

I+D EN PEQUEÑOS AEROGENERADORES EN ESPAÑA

Cruz Cruz, J.I.
Arribas de Paz, L.M.
Cano Santa Bárbara, L.
Fiffe Verdecia, R.P.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

Publicación disponible en el [Cátalogo general de publicaciones oficiales](#).

© CIEMAT, 2022

ISSN: 2695-8864

NIPO: 832-22-018-2

Maquetación y Publicación:

Editorial CIEMAT

Avda. Complutense, 40 28040-MADRID

Correo: editorial@ciemat.es

[Novedades editoriales CIEMAT](#)

El CIEMAT no comparte necesariamente las opiniones y los juicios expuestos en este documento, cuya responsabilidad corresponde únicamente a los autores.

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Queda prohibida la reproducción total o parcial de cualquier parte de este libro por cualquier medio electrónico o mecánico, actual o futuro, sin autorización por escrito de la editorial.

I+D EN AEROGENERADORES DE PEQUEÑA POTENCIA EN ESPAÑA

Cruz Cruz, J.I.; Arribas de Paz, L.M.; Cano Santa Bárbara, L.; Fiffe Verdecia, R.P.

51 pp, 44 ref, 14 fig

Resumen:

En este documento se recogen de forma extensa, pero no exhaustiva, algunas de las actividades llevadas a cabo en España en iniciativas de I+D+i en el campo de los aerogeneradores de pequeña potencia. Se centra principalmente en las actividades desarrolladas durante el siglo XXI, comenzando con el Proyecto Singular Estratégico de Minieólica, que ha sido hasta la fecha, la mayor iniciativa financiada a nivel estatal de fomento de la innovación en esta tecnología, que buscaba promover la actividad en el sector y que, de hecho, dio lugar al mayor florecimiento en cuanto al número de empresas involucradas.

Además, se incluyen también iniciativas de investigación y desarrollo llevadas a cabo por las principales empresas del sector, financiadas principalmente a través de proyectos, bien internacionales, bien europeos, así como por alguna entidad pública que, excepcionalmente, ha participado también en proyectos relacionados con esta tecnología.

R+D FOR SMALL WIND TURBINES IN SPAIN

Cruz Cruz, J.I.; Arribas de Paz, L.M.; Cano Santa Bárbara, L.; Fiffe Verdecia, R.P.

51 pp, 44 ref, 14 fig

Abstract:

This document provides an extensive, but not exhaustive, account of some of the activities carried out in Spain within the initiatives in the field of small wind turbines. It focuses mainly on the activities developed during the 21st century, starting with the Singular Strategic Small Wind Project, which has been the largest state-funded initiative to date to promote innovation in this technology, which sought to promote activity in the sector and which, in fact, led to the greatest flourishing in terms of the number of companies involved.

It also includes research and development initiatives carried out by the main companies in the sector, financed mainly through international and European projects, as well as by some public bodies which, exceptionally, have also participated in projects related to this technology.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	5
2	LA EÓLICA DE PEQUEÑA POTENCIA EN ESPAÑA.....	6
3	PSE MINIEÓLICA	8
4	PROYECTOS I+D ESTATALES Y AUTONÓMICOS	11
5	PROYECTOS INTERNACIONALES	24
6	CENTROS DE I+D / UNIVERSIDADES.....	35
7	TENDENCIAS EN LA I+D	40
8	BIBLIOGRAFÍA	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Proceso de desarrollo del aerogenerador Windera, hasta su certificación [10]	14
Figura 2.	Aerogenerador de traslación instalado en Burgos [13]	15
Figura 3.	Aerogenerador de Argolabe [16]	16
Figura 4.	Ensayos realizados dentro del Proyecto Lignum [20]	18
Figura 5.	Aerogenerador de Kliux (Fuente: CIEMAT)	19
Figura 6.	Aerogenerador de Vortex (Fuente: CIEMAT)	20
Figura 7.	Aerogenerador de Sonkyo (Fuente: CIEMAT)	21
Figura 8.	Aerogenerador de Windeco (Fuente: CIEMAT)	23
Figura 9.	Ensayo de aerogenerador de Enair en el CEDER-CIEMAT (Fuente: CIEMAT)	29
Figura 10.	Aerogeneradores de Baiwind en el proyecto LIFE COOP 2020 [40]	31
Figura 11.	Planta de Ensayos de Pequeños Aerogeneradores nº 5 (PEPA V), en Soria (Fuente: CIEMAT)	35
Figura 12.	Laboratorio de Ensayo de Pequeños Aerogeneradores de Barlovento [42]	36
Figura 13.	Actividades del grupo FERES, en la Universidad de Oviedo [43]	38

1 INTRODUCCIÓN

Si bien la tecnología de aerogeneradores de pequeña potencia ha estado presente desde el inicio del desarrollo del uso de la generación eólica para producción de electricidad (todos los primeros aerogeneradores eran de pequeña potencia), se puede afirmar que, actualmente, es una tecnología peculiar en su estado de desarrollo actual si se la compara con otras tecnologías de generación renovable.

Así, por ejemplo, si se compara el estado de desarrollo de la tecnología eólica existente para pequeños aerogeneradores con la que hoy en día se utiliza en grandes aerogeneradores, y a pesar de ser en ambos casos tecnología eólica, se puede constatar que el estado del arte de los pequeños aerogeneradores está todavía distante de la madurez tecnológica y de la competitividad económica. Los costes medios para la actual minieólica aislada, podrían estar entre los 2.500 y los 6.000 €/kW instalado, mientras que en aplicaciones de generación distribuida un pequeño aerogenerador podría variar entre los 2.700 y los 8.000 €/kW. Ambos rangos contrastan con los costes específicos de los grandes aerogeneradores, que están por debajo de los 1.300 €/kW.

En lo que respecta al análisis del comportamiento de los pequeños aerogeneradores, la densidad de potencia media está alrededor entre 0,15 y 0,25 kW/m² debido a la limitación del potencial eólico disponible en los emplazamientos de la minieólica, en comparación con las localizaciones típicas para los aerogeneradores de gran tamaño.

La tecnología minieólica es además claramente diferente de la utilizada en grandes aerogeneradores. Estas diferencias afectan a todos los subsistemas: sobre todo al sistema eléctrico y al de control, pero también al diseño del rotor. La mayoría de los aerogeneradores de pequeña potencia existentes en el mercado han sido construidos de forma casi artesanal. Esto está asociado al tipo de empresas que, típicamente, se encuentran en este sector: empresas más bien pequeñas, muchas veces familiares, y muchas veces con unas capacidades técnicas muy diferentes de las de los fabricantes de grandes aerogeneradores.

El desarrollo de las tecnologías de generación renovable, así como su disminución de costes tan espectaculares experimentados durante las últimas décadas (especialmente en generación solar FV y eólica a gran escala), ha venido precedido de una fuerte actividad en I+D+i acompañada de esquemas de apoyo económico a la generación. En el caso de la minieólica, el esquema de apoyo económico a la generación no coincidió en el tiempo con la apuesta por la actividad en I+D, de forma que, aunque sí se llegaron a desarrollar modelos de calidad para poder lanzarse a la fabricación masiva, en el momento en el que esto ocurrió, el esquema retributivo de la generación con esta tecnología no hacía rentable su incorporación, lo que supuso un freno que, hasta el día de hoy, mantiene al sector en un nivel de actividad residual.

Este documento viene a completar un documento anterior [1] en el que se revisaba el estado del mercado de pequeños aerogeneradores en España, en el que se abordaban buena parte de los aspectos relacionados con esta tecnología, pero no la actividad en I+D.

2 LA EÓLICA DE PEQUEÑA POTENCIA EN ESPAÑA

En lo referente a la descripción de la eólica de pequeña potencia en España, se recomienda dirigirse al documento previamente publicado [1] bajo el título: “Mercado de aerogeneradores de pequeña potencia en España”, en el que se abordaban los principales aspectos relacionados con este sector, salvo precisamente el de las actividades de I+D+i, que es el tema objeto del presente documento.

No obstante, con la intención de que el presente documento sea autocontenido, se expone a continuación un breve resumen de la situación de la eólica de pequeña potencia en España, con la información básica para poder comprender la información que posteriormente se ha incluido.

El primer aspecto a establecer, ¿qué es la eólica de pequeña potencia?: de acuerdo con el estándar UNE-61400-2 [2], relativo al diseño de los aerogeneradores de pequeña potencia, se establece en su Edición 3, que se consideran como tales, aquellos con un área barrida de rotor menor de 200 m², lo que viene a ser de una potencia menor de unos 65 kW. No obstante, en una concepción más común, se considera que comprende aerogeneradores de hasta 100 kW, que es el límite establecido para la generación de pequeña potencia de cualquier tecnología conectada a la red, tal y como establece por ejemplo el RD. 1699/2011 de regulación de la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia. Por lo tanto, cuando se hable de eólica de pequeña potencia, en general, se estarán tratando aerogeneradores de hasta 100 kW de potencia nominal.

Lo cierto es que tradicionalmente ha sido un sector minoritario, con pocas empresas “de siempre”, a las que se han ido uniendo otras que, en muchos casos, han terminado por desaparecer o cambiar de actividad. La industria tuvo un momento de crecimiento durante la primera década del siglo XXI, pero, sin duda, fue la publicación del ambicioso objetivo de instalar 300 MW de esta tecnología, aparecido en el PER 2011-2020, lo que avivó más el sector. Se pueden clasificar a los fabricantes nacionales de la siguiente manera:

- Los “grandes”: que fabrican modelos en torno a 100 kW, como Norvento, Argolabe o Del Valle Aguayo;
- Los “veteranos”: con varias décadas de actividad, como Bornay y Solener;
- Los “nuevos”: como: Windeco, Sonkyo, Siliken, Zigor, Enair, Ennera.
- Los de eje vertical: Kliux, Baiwind, Technowind.
- Nuevos desarrollos: Vortex, CleverWind.
- Otros: empresas implicadas en este sector de forma indirecta, como: Ingeteam, Zigor Corporación, Lancor, Obeki o TramaTecnoAmbiental.

