



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Linares

**IMPLANTACIÓN, ESTUDIO EXPERIMENTAL Y
PUESTA A PUNTO DE UN AEROGENERADOR
PARA APLICACIONES DE GENERACIÓN
DISTRIBUIDA**

Alumno: Pablo J. Serrano Lozano

Tutor: David Vera Candeas

Depto.: Ingeniería Eléctrica

Febrero/2018

Implantación, estudio experimental y puesta a punto de un aerogenerador para aplicaciones de generación distribuida

Pablo J. Serrano Lozano

Grado en Ingeniería Eléctrica

David Vera Candeas

Departamento de Ingeniería Eléctrica

❖ Índice

1. Introducción	- 4 -
1. Generación distribuida.....	- 4 -
2. Contexto Energético	- 6 -
3. Estado del arte	- 9 -
1. Proyecto de ejecución de una instalación híbrida eólica-solar aislada de una red en una vivienda unifamiliar en Muros, A Coruña.	- 11 -
2. Instalación de una aerogenerador de eje vertical en el edificio de la Universidad de Cantabria.	- 12 -
3. Generación Distribuida: Estudio de Requerimientos para la Interconexión a la Red de Distribución.....	- 14 -
4. Montaje, medición y seguimiento del funcionamiento de paneles fotovoltaicos en combinación a un sistema de generación eólica	- 15 -
5. Aldea Aislada en Cabo Verde	- 16 -
6. Diseño de un sistema Híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua	- 18 -
7. Design and experimental verification of a high efficiency small wind energy portable turbine (SWEPT).....	- 19 -
8. Stand-alone operation of an alkaline water electrolyser fed by wind and photovoltaic systems	- 20 -
2. Resumen.....	- 21 -
<i>Abstract</i>	- 21 -

3. Objetivos	- 22 -
4. Materiales y métodos	- 23 -
1. Localización.....	- 23 -
2. Materiales	- 24 -
3. Trabajo técnico	- 33 -
4. Contexto teórico	- 37 -
5. Resultados y discusiones.....	- 40 -
6. Conclusiones	- 46 -
7. Anexos	- 47 -
8. Bibliografía	- 57 -

1. Introducción

La investigación experimental está integrada por un conjunto de actividades metódicas y técnicas que se realizan para recabar la información y datos necesarios sobre el tema a investigar y el problema a resolver.

En el comienzo de este trabajo experimental se explica de una manera sencilla cada una de las partes que lo constituyen. En la introducción se va definir el concepto de gestión distribuida y se estudiará el contexto energético, además se expondrá el estado del arte de este trabajo experimental. La segunda parte será el resumen del trabajo realizado durante varios meses. Se ha intentado hacer de una manera reducida evitando los trabajos de menor importancia. La parte tres, objetivos, plantea la finalidad o propósito perseguido cuando se inició este estudio. La cuarta parte es materiales y métodos. En esta se elaborada un listado de todo el material que se ha instalado durante el proyecto, diciendo las características más destacables. También se ha expuesto el marco teórico en el cual se basa un aerogenerador, es decir, el potencial eólico aprovechable. El siguiente punto es el cinco, discusión y resultados, en el cual se expone una vez hechas las primeras mediciones la generación de energía eléctrica con la velocidad de aire medida. Así podremos hacernos una idea de la posible generación y la comprobación de que el sistema funciona de manera correcta. En el punto seis, conclusiones, después de todo el trabajo desarrollado se expondrán las deducciones a las que se llega y también futuras mejoras que se podrían añadir. El punto siete, anexos, incluye todos los planos utilizados y diferentes esquemas para una mejor comprensión del estudio. Y por último el punto ocho, referencias bibliográficas.

1. Generación distribuida

En la actualidad no existe en la literatura una definición exacta y única para el concepto de Generación Distribuida (GD). Cualquiera de las siguientes definiciones puede considerarse como válida para la definición de GD.

- JENKINS [8]: estos autores prefieren una definición amplia sin entrar a discutir debates sobre el tamaño de los generadores , tensión de conexión, tecnología de generación, etc. Sin embargo, mencionan algunos atributos asociados generalmente a la GD:

- No ser planificada ni programada centralmente (REE).
 - Normalmente con potencia instalada inferior a 50MW o 100MW.
 - Conectada a redes de distribución ($U \leq 145\text{kV}$).
- Ackermann [8]: Estos autores proponen también una definición de GD atendiendo a una serie de aspectos como el propósito de la GD, ubicación, potencia instalada, tecnología de generación, impacto ambiental, modo de operación y nivel de penetración.
 “Generación distribuida consiste en una fuente de potencia eléctrica conectada directamente a la red de distribución o en las instalaciones de BT de los consumidores”
 La distinción entre la red de distribución y la red de transporte la deja supeditada a lo establecido legalmente en cada país. Estos autores proponen también una clasificación de la GD atendiendo a su tamaño (potencia eléctrica instalada):
 - Micro GD: $1\text{W} < \text{Potencia instalada} < 5\text{kW}$
 - Pequeña GD: $5\text{kW} < \text{Potencia instalada} < 5\text{MW}$
 - Mediana GD: $5\text{MW} < \text{Potencia instalada} < 50\text{MW}$
 - Gran GD: $50\text{MW} < \text{Potencia instalada} < 300\text{MW}$
- Agencia Internacional de la Energía [19]: producción de energía eléctrica en las instalaciones de los consumidores o en las instalaciones de la empresa distribuidora, suministrando energía directamente a la red de distribución.
 - ENDESA [20]: la GD o descentralizada es una parte fundamental en una Smart City, y consiste en la generación de energía eléctrica mediante muchas pequeñas fuentes de generación instaladas cerca de los puntos de consumo. La generación distribuida es una cooperación entre la micro-generación y la generación de las centrales convencionales.
 - En España se entiende por GD al conjunto de sistemas de generación eléctrica que se encuentran conectados dentro de las redes de distribución, caracterizados principalmente por su pequeña potencia instalada y por estar ubicados cerca de los puntos de consumo [17]. Sus principales características son:

Estar conectada a la red de distribución (en España suele ser inferior los 110kV, REE).

- Flujo eléctrico bidireccional, es decir, una parte de la generación puede ser consumida por la misma instalación y el resto ser exportada a la red de distribución. Incluso, estas instalaciones pueden ser capaz de generar energía eléctrica y térmica simultáneamente (plantas de cogeneración).
- No existe una planificación centralizada de la energía eléctrica que se genera (no estar controlado por REE).
- Generalmente de potencia eléctrica instalada inferior a 50MW.

2. Contexto Energético

El dios del viento de la mitología griega es Eolo, de donde viene la palabra eólico. La historia de la energía eólica es muy famosa, porque es una de las fuentes de energías más antiguas y aprovechadas por la humanidad.

No es necesario extenderse mucho en esto ya que es de dominio público, pero si destacar que los primeros molinos que se conocen en la historia eran de eje vertical. Estos se encontraban en Afganistán alrededor del siglo VII. Se destaca esto ya que este tipo de molino de eje vertical, siendo su diseño de los más primarios y rudimentarios, a día de hoy son los más innovadores y vanguardistas.

En la actualidad estamos sobreexplotando nuestro planeta. Llevándolo a una contaminación y falta de recursos extrema. Esto lleva a problemáticas como la del conocido cambio climático. Uno de los mayores causantes de este cambio climático es nuestra actual forma de generación de energía. Diferentes centrales térmicas de combustibles fósiles llevan a esto, además de un aire muy contaminado causando graves problemas respiratorios para la población.

Por este motivo la generación de energía de fuentes renovables limpias y renovables es algo muy a la orden del día. En concreto la energía eólica, fuente limpia, inagotable, que no deja ningún tipo de residuo y cada vez más barata. Para la obtención de este tipo de energía no necesitamos ningún proceso de combustión o transformación térmica, por lo que desde un punto de vista medioambiental, es un proceso con muchos puntos a favor. Los únicos puntos negativos de estas son la contaminación visual y sonora.

Ya que al necesitar tanta altura y tener palas de enorme tamaño para la mayor obtención de energía tiene un impacto visual muy grande que marca el paisaje. También hay que destacar que el gran rotor produce ruido al girar, lo que puede llegar a ser molesto.

En el último cuarto de siglo la energía obtenida del viento ha aumentado su desarrollo de una manera notable, invirtiendo mucho en la mejora de tecnología eólica. Los aerogeneradores han aumentado su generación eléctrica de 55 KW en 1982 hasta 5 MW de hoy día. La potencia total instalada a finales de 2016 fue de 486.749 MW, en el 1980 era de tan solo 100 MW. Actualmente más del 3% de la energía total consumida en el mundo proviene de la energía eléctrica y se espera que alcance un 5% para 2020. En el año 2040 la Agencia Internacional de la Energía prevé que cubra un 9% de la demanda y más del 20% en Europa.

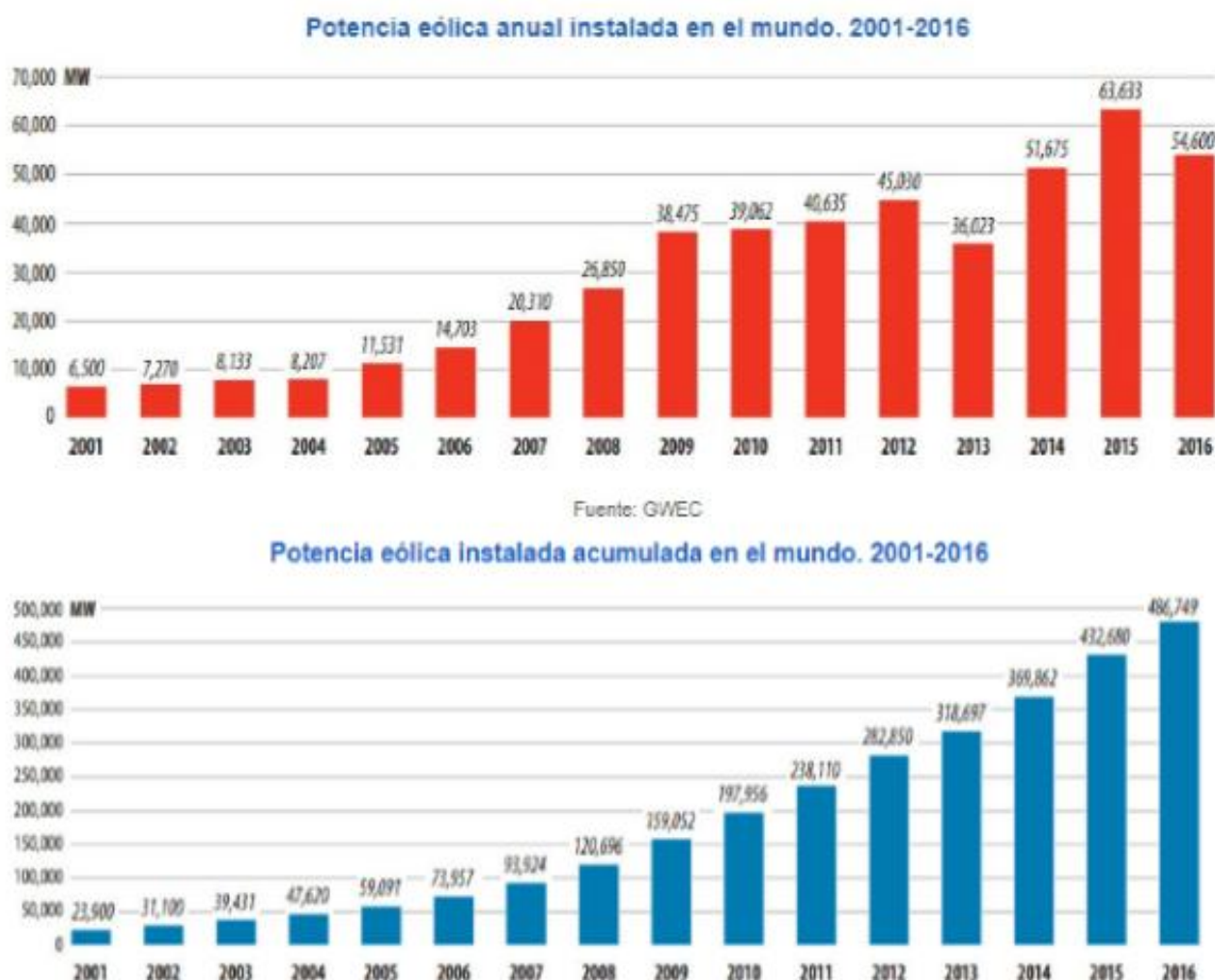
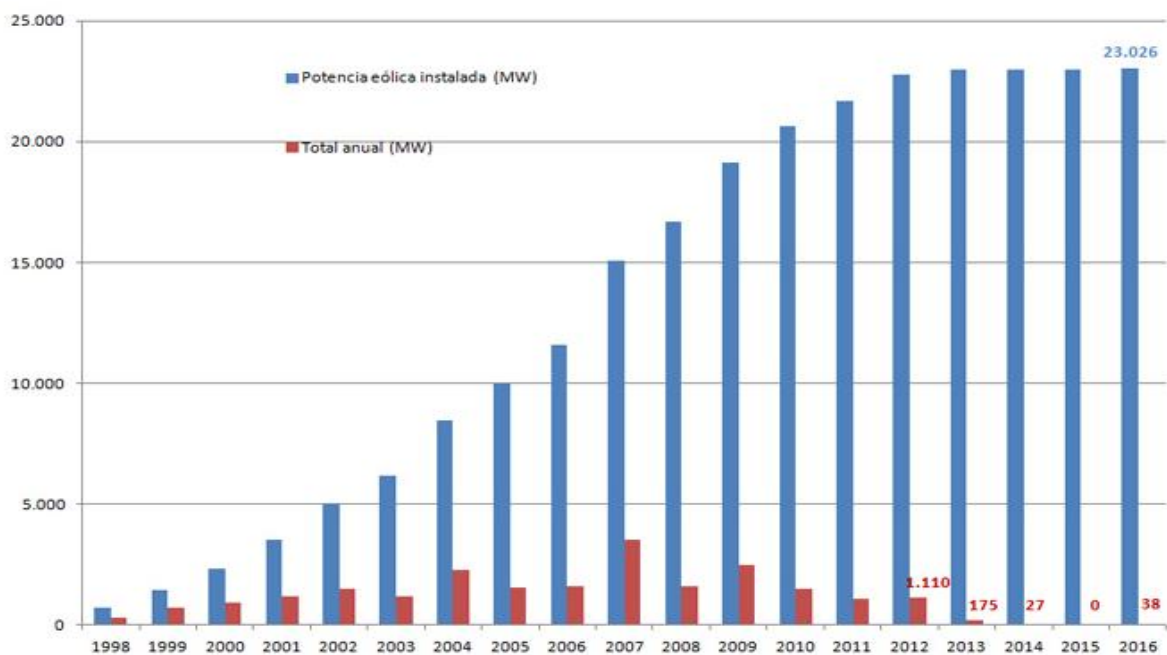


Figura 1.1- Potencial eólico. Fuente [16]

España fué uno de los países precursores y líderes en aprovechar el viento para producir electricidad. Tras treinta años de la instalación del primer aerogenerador en

nuestras fronteras, fuimos el primer país cuya principal fuente de energía para generación eléctrica proviene de una fuente renovable, el viento. Con un 20.9% de la demanda total en 2013. Sin embargo esta implantación eólica se ha ralentizado drásticamente. Aun así, España con 23.026 MW es el segundo país con más potencia eólica instalada tras Alemania. Y la quinta del mundo después de China, EEUU e India.

