <http://www.off-grid-europe.com/steca-solarix-pi-1200-inverter>

Anexo3:

- [1] “R. Dufo-López, I.R. Cristóbal Monreal, J.M. Yusta-Loyo. Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimise cost and maximise human development index and job creation. Renewable Energy 94 (2016) 280-293”