En cuanto a la caracterización del recurso eólico para pequeños aerogeneradores, se ha avanzado mucho en los últimos años, gracias principalmente a herramientas internacionales disponibles, tales como el *Global Wind Atlas* o el *New European Wind Atlas*, ambos para la estimación del recurso eólico, o la herramienta *MyWindTurbine*, para el análisis de la influencia de los obstáculos.

Uno de los problemas endémicos, para el desarrollo estable de la energía eólica de pequeña potencia, es la dificultad de disponer de una evaluación precisa del recurso en el lugar de instalación del aerogenerador, debido a su alto coste, lo cual afecta a la adecuada selección del aerogenerador según el potencial eólico existente en el emplazamiento (ver clases de viento según la norma *UNE-EN 61400-2 Edición 2015* [2] para diseño de pequeños aerogeneradores). Por ello, es necesario avanzar en este área de conocimiento, ya que la evaluación del recurso es más compleja, si cabe, en pequeña eólica que en la grande, al existir en muchos emplazamientos niveles de intensidad de turbulencia mayores que los incluidos en la norma y por lo tanto, además de dificultar la decisión de compra, de la clase de aerogenerador adecuado, puede dar como resultado una productividad menor o incluso una vida útil menor, lo cual afectará claramente al grado de satisfacción del usuario.

Son reseñables también algunas iniciativas de promoción de la tecnología minieólica a nivel municipal, tales como las llevadas a cabo en Barcelona o en Lanzarote.

Un aspecto clave en el desarrollo de esta tecnología ha sido y es, el de la normativa de aplicación. El desarrollo de normativas que garanticen las cualidades necesarias en los productos comerciales, ha sido una de las actividades (relacionada por cierto con el I+D+i y que, por lo tanto, también será referenciada en este documento) que más se ha desarrollado en las últimas décadas. Tiene la particularidad, además, de que, al tratarse de un producto muy cercano al usuario final, es deseable que esta normativa sea cercana y en cierta forma “amigable” para un usuario que no tiene por qué ser experto en la materia. Finalmente, en lo relativo al mercado de aerogeneradores de pequeña potencia en España, se puede decir que hay una situación agrisulca: el Plan de Energías Renovables 2011-2020 (PER 2011-20) marcaba un objetivo 300 MW para la minieólica, muy ambicioso para este sector. Todo un plan perfectamente trazado que no llegó a llevarse a cabo, fundamentalmente por la siguiente razón: las medidas económicas que deberían acompañar las medidas normativas en el plan, nunca llegaron a ponerse en marcha.

Estas medidas económicas establecían la necesidad de establecer un marco retributivo específico para la minieólica, acompañado de líneas de ayuda para la generación distribuida minieólica. Se proponía establecer un mecanismo de financiación para instalaciones de hasta 10 kW, en aplicaciones residenciales y comerciales, y un programa de subvenciones para proyectos de demostración tecnológica, de hasta 5 kW, junto con un programa de subvenciones a instalaciones que no reciban apoyo del Régimen Especial (aisladas de red y autoconsumo). Pero antes de que el PER entrara en funcionamiento, hubo un giro en la política de apoyo a las renovables en España, pasando a quedar prohibidas las ayudas a todas las tecnologías renovables y, si bien ya entonces había tecnologías que no necesitaban las ayudas, la minieólica todavía no estaba en ese nivel, tal y como se recogía en el propio PER 2011-20.

3 PSE MINIEÓLICA

Entre los años 2006 y 2012 se desarrolló el proyecto singular estratégico PSE-MINIEÓLICA liderado por el CIEMAT y financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del Plan Sectorial Estratégico.

El proyecto PSE-MINIEOLICA abarcó un conjunto de actividades de I+D interrelacionadas entre sí, que pretendían alcanzar el objetivo de disponer de un sector tecnológico dedicado a la energía eólica de pequeña potencia, competitivo desde el punto de vista técnico y económico. Para ello se realizaron actividades de desarrollo tecnológico, de desarrollo de producto y de diseminación y fomento.

Dados la dependencia y los costes de la energía, en España existe la necesidad cada vez más imperiosa de aprovechar todo tipo de energías de naturaleza autóctona. El gran abanico de aplicaciones ya sea conectadas a la red eléctrica (generación distribuida, integración en edificios como elemento de reducción de la demanda de energía) o en sistemas aislados en lugares alejados de la red eléctrica (con baterías, bombeo, desalación de agua de mar, hidrógeno,...) o en sistemas híbridos conjuntamente con otras fuentes de energía renovables o no renovables (eólico-fotovoltaico, eólico-diésel, eólico-biomasa, eólico-minihidráulico...), nos indica que a pesar de ser un sector de pequeña potencia, sus objetivos de capacidad a nivel nacional son importantes (más de 1000 MW) y en terceros países son aún más importantes, siempre que se produzca un aumento de la calidad y fiabilidad, a la par que una reducción de costes, y eso pasa principalmente por el desarrollo tecnológico conjunto, entre todos los posibles aportadores de conocimiento, como son el sistema de ciencia-tecnología nacional, las pequeñas empresas tecnológicas y los fabricantes tanto de componentes como del sistema completo.

Los objetivos principales del proyecto PSE-MINIEOLICA fueron:

- Incrementar la viabilidad de la tecnología eólica nacional de pequeña potencia para su uso en todo tipo de aplicaciones, conectadas a la red, aisladas, instaladas en una torre como soporte, o en la cubierta de edificios o en aplicaciones novedosas como la producción de hidrógeno o la desalación de agua.
- Promover la colaboración, entre todas las entidades participantes, para disminuir el coste específico de los aerogeneradores de pequeña potencia y aumentar la eficiencia y fiabilidad de la tecnología de generación eólica distribuida, de potencia nominal hasta 100 kW, fomentando el uso de la misma tanto en aplicaciones aisladas como conectadas a red.
- Crear un “Sector Minieólico innovador” entre organismos científico-técnicos, consultoras, ingenierías, instaladores y fabricantes.

El proyecto PSE-MINIEOLICA estaba organizado en 12 subproyectos organizados en las tres áreas anteriormente definidas:

- Desarrollo de producto (5 subproyectos):
 - Subproyecto 1.1: Desarrollo de un nuevo aerogenerador asíncrono de alta disponibilidad de 100 kW. “TURBEC”. Líder: Del Valle Aguayo (DVA)
 - Subproyecto 1.2: Desarrollo de un aerogenerador de paso fijo y velocidad variable de 25 kW, sin reductora y con control de velocidad predictivo. “V25 QUATRO”. Líder: Obeki Innobe.
 - Subproyecto 1.3: Desarrollo de un aerogenerador con cambio de paso y velocidad variable de 50 kW con generador síncrono multipolar asimétrico. “VELTER 50”. Líder: Soluciones Energéticas S.A.
 - Subproyecto 1.4: Desarrollo de un aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus con cambio de paso. Líder: IndesmediaEOL
 - Subproyecto 1.6: Desarrollo de convertidores para conexión a red. Líder: Bornay Aerogeneradores.
- Desarrollo tecnológico (2 subproyectos)
 - Subproyecto 2.1: Aerodinámica y diseño estructural. Nuevos materiales y tecnologías de fabricación del conjunto rotor y elementos estructurales: palas, bujes, torres, chasis. Diseños estructurales alternativos. Desarrollo de herramientas de diseño. Líder: INTA
 - Subproyecto 2.2: Desarrollo de sistemas multiuso para la regulación, control y supervisión de la generación MINIEÓLICA. Líder: TTA
- Dinamización del sector e infraestructura soporte (5 subproyectos)
 - Subproyecto 3.1: Ensayo y certificación de la tecnología minieólica nacional existente en operación aislada y a red. Líder: CIEMAT
 - Subproyecto 3.2: Desarrollo de un mapa eólico nacional adaptado a la minieólica. Líder: Universidad de Murcia
 - Subproyecto 3.3: Instalación y demostración de sistemas de medida de energía mini eólica en entornos urbanos. Líder: Loitespiral
 - Subproyecto 3.4: Evaluación y diseño de un proyecto demostrador de energía eólica e hidrógeno. Líder: INTA
 - Subproyecto 3.6: Normalización, legislación y caracterización de la generación minieólica. Líder: CIEMAT

En el proyecto PSE-MINIEOLICA colaboraban 30 entidades directamente: 2 OPIS (CIEMAT e INTA), 3 Universidades (Universidad de Murcia, Universidad Complutense de Madrid y Universidad de Santiago de Compostela), 3 centros tecnológicos (Robotiker, LEIA y CETPEC) y 21 empresas tanto de diseño de componentes y aerogeneradores (Windeco, SolenerSA, Bornay Aerogeneradores, IDM, ECERSA, Argolabe Ingeniería, Obeki, Trama TecnoAmbiental TTA, Ingeteam y Zigor) como de desarrollo de aplicaciones (Loitespiral, Besel, Inova, Ariema, Cafestore, SACYR Vallehermoso, Arana, García y Olano).

Este complicado macroproyecto con un presupuesto de 6 M€ dio lugar a varios logros importantes como: Aerogenerador TURBEC 100 de Argolabe, Aerogeneradores Bornay Plus, Laboratorio acreditado de ensayo de pequeños aerogeneradores en el CEDER-CIEMAT y el Mapa eólico nacional para minieólica desarrollado por la Universidad de Murcia.