Evolución de la potencia eólica instalada año a año en España (en MW)



Fuente: AEE

Figura 1.2- Potencia eólica en España. Fuente [16]

La energía eólica está evolucionando en una dirección mucho más individualista, buscando una generación más doméstica y a pequeña escala. A finales de 2014 había un total de 945.000 pequeñas turbinas instaladas en todo el mundo lo que supone un incremento del 8,3% respecto a las 872.000 unidades de 2013. El cambio de dirección hacia una energía eólica más doméstica tiene ciertas ventajas. La más destacada es la menor pérdida de energía ya que el transporte de ella es menor o casi nulo por generar la energía *in situ*. El ahorro hacia el consumidor en la factura mensual es otra ventaja, aunque el desembolso inicial sea alto. La producción de un tipo de energía que no genera

contaminantes sería otro punto a favor. El mayor mercado de la energía minieólica o microeólica se encuentra en zonas rurales alejadas de las grandes urbes. Es decir lugares remotos donde no es rentable hacer llegar las líneas eléctricas. Lugares como casas rurales, granjas, cabañas, torres de telecomunicaciones... estos sitios se consideran puntos aislados. Estos lugares son idóneos para instalar minieólica o incluso un sistema híbrido eólico-fotovoltaico ya que el coste es bastante menor que un enganche a red de muchos km. Esta solución daría electricidad a lugares donde tradicionalmente les ha sido negada consiguiendo una mejora considerable que supondría un mayor bienestar para las personas o un mayor rendimiento en sus actividades económicas.

La nueva ley del sector energético, que entró en vigor en nuestro país, ha sido un gran perjuicio para la mayoría de las empresas cuyo destino es la mejora de la eficiencia energética, y más aún a las dedicadas a la energía minieólica. Según esta nueva ley, los poseedores de algún tipo de generador eléctrico propio que necesite un punto de conexión a red, deberán pagar un peaje de respaldo a las compañías eléctricas. Este nuevo impuesto cambia muchos de los proyectos de ahorro energético de autoconsumo. Por lo tanto la normativa es un punto muy a tener en cuenta para el cálculo de la viabilidad de cualquier proyecto de generación eléctrica mediante fuentes renovables.

3. Estado del arte

El estado del arte o en inglés *State of the Art*, se refiere al conocimiento o tecnología más vanguardista actualmente. Describe las investigaciones más recientes sobre un tema específico. La descripción es un texto académico que expone sistemáticamente los avances existentes acerca del tema y es de carácter cualitativo, en el que se detallan los resultados y enfoques de las investigaciones en torno a la cuestión que cada investigación ha abonado al tema de estudio de interés del investigador. Esta investigación gira en torno a cuatro elementos. ¿Quién?, ¿cuándo?, ¿dónde? y ¿qué?

El estado del arte es una de las primeras tareas a realizar en un trabajo experimental. Este es principalmente por tres motivos. El primero es para que el sujeto de la investigación tenga un primer acercamiento al tema que le interesa para así adquirir unos conocimientos previos. También para permitirle conocer otras investigaciones que le ayuden al investigador clarificar sus ideas respecto al tema de interés, y así podrá definirlo

mejor, perfeccionarlo, delimitarlo y enfocarlo desde la perspectiva que a él le interesa. El último motivo es conocer que es lo más novedoso en el susodicho tema y conocer quiénes son sus autores, para permitir en un flujo de comunicación si fuera necesario.

En el presente estado del arte he seleccionado de muchos textos académicos ocho en concreto. Que se sintetizan en la Tabla 1.3.1. Estos se han encontrado en diferentes buscadores como “*scholar google*”, “*scopus*” y “*tandfonline*”. A continuación se realiza una redacción de cada de cada una de las investigaciones revisadas.

¿Quién?	¿Cuándo?	¿Dónde?	¿Qué?
Martín Febeiro Monteagudo	Septiembre 2015	Muros (A Coruña)	Proyecto de ejecución de una instalación híbrida eólico-solar
Pablo Turrado Garrido	Septiembre 2016	Santander	Instalación de aerogenerador en la Universidad de Cantabria
Erik Torres	Diciembre 2011	San José (Costa Rica)	Generación Distribuida: Estudio de Requerimientos para la Interconexión a la Red de Distribución
Gustavo Fernando Cárdenas	Febrero 2016	San Julián (Argentina)	Montaje, medición y seguimiento del funcionamiento de paneles fotovoltaicos en combinación a un sistema de generación eólica.
Ingenieros de la empresa Enair	Enero 2013	Vale da Costa (Cabo Verde)	Aldea Aislada en Cabo Verde
Carlos Ponze Corral	Diciembre 2014	Poblado la Noria (México)	Diseño de un sistema Híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua
Ravi Anant Kishore Shashank Priya	Mayo 2013	Blacksburg, Virginia (EEUU)	Design and experimental verification of a high efficiency small wind energy portable turbine (SWEPT).
Alfredo Ursúa, Idoia San Martín Ernesto L Barrios Pablo Sanchis	Octubre 2013	Pamplona (Navarra)	Stand-alone operation of an alkaline water electrolyser fed by wind and photovoltaic systems

Tabla 1.1- Cuadro sintetizado estado del arte. Fuente propia

1. Proyecto de ejecución de una instalación híbrida eólica-solar aislada de una red en una vivienda unifamiliar en Muros, A Coruña.

El primer estudio revisado titulado “Proyecto de ejecución de una instalación híbrida eólica-solar aislada de una red en una vivienda unifamiliar en Muros, A Coruña”. Realizado por Martin Febeiro Monteagudo en septiembre de 2015, y con la ayuda de su tutora Ana Díez Suárez. Éste es un trabajo fin de grado en la Univerdad de León. [1]

Lo primero que se concibe en este proyecto es una introducción a los diferentes contextos energéticos actuales. Haciendo más incapié en la situación energética española y de la importancia del autoconsumo.

Sigue con la localización de la instalación. Ésta se sitúa en Muros, que es un municipio español perteneciente a la provincia de La Coruña y la comarca de Muros, en la comunidad autónoma de Galicia. Está situado en el extremo norte de la Ría de Muros y Noya, la más septentrional de las Rías Bajas. Según el INE, en 2012, su población era de 9437 habitantes. Se resalta que no hace un estudio previo de viabilidad ya que el usuario quiere expresamente la instalación del sistema híbrido independiente a la red, es decir, como punto aislado energético. La instalación se proyecta en una vivienda unifamiliar de 192 m², repartidos estos metros cuadrados entre dos plantas. El autor detalla los planos de la vivienda y la localización exacta de la instalación, situada en la azotea.

Tras la localización realiza un estudio de la demanda. Es decir, analiza la potencia de dicha vivienda. Cabe destacar que es una vivienda normal con todo tipo de electrodomésticos usuales en la casas de hoy en día. Se realiza una tabla con las cargas de la vivienda para así dimensionar el sistema. Se obtiene que el consumo anual de esta es de 2970 KWh que aplicándole un margen de seguridad del 0.3% es de 3626 KWh, que es la cantidad capaz de aportar la instalación a lo largo del año.

Ya conocida la energía que se debe producir, realiza los pertinentes cálculos con los que obtener la capacidad de generación. Todo esto se detalla en el proyecto. Concluyendo que el sistema en la parte solar debe tener unos 17 paneles “*Exiom solution model EX260p*”. Estos conectados en paralelo en cuatro ramales con 4, 4, 4 y 5 paneles cada uno para aportar la energía suficiente, y con una inclinación óptima calculada de 40°. Se colocarán cuatro reguladores “*BlueSolar Charge Controller MPPT50/70*”, cada uno en un ramal diferente para controlar el flujo energético. El sistema de acumulación, controlado por los reguladores, serán 12 vasos de 2 V cada una del modelo “*Baterias Ecosafe 350 Ah 2V*” cuya misión será aportar energía en los momentos que no se obtenga la suficiente de

los sistemas de generación. Y un inversor “*Pahoenix 24/500*” con una potencia punta de 10.000 W.

Al igual que se realiza un análisis solar para comprobar el número de paneles y la inclinación necesaria, se realiza un estudio eólico. El cual demuestra que la velocidad media durante un año es de 2,809 m/s. Esta velocidad es insuficiente para el arranque del generador síncrono del aerogenerador. Como consecuencia, la mayoría de los días las palas de éste no se moverían, con lo cual el autor desecha la idea de la instalación del aerogenerador por no ser productivo en el emplazamiento proyectado.

Por último realiza un presupuesto del material y mano de obra utilizado que hace que el precio del proyecto se fije en 14.277 €.

2. Instalación de un aerogenerador de eje vertical en el edificio de la Universidad de Cantabria.

Este estudio titulado como vemos arriba y desarrollado íntegramente en la Universidad de Cantabria por Pablo Turrado Garrido en septiembre de 2016. En Santander. [2]

El objetivo o finalidad del trabajo fin de grado de Pablo Turrado consiste en ver la viabilidad tanto técnica como económica de la instalación en la cubierta de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Industriales y de Telecomunicaciones de aerogeneradores de eje vertical para la producción eléctrica. Tras definir el objetivo de su TFG sigue con un contexto energético de la actualidad.

Como su proyecto se centra precisamente en aerogeneradores verticales, dejando de lado los horizontales que son los más usuales, ha entrado en profundidad en la explicación de éstos. Exponiendo que además de aerogeneradores de eje vertical también son conocidos como VAWT, que hay más de 150 tipos y que el primero se diseñó en el siglo XX. Los tipos más conocidos son el Savonius, Darrieus y Giromill. Y que las ventajas de éstos sobre los horizontales son las siguientes: No precisan de orientación ya que captan el aire de cualquier dirección; funcionan bien con vientos racheados al contrario que

los de eje horizontal y no necesitan tanta altura ya que funciona con vientos de menor velocidad porque su rotor ofrece menor resistencia. Sin embargo, a pleno rendimiento, son menos eficientes y no ofrecen beneficios con rachas fuertes.

Para su TFG el autor ha elegido un *“Technowind Tornado 5000”* este es de tipo Giromill, Figura 1.3, ya que los de tipo Savonius no son convenientes para generación eléctrica y los de tipo Daerrieus requieren de arranque para su funcionamiento. Tras elegir el tipo de aerogenerador describe sus partes y los elementos también necesarios. El regulador de carga eólico y el inversor *“ABB PVI-6000-TL-W”*.

La rosa de vientos del lugar, obtenida gracias a AEMET, dicta que los vientos más fuertes en ese emplazamiento son noreste a suroeste. Con esa información y las medidas de la azotea, llega a la conclusión que debe poner cinco aerogeneradores del tipo indicado anteriormente, estos deben estar en línea en dirección noroeste a sureste, para que entre ellos no se “roben” masa de aire.



Figura 1.3- Aerogenerador Giromill. Fuente [2]

El estudio eólico realizado concluye que la velocidad media del aire en esa zona es de 4,78 m/s y que como esta velocidad ha sido obtenida por datos de AEMET son 10 m de altura y la azotea está a 35 m, con lo cual hay que utilizar la ecuación 1.2.

$$v = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (1.2)$$

Sabiendo que v_0 es la velocidad original, v la velocidad que se quiere saber, H_0 la altura de la velocidad original, H la altura a la que se quiere saber la velocidad y α el coeficiente de fricción según el tipo de terreno podemos saber que la velocidad en la azotea será de 7.88 m/s, que sería la velocidad media.

Con de la distribución de Weibull y la velocidad media obtendremos la probabilidad de que la velocidad de aire desde 0 m/s a 25 m/s. Teniendo en cuenta la curva de rendimiento del aerogenerador, a cada velocidad le corresponderá una potencia, obtenemos que al generación es de 1962 W que multiplicado por el número de días que tiene un año, el número de horas de un día, el número de aerogeneradores y los diferentes factores de corrección se obtiene como resultado una generación neta al año de 80 KWh.

En el TFG se detalla un presupuesto en el que la instalación y mano de obra asciende a un total de 185.000 €.

Con lo cual el autor llega a la conclusión tras un estudio económico utilizando el TIR y el VAR de que el proyecto no es viable económicamente. Su producción eléctrica vertida a la red sin ayuda gubernamentales no rentabiliza la gran inversión. Si en vez de impuesto por el vertido de energía generada hubiera ayudas por la generación de energía limpia, el proyecto podría llegar a ser rentable, relata el autor.

3. Generación Distribuida: Estudio de Requerimientos para la Interconexión a la Red de Distribución

El primer estudio revisado titulado “Generación Distribuida: Estudio de Requerimientos para la Interconexión a la Red de Distribución”. Realizado por Erik Torres, estudiante de ingeniería eléctrica, en diciembre de 2011. Con la ayuda de su tutor Franklin Chinchilla Hidalgo. Este es un proyecto final de carrera de Universidad de Costa Rica. [3]

El presente trabajo muestra los resultados de una investigación realizada sobre los sistemas de generación distribuida (GD) utilizados más comúnmente, y sus respectivas ventajas y desventajas en la utilización para GD.

Se explican distintos conceptos referentes a la GD y los beneficios que obtienen las partes involucradas en la inserción en mayor cantidad de GD en las redes de distribución, tanto para la empresa distribuidora de la energía eléctrica como para los clientes que deseen implementar su propia generación y conectarse a la red.

Se presenta un estudio de las posibles fuentes de energía renovables con mayor potencial para el desarrollo de la GD en distintos puntos del país, tales como la fuente solar, eólica y biomasa; buscando una mayor promoción de la GD a base de energía limpia y renovable.

Se establecen las principales barreras que afronta la mayor penetración de la GD en Costa Rica, siendo clasificadas en legales, administrativas, técnicas, geográficas y financieras. Después de analizar cada una de estas barreras, se realizan propuestas para mitigar éstas, de forma que se logren disminuir en lo posible. Dentro de las propuestas realizadas, se destaca la necesidad de establecer procedimientos que regulen la GD dentro del marco legislativo del país e incentivar a la población con el uso de métodos de tarificación como el “*Net Metering*” y “*Feed in Tariff*” utilizados en otros países más desarrollados en GD.

Como parte final del proyecto, se realizaron investigaciones sobre estudios en el análisis de impacto de la GD en la red de distribución en otros países con casos reales y de simulación por software, y su posible utilización como referencia en el país a mayor implementación de la GD.

4. Montaje, medición y seguimiento del funcionamiento de paneles fotovoltaicos en combinación a un sistema de generación eólica de baja potencia

El estudio llamado “Montaje, medición y seguimiento del funcionamiento de paneles fotovoltaicos en combinación a un sistema de generación eólica de baja potencia” que ha sido realizado por Gustavo Fernando Cárdenas en San Julián, Argentina, y realizado desde la Universidad Nacional de la Patagonia Austral. [4]

Gustavo, tras comentar el contexto energético de las energías no convencionales en su país, resume que el proyecto trata del diseño y vinculación de unos paneles fotovoltaicos vinculados a un sistema eólico de baja potencia.

Disponen de un generador eólico facilitado por la universidad de 1 KW y 24 V con su respectivo regulador de carga eólico ajustado a sus características. El equipo cuenta con un sistema de adquisición de datos con almacenamiento en formato de tarjetas Flash / SD para registrar los datos de producción y documentar el funcionamiento midiendo parámetros como la tensión de batería, corriente de carga del aerogenerador, RPM del rotor, tensión y corriente alterna de salida del inversor, etc. Se realizan actividades de monitoreo y descarga de datos de los equipos, así como su supervisión general para reducir las necesidades de mantenimiento.

La instalación se encuentra en la zona chacra de San Julián, a 3 km del aeropuerto. Por este motivo el autor obtiene los datos climatológicos del aeropuerto. De esta forma conoce la radiación media diaria por mes en la zona. Y con ella y el software *"Restscreen"*, averigua que la inclinación óptima de los paneles para su rendimiento máximo debe ser de 60°.

Gustavo Fernando ha elegido 4 paneles de 100 W tipo *"Solartec KS 100T"*. Los ha dispuesto en dos ramas con dos paneles en cada rama, y éstas conectadas en paralelo. Como en cada rama se genera una corriente máxima de 4,16 A, el regulador tendrán que aguantar la suma de las dos ramas que es 8,32 A. Para sobredimensionar un poco ha elegido el regulador *"Solsum Steca 20"* que agunta una corriente máxima de 20 A. Ha escogido un sistema de acumulación formada por 2 baterías plomo-ácido de 12 V y una capacidad de 220 Ah. El inversor es *"Inverter Qmax"* escogido con las características necesarias.

Por último realiza un presupuesto en el cual indica que la inversión es de 42.243 \$.

5. Aldea Aislada en Cabo Verde

Este fue un proyecto realizado en Vale da Custa (Cabo Verde), en enero de 2013 por las empresa Enair y SMA Ibérica Tecnología Solar y gracias a la ayuda de fondos de colaboración europeos. [5]

Este proyecto altruista ha llevado la luz a una aldea de 117 viviendas, una escuela, un pequeño centro sanitario y una administración local. La central de microgeneración tiene

una potencia nominal de 45 KW. Ésta llega a abastecer picos de 100 KW. El sistema se ha diseñado para que la energía no siempre tenga que acumularse en las baterías, si es necesario fluye directa al punto de consumo, lo que evita ciclos de carga, alargando al vida útil del sistema de acumulación.

La instalación compuesta de 15kW de mini eólica y 20 kW de fotovoltaica, Figura 1.4, se conecta directamente al bus de alterna de los consumos mediante inversores de red “Windy Boy y Sunny Minicentral” los cuales son gestionados por 6 gestores inteligentes de red Sunny Island. Los Sunny Island crean la red trifásica manteniendo una tensión de 400V y 50Hz totalmente estable. La gestión consiste en aportar energía de las baterías a la red, cargar baterías con los excesos, arrancar un grupo electrógeno de apoyo si fuera necesario e incluso pueden arrancar cargas externas auxiliares optimizando la generación eléctrica. La extensión de esta red eléctrica es de menos de 10 km.



Figura 1.4- Instalación aldea de Cabo Verde. Fuente [5]

Ficha Técnica:

Torres tubulares basculantes; 3 aerogeneradores Enair 70; 20 KW fotovoltaica; 3 inversores “Windy Boy 5000TL”; 3 Inversores “Sunny Minicentral 7000”; 6 “Suunny Island 5048”; 1 “Mulcluster Box”; estructura plástica sobre suelo; 2 bancos de baterías de 2400Ah a 48V y un grupo de apoyo diésel de 36KW a 1500 RPM.

- Resultados globales:

Total eólicas 53,7kWh/día

Fotovoltaicas 76,0 kWh/día

- Máximas alcanzables:

Total eólicas 205,0 kWh/día

Fotovoltaicas 88,6 kWh/día

6. Diseño de un sistema Híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua

Éste es un proyecto desarrollado por Carlos Ponze Corral en diciembre de 2014 para ver la viabilidad de implantar un sistema de generación híbrido en una zona rural en el estado de Chihuahua donde no cuentan con una red de distribución con la que poder abastecerse de energía eléctrica. El sistema híbrido o HRES (Sistema Híbrido Renovable, con sus siglas en inglés) contaría de módulos fotovoltaicos, un aerogenerador y un grupo diésel de apoyo. Generalmente estos sistemas combinan una fuente de energía renovable con una convencional. [6]

El proyecto desarrolla la explicación teórica de la energía según su fuente de origen y los parámetros a tener en cuenta. En la solar señala que el parámetro a valorar es la radiación solar y la curva corriente-tensión de los paneles fotovoltaicos. En la fuente eólica destaca tres factores: distribución del viento en el lugar del sistema, altura de los aerogeneradores y curva de potencia eléctrica de salida de los aerogeneradores proporcionada por el fabricante. El generador diésel de respaldo se usa por su disponibilidad inmediata las 24 horas del día.

El Poblado la Noria se sitúa a 200 km del municipio de Chihuahua, en el municipio de San Isidro. Este cuenta con unos 107 habitantes. Se estiman 20 casa con 5 habitantes cada una de ellas que en total tendrían un consumo aproximado de 22,78 KWh de carga diaria promedio anual. Ésta estimación se ha hecho teniendo en cuenta el tipo de vivienda y el tipo de electrificación de estas (mirando la media de aparatos eléctricos y puntos de luz en cada casa). En esta zona los datos obtenidos gracias a SENOR y NASA la radiación media es de 1 KWh/m² por día y la velocidad promedio del viento es de 6,15 m/s.

El proyectista establece que sería necesaria la instalación de 12 módulos fotovoltaicos de 250 W cada uno, elige la marca HJ. Una turbina de 1 KW, de la marca “*Bergey Windpower*”. Tres baterías en serie ácido-plomo de capacidad 225 Ah, modelo “*Trojan T-105*”. Un generador diésel de potencia nominal 3 KW de la marca ST. Y un convertidor modelo “*Goldsource AR-5000*”. Conectado como apreciamos en la Figura 1.4.

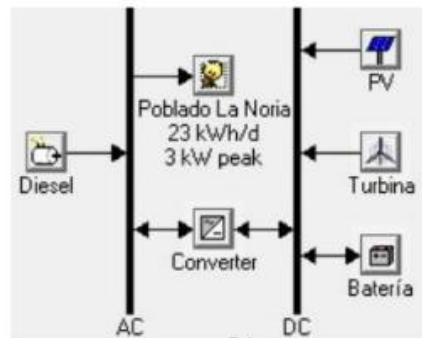


Figura 1.5- Tipo de conexión.
Fuente [6]

Tras una simulación del sistema obtenie que el precio de la enegia generada seria de 0,405 \$/KWh, cuatro veces más que en cualquier ciudad de México conectada a al red. Pero como no hay posibilidad de conexón a la red, se debe llevar a cabo el proyecto para poder suministrar energia electrica al poblado.

7. Design and experimental verification of a high efficiency small wind energy portable turbine (SWEPT).

Este artículo publicado en la revista científica llamada “*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*”, en su edición 18, el 14 de mayo de 2013. Elaborado por Ravi Anant Kishore y Shashank Priya en el *Center for Energy Harvesting Materials and Systems* (CEHMS), en Blacksburg (Virginia, EEUU). [21]

Este estudio prueba teórica y experimentalmente los resultados de un pequeño aerogenerador portátil, en inglés (SWEPT) *Small Wind Energy Portable Turbine*, de 40 cm de diámetro con vientos de una velocidad de 4 m/s. Los experimentos en el túnel de viento revelan que el SWEPT produce una potencia nominal a esa velocidad de 1 W y es capaz de producir hasta 2,2 W con velocidades de viento de 5,5 m/s.

8. Stand-alone operation of an alkaline water electrolyser fed by wind and photovoltaic systems

Artículo realizado en el departamento de ingeniería eléctrica y electrónica en la universidad de Navarra, por Alfredo Ursúa, Idoia San Martín, Ernesto L. Barriosy Pablo Sanchis. Publicado en la edición 38 de la revista científica *"International Journal of Hydrogen Energy"*. [22]

Este artículo informa sobre la representación experimental completa de una pila de hidrógeno de $1 \text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$. Específicamente, se realizó un estudio del rendimiento eléctrico, la tasa de producción de hidrógeno, la pureza de los gases generados y energía eficiencia. Para un rango operación de corrientes (40-120 A), de temperaturas (35-65 °C) y presiones de (5-25 bar). Además, se realizó un estudio experimental sobre la operación de la pila de hidrogeno en sistemas eólicos aislados y sistemas fotovoltaicos basados en energías renovables. Los resultados obtenidos de las simulaciones del sistema eólico y fotovoltaico demuestran que la pila funciona correctamente, con respecto al balance del sistema y a las principales características electroquímicas de esta.

2. Resumen

Este trabajo experimental está basado en la implementación y puesta a punto de un pequeño sistema de generación aislado, no está conectado a la red. El sistema obtiene la energía de dos fuentes renovables, la eólica y la solar. De un aerogenerador de 600 W y 12 V y dos placas fotovoltaicas de 100 W cada una que transfieren la energía eléctrica a un acumulador formado por seis baterías de 2 V cada una conectadas en serie. Para poder almacenar la energía que proviene del aerogenerador se usa un regulador eólico, que también hace la función de rectificador para transformar la C.A. en C.C. y así posibilitar su acumulación en las baterías. Además se encarga de controlar la carga en el acumulador, al igual que el regulador solar. El sistema no tiene como función la producción de energía si no que su finalidad es didáctica, la de aportar al alumnado conocimiento sobre este tipo de sistemas.

Abstract

This experimental project is based on the implementation of a small generator system that is isolated, it is not connected to a network. The system obtains energy from two renewable sources, wind and solar. From a wind generator of 600 W and 12 V and two photovoltaic plaques of 100 W each that transfers the electric energy to an accumulator that is comprised of six 2V batteries connected in series. In order to store the energy that comes from the wind generator an aero regulator is used, that also serves as a rectifier to transform A.C. into D.C. and in this way it is possible to accumulate in the batteries. It is also tasked with controlling the charge in the accumulator, just like the solar regulator. The purpose of the system is not the production of energy it is meant as a learning tool that is so that the students may learn about these systems.

3. Objetivos

El objetivo que se persigue al inicio de este proyecto no es la finalidad común que se persigue cuando se realiza una instalación para generación eléctrica renovable. La finalidad habitual es la máxima generación eléctrica posible al menor precio. El objetivo aquí es didáctico. Esta instalación no está situada en un lugar donde sea rentable económicamente para la producción eléctrica. De haber sido así, se hubiera elevado a más metros de altura donde el aire no interfiriera con ningún muro de ningún edificio; o directamente, se hubiera localizado en otro lugar donde se conociera un gran movimiento de aire durante la mayoría de días del año, como por ejemplo una zona costera. Linares no es un lugar en el que haya diariamente aire suficiente para que arranque un aerogenerador.