4 PROYECTOS I+D ESTATALES Y AUTONÓMICOS

Además del PSE Minieólica (la mayor iniciativa de promoción a nivel nacional hasta la fecha de este sector), las diferentes empresas han continuado participando en actividades de I+D+i, con financiación autonómica o internacional según los casos. Se comenzará en este apartado con la revisión de algunos de los proyectos con financiación autonómica, para abordar en el siguiente apartado aquellos proyectos de investigación con financiación internacional en los que han participado entidades españolas, siempre relacionados con la minieólica.

Es conveniente indicar que la descripción que se presenta ha sido realizada a partir de información pública y que, por lo tanto, no es uniforme. Es decir, habrá actividades de I+D de las que se cuenta con una descripción más detallada, y otras de las que apenas se tenga información sobre el título de la actividad. No obstante, se proporcionarán las fuentes de la información para poder acudir a la referencia original, en cada caso.

4.1 COMUNIDAD VALENCIANA

4.1.1 BORNAY AEROGENERADORES S.L.U.

4.1.1.1 DESARROLLO DE UN NUEVO AEROGENERADOR DE MINIEÓLICA

Este proyecto fue cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), dentro del “Programa Operativo Pluri regional de Crecimiento Inteligente” y el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) (Expediente 00083957 - IDI-20151006) [2].

El proyecto nace en el año 2015, como una continuidad de anteriores proyectos de I+D+i con los que se trabajó en el desarrollo de inversores y electrónica de control para aerogeneradores de conexión a red, tal como el PSE Minieólica 2006-2012 que ya ha sido presentado en el Capítulo 3.

Fruto de los conocimientos adquiridos a lo largo de la trayectoria de Bornay, gracias a proyectos como el anterior y conocedores de las carencias y expectativas que el mercado demanda de la tecnología minieólica, Bornay se planteó el desarrollo de un nuevo aerogenerador, que diera soluciones y respuestas a ello y que se basó en las siguientes premisas:

- Funcionales: Aumento de la eficiencia; Incremento de la producción a bajas velocidades de viento (2 a 5 m/s); seguro bajo cualquier circunstancia; silencioso.
- Técnicas: Alternador de alta eficiencia a bajas revoluciones; voltaje de salida único; entrega energía controlada para todo tipo de aplicaciones; sin sistemas de desorientación ni paso variable; grado de protección IP 5X o superior; conforme a UNE-EN-61400-2 [2].

El proyecto, llevado a cabo desde agosto 2015 hasta el 31 de diciembre de 2016, contó con un presupuesto de unos 350.000 €, involucrando unas 7.000 horas de 17 personas que trabajaron en el proyecto.

4.1.1.2 DISEÑO Y DESARROLLO DE LOS CONVERTIDORES ELECTRONICOS APLICADOS A LOS GENERADORES DE MINIEOLICA BORNAY (FASE III)

En este proyecto desarrollado entre 2019 y 2020, Bornay Aerogeneradores SLU contrató al Instituto Interuniversitario de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM), de la Universidad Politécnica de Valencia, para el diseño y desarrollo de los convertidores electrónicos aplicados a sus aerogeneradores [3].

4.1.1.3 IVACE

Además de los proyectos mencionados, Bornay contó con financiación del IVACE (Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial) para la actualización de sus procesos e instalaciones, tales como [5]: digitalización y teletrabajo en Bornay Aerogeneradores (Expediente: IMDIGB/2021/143), 8.884 €; mejora de la competitividad a través de proyectos de tecnología y digitalización. 20.881,25€; transformación Digital (IMDIGA/2017/169)

4.1.2 ENAIR

Enair (en la actualidad las máquinas Enair se comercializan bajo el nombre de Ryse Energy) se consolida como empresa a partir de la patente de un dispositivo para regular el paso de las palas de un aerogenerador [6], partiendo de diseños propios anteriores y donde se le realizaron algunas modificaciones sobre todo en la parte de la pala y del sistema de control. En su apuesta por la innovación, se incrementó el esfuerzo y la inversión, invirtiendo en esta área más de 1 millón de euros [7].

Inicialmente, la empresa siguió comercializando la máquina de 4 kW, pero con la idea de hacer máquinas más grandes, del entorno de 10-20 kW y con el objetivo de hacer una máquina de 50-60 kW para el mercado de generación distribuida de media potencia.

Las máquinas de Enair se ensayaron y el modelo E70PRO de 4 kW obtuvo la certificación MCS, pasando los ensayos de duración y seguridad de las normas IEC en un emplazamiento de Clase I de viento [8]. Las máquinas de 20 y 40 kW no se han certificado todavía.

Enair ha participado en el Proyecto IMIDCA/2020/17, cofinanciado con fondos FEDER a través del IVACE, dentro del Programa de la Comunidad Valenciana. Se trata de un proyecto de desarrollo y demostración de una planta de desalación por ósmosis inversa de agua salada para uso agrícola y consumo humano, accionada por energías renovables eólicas y fotovoltaica en sinergia, que se integran en una planta de desalación, a la que bombea a sus membranas de ósmosis inversa agua salada y agua salobre en recirculación, a la presión adecuada [9].

Enair ha participado además en el proyecto europeo ECIWIND (descrito en el apartado 5.5).

4.2 PAÍS VASCO

4.2.1 ENNERA

La empresa Ibaia Energía S.L. filial del Grupo CAF inició su andadura en el 2007 con la idea de diseñar, fabricar, certificar y comercializar un aerogenerador del entorno de 3-5 kW. El objetivo era diseñar un aerogenerador de eje horizontal que fundamentalmente tuviera un alto rendimiento con reducido nivel de ruido, ya que inicialmente la idea era instalarlos en núcleos urbanos y periurbanos. El desarrollo, con una inversión estimada en unos 3,5 M€ [10], fue completado en un proceso de algo más de cinco años, tal y como se representa en la Figura 1.

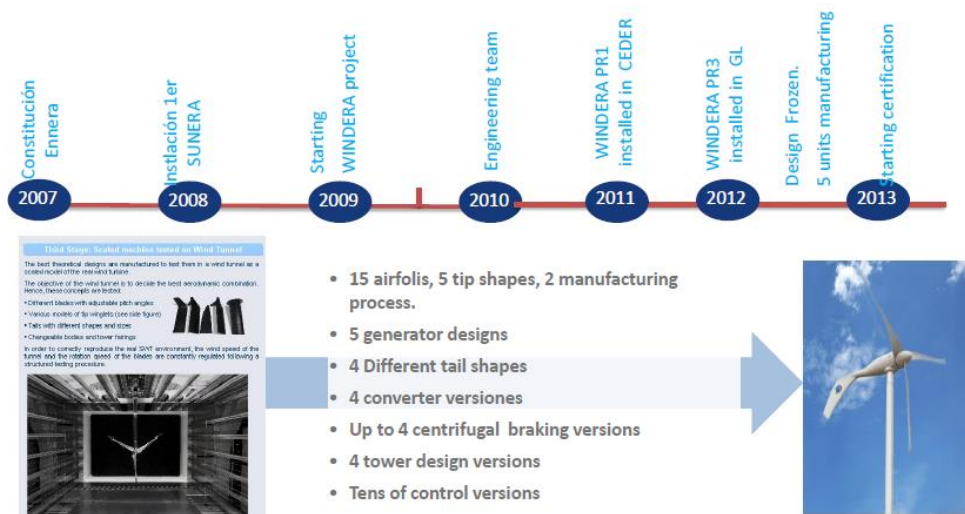


Figura 1. Proceso de desarrollo del aerogenerador Windera, hasta su certificación [10]

Durante los siguientes años, empezaron con el diseño y presentaron la patente [11] de una pala que comprende un cuerpo principal que aloja en su interior un núcleo al que está fijado dicho cuerpo principal, en donde el núcleo comprende un alma de metal u otro material de características análogas, y el cuerpo principal es una pieza de plástico reforzado moldeada sobre dicho alma.

Además de esta invención, la máquina de Ibaia, que pasó posteriormente a denominarse Ennera, incorporaba alerones en la punta de la pala (*winglets*) que permitían reducir los torbellinos que genera y que producen mucho ruido, consiguiendo hacer un aerogenerador muy silencioso. Después de diversos ensayos el aerogenerador se comercializó con el nombre de Windera S de 3,2 kW de potencia nominal y con un sistema de instalación y conexión, incluyendo el convertidor desarrollado por completo por la empresa Ennera. Esta máquina se certificó por GL al amparo de diferentes normas internacionales, consiguiendo la certificación de *Class NK* para la instalación en Japón, siendo este su principal mercado debido a la *feed-in-tariff* existente.

Posteriormente, realizaron modificaciones a la máquina Windera S para obtener 4 kW de potencia nominal, incrementando ligeramente la longitud de la pala.

4.2.2 BAIWIND

Baiwind S.L. nació en 2009 tras comprar la tecnología de la empresa Enerlim Albia, que tenía aerogeneradores de traslación ya instalados en Burgos con una tecnología disruptiva, que permitía aprovechar vientos no demasiados altos y que fueran de naturaleza muy direccional mediante la traslación de los perfiles aerodinámicos horizontalmente, de tal manera que en la parte final de cada torre de sustentación, giraba y convertía el movimiento lineal en movimiento rotativo, que era transformado en energía eléctrica. Se instaló un prototipo de 300 kW en Hozalla (Burgos) para probar la tecnología. La idea de concepto de este aerogenerador fue que pudiera ir en varias columnas y/o filas de tal manera que le confiriera una estructura modular y matricial. Las palas inicialmente eran de perfil simétrico y planta rectangular con lo que su fabricación era sumamente competitiva. La regulación se conseguía mediante un mecanismo de desorientación que permitía cambiar el ángulo de ataque de manera autónoma en cada pala [12].



Figura 2. Aerogenerador de traslación instalado en Burgos [13]

La empresa Baiwind, además tenía varios modelos de un aerogenerador de eje vertical, que se comercializaba con la marca ROBLE y que era diseñado con diferentes áreas de captación y potencias, en función de la clase del emplazamiento donde fuera a instalarse. Se realizaron diversos ensayos en diferentes emplazamientos para verificar el comportamiento dinámico y de curva de potencia, obteniéndose algunos buenos resultados en cuanto a producción, aunque no se certificó [14].

Se presentan dos proyectos internacionales en los que participó BAIWIND en los apartados 5.7 y 5.8.

4.2.3 ECERSA / DEL VALLE AGUAYO / ARGOLABE

La empresa alavesa Del Valle Aguayo (DVA) desarrolló, a través de la empresa Ebro Cantábrica de Energías Renovables (ECERSA) y con la colaboración de Argolabe Ingeniería, un aerogenerador con rotor tripala de 22,5 m de diámetro y eje horizontal, con 100 kW de potencia nominal @ 10,5 m/s, Clase III denominado TURBEC 100. Esta turbina es de velocidad y paso variables, dispone de un generador asíncrono de 8 polos acoplado mecánicamente al rotor mediante una caja multiplicadora

planetaria de dos etapas con relación de multiplicación 1:16,9 y que se conecta a la red, a través de un convertidor *Back-to-Back* de cuatro cuadrantes. El prototipo fue instalado en 2011 en el Parque Tecnológico de Álava y se controla desde el Centro de I+D que la empresa DVA dispone en el Parque. Este proyecto de innovación fue apoyado por el Plan Sectorial Estratégico del Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del proyecto PSE-Minieólica (ver Capítulo 3) y su objetivo fue, desarrollar un prototipo de aerogenerador de altas prestaciones para conectar en autoconsumos. El modelo de pala de 11 m fue ensayado estáticamente en el Laboratorio de Ensayos Eólicos LE² del CEDER-CIEMAT en Soria.

Argolabe presentó posteriormente en 2014, el proyecto AGDA (Aerogenerador de media potencia para Generación Distribuida y Autoconsumo) a la convocatoria del programa de Ciencia y Tecnología en Medio Ambiente y Cambio Climático, del Mecanismo Financiero del Espacio Económico Europeo (*EEA-Grants*) gestionado por el CDTI. En este prototipo denominado T100 se modificaron los sistemas hidráulicos del cambio de paso y del sistema de frenado del TURBEC 100 por soluciones electromecánicas. Además, se modificó la transmisión planetaria por una transmisión helicoidal de ejes paralelos con relación 1:22 con lo que la velocidad nominal de rotación bajó al rango de 17-50 rpm. El prototipo resultante fue instalado en las Bodegas Fernández de Piérola en Moreda (Álava) como sistema de autoconsumo eólico [15].



Figura 3. Aerogenerador de Argolabe [16]

4.2.4 CLEVER WIND

La empresa CleverWind solicitó la patente de aerogenerador de eje vertical con bajo impacto visual [17] donde se refleja la invención de rotor vertical de dos palas, cuya principal ventaja competitiva es que se puede plegar y desplegar en función del viento existente, de tal manera que la vida útil se vea incrementada y los costes de mantenimiento se vean reducidos.

El molino tiene un anemómetro de control que indica cuando hay viento suficiente para el aprovechamiento o cuando hay excesivo para el daño estructural, de tal manera que pueda optimizar la producción de viento sin ver comprometida su integridad estructural, pudiendo reducir los costes en materiales.

4.3 ARAGÓN – ADES

ADES presenta en su página web [18] una lista de diez proyectos de investigación, todos ellos a nivel de desarrollo de prototipos, aunque algunos de tamaño sensiblemente mayor que el de los aerogeneradores de pequeña potencia, objeto de este documento. En particular, los proyectos GEBE, SINTER, Nazareth sí pueden considerarse incluidos en el ámbito del documento:

- Proyecto GEBE: Gestor de balances de redes energéticas con generación distribuida inteligente. Financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación por la convocatoria INNPACTO. Referencia proyecto: IPT-120000-2010-011
- Proyecto Nazareth: Integración de distintas fuentes energéticas para garantizar el suministro.
- Proyecto Sinter: Sistemas Inteligentes de Estabilización de red, para la integración de energías renovables. Financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación por la convocatoria Plan E.

También se presenta en la mencionada página web un listado de patentes, aspecto no tan frecuente entre las empresas del sector. Las patentes estaban relacionadas con diferentes tecnologías; las relacionadas con la generación eólica eran principalmente:

- Turbina eólica pendular de par motor compensado.
- Edificios sostenibles con integración solar + eólica.
- Soluciones híbridas para micro-redes aisladas o conectadas.

4.4 GALICIA – NORVENTO

La empresa Norvento Enerxía comenzó su actividad en Lugo, en el año 1981, como empresa de servicios de ingeniería y consultoría en sistemas eléctricos y en energías renovables. A finales de los años 80 comienza a promover proyectos con energías renovables: primero centrales minihidráulicas y después, parques eólicos en el norte de la provincia de Lugo, con aerogeneradores de la cooperativa catalana Ecotecnia Soc Coop. En los años 2000, Norvento Enerxía, comenzó a promover proyectos con energía solar fotovoltaica y con biomasa. Hasta 2009 promueve proyectos con energías renovables en otros países, pero no es hasta 2009 cuando decide desarrollar su propia tecnología eólica diseñando y fabricando íntegramente un aerogenerador comercial de 100 kW de potencia nominal denominado nED100. A partir de 2016 entró en el mercado de las microrredes y los sistemas aislados de la red [19].

4.4.1 PROYECTO LIGNUM

El proyecto LIGNUM fue una iniciativa nacida en la Convocatoria del CDTI FEDER Innterconecta, para la Comunidad Autónoma de Galicia en el 2013, que tenía por título “Nuevos usos y sistemas para la madera sólida de Eucalyptus Globulus”. El proyecto LIGNUM lo lideraba la empresa Grupo LOSAN,

que tuvo de asociadas a las empresas Norvento NED Factory, Neodyn y Seistag Innovación. El objetivo del proyecto desde el punto de vista eólico era demostrar la capacidad de la madera de eucalipto para la realización de partes de un aerogenerador, sobre todo la torre y la pala. Para ello se diseñaron y fabricaron nuevos conceptos de torre y se diseñó un modelo de pala más esbelta que pudiera cumplir las exigencias de las normas de ensayo de palas de aerogeneradores.

Algunos tramos de torre diseñados se ensayaron en la PEMADE (Plataforma de Enxeñería da Madeira Estrutural) de la Universidad de Santiago de Compostela y un modelo de un nuevo diseño de pala fabricada a la manera tradicional con resina y fibra que permitiera comparar resultados con la de madera fue ensayado en el CEDER-CIEMAT y certificado por la empresa TÜV-Sud.

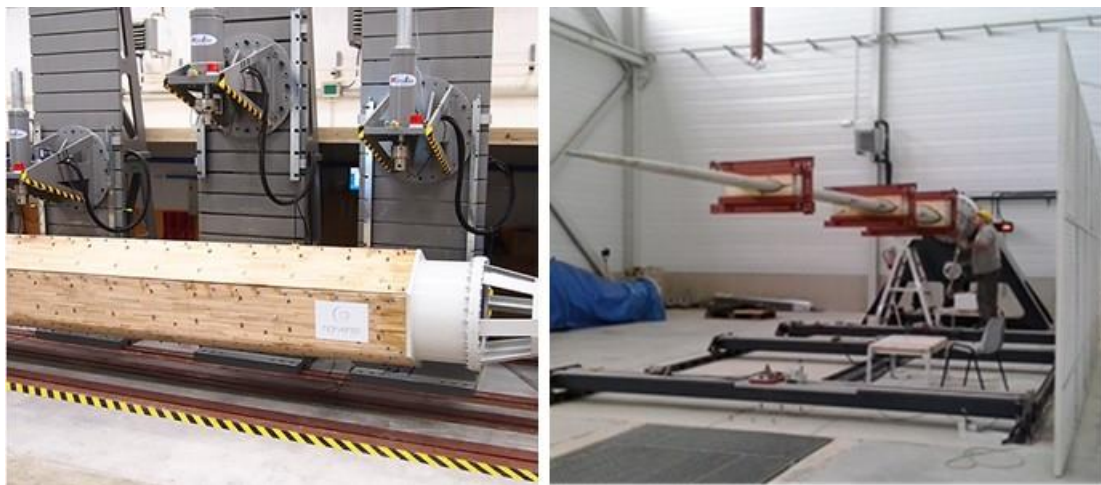


Figura 4. Ensayos realizados dentro del Proyecto Lignum [20]

4.4.2 PROYECTO AIRLUMINUM

El proyecto “Airluminum” es un proyecto de I+D+i en el que Norvento Tecnología lleva trabajando desde finales de 2020 y cuyo objetivo es aunar las ventajas de los generadores de imanes permanentes direct drive con las bondades del empleo de materiales más ligeros, persiguiendo la reducción sustancial de la masa, en esta tipología de aerogeneradores.

4.4.3 CENTRO DE ENSAYO DE AEROGENERADORES DE MEDIA POTENCIA PARA AUTOCONSUMO INDUSTRIAL

En abril de 2017 la Consellería de Economía, Empleo e Industria de la Junta de Galicia y Norvento anunciaron un acuerdo mediante el cual se daba el primer paso para la tramitación administrativa del parque eólico experimental nED, el primer centro de ensayo de aerogeneradores de media potencia para autoconsumo industrial, de toda España. El parque estará situado en el Concello de A Pastoriza, en Lugo. Con una inversión total de más de 3,5 millones de euros, permitirá la realización de ensayos en hasta cinco aerogeneradores de media potencia (100 kW – 700 kW), además estará dotado de hasta tres torres meteorológicas y contará con instalaciones y equipamiento de última generación que permitirá probar los nuevos modelos de aerogeneradores en el futuro [21].