Con lo cual, repetimos que la finalidad es didáctica. Se persigue que en días con viento suficiente el alumnado de la EPSL pueda subir a la azotea a medir el viento y la tensión y corriente generada por éste. El alumnado también podría medir la potencia generada por las placas. De esta manera, además de coger destreza a la hora de realizar medidas eléctricas, se familiarizarán con diferentes instrumentos como la pinza amperimétrica, el polímetro... Igualmente, esta instalación puede ayudarles a entender diferentes conceptos de las energías renovables, porque pueden comprobar *in situ* cómo funcionan las mismas. Así que el objetivo perseguido es ambicioso ya que busca mejorar la formación de alumnos que estudian en la EPSL.

4. Materiales y métodos

1. Localización

La instalación está ubicada en la azotea del edificio de laboratorios de la EPLS en Linares (Jaén), Figura 4.1. Situado exactamente en 38,09° N y 3,65° W. Y a una altura de 620 m sobre el nivel del mar. En la parte de anexos se podrá observar el plano de la zona donde va ubicado el proyecto en la azotea. En el cuadro amarillo de la Figura 4.2, que es una foto tomada desde satélite, localizamos la ubicación del proyecto.



Figura 4.1- Localización. Fuente [11]



Figura 4.2- Localización. Fuente [11]

2. Materiales

A continuación se va a redactar un listado preciso de los materiales pertinentes del proyecto.

- Aerogenerador. Este tiene una potencia de 600 W y ha sido fabricado por la empresa española Bornay, figura 4.2. Es bipala con un diámetro de 2 m y está hecho de fibra de vidrio. Su giro es anti horario y de 1000 rpm. Su alternador es trifásico de imanes permanentes de ferrita y su voltaje son 12 V, figura 4.3. El aerogenerador cuenta con diferentes partes como palas, cono frontal, buje, cola, timón... que podemos observar en la figura 4.4 y 4.5. Tiene un peso de 38 kg. La velocidad de viento necesaria para su arranque es de 3 m/s, la de su potencia nominal es de 11 m/s y la de frenado automático es de 13 m/s. En el apartado de anexos se especifican todas sus dimensiones y su ficha técnica.



Figura 4.3- Aerogenerador 600 W. Fuente propia.



Figura 4.4- Pala aerogenerador. Fuente propia.



Figura 4.5-Partes desmontadas aerogenerador. Fuente propia.

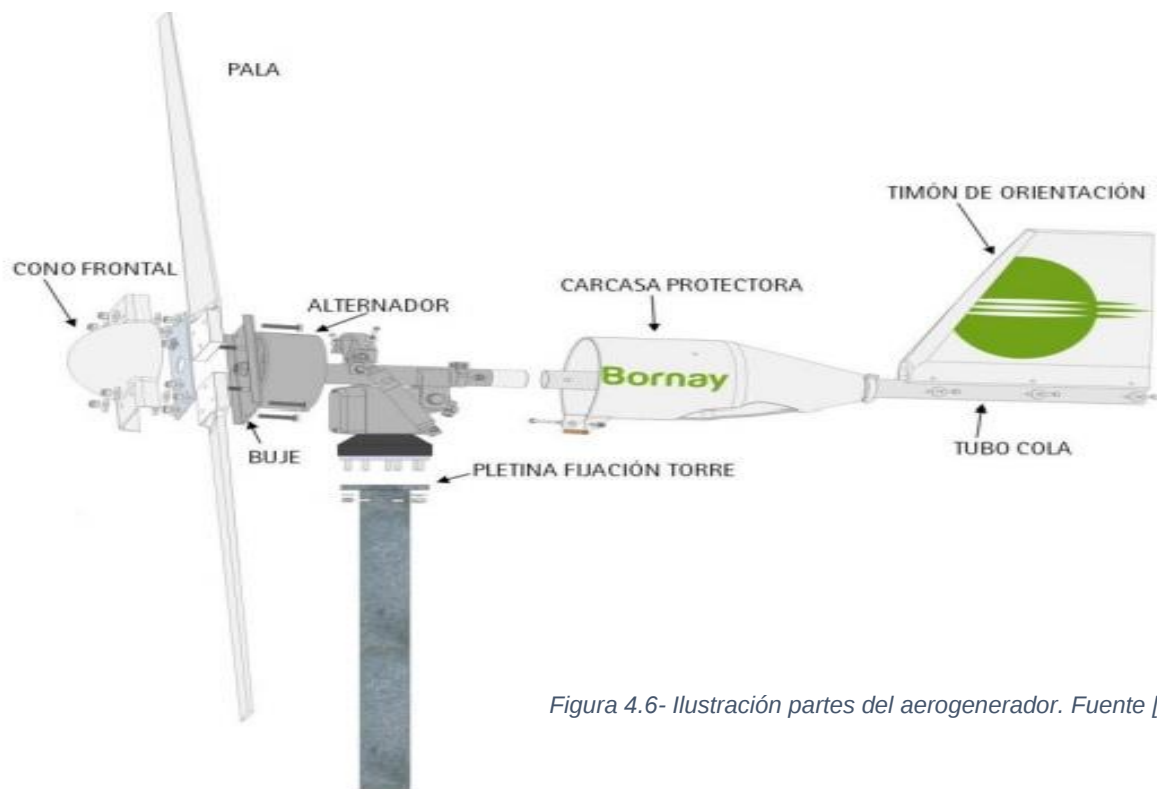


Figura 4.6- Ilustración partes del aerogenerador. Fuente [11]

- Módulos fotovoltaicos. Dos paneles fotovoltaicos de 100 W cada uno. Los paneles solares modelo “Me Solar MESM-100W” están fabricados con células monocristalinas de alta eficiencia para generar energía gratuita, cargando baterías a 12 V. Los paneles solares “Me Solar” utilizan células monocristalinas alemanas “SolarWorld”. Éstas tienen unas características y comportamiento excelentes, incluso en condiciones de baja radiación. El número total de células en cada módulo es 36 (4x9). Sus dimensiones son 945x670x30 en mm y un peso de 7 Kg. Los módulos solares se suministran con la caja de conexiones con diodos anti-retorno para prevenir corriente inversa desde la batería hacia el panel. Se suministran con 2 cables de 900 mm especialmente diseñados para aplicaciones solares, y conectores compatibles MC4. Utiliza cristal templado de 3,2 mm. Los datos eléctricos a destacar, además de la potencia pico mencionada de 100 W, es la tensión nominal (Vmpp) de 17,8 V y la corriente nominal de 5,62 A. Estos datos eléctricos dados son bajo condiciones de radiación 1000 W/m² y una temperatura de 25 °C. Todas las especificaciones están en la hoja de características adjunta en el apartado de anexos.
- Estructura para los módulos. Estructura de aluminio para situar los dos módulos fotovoltaicos, Figura 4.7. A ésta se le ha añadido contrapesos para su fijación.



Figura 4.7-Estructura con los dos módulos fotovoltaicos. Fuente propia.

- Estructura del aerogenerador. Torre P-750 Estructura de acero galvanizado en celosía de 3 m de altura soldada a una plancha de acero de 2 m². En el apartado de anexos encontraremos los planos de esta con sus medidas. Figura 4.8.



Figura 4.8-Aerogenerador fijado en su estructura. Fuente propia.

- Regulador de cargas del aerogenerador. El funcionamiento del regulador es, en primer, lugar transformar la energía del aerogenerador generada en alterna, en corriente continua apta para la carga de su banco de baterías. En segundo lugar, el regulador controlará el estado de la batería evitando sobrecargas de la misma y controlando el funcionamiento del aerogenerador. Cuadro de control o regulador digital de 12 V y 60 A de la marca Bornay. El regulador ha sido especialmente diseñado para funcionar con el aerogenerador. Para ello el regulador está provisto de una entrada de trifásica que baja del aerogenerador y una salida +/- que va al acumulador.

El regulador emplea la energía que obtiene del aerogenerador para cargar baterías y emplear esa energía en el consumo eléctrico del usuario. Mientras las baterías estén descargadas y las condiciones climatológicas lo permitan, el regulador estará aportando energía a los acumuladores. En el momento en el que

las baterías estén cargadas al valor pre programado, el regulador hará que el aerogenerador se frene, evitando sobrecargas de las baterías. La forma de realizar ese frenado es mediante impulsos eléctricos, es decir, introduciendo cargas controladas al aerogenerador.

El consumo del regulador/inversor es despreciable. Dispone de freno manual. El regulador posee unas resistencias internas de disipación, y la parte superior del regulador puede calentarse en día de viento, una vez las baterías están cargadas. Figura 4.9.



Figura 4.9- Regulador/inversor fijado en pared. Fuente propia.

- Regulador solar. Es un regulador de “Victron Energy modelo Bluesolar PWM-light” de 12V y 10 A. Es un controlador PWM (modulación por ancho de pulso), no es tan eficiente como uno de tipo MPPT (seguidor de máximo punto de potencia) pero son bastante más baratos. Carga las baterías en las tres etapas (inicial, absorción y flotación). El regulador solar dispone de protección contra sobretensión, sobrecarga y conexión inversa paneles y/o acumulador. Su consumo es despreciable (< 10 mA). En el apartado de anexos podremos encontrar su hoja de características. Figura 4.10.



Figura 4.10-Regulador solar. Fuente [13]

- Acumulador. Formado por una banco de 6 baterías plomo-ácido conectadas en serie. Cada uno de estos vasos o baterías es de 2 V modelo “Bae Secura PSV Solar”. Son baterías estacionarias con una capacidad de C100 y 431 Ah. Otras características a destacar son: Separador micro poroso; electrolito de ácido sulfúrico con una densidad de 1.24 kg/l a 20 °C; contenedor transparente y de alta resistencia a los impactos; bornes protegidos al 100 % contra el gas y electrolito, revestimiento plástico. · Protección - IP 25 conforme a la norma EN 60529, protección contra contactos conforme a la norma VBG 4. Hoja de características o “data sheet” en el anexo. Figura 4.11.



Figura 4.11-Tipo de batería utilizada en el banco de baterías. Fuente [12]

- Anemómetro Vaavud. Es un anemómetro portátil, para el móvil. Modelo llamado “Vaavud Wind Meter”, un gadget que nació por una iniciativa de *kickstarter* que se acopla a *smartphones* iOS o Android y nos permite conocer la velocidad del viento. Figura 4.12



Figura 4.12- Anemómetro móvil. Fuente [14].

- Analizador de redes. Es un instrumento capaz de analizar las propiedades de las redes eléctricas, especialmente aquellas propiedades asociadas con la reflexión y la transmisión de señales eléctricas, conocidas como parámetros de dispersión. Analizador de redes de la marca francesa “Chauvin Arnoux” modelo “C.A. 334B”.Figura 4.13.



Figura 4.13- Analizador de redes. Fuente propia.

- Instalación eléctrica:

Para el aerogenerador se ha utilizado conductores 3x16 mm² en una manguera libre de alógenos RZ1-K(AS) de 20 mm de diámetro. Bajo tubo corrugado reforzado de 32 mm de diámetro. Hay que subrayar que no se han realizado ningún tipo de cálculos eléctricos para determinar la sección de los conductores, ya que el fabricante nos facilita esto.

Las recomendaciones mínimas de la instalación así como el cableado entre batería y el regulador se especifica en la Tabla 4.1.

Modelo	Cable Batería	Batería Mínima
Bornay 600/12 V	16 mm ²	550 Ah C ₁₀₀

Tabla 4.1. Secciones conductores entre batería y regulador. Fuente [12]

Para determinar la sección del cable de bajada que se debe utilizar, en función de las características del aerogenerador y la distancia que le separa de su cuadro de control, véase la Tabla 4.2 para cable conductor de cobre.

Modelo	Iac x fase (A)	0-20 m	20- 40	40-60 m	60-80 m	80-100 m
Bornay 600/12V	17	10 mm ²	16 mm ²	25 mm ²	35 mm ²	50 mm ²

Tabla 4.2. Secciones de bajada en función de la longitud Fuente [12]

Para el sistema fotovoltaico se han utilizado conductores 2x6 mm² en una manguera libre de alógenos Rz1-K(AS) de 12 mm de diámetro. Bajo tubo corrugado reforzado de 32 mm de diámetro. Figura 4.14.



Figura 4.14- Sección manguera alógena. Fuente propia.

- Herramientas utilizadas. Principalmente son las siguientes: pinza punta, pinza boca redonda, alicate pelacables, alicate de corte frontal, alicate cortacable, pinza universal, cuchilla pelacables, destornillador cruz o estrella, destornillador allen o hexagonal, destornillador polizidriv, destornillador plano, busca polos, pinza amperimétrica, Figura 4.15, y polímetro, Figura 4.16.



Figura 4.15- Pinza amperimétrica.
Fuente propia.



Figura 4.16- Polímetro. Fuente propia.

3. Trabajo técnico

En este apartado, trabajo técnico, se explicará el trabajo realizado durante varios meses de manera breve. El cual está basado en la instalación, puesta a punto y documentación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico, capaz de llegar a generar 800W, de los cuales 200 W se obtendrían de la energía solar y 600 W de eólica. Durante diferentes meses se ha estado trabajando en los diferentes laboratorios del departamento de ingeniería eléctrica. Durante este periodo de tiempo he estado en contacto y trabajando para la realización del proyecto con las siguientes personas de la universidad: Ernesto Arjonilla Guerrero, técnico de laboratorio en Linares; David Vera Candeas, profesor de la Universidad de Jaén. Y Francisco Jurado Melguizo, catedrático de la Universidad de Jaén y director sección departamental de Linares. Cabe destacar que sin ellos este proyecto no se habría realizado.