4.5 RIOJA – KLIUX

Kliux, es una empresa que nace como consecuencia de la idea de un aerogenerador de eje vertical que fue patentada en Estados Unidos como “*Wind power machine*” [22] y que tenía como principal novedad la disposición de los álabes.

La máquina de Kliux, desarrollaba una potencia de 2 kW a unos 12 m/s de velocidad de viento (con área barrida de 6 m²), confiriéndole un aspecto esbelto y a la vez con un nivel de ruido muy bajo debido a que no giraba a demasiadas vueltas. La forma de operar de este rotor es que hay un número de palas que trabajan en sustentación y otras que trabajan en arrastre, de tal manera que puede funcionar en vientos con predominio turbulento, sin que se vea afectado su rendimiento. Otro aspecto importante de su desarrollo fue, el uso de los materiales para la fabricación de los álabes, ya que estaban formados por un plástico patentado por Bayer que los hacía muy ligeros y de suficiente resistencia al pandeo, si bien, se tuvieron que modificar los puntos de unión con el eje [23].

Posteriormente, se ha desarrollado otra patente con los álabes curvos que permite con unos alerones, desprender los torbellinos [24] pero no hay constancia del desarrollo comercial de esta máquina (inicialmente previsto para el año 2022).



Figura 5. Aerogenerador de Kliux (Fuente: CIEMAT)

4.6 CASTILLA Y LEÓN –VORTEX BLADELESS

La empresa Vortex Bladeless nació al amparo de una invención patentada como aerogenerador resonante por vorticidad [25] que consiste fundamentalmente en un mástil vertical de cuerpo cilíndrico que se lleva deliberadamente a resonancia, para aprovechar la fuerza de los vórtices que se produce el viento, al chocar con esta estructura.

La máquina consta de un mástil interior realizado en fibra de carbono que permite absorber todas las fuerzas estructurales, sobre todo a fatiga, que pueden llevar al aerogenerador al colapso. Interiormente también tiene un generador eléctrico que debe aprovechar las variaciones de amplitud que realiza el mástil e intentar aprovechar al máximo ese par mecánico producido.



Figura 6. Aerogenerador de Vortex (Fuente: CIEMAT)

Posteriormente se desarrolló un Vortex más pequeño, el Vortex NANO de apenas 85 cm de altura y capacidad de potencia de algunos vatios para poder seguir haciendo avances en el desarrollo del generador eléctrico. En el apartado 5.6 se describe el proyecto europeo Vortex Tacoma.

4.7 CANTABRIA – SONKYO ENERGY

El aerogenerador Windspot de 3,5 kW de potencia nominal, fabricado por SONKYO, fue ensayado y certificado, pasando los ensayos de duración y seguridad de las normas IEC, lo que le permitió participar en mercados como el de Reino Unido y el de Estados Unidos, entre otros.



Figura 7. Aerogenerador de Sonkyo (Fuente: CIEMAT)

Además, la empresa Sonkyo Energy estuvo implicada en los dos proyectos de investigación que se describen a continuación.

4.7.1 ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE TURBINA DEL AEROGENERADOR WINDSPOT 3,5 KW

El Centro Tecnológico CTC desarrolló un proyecto cuyo objetivo fue evaluar el comportamiento aerodinámico de la turbina del aerogenerador Windspot 3,5 kW de la compañía Sonkyo Energy [26]. Dicho análisis se llevó a cabo en dos fases principales:

- Estudio teórico del comportamiento aerodinámico de la pala,
- Simulación del funcionamiento de la turbina, mediante herramientas de CFD, utilizando ANSYS CFX 13.0

4.7.2 DESARROLLO DE UN AEROGENERADOR DE 15 KW

El Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación concedió a la empresa cántabra Sonkyo Energy la ayuda de 1 M€, destinado al desarrollo de un nuevo aerogenerador de 15 kW, el mayor de la familia de aerogeneradores de minieólica que fabrica Sonkyo Energy. Hasta ese momento, la empresa fabricaba aerogeneradores para aplicaciones domésticas de 1,5 kW, 3,5 kW y 7,5 kW bajo la marca Windspot [27].

Se trataba de un proyecto muy ambicioso y un reto a nivel de desarrollo e innovación, porque los tres aerogeneradores de pequeña potencia mencionados tenían una base tecnológica bastante parecida, pero en el nuevo diseño se pretendía innovar y aplicar nueva tecnología.

Los centros de investigación involucrados en el proyecto eran: el Instituto Nacional de Tecnología Espacial (INTA), encargado del diseño de las palas, y el Centro Tecnológico INNOVA, colaborador en el desarrollo del sistema de paso variable de este aerogenerador. También la empresa especializada en electrónica SETELSA, formaba parte del proyecto, ocupándose del proceso de control del prototipo.

4.8 MURCIA – WINDECO

Windeco es una empresa que nace en Yecla con financiación privada, que desarrolló un aerogenerador de eje horizontal tripala denominado VENTO 5000, a partir de la patente “aerogenerador perfeccionado para aplicaciones de baja potencia” [28], que aprovechaba vientos bajos.



Figura 8. Aerogenerador de Windeco (Fuente: CIEMAT)

Este aerogenerador tenía un diámetro de 5,25 m y potencia nominal de 5 kW. La ventaja competitiva de esta máquina radicaba en el convertidor electrónico de potencia, que permitía con pocos cambios, poder conectarse a diferentes niveles de tensión de generación e incorporaba un sistema de aprendizaje de los niveles de tensión-rpm que optimizaba la curva de potencia. Fue ensayado, pero no certificado.

5 PROYECTOS INTERNACIONALES

5.1 PROYECTO TAREA 27

A nivel internacional y dentro del Programa para la colaboración tecnológica en energía eólica de la Agencia Internacional de la Energía (IEA WIND TCP) se desarrolló, coordinado por CIEMAT, desde el año 2007 hasta el año 2012, la primera fase de la tarea 27 con objeto de desarrollar y desplegar una etiqueta para usuarios de la eólica de pequeña potencia: *“Development and Deployment of Small Wind Turbine Consumer Labelling”*. En este proyecto colaborativo se desarrollaron unas prácticas recomendadas para la elaboración de esta etiqueta que posteriormente fue incluida en un anexo de la norma IEC 61400-2 [2].

En este grupo de trabajo participaron expertos de Australia (Murdoch University), Canadá (WEICan), Corea del Sur (KIER), Dinamarca (DTU-RISOE), España (CIEMAT), Italia (Universidad de Nápoles) Japón (AIST, Kiushu University), Suecia (TEROC), Reino Unido (TUV NEL), Estados Unidos (NREL, SWCC), Alemania (GSWEA) y Francia, Grecia y China como observadores.

La ventaja de este etiquetado, es armonizar la forma de entregar la información de forma más amigable, de los resultados de los ensayos experimentales, para que el usuario pueda comparar fácilmente los productos objetivamente. Al no ser una certificación, es menos costosa ya que solo requiere de los distintos ensayos realizados por un laboratorio acreditado. En esta tarea se progresó de forma coordinada con el comité MT2 para la actualización de la norma IEC 61400-2.

Posteriormente desde 2013 hasta 2018 el Comité Ejecutivo de la IEA Wind TCP aprobó una extensión de la tarea 27 en esta ocasión para investigar el comportamiento de los pequeños aerogeneradores en entornos de alta turbulencia. El grupo en esta ocasión, también coordinado por CIEMAT y Wind Energy Advisors WEA de Estados Unidos, estaba compuesto por expertos de Austria (Universidad de Ciencias Aplicadas del Instituto Técnico de Viena), Bélgica (Universidad Libre de Bruselas), China (CWEA, IMUT, TSWA), Irlanda (CREDIT-Dundalk Institute of Technology), Japón (NEDO, Kanazawa University), Corea de Sur (KETEP), España (CIEMAT) y Estados Unidos (NREL)

Como resultado de esta actividad se publicaron unas recomendaciones prácticas sobre la evaluación de emplazamientos de aerogeneradores de pequeña potencia, en entornos con alta turbulencia, (*Recommended Practices on “micro-siting of small turbines in highly turbulent sites*). También se publicó un informe consensuado con recomendaciones técnicas para considerarlas en la nueva edición de la norma IEC 61400-2 y por último un detallado compendio de todos los casos de estudio llevados a cabo en todo el mundo para elaborar la recomendación práctica anteriormente mencionada. Toda esta información es pública y está disponible [29].

5.2 PROYECTO SWIP

El proyecto SWIP estaba enfocado al desarrollo de soluciones innovadoras para superar las barreras del sector de la minieólica y su mercado, para que se diera un apropiado despliegue de estos sistemas en las áreas urbanas de toda Europa [30].

En una primera fase, se llevó a cabo la evaluación del actual estado del arte de este sector, analizando su marco normativo y económico, estudiando las tecnologías y productos disponibles de aerogeneradores de pequeño y mediano tamaño. Con la información recopilada se desarrollaron las siguientes actividades:

- Desarrollo de una nueva metodología para la evaluación del recurso eólico en áreas urbanas, con un error RMS máximo del 8% en predicción de la velocidad del viento.
- Diseño de un innovador aerogenerador de bajo coste (de entre 1 y 100 kW), adaptable a diferentes estructuras y emplazamientos.
- Diseño y desarrollo de palas de aerogenerador de última generación, que maximizan el rendimiento energético en cada uno de los modelos finales, para turbinas medianas y pequeñas, considerando tanto eje vertical como eje horizontal.
- Implementar un sistema SCADA que permitió un mejor funcionamiento del aerogenerador, gracias a unos parámetros mejorados de operación y mantenimiento.
- Estudio de la integración estructural en edificios/distritos, analizando los sistemas y elementos de anclaje. Elaboración de guías de buenas prácticas para la integración estética de los aerogeneradores, con el fin de garantizar la aceptación social.
- Desarrollo de soluciones para mitigar y absorber los ruidos y las vibraciones producidos por los aerogeneradores.

SWIP implementó todas estas soluciones y novedades en tres demostradores, donde fueron puestas a prueba y validadas bajo condiciones reales de operación. Estos casos piloto estaban ubicados en [31]:

- Zaragoza (España): Ubicado en la sede de CIRCE. Edificio de bajo consumo energético que era al mismo tiempo un laboratorio de I+D+i sobre eficiencia energética en la edificación.
- Choczewo Commune, Región de Pomerania (Polonia). Instalado sobre el suelo al lado de la Oficina Regional, con el fin de suministrar energía a los edificios adyacentes.
- Kokoszki District, Gdansk (Polonia): Instalado en un área industrial local, próximo a varias fábricas.

Estos avances tecnológicos de última generación tenían como objetivo conseguir:

- Una importante reducción de costes de mantenimiento (en torno al 40%)
- Un incremento del 9% en el rendimiento del aerogenerador
- La mitigación y/o eliminación de los ruidos y vibraciones
- Una probable reducción en la inversión del usuario final

El proyecto SWIP coordinado por CIRCE, tuvo una duración de 3 años y 8 meses (octubre de 2013 - septiembre de 2017). En total, el proyecto contó con la participación de 13 socios de 10 países diferentes de la UE, que abarcaban las partes interesadas más relevantes: seis PYMEs, una gran industria, cinco centros de investigación y una autoridad pública.

CIRCE estaba a cargo de la evaluación de recurso eólico en los demostradores, así como de los ensayos de curva de potencia y evaluación de la durabilidad del aerogenerador, con el fin de mejorar la precisión en la estimación de la potencia generada. Del mismo modo, una vez instalados, CIRCE fue el encargado de la monitorización del funcionamiento de cada uno de los demostradores. Además, CIRCE era el responsable de un gran número de actividades relacionadas con el diseño y desarrollo de los componentes eléctricos, como el generador de imanes permanentes o la multiplicadora magnética, tomando parte también en el desarrollo, integración y definición de los parámetros del SCADA.

En relación con la seguridad, CIRCE participó en el estudio de los estándares y en la realización de ensayos de seguridad, especialmente en todo lo relacionado con las interferencias electromagnéticas (EMI), estableciendo los requerimientos en áreas urbanas para garantizar que los equipos electrónicos creados en el proyecto funcionan bajo la regulación vigente.

El coste total del proyecto SWIP ascendió a 6,5 M€. Fue un proyecto colaborativo cofinanciado por la Unión Europea dentro del Séptimo Programa Marco (FP7), siendo la contribución total de la UE de 4,9 M€.

SWIP fue evaluado favorablemente en una convocatoria abierta dentro del Séptimo Programa Marco, tema ENERGY 2013.2.3.2: Aerogeneradores de tamaño pequeño y mediano. Esta cofinanciación de la UE se basó en el Acuerdo de Subvención nº 608554, firmado entre el consorcio del proyecto y la Comisión Europea.

5.3 PROYECTO SWTOMP

SWTOMP (*Small Wind Turbines Optimization and Market Promotion*) se creó con el objetivo principal de promocionar, desarrollar e implementar nuevas soluciones en el uso de los aerogeneradores de pequeña y media potencia. El proyecto, coordinado por CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), contó con la participación de diferentes Centros de investigación y Universidades de Turquía (IZTECH, Izmir Institute of Technology), Finlandia (VTT, Technical Research Centre of Finland Ltd), Rumanía (UTCN, Universitatea Tehnica din Cluj-Napoa), Argentina (INTI, Instituto Nacional de Tecnología Industrial-Neuquén), Uruguay (UdelaR, Universidad de la República), Méjico (INEEL, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias) y República Dominicana (INTEC, Instituto Tecnológico de Santo Domingo).

Los objetivos a alcanzar en la realización de este proyecto fueron, la dinamización del mercado de los aerogeneradores de pequeña y media potencia en los países participantes, desarrollar nuevas máquinas de este tamaño específicamente diseñadas para regiones con condiciones climáticas muy adversas como pueden ser frío extremo o vientos tropicales y desarrollar sistemas de cooperación en la investigación entre centros tecnológicos de I+D, fabricantes de aerogeneradores, administración y clientes finales.

El proyecto tuvo una duración de tres años y correspondió al CIEMAT realizar las tareas de coordinación y de desarrollo de nuevos estándares internacionales para regiones con condiciones climáticas especiales.

La financiación de este proyecto se enmarcó en la convocatoria de la 2nd Joint Call de ERANET-LAC para la realización de proyectos de investigación entre los países de la Unión Europea y los países adscritos de Latinoamérica.

Para ello, se llevaron a cabo diferentes tareas. Con respecto a la promoción de los aerogeneradores de pequeña/mediana escala: se realizó un análisis del mercado de SWT en los países participantes diseñando un formulario de encuesta por muestreo para recoger la información. Se realizaron 4 talleres de difusión de la tecnología de los aerogeneradores pequeños (SWT) en 4 países (México, España, Uruguay y Colombia) Se redactó un documento con material técnico educativo sobre la minieólica, en forma de publicación, por parte de los socios participantes de SWTOMP.

Los trabajos realizados en relación con el desarrollo de la metodología para la evaluación de los recursos eólicos para SWT incluyeron los códigos de evaluación de los recursos eólicos existentes en diferentes lugares verificando los resultados por medio de datos medidos y el desarrollo de la metodología para evaluar fácilmente los recursos eólicos para SWTs. Esto dio como resultado una aplicación web online (WebApp) llamada "*Small Wind Assessment Tool - SWAT*". El resultado de la aplicación web SWAT se publicó para Turquía en inglés como una versión BETA. Se proporcionará a todos los países en tres idiomas (inglés, turco y español).

En relación con el desarrollo de nuevos aerogeneradores pequeños, diseñados específicamente para entornos muy fríos y tropicales, se seleccionó un SWT de la empresa Aeroluz de México para realizar cambios en el generador eléctrico y en el rotor eólico con el fin de ser utilizado en climas tropicales. Para ello se utilizó un estator comercial de una máquina de inducción para construir un generador síncrono de imanes permanentes con imanes de ferrita. El uso de la ferrita tiene como objetivo reducir el coste y hacer que la máquina sea más adecuada para las altas temperaturas en condiciones climáticas tropicales. También se diseñó un nuevo rotor para esta máquina. El SWT seleccionado en Argentina por estar optimizado para su uso en climas fríos era de la empresa Eolocal. El retraso en la entrega de los fondos limitó las actividades en Argentina. Por este motivo, sólo se realizaron algunos estudios.

Con respecto a las Normas para SWT, la actividad se centró en la identificación de posibles mejoras de la norma ya existente IEC-61400-2 Tercera Edición [2]; entregando un documento con el análisis de todos los requisitos y recomendaciones relacionadas con las condiciones ambientales del sitio donde se instalaría el pequeño aerogenerador.

Se puede encontrar más información en la página web del proyecto [32].

5.4 PROYECTO WINDUR

El Proyecto WINDUR (*Small Wind Turbine for Urban Environments*) financiado por el programa H2020 SMES y coordinado por la Universidad de Gante (Bélgica) en el que participaron tanto el Centro Nacional de Energías Renovables CENER (España) realizando el diseño del rotor, para lo cual utilizó un proceso de diseño de optimización iterativo, con herramientas de simulación de desempeño desarrolladas por CENER. También participó la empresa española de ingeniería SOLUTE que conjuntamente con la Universidad de Uppsala desarrollaron una interfaz gráfica de usuario (GUI) que emplea el programa CFD libre OpenFOAM para aplicaciones industriales.

La solución tecnológica propuesta WINDUR propuso una pequeña turbina eólica de eje vertical (VAWT) optimizada para su uso en entornos urbanos como un sistema montado en la azotea. Los nuevos desarrollos propuestos incluían:

- un sistema de control de velocidad variable desarrollado para maximizar el rendimiento energético de VAWT bajo velocidades de viento que cambian rápidamente,
- un diseño aerodinámico basado en un rotor helicoidal, refinado para reducir el peso del rotor y las cargas en el techo, para reducir la complejidad y el costo de instalación de WINDUR y
- una evaluación del recurso eólico en áreas urbanas, para caracterizar aquellos lugares con mejores recursos eólicos.

WINDUR tenía un rendimiento objetivo de 0,35 kWh/€ a una velocidad media anual del viento de 6,5 m/s para garantizar un período de retorno de la inversión (ROI) inferior a 15 años.

Este proyecto se desarrolló del 2013 al 2016 y contó con una financiación europea de 1.158.000 € [37].

5.5 PROYECTO ECIWIND

El proyecto ECIWIND [38] fue un proyecto presentado en mayo de 2015 por las empresas LANCOR 2000 S COOP y Enair dentro de los programas H2020-EU.3.3. *SOCIETAL CHALLENGES - Secure, clean and efficient energy* y H2020-EU.2.3.1. *Mainstreaming SME support, especially through a dedicated instrument* de la Unión Europea. El presupuesto fue de 1.867.578,75 € y tenía por objetivo la fabricación de un aerogenerador de 40 kW a un coste que permitiera competir con otras fuentes de energía en los sitios donde el recurso lo permitiera.