La instalación se ha realizado en la azotea del edificio de laboratorios de la EPSL. Allí se han instalado dos módulos fotovoltaicos y el aerogenerador. Aunque no sea parte de este estudio también se ha instalado otro aerogenerador que estaba en la antigua

escuela. Este antiguo aerogenerador de 250 W de la empresa Bornay se ha restaurado. Figura 4.17.

Una vez recibido todo el material, el primer paso fue el ensamblaje en el laboratorio del nuevo aerogenerador de Bornay de 600 W y 12 V para comprobar su correcto funcionamiento. También se preparó el acumulador del sistema, Figura 4.18. Este consta de 6 baterías plomo-ácido conectadas en serie, cada una de ellas de 2 V. Con esta conexión en serie obtenemos los 12 V que requiere el aerogenerador. También se instaló en pared de manera vertical los dos reguladores eólicos y el regulador de carga solar. El regulador eólico que aparte de controlar las cargas de las baterías también tiene la función de un convertidor, es un rectificador que transforma la corriente alterna trifásica que produce el aerogenerador a una corriente continua apta para el acumulador. El 19 de septiembre se realizó la inspección técnica del arquitecto de la UJA para la aprobación del proyecto. Más tarde se realizó la instalación eléctrica de los diferentes conductores, que se especifican en el apartado de materiales y métodos, la cual va desde la azotea por los falsos techos de los laboratorios hasta el laboratorio L-152. En el cual están la bancada de baterías y los reguladores.



Figura 4.17-Restauración antiguo aerogenerador. Fuente propia.



Figura 4.18- Conexión baterías. Fuente propia.

Una vez instalado y preparado tanto el cableado como los reguladores y el banco de baterías, se procedió a la instalación de la torreta, para elevar el aerogenerador. Esta es una estructura en celosía de acero galvanizado de 3 m de altura soldada a una plancha de acero, que soldó y fijó una empresa privada, ya que se requería de grúa y de personal cualificado en soldadura por arco eléctrico. Antes de fijar el aerogenerador a la estructura lo montamos *in situ* en la azotea. Una vez fijado a la estructura con ayuda de la grúa se colocó en la posición indicada y se soldó a la plancha. Figura 4.19. Además añadimos unos contrapesos, 8 bloques de unos 30 Kg cada uno. La misma empresa delimitó la zona colocando una valla la zona donde están situados los aerogeneradores y los paneles por seguridad.

Cabe destacar que, como aconseja el fabricante, se planificó la instalación en un día con poco viento. Ya fijado y colocado el aerogenerador y su estructura, se cortocircuitaron sus fases con un interruptor manual colocado en el armario de conexión. Esto se hace para la protección del bobinado interno, para que no gire sin carga si comienza a soplar viento. Además, nos servirá como freno de emergencia e interruptor para mantenimiento.

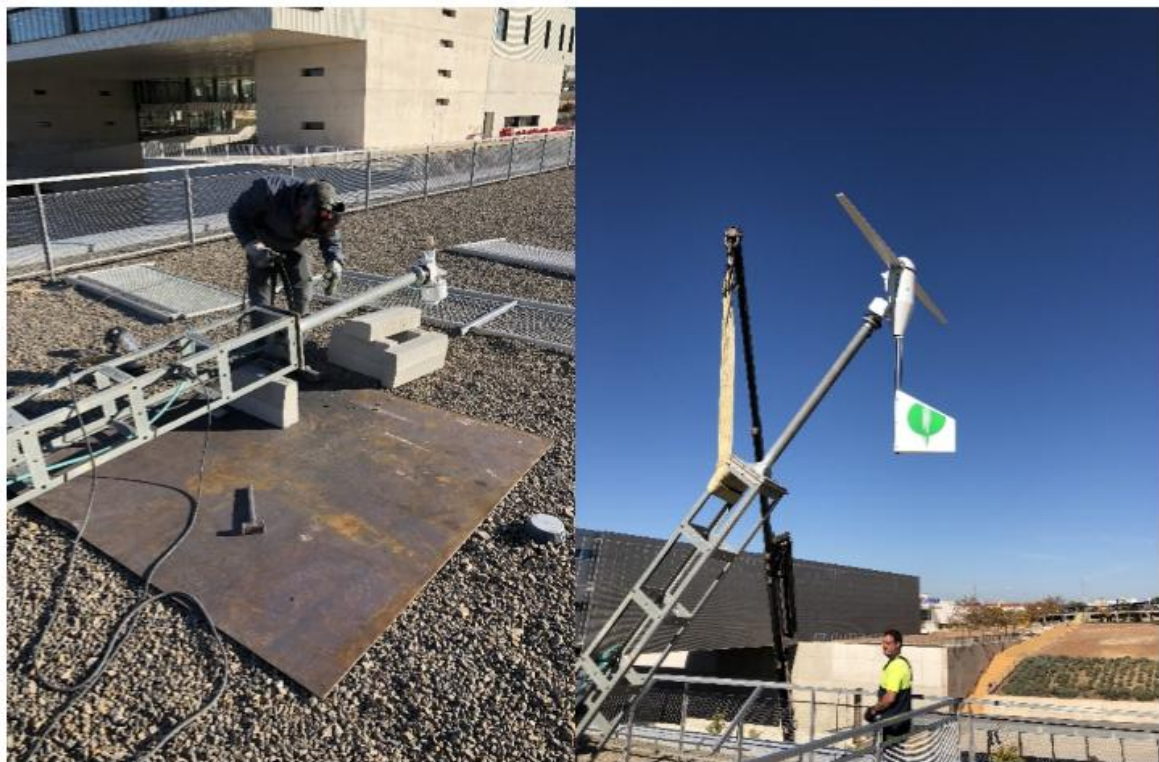


Figura 4.19 –Instalación aerogenerador. Fuente propia.

Para los módulos fotovoltaicos se diseñó y compró una estructura metálica donde están colocados a medida. Esta estructura se lastró con varios contrapesos como en el aerogenerador.

Por último se realizó la interconexión de los sistemas de generación con los acumuladores, ésta se hizo en armarios de intemperie de IP66. Esta IP es el grado de protección, que en este caso, quiere decir que tiene una fuerte protección contra el polvo y el agua. Hay varios armarios, uno para la conexión del aerogenerador con su regulador y otro para los paneles con su regulador. Figura 4.20.

Una vez todo instalado se comprobó el correcto funcionamiento de cada parte del sistema. Para esto se esperó que hubiera un día con el suficiente viento, ya que Linares no suele tener a diario días con una velocidad de aire suficiente para que arranque el aerogenerador. La velocidad de arranque es de 3,5 m/s. En la Figura 4.21 se muestra la instalación en la azotea.



Figura 4.20- Armario de conexión. Fuente propia.



Figura 4.21- Instalación. Fuente propia.

4. Contexto teórico

El marco o contexto teórico en el cual se sustenta este trabajo experimental es el potencial eólico aprovechable. Aunque el potencial eólico que puede aprovechar una turbina es un estudio extenso y complejo, yo solo he requerido las partes básicas de éste.

Una masa de aire a una velocidad tiene una energía cinética, ecuación 4.1 [18], donde como ya sabemos m es la masa del aire y v la velocidad a la que se mueve.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.1)$$

Para saber la energía cinética por unidad de volumen, ecuación 4.2 [18], solo habrá que tener en cuenta que ρ , densidad del aire, a efectos prácticos puede considerarse constante.

$$e = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (4.2)$$

Conociendo el Teorema de Gauss, el flujo de aire a través de una superficie es la ecuación 4.32 [18]. Donde Φ es el flujo de aire, A es la superficie que atraviesa este flujo de aire y v es la velocidad a la que se mueve este.

$$\Phi = vA \quad (4.3)$$

Con todo esto podemos deducir que la energía que fluye por unidad de tiempo o potencia eólica disponible P_d en un área A perpendicular al flujo de aire es la ecuación 4.42 [18]. Donde consideramos la densidad del aire ρ constante e igual a 1,225 Kg/m³. La unidad de potencia eólica disponible en el S.I. es el watio W.

$$P_d = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.4)$$

Por tanto, la potencia disponible en las masas de aire en movimiento es directamente proporcional a la densidad, al área perpendicular enfrentada al rotor y al cubo de la velocidad.

Ahora bien, el cumplimiento de las leyes de conservación de la masa hace que no toda esa potencia disponible en el aire pueda aprovecharse. Además de las características del viento, la potencia aprovechable depende también de las características de

funcionamiento de la máquina. Habrá que considerar, además, las pérdidas mecánicas en la transmisión y la eficiencia eléctrica del generador. Estos factores se tendrán en cuenta a parte.

Gracias a Betz, ingeniero experto en el campo de la mecánica de fluidos, sabemos que no todo el potencial eólico del aire se puede aprovechar en energía, como ya demostró en 1927. Este alemán demostró científicamente que cualquier turbina eólica, sin importar el diseño, no puede superar un rendimiento del 59,25% ($16/27$) en la transformación de energía eólica en mecánica. Este parámetro es conocido como el Límite de Betz.

5. Resultados y discusiones

Ya puesta a punto toda la instalación y después de comprobar su correcto funcionamiento, se procedió a unas mediciones iniciales. Para estas mediciones se utilizó un anemómetro de móvil Vaavud VAV-1R Thor, Figura 5.1. Ésta no es la mejor manera para tener unas mediciones constantes y precisas de la velocidad y dirección del viento en el aerogenerador pero de momento es el único sistema para tomar medidas eólicas del que dispone la escuela. En un futuro se debería instalar un anemómetro fijo al aerogenerador conectado a un sistema SCADA para tener constantemente monitorizada la información del viento.



*Figura 5.1- Anemómetro Vaavud
Fuente [14]*

La forma de tomar las medidas con el anemómetro de móvil Vaavud es bastante sencilla, solo hay que conectar el anemómetro en el orificio Jack de 3,5 mm de nuestro móvil. Descargar la aplicación e iniciar la medición. Este toma medidas durante 30 s y después muestra por pantalla la velocidad media del aire y la máxima durante este periodo.

Para saber la generación eléctrica según la velocidad del aire hay que medir tensión e intensidad con la ayuda de la pinza amperimétrica y el polímetro en los armarios de conexión a la vez que realizamos la medición eólica. En una primera medida, un día con un potencial eólico suficiente, se obtuvo una velocidad media de 5m/s, Figura 5.2.



Figura 5.2- Mediciones. A) Velocidad del aire, arriba. B) Intensidad por una fase, a la izquierda. C) Tensión entre fases, a la derecha. Fuente propia.

Con una corriente de línea de línea de 3,9 A y una tensión de línea de 12,213 V obtenemos una potencia eléctrica de 70,12 W, considerando el coseno de φ igual a 0,85. Ecuación 5.1.

$$P_{elect} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 12,213 \cdot 3,9 \cdot 0,85 = 70,12W \quad (5.1)$$

Según lo visto en el apartado de materiales y métodos con la ecuación 4.4 y recordando que tomamos la densidad del aire constante como $1,225 \text{ Kg/m}^3$ y el dinámetro de palas del aerogenerador es de 2 m. El potencial eólico será el siguiente.

$$A = \pi r^2 = \pi \quad (5.2)$$

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A v^3 = 0,5 \cdot 1,225 \cdot \pi \cdot 5^3 = 240,53 \text{ W} \quad (5.3)$$

Conocidas la potencia eléctrica (5.1) y la potencia eólica (5.3) podemos obtener el rendimiento del aerogenerador funcionando con la velocidad de aire medida.

$$\eta = \frac{P_{elect}}{P_d} \cdot 100 = 29,15 \% \quad (5.4)$$

Este bajo rendimiento al igual que la baja generación eléctrica se debe a la velocidad del aire. La velocidad necesaria de arranque del aerogenerador es 3,5 m/s, la de la potencia nominal es de 11 m/s y la de frenado es de 13 m/s. Con esto y con la ilustración de la Figura 5.3 se entiende que a bajas velocidades haya una pobre generación y un reducido rendimiento.

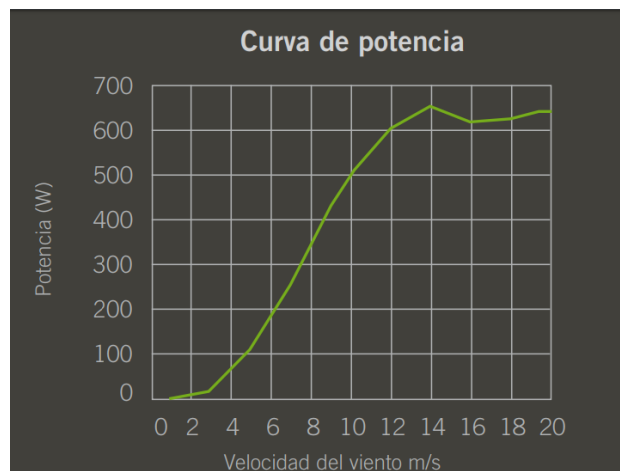
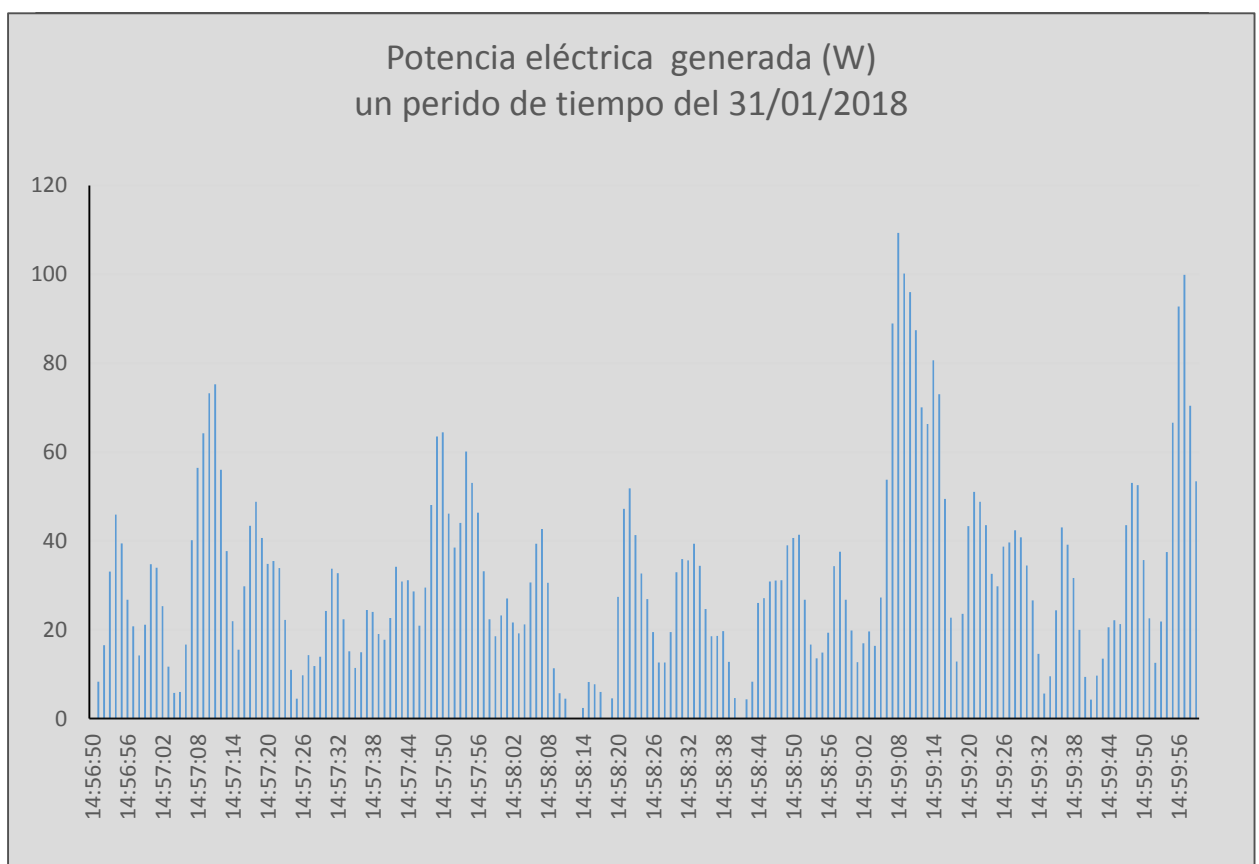


Figura 5.3- Curva de potencia del aerogenerador.
Fuente [12]

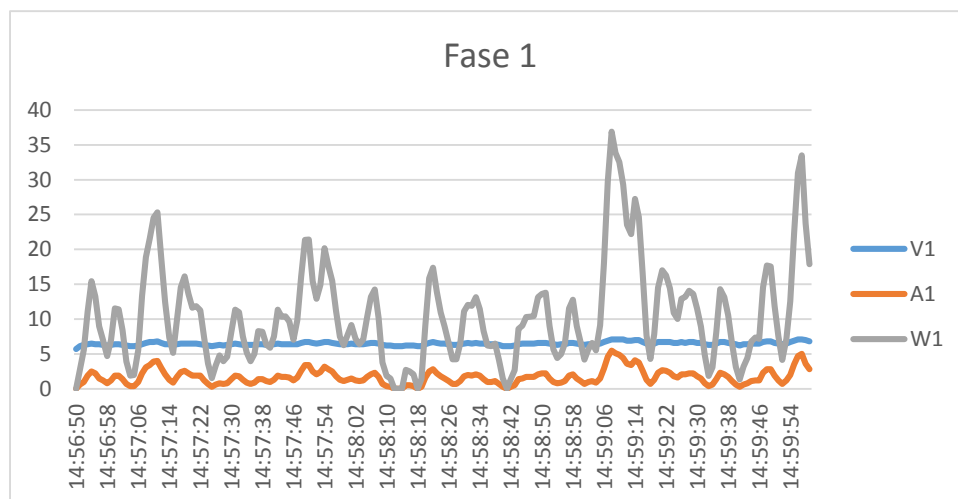
También como resultado se va a mostrar los siguientes gráficos, que muestran las medidas eléctricas obtenidas del aerogenerador en un corto periodo de tiempo un día cualquiera. Estas medidas se tomaron con el analizador de redes. Se realizaron el 31/01/2018 en un periodo de tiempo de unos seis minutos comprendidos entre las 14:56 y 14:59. Estas medidas se tomaron un día aleatorio para comprobar la compensación entre fases y su producción eléctrica.

En la Gráfica 5.1 se observa la potencia total del aerogenerador en ese periodo de tiempo.

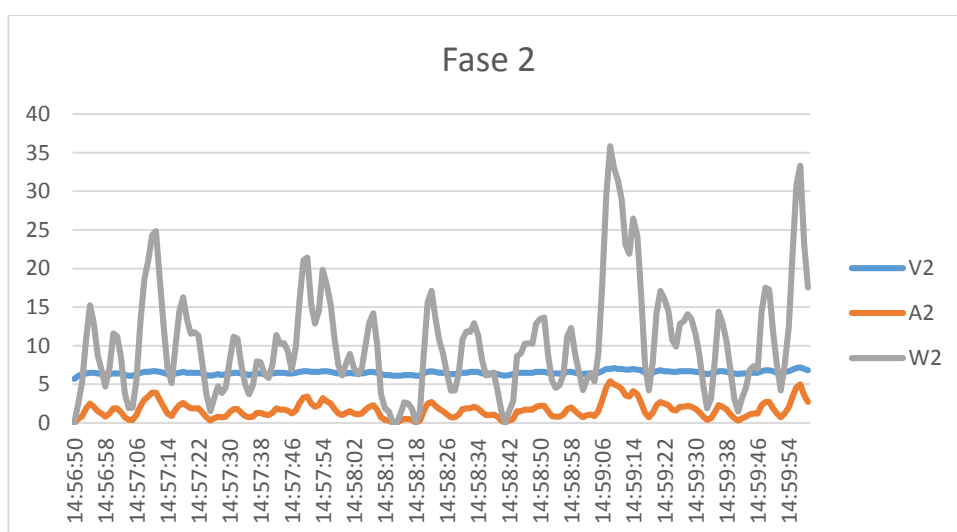


Gráfica 5.1- Potencia total generada. Fuente propia.

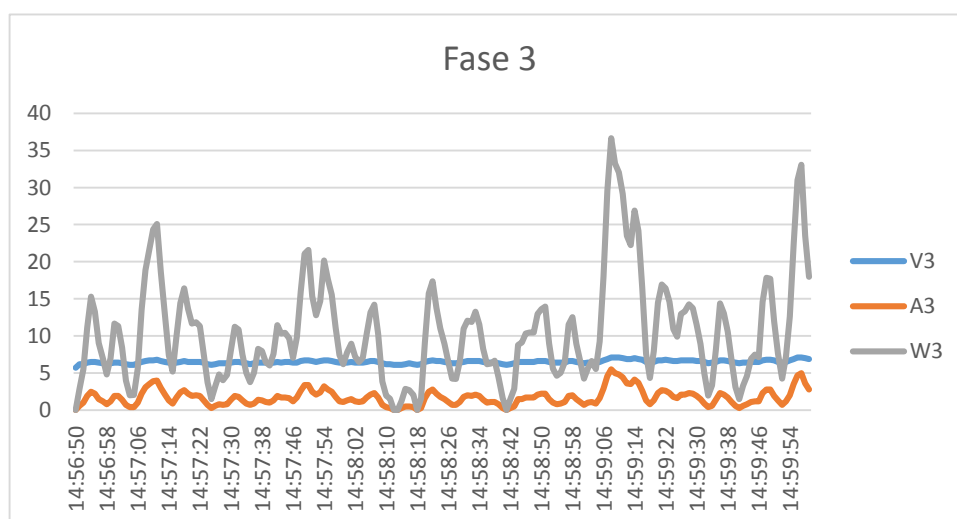
En las Gráficas 5.2, 5.3 y 5.4 veremos la corriente, tensión y potencia en cada una de las fases. De esta manera verificaremos una correcta compensación de ellas, que no haya valores muy dispares entre ellas.



Gráfica 5.2- Fase 1. Fuente propia

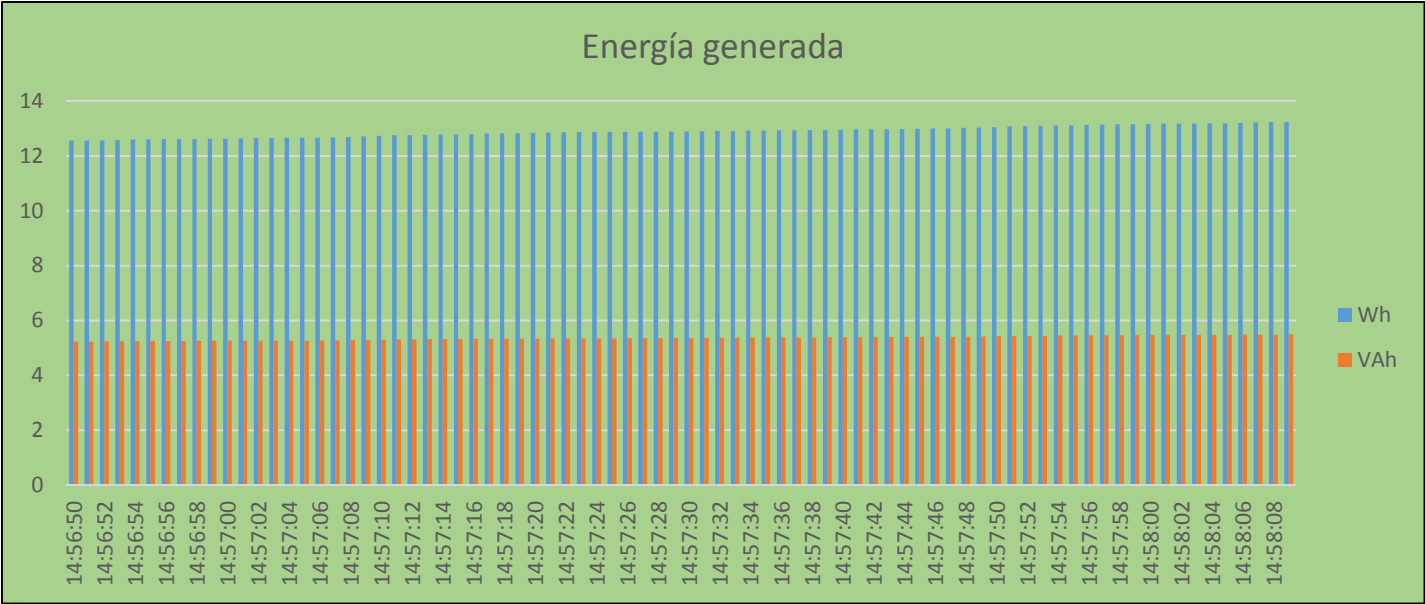


Gráfica 5.3- Fase 2. Fuente propia



Gráfica 5.3- Fase 3. Fuente propia

Por último acabaremos el apartado de discusión y resultados con una comparativa de la energía, de la energía aparente (VAh) y la energía activa (Wh), Grafica 5.4.



Gráfica 5.5- Energía generada. Fuente propia

6. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo experimental son claras. Se verifica que esta instalación no tiene una gran eficiencia. Esto se ha expuesto en la discusión, ya que en las primeras mediciones se observa el bajo rendimiento del aerogenerador. Además se tuvo que esperar varias semanas para encontrarme un día con aire suficiente que moviera las palas de nuestro aerogenerador y que produjeran energía limpia. Con lo cual, la conclusión es que este sistema no tiene un gran rendimiento lo que conlleva a que no tiene un gran potencial de generación. Sin embargo tiene un gran potencial didáctico para la escuela. De este sistema de generación de energía limpia se pondrán desarrollar diferentes prácticas para el alumnado, mejorando así su formación académica. Los alumnos podrán conocer más en profundidad como generar energía a partir del sol y el aire, ya que podrán observar y palpar e incluso se podrían desarrollar diferentes investigaciones con ayuda del sistema.

Otra parte que ha destacar es la futura mejora de la zona. Se podrían hacer futuras adquisiciones y futuros trabajos para seguir aumentando el sistema mixto de generación de energía. Se debería comprar un anemómetro e instalar en el aerogenerador de Bornay para así tener una información precisa del movimiento de masas de aire, incluso se podría monitorizar para saberlo a tiempo real. También se podría aumentar los módulos fotovoltaicos con diferentes tipos de placas. Las que están instaladas ahora son monocristalinas, las más eficientes. Se podrían comprar unas placas fotovoltaicas policristalinas y así comprobar la diferencia de eficiencia entre ambos tipos. Otra adquisición muy beneficiosa sería la de un ventilador de exterior. Con este no se dependería de los días ventosos para realizar prácticas con el aerogenerador si no que el día que se planificara se podrían realizar, independientemente de la meteorología. Otra idea sería, la instalación de manera fija en la azotea la caldera de biomasa, de la que dispone el departamento de ingeniería eléctrica de Linares. De esta, manera en una misma zona, se podrían ver tres tipos diferentes de generación eléctrica con energías renovables. Sería algo impresionante a nivel académico y algo que no se puede ver en muchas universidades.

A nivel personal, tengo que exponer que el desarrollo de este trabajo me ha servido para completar de una manera más práctica mis conocimientos adquiridos durante estos años en la carrera, ya que repito, se estudia todo desde un marco mucho más teórico.

7. Anexos

En anexos se mostrarán diferentes planos y hojas de características o *data sheet*.

- Hojas de características:
 1. Especificaciones técnicas y medidas del aerogenerador Bornay 600 W/ 12 V en la página 48 y 49.
 2. Hoja de características de “*Victron Energy modelo Bluesolar PWM-light*” en la página número 50.
 3. Características baterías modelo “*Bae Secura PSV Solar*” de 2 V en la página número 51.