La Escuela Superior de Ingeniería Industrial, Aeroespacial y Audiovisual de la Universidad Politécnica de Cataluña en Tarrasa (ESEIAAT) desarrolló, en su departamento de motores y máquinas térmicas, el diseño de las palas utilizadas en el proyecto. Para el diseño completo del aerogenerador se realizó un complejo estudio aerodinámico basado en las más modernas técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD). En este caso los estudios requirieron una capacidad de cómputo muy alta y un conocimiento experto debido a que las condiciones eran complejas debido a que los aerogeneradores de estas potencias suelen estar ubicados en entornos en los que no siempre es posible un flujo ideal y las turbulencias tan cercanas a la superficie, producen cargas adicionales inesperadas, en muchos casos. El objetivo de esta gran inversión de recursos no ha sido otro que la optimización, encontrando el punto extra que marca la diferencia con el resto. En relación a las palas, se buscó el diseño óptimo para que se obtenga la máxima energía provocando el menor ruido acústico. En cuanto a la góndola, el objetivo fue el diseño completo, para lograr la menor perturbación al flujo eólico que llega al rotor. Tras un gran número de simulaciones se vio que lo mejor es emplear los ángulos de inclinación óptimos de las palas y de la góndola y se ha demostrado la facilidad de orientación que tiene la turbina desarrollada con rotor a sotavento.



Figura 9. Ensayo de aerogenerador de Enair en el CEDER-CIEMAT (Fuente: CIEMAT)

Tras este estudio se diseñaron dos primeros prototipos (de 4 y 10 kW) para probar a pequeña escala los diseños realizados en cada una de las partes. Las mejoras realizadas por parte de los estudios CFD en el rotor, con una gran eficiencia y resultados aeroelásticos muy buenos y en el generador eléctrico, dieron como resultado un avance significativo en el rendimiento y el nivel de ruido generado. Así, en los ensayos realizados en la Planta de Ensayos de Pequeños Aerogeneradores del CIEMAT (PEPA V) el C_p llegó al 0,45 a velocidades en torno a 8 m/s con un nivel de potencia sonora aparente de 87 dBA para 8 m/s, un nivel bajo para las máquinas de eje horizontal.

Dos de las características principales del producto final de 40 kW especificado en el proyecto, que variaban respecto a los prototipos, eran el sistema de orientación ya que este era un aerogenerador a sotavento, mientras que los otros eran por timón de cola y el control de pitch que era activo en el caso de la máquina de 40 kW mientras que era pasivo en los prototipos. Se realizaron todos los diseños y se fabricaron todas las piezas de acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de los primeros prototipos. Se ensayó, pero hubo diferentes cambios en el diseño que no permitieron la realización de un ensayo completo antes de que el proyecto terminara en noviembre de 2018.

5.6 PROYECTO VORTEX TACOMA

Inicialmente, se hicieron numerosas pruebas en cuando la disposición de los elementos dentro del mástil, la propia geometría del mástil y diferentes materiales, llegando a la conclusión que un tamaño apropiado debería ser en torno a 3 metros de altura y forma cilíndrica. Para su desarrollo, obtuvieron un proyecto europeo en la convocatoria *H2020-EU.3.3. – “SOCIAL CHALLENGES - Secure, clean and efficient energy”* denominado *New concept of acceptable wind energy generators without blades* [39], por valor de algo más de 1.9 M€ que consistía en probar diferentes desarrollos de generadores eléctricos, materiales, formas de regulación y finalmente el ensayo en campo. El objetivo era obtener la máquina Vortex TACOMA de 100 W de potencia nominal. En dicho proyecto se desarrollaron gran parte de los componentes con una fiabilidad importante, faltando todavía desarrollo en el generador eléctrico, que no estaba perfectamente sincronizado para dar potencias similares al objetivo.

5.7 PROYECTO LIFE COOP2020

El objetivo principal del proyecto *Pilot for rural smart grids through optimization of energy use and innovative renewable biomass sources* (Proyecto LIFE COOP2020) era demostrar la viabilidad económica y medioambiental de un nuevo modelo de negocio para las cooperativas agrícolas, integrando el ahorro energético y la generación de energías renovables y la producción de biomasa [40].

Se centró en dos enfoques principales, en primer lugar, en la realización de ahorros energéticos y en segundo lugar en la generación de energía a partir de diferentes fuentes renovables. Ambas actividades fueron probadas y optimizadas para formar la columna vertebral de una llamada "red rural inteligente" y apoyar la evidencia de la vida real, de que la generación de energía

descentralizada y distribuida es económicamente factible y deseable. Además, a través de este proyecto, la Cooperativa de Cambrils demostró la viabilidad de un nuevo modelo productivo, que generó una serie de "empleos verdes", que proporciona un nuevo futuro para el desarrollo rural.

El proyecto fue llevado a cabo por una asociación transnacional con competencias complementarias: 1 cooperativa agrícola, 4 PYMEs de España y 1 centro de investigación griego. Cada uno de ellos, en función de su experiencia específica, participó de forma transversal en todas las fases del proyecto. Una de esas PYMEs era Baiwind (ver apartado 4.2.2), fabricante español de aerogeneradores de eje vertical, que aportó algunos de sus equipos a los demostradores.



Figura 10. Aerogeneradores de Baiwind en el proyecto LIFE COOP 2020 [40]

5.8 PROYECTO HY-POWERBOX

El proyecto *New Hybrid Autonomous Power Supply system for the energy independence of isolated off-grid sites (HY-POWERBOX)* fue aprobado en la llamada Eurostars Cut-Off 3, dentro del tema Tecnología Energética, de la red Eurostars 2. El objetivo del proyecto era desarrollar una nueva fuente de alimentación autónoma para aplicaciones aisladas fuera de la red, como casas y pequeños emplazamientos profesionales. La nueva solución se basaba en el uso combinado de fuentes de energía naturales (es decir, el sol, el viento y el agua) y pilas de combustible. El nuevo producto se desarrolló hasta llegar a un prototipo de tamaño real que se probó sobre el terreno durante el proyecto en condiciones reales de funcionamiento para la aplicación seleccionada de cabañas de pastores de montaña. El proyecto se desarrolló entre 2015 y 2018 y los socios del proyecto fueron: SIREA Industrie (Francia), Coordinador; FLEXIVA automation & Robotik GmbH (Alemania) y Baiwind S.L. (España), quien aportaba sus aerogeneradores de eje vertical para los demostradores [41].

5.9 RED CYTED REGEDIS

En el marco del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo CYTED, se aprobó en 2017 la Red de Energía Eólica para Generación Distribuida en Entorno Urbano REGEDIS, que tiene como objetivos, conocer el recurso eólico disponible en espacios urbanos y periurbanos mediante la aplicación de la metodología, los procedimientos y los modelos existentes en la

actualidad, conocer la tecnología eólica de pequeña potencia existente para generación distribuida, especialmente aquella optimizada para su utilización en entornos urbanizados, identificar las adaptaciones necesarias para el diseño de aerogeneradores para generación distribuida en entornos urbanizados, conocer el impacto de la generación eólica distribuida en las redes eléctricas urbanas, conocer las metodologías y requerimientos existentes para garantizar la calidad de los datos de recurso eólico, de la tecnología de aerogeneradores, de la energía producida, de la instalación y de la operación y mantenimiento, conocer el marco legal (regulación para obtención de permisos, esquemas de apoyo) que existe en los países participantes para la generación eólica distribuida, conocer casos de éxito de sistemas con aerogeneradores eólicos, conocer instrumentación útil y a coste competitivo para facilitar la evaluación de sistemas de generación eólica distribuida y por último intercambiar entre los expertos de los distintos países participantes en la Red, la experiencia adquirida [36].

Los participantes en la red son 22 centros de investigación/universidades de 13 países distintos. La participación industrial se ha limitado a 5 fabricantes. Por países las entidades participantes son:

- En España y como coordinador de la red, el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas).
- En Argentina, el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), el LADIFA FAIN UNCO Laboratorio de dinámica de fluidos ambientales – Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Comahue, el ITA UNPA Instituto de Tecnología Aplicada de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral, el UTN FRN, UTN FRH Facultad Regional de Neuquén y Haedo Universidad Tecnológica Nacional, y el OES UTN–FRRO Observatorio de Energía y Sostenibilidad – Facultad Regional Rosario -Universidad Tecnológica Nacional.
- En México, el CIATEQ A.C Centro de Tecnología Avanzada, el INEEL (Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias) y la UNITSMO (Universidad del Istmo).
- En Portugal, el LNEG (Laboratorio Nacional de Energía y Geología).
- En Brasil, el CER-UFPE (Centro de Energías Renováveis da Universidade Federal de Pernambuco).
- En Chile, el CERE-UMAG (Centro de estudio de recursos energéticos de la Universidad de Magallanes).
- En Colombia la UPB (Universidad Pontificia Bolivariana) y la Universidad EIA.
- En Cuba, el CETER/CUJAE (Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría) y la UCLV (Universidad Central de Las Villas).
- En El Salvador, la UDB (Universidad Don Bosco).

- En Uruguay, el FING-UDELAR de la Facultad de Ingeniería – Universidad de la República.
- En Panamá, la UTP (Universidad Tecnológica de Panamá).
- En Perú, la PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú).
- En República Dominicana, el INTEC (Instituto Tecnológico de Santo Domingo)
- En Ecuador, la UTPL (Universidad Técnica Particular de Loja).
- Entre los fabricantes, se encuentran tres empresas argentinas Giacobonne – Eolux, Tecnotrol SRL, Eolocal, Electromecanica Bottino Hnos. y una empresa española Baiwind S.L.

En esta red que ha estado financiada desde 2018 hasta 2022, se cumplieron con éxito gran parte de los objetivos propuestos, al lograr desarrollar conjuntamente procedimientos de evaluación del recurso eólico en entorno urbano mediante modelos numéricos abiertos y modelos físicos mediante túnel de viento que se compararon con herramientas comerciales existentes (WindSim, WASP). Se aprovecharon estos modelos para evaluar la capacidad de potencia minieólica que se podría desplegar en ciudades y entornos urbanos. Se desarrollaron metodologías de diseño, fabricación y ensayo de componentes de aerogeneradores (palas, generador eléctrico, convertidores de potencia) tanto de eje horizontal como vertical. Se presentaron dimensionados de sistemas reales con disposición de datos. Se desarrollaron procedimientos para garantizar la calidad de la tecnología eólica distribuida, se identificaron regulaciones aplicadas en algunos de los países en relación a esta tecnología y se intercambiaron desarrollos de instrumentación y software para evaluación de aerogeneradores y sistemas con técnicas de coste competitivo que permitan desarrollar medidas de calidad en cualquier país del área latinoamericana, sin que el coste sea una barrera.