- Planos:
 1. Esquema eléctrico de la instalación en la página 52.
 2. Plano de la zona exacta de ocupación del proyecto en la azotea del edificio de laboratorios en la página 53.
 3. Plano de la torre P-750 donde está colocado el aerogenerador en la página 54.
 4. Plano del acople a la torre en la página 55.
 5. Plano de la pletina de fijación de la torre en la página 56.

Especificaciones técnicas

Número de hélices	2
Diámetro	2 mts.
Material	Fibra de vidrio / carbono
Dirección de rotación	Anti-horaria

Especificaciones eléctricas

Alternador	Trifásico de imanes permanentes
Imanes	Ferrita
Potencia nominal	600 W
Voltaje	12, 24, 48 v.
RPM	@ 1000
Regulador	12v 60 Amp 24v 30 Amp 48v 15 Amp

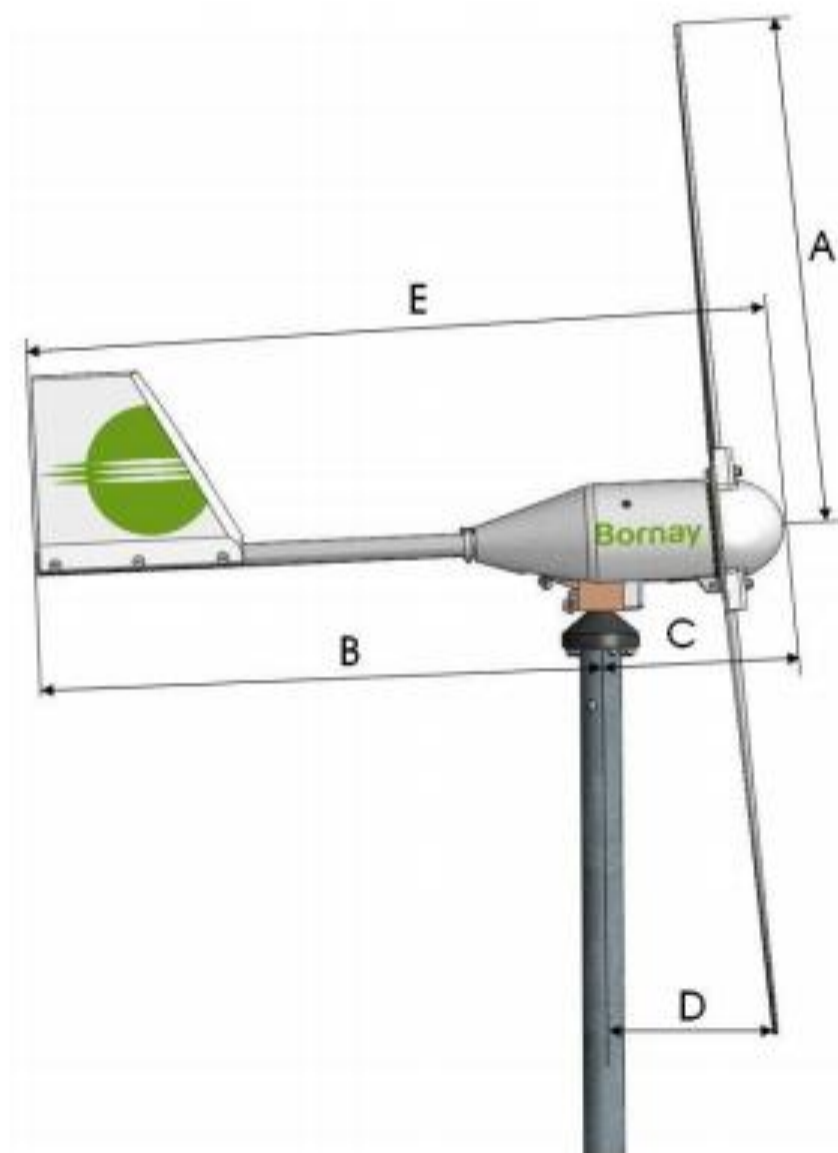
Velocidad de viento

Para arranque	3,5 m/s
Para potencia nominal	11 m/s
Para frenado automático	13 m/s
Máxima	60 m/s

Especificaciones físicas

Peso aerogenerador	38 Kg
Peso regulador	7 Kgr
Embalaje	500 x 770 x 570 mm. – 55 Kg
Dimensiones – peso	1040 x 270 x 70 mm – 4,7 Kg
Total	0,22 m3 – 59,7 Kgr.
Garantía	3 años

Modelo	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)
Bornay 600	1000	1120	350	360	1470
Bornay 1500	1430	1670	370	470	2040
Bornay 3000	2000	2140	470	645	2610
Bornay 6000	2000	2640	495	645	3135



Blue Solar PWM-Light	12/24-5	12/24-10	12/24-20	12/24-30
Tensión de la batería	12/24 V con detección automática de la tensión de entrada			
Corriente de carga nominal	5 A	10 A	20 A	30 A
Desconexión automática de la carga	Sí			
Tensión solar máxima	28 V / 55 V (1)			
Autoconsumo	< 10 mA			
Salida de carga	Control manual + desconexión por baja tensión			
Protección	Inversión de la polaridad de la batería (fusible)	Cortocircuito de salida	Sobret temperatura	
Protección contra sobrecarga	Desconexión tras 60 s en caso de alcanzar el 130% de carga			
	Desconexión tras 5 s en caso de alcanzar el 160% de carga			
	Desconexión inmediata en caso de cortocircuito			
Puesta a tierra	Positivo común			
Rango de temp. de trabajo	-20 a +50°C (carga completa)			
Humedad (sin condensación)	Máx. 95 %			
BATERÍA				
Tensión de carga de "absorción"	14,2 V/28,4 V			
Tensión de carga de "flotación"	13,8 V/27,6 V			
Desconexión de carga por baja tensión	11,2 V/22,4 V			
Reconexión de carga por baja tensión	12,6 V / 25,2 V (manual)			
	13,1 V / 26,2 V (automática)			
CARCASA				
Clase de protección	IP20			
Tamaño de los terminales	5 mm² / AWG10			
Peso	0,15 kg		0,2 kg	
Dimensiones (al x an x p)	70 x 133 x 33,5 mm (2.8 x 5.3 x 1.3 pulgadas)			
ESTÁNDARES				
Seguridad	IEC 62109-1			
EMC	EN 61000-6-1, EN 61000-6-3, ISO 7637-2			
1) Usar paneles solares de 36 celdas para 12V Usar paneles solares de 72 celdas para 24 V o 2 de 36 celdas en conectados en serie		2) El controlador conmuta al nivel de tensión de flotación 2 horas después de alcanzada la tensión de absorción Siempre que la tensión de la batería cae por debajo de 13 V, se inicia un nuevo ciclo de carga.		

BATERÍAS / ESTACIONARIAS / BAE SECURA PVS SOLAR

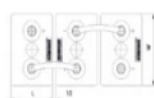
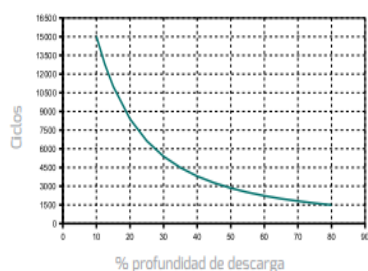


Las baterías estacionarias BAE SECURA PVS con un bajo mantenimiento son usadas para almacenar energía en instalaciones de energías renovables de tamaño medio y grande.

Debido al robusto diseño de las placas, estas baterías son una excelente elección para altos requerimientos de ciclaje y una larga vida útil.

DISEÑO

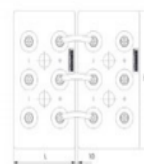
- Placa positiva - Placa tubular protegida con una funda sólida de rejilla de polyester y bajo contenido en antimonio, la dotan de una sólida resistencia a la corrosión.
- Placa negativa - Placa tipo rejilla con una aleación con bajo contenido en antimonio con un material expandible de larga duración.
- Separación - Separador micro poroso
- Electrolito - Acido sulfúrico con una densidad de 1.24 kg/l a 20 °C
- Contenedor - Transparente, y de alta Resistencia a los impactos.
- Tapones - Tapones con laberinto para recuperar el gas, opcionalmente se pueden suministrar tapones cerámicos.
- Bornes - Protegidos al 100 % contra el gas y electrolito, revestimiento plástico.
- Protección - IP 25 conforme a la norma EN 60529, protección contra contactos conforme a la norma VBG 4



2 PVS 140 a 6 PVS 900



8 PVS 1200 a 12 PVS 2280



13 PVS 3470 a 16 PVS 3040



17 PVS 3230 a 26 PVS 4940

INSTALACIÓN

Las baterías BAE SECURA PVS solar están diseñadas para instalaciones interiores. Para instalaciones exteriores, puede contactar con nuestros comerciales.

MANTENIMIENTO

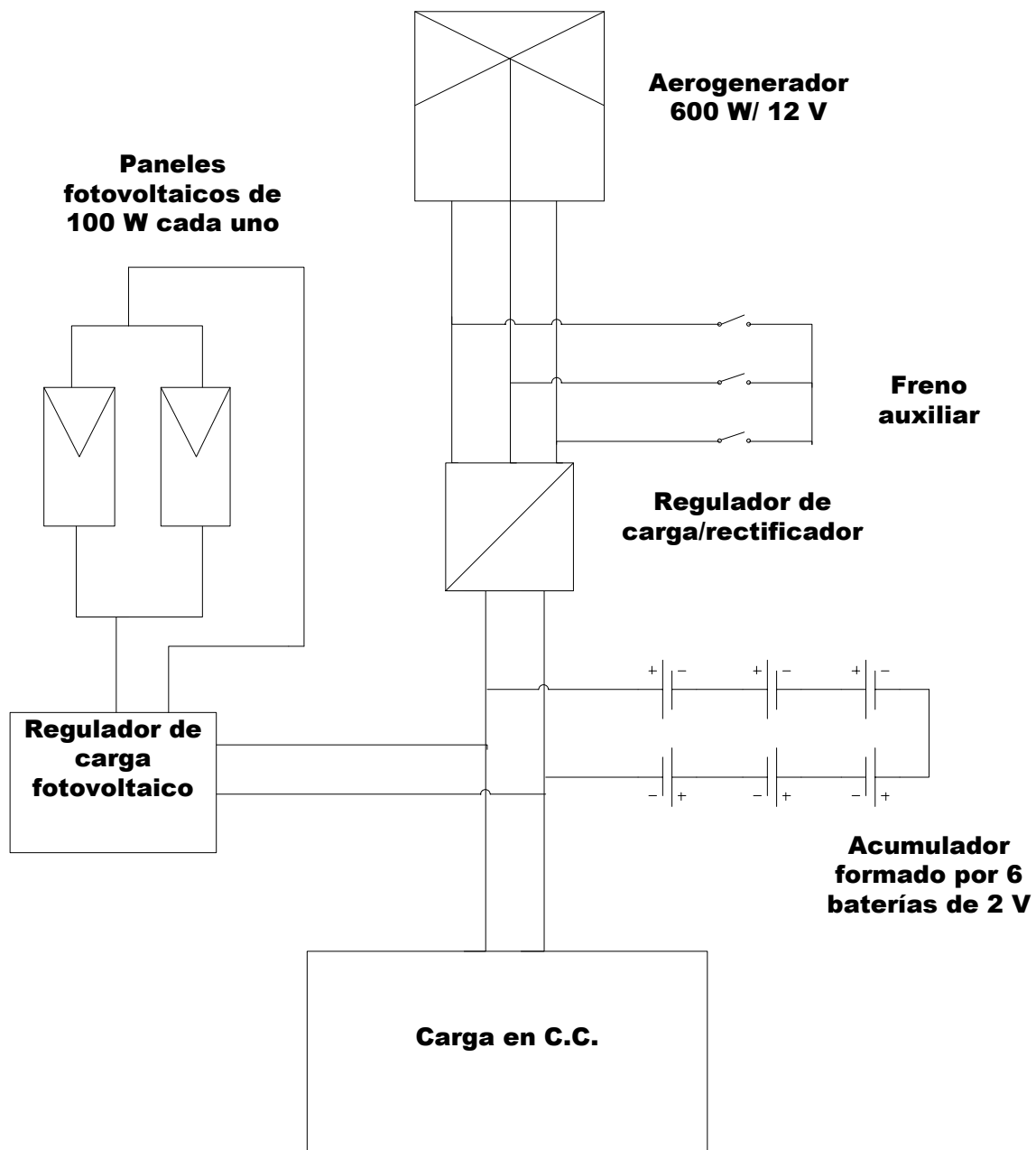
- Cada 6 meses comprobar el voltaje de los elementos así como la temperatura.
- Cada 12 meses comprobar las conexiones, comprobar el voltaje de los elementos así como la temperatura.
- Cada 3 años, rellenar el electrolito (Variará en función de la utilización y la temperatura)

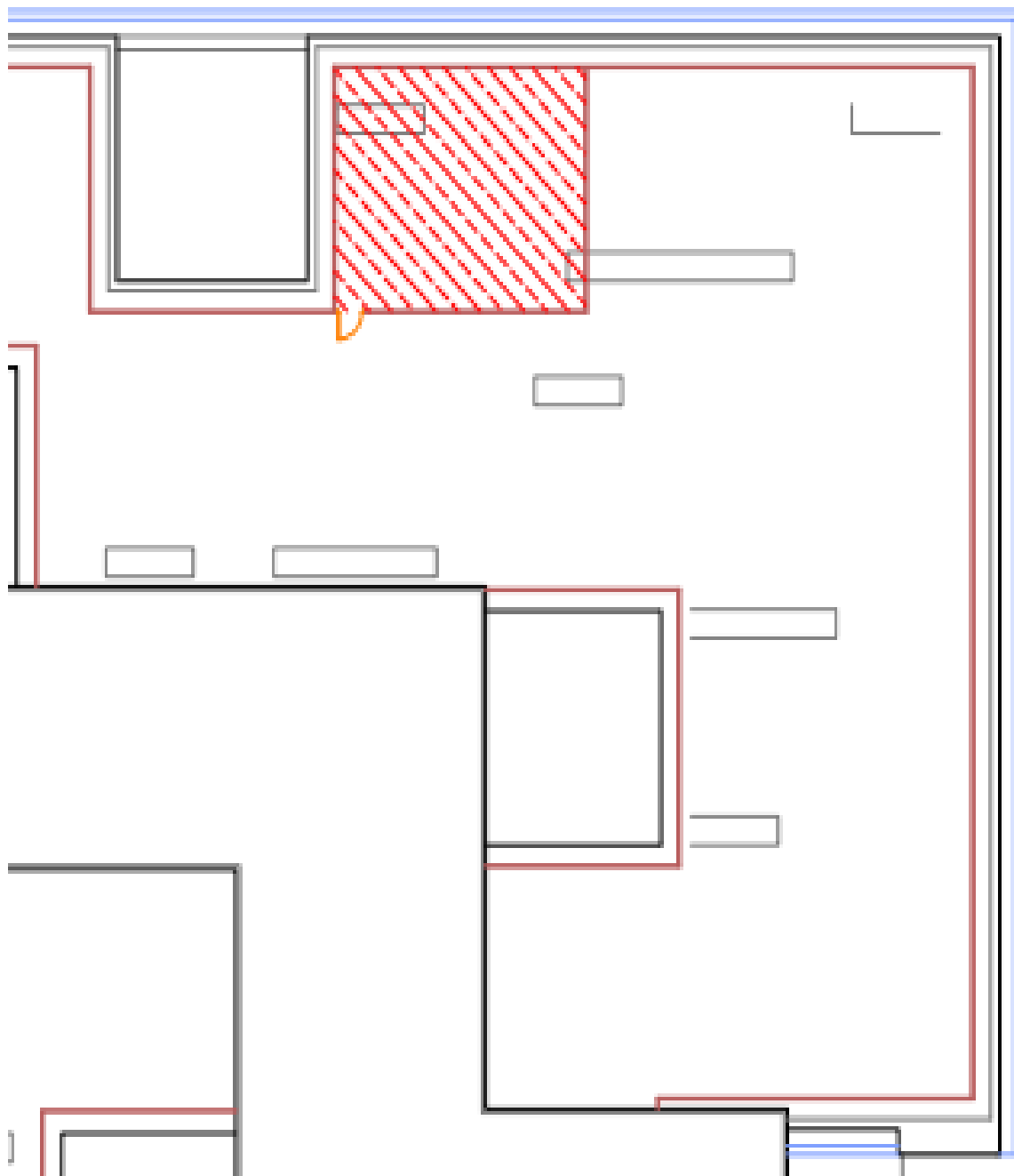
DATOS OPERATIVOS

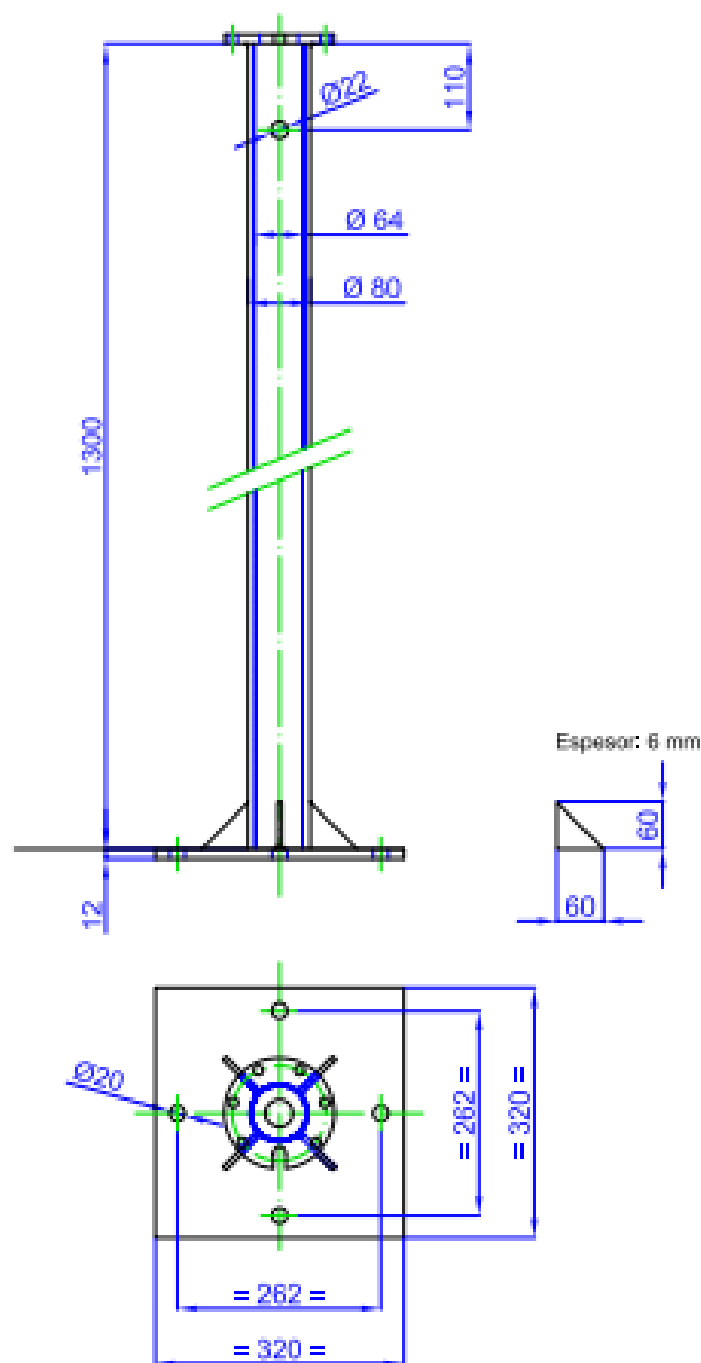
- Profundidad de descarga - Max. 80 % ($U_e = 1.91 \text{ V/elto}$ para periodos de descarga >10 h; 1.80 V/elto para 1 h)
- Descargas profundas de más del 80 % deben evitarse.
- Corriente de carga - Limitada, la mínima corriente de carga debe de ser 5A/100 Ah C_{10} .
- Voltaje de carga en operación cíclica - Restringido entre 2.30 V a 2.40 V por elemento, revisar las Instrucciones de operación.
- Voltaje de flotación - 2.23 V/elemento.
- Ciclos - 2700 conforme a IEC 61427.
- Temperatura - -20 °C a 55 °C, rango de temperatura recomendado entre 10 °C y 30 °C.
- Autodescarga - Aprox. 3 % por mes a 20 °C.

NORMATIVA

- Norma de test - IEC 60896-11, IEC 61427
- Norma de seguridad - EN 50272-2







Bornay

ACOPLE TORRE

Bornay Aerogeneradores S.L.U.
Polígono Industrial Río
Canino del Río, s/n
03420 Castalla (Alicante)
www.bornay.com

9/09/2009

Dibujado por: Rafael Juan Claverías

10/09/2009

Revisado por: Ramón Cerdà Mira

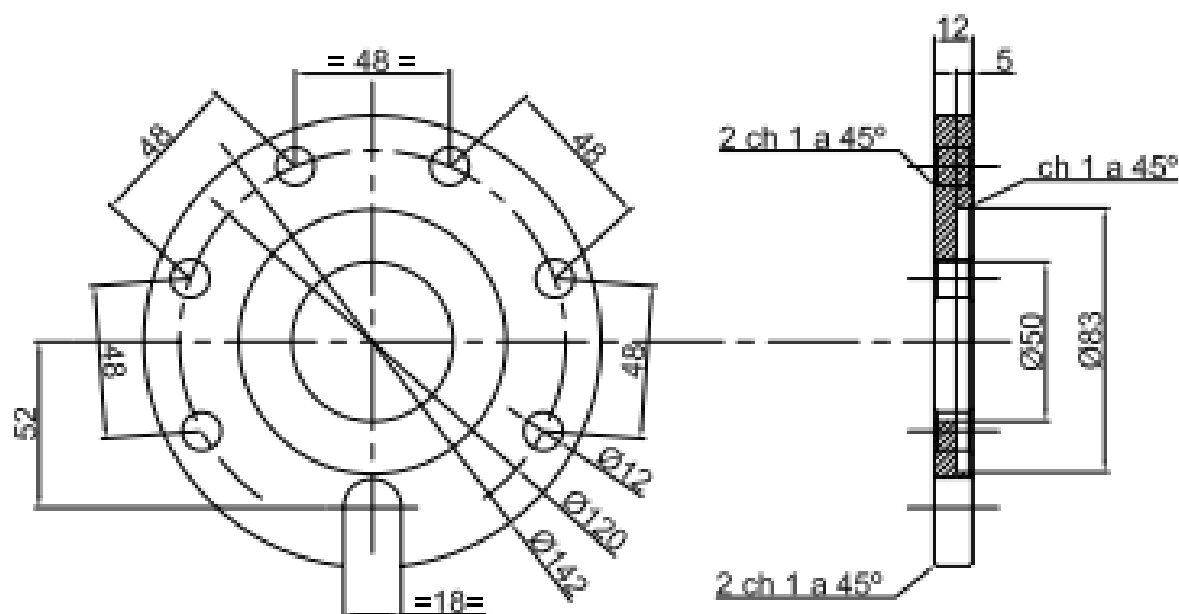
Escala: 1/8

Material: Borna ST-03 80 x 64
Placa Oskorte 320 x 320 x 12 Placa negra 60 x 6

Esta información es confidencial, propiedad de Aerogeneradores Bornay S.L.U.
Prohibida su reproducción y/o distribución sin autorización del propietario.

Ref:

Plano:



Bornay

PLETINA FIJACIÓN TORRE

Bornay Aerogeneradores S.L.U.

Polígono Industrial El Río
Carretera del Río, s/n
03420 Costatón (Alicante)

www.bornay.com

9/09/2009

Dibujado por: Rafael Juan Claverías

10/09/2009

Revisado por: Ramón Cerdá Mira

Escala: 1/2

Material: Oxicorte 12 mm

Esta información es confidencial, propiedad de Aerogeneradores Bornay S.L.U.
Prohibida su reproducción y/o distribución sin autorización del propietario.

Ref:

Plano:

8. Bibliografía

[1] Feberiro M. (2015). *Proyecto de ejecución de una instalación híbrida eólico-solar aislada de una red en una vivienda unifamiliar en Muros, A Coruña*. [Trabajo fin de grado]. Universidad de León.

[2] Turrado P. (2016). *Instalación de un aerogenerador de eje vertical en el edificio de la Universidad de Cantabria*. [Trabajo fin de grado]. Universidad de Cantabria.

[3] Torres E. (2011). *Generación Distribuida: Estudio de Requerimientos para la Interconexión a la Red de Distribución*. [Proyecto fin de carrera]. Universidad de San José

[4] Cárdenas G. (2016). *Montaje, medición y seguimiento del funcionamiento de paneles fotovoltaicos en combinación a un sistema de generación eólica de baja potencia*. [Trabajo fin de grado]. Universidad Nacional de la Patagonia Austral

[5] "Aldea asilada en cabo verde". ENAIR ENERGY, © 1970-2018. [Consulta: 31 enero 2017]. Disponible en: <https://www.enair.es/es/instalaciones/instalacion/aldea-asilada-en-cabo-verde>

[6] Ponze C. (2014). *Diseño de un sistema Híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua*. [Proyecto de ingeniería]

[7] A.TEYRA, M. ALBERTO. *Generación distribuida e independiente*. Académica Española. 2012

[8] "Introducción a la Generación Distribuida". Código 14713006. Departamento de ingeniería eléctrica. Universidad de Jaén. Octubre 2017.

[9] "Curso de energía eólica". Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Zaragoza

[11] *Google Earth*. Google, © 1998. [Consulta 5 diciembre de 2017]. Disponible en: <https://earth.google.com>

[12] Catálogo. Aerogenerador Bornay 600. Bornay. Castalla. Alicante.

[13] Catálogo. BlueSolar PWM-Light 10 A. Victron Energy. Almere Haven (Holanda).

[14] Catálogo. Anemometer. Vaavud. Copenhagen.

[15] Catálogo. PVS cells. BAE. Berlín.

[16] Potencia instalada. Asociación Empresarial Eólica, © 2007-2011. [Consulta: 28 noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/potencia-instalada/>

[17] F. JURADO MELGUIZO. *La generación eléctrica distribuida con microturbinas de gas*. Sevilla: Koobeht International. 2005

[18] MIGUEL VILLARUBIA LÓPEZ. *Ingeniería de la energía eólica*. Marcombo. 2012

[19] *Internacional Energy Agency*. OECD/IEA, © 2018. [Consulta: 3 octubre 2017]. Disponible en: <https://www.iea.org/>

[20] *Endesa educa*. Enel, © 2014. [Consulta 4 octubre 2017]. Disponible en: https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/generacion-distribuida

[21] R. ANANT KISHORE, S. PRIYA. Design and experimental verification of a high efficiency small wind energy portable turbine (SWEPT). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 18. Blacksburg, Virginia (EEUU). 14 mayo 2013, pp. 12-19.

[22] A. URSÚA, I. SAN MARTÍN, E. BARRIOS, P. SANCHIS. Stand-alone operation of an alkaline water electrolyser fed by wind and photovoltaic systems. *International journal of hydrogen energy*. 38. Pamplona. 11 octubre 2013, pp. 14952-14967.