Como consecuencia de la red se realizaron tres Jornadas científico/tecnológicas, múltiples talleres de trabajo y se publicaron varios artículos conjuntamente entre miembros de la red.

5.10 PROYECTOS DESARROLLADOS POR LA DIPUTACIÓN DE HUELVA

El Departamento de Energías Renovables de la Diputación de Huelva, junto con la Agencia de la Energía de Huelva, se encarga de fomentar a nivel provincial el ahorro energético y la aplicación de tecnologías de energía renovable y participa activamente en varios proyectos europeos relacionados con la energía. En particular, participó en estos tres proyectos relacionados con la tecnología mini-eólica:

- **Rural – RES:** Fue el coordinador de Rural-RES, un proyecto del Programa de Energía Inteligente para Europa, IEE/07/797/SI2.499715, que tuvo como objeto promover el desarrollo sostenible en las regiones montañosas y rurales de la Unión Europea mediante la promoción de la utilización de sistemas de energía renovable de pequeña escala a medida de los territorios. Como resultados de este proyecto, se elaboró una Guía de buenas prácticas Mini-Eólicas [33].

- **Proyecto WICO (Wind of the Coast):** coordinado por la Diputación de Huelva, WICO fue un proyecto financiado por Europa que estudió las iniciativas de energía renovable costera eólica a pequeña escala. El objetivo principal del proyecto WICO era compartir conocimientos y experiencias para el despliegue de sistemas de energía eólica de pequeño tamaño a lo largo de las costas. Las zonas costeras ofrecen una amplia gama de oportunidades para producir energía renovable derivada del viento, las corrientes y las mareas. Los socios del proyecto WICO identificaron los sistemas eólicos pequeños como una tecnología adecuada para su integración a lo largo de la costa para explotar la presencia de vientos terrestres y marinos. El proyecto WICO elaboró unas directrices que serían funcionales y estarían diseñadas para facilitar el desarrollo de políticas que permitieran un despliegue más rápido y amplio de los sistemas de energía renovable a pequeña escala. Por lo tanto, el compromiso con los responsables políticos y las organizaciones con responsabilidades de planificación era importante para el proyecto. El proyecto desarrollaba una herramienta transferible que permita compartir tanto la información técnica sobre los sistemas de nueva generación como los conocimientos necesarios para superar las barreras que impiden un uso más amplio de esta tecnología, incluidas las políticas, la viabilidad económica, los incentivos financieros, la concienciación, etc. El proyecto estuvo financiado por el programa Interreg IVC Atlantic Area POWER. Marine South East estuvo trabajando con socios de Italia y España para identificar y desarrollar las mejores prácticas en el sector público para promover el despliegue exitoso de esquemas de energía renovable a gran escala con el fin de maximizar el beneficio para la economía regional, el medio ambiente y la sociedad. El proyecto WICO se desarrolló entre 2009 y 2011 [34].
- **Proyecto Poptep Retaler II:** forma parte del Programa de Cooperación Transfronteriza España-Portugal 2007-2013 impulsado por la Unión Europea. Dentro de las iniciativas incluidas en este proyecto, estaba la instalación de dos aerogeneradores de minieólica de 1,5 kW (Enair 30) de potencia nominal y eje de giro horizontal, en los municipios de El Almendro y Santa Bárbara, cofinanciado al 75% mediante fondos FEDER [35].

6 CENTROS DE I+D / UNIVERSIDADES

En este apartado se presentan algunas de las actividades desarrolladas por diferentes centros de investigación y universidades en el área de los aerogeneradores de pequeña potencia. Estas actividades incluyen desde el desarrollo de plantas de ensayo (como la del CIEMAT o la de la empresa Barlovento Recursos Naturales) hasta las actividades de investigación realizadas en algunos departamentos universitarios.

6.1 CIEMAT- CEDER

EL Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER), perteneciente al Departamento de Energía del CIEMAT lleva casi 25 años desarrollando proyectos de desarrollo de la tecnología en el ámbito de los sistemas de generación de energía eólica en operación aislada de la red eléctrica y en entornos de redes débiles, incluyendo sistemas que faciliten su integración frente a fluctuaciones y nuevos sistemas de almacenamiento de energía. Además, se han realizado ensayos de pequeños aerogeneradores en laboratorio con procedimientos desarrollados de acuerdo a las normas internacionales, para poder mejorar la tecnología, los productos y el mercado de pequeños aerogeneradores.

El CEDER-CIEMAT posee diversas infraestructuras para poder desarrollar estos trabajos, como las que se describen a continuación:

- **Plantas de Ensayo de Pequeños Aerogeneradores:** la Unidad de Eólica en el CEDER-CIEMAT cuenta con 5 localizaciones, con capacidad para 15 puestos de ensayo, para la realización de ensayos de aerogeneradores de pequeña potencia en campo, que permiten realizar todas las medidas exigidas por las diferentes normas de ensayo. Tres de estos puestos de ensayo están situados bajo condiciones de fuerte viento (clase I/II según la norma IEC 61400-2 [2]). También cuenta con un edificio que se emplea como laboratorio de ensayo de componentes de aerogeneradores, con instalaciones para el ensayo de palas y generadores eléctricos, y que permite montar aerogeneradores de pequeña potencia en su cubierta para su estudio en entornos urbanos (semi-urbanos).



Figura 11. Planta de Ensayos de Pequeños Aerogeneradores nº 5 (PEPA V), en Soria (Fuente: CIEMAT)

- **Laboratorio de ensayos eólicos LE2.** Los procedimientos del laboratorio, siguen los preceptos de la norma ISO 17025 sobre los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración, para realizar los ensayos de curva de potencia de aerogeneradores según la norma UNE/EN 61400-12-1, los ensayos de emisión de ruido acústico según la norma 61400-11 y los ensayos de duración y seguridad y funcionamiento según la norma 61400-2. El objetivo del Laboratorio de Ensayos Eólicos (LE2) es poder certificar completamente aerogeneradores de pequeña potencia a fin de conseguir una mayor calidad y seguridad de los productos que se comercialicen, tanto a nivel nacional como internacional.
- **Banco de Ensayo de Palas.** Permite realizar diversos ensayos estructurales de palas (propiedades, estáticos y fatiga) hasta 11 metros de longitud, siguiendo las directrices de las normas IEC TS 61400-23 e IEC 61400-2 [2]. Los ensayos de palas a escala real suministran información para optimizar y validar los diseños de los fabricantes, y la realización de algunos de estos ensayos es un requerimiento para obtener la certificación del aerogenerador.
- **Banco de Ensayo de Generadores Eléctricos.** Está compuesto por dos bancos de ensayos de generadores eléctricos, uno con capacidad para ensayar generadores de hasta 10 kW de potencia con velocidades de giro de hasta 3000 rpm y otro de hasta 120 kW y varios rangos de velocidades de rotación gracias a una multiplicadora multi-etapa. Los ensayos se realizan según lo establecido en la norma IEC-60034.

6.2 BARLOVENTO RECURSOS NATURALES



Figura 12. Laboratorio de Ensayo de Pequeños Aerogeneradores de Barlovento [42]

Barlovento cuenta con un Laboratorio de Ensayo de Pequeños Aerogeneradores a disposición de sus clientes, donde llevar a cabo los ensayos y actividades relacionadas con esta tecnología. Dicho emplazamiento permite el ensayo de aerogeneradores Clase I, según IEC 61400-2. Barlovento está acreditado según ISO-EN 17025 para la realización de los ensayos de certificación de pequeños aerogeneradores conforme a las normativas internacionales [42]:

- IEC 61400-2: Wind turbines – Part 2: Design requirements for small wind turbines.

- AWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard
- British Wind Energy Association Small Wind Turbine Performance and Safety Standard

Dentro de los ensayos que Barlovento ofrece se encuentran:

- Safety & Function test: verificación de las condiciones de funcionamiento del aerogenerador así como de los sistemas de control que posibilitan un funcionamiento fiable y seguro.
- Ensayo de Curva de Potencia: verificación de curva de potencia y rendimiento del aerogenerador.
- Ensayo de Ruido Acústico: verificación del funcionamiento del aerogenerador en cuanto a generación y análisis de ruido acústico.
- Ensayo de Duración: verificación del funcionamiento del aerogenerador durante un período mínimo de seis meses en todo el rango de condiciones de funcionamiento, de cara al aseguramiento del funcionamiento del mismo en el largo plazo.

6.3 FUNDACIÓN CIRCE

La fundación CIRCE se creó en la Universidad de Zaragoza en 1993 con el objetivo de trabajar en el desarrollo de energías renovables y desarrollo sostenible. La fundación CIRCE ha tenido siempre un papel importante en el desarrollo de la energía eólica en España, participando en numerosos proyectos de diseño, medida y ensayo de aerogeneradores y de parques eólicos.

Uno de sus laboratorios, el LME (Laboratorio de Mediciones Eléctricas) está acreditado por ENAC para el ensayo de curva de potencia según la norma IEC 61400-12-1 y para el ensayo de duración según la norma IEC 61400-2 [2].

6.4 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

El Departamento de vehículos espaciales de la ETSIA de la UPM, desarrolló desde 2020, el proyecto zEPHYR financiado mediante el programa H2020 Marie Skłodowska-Curie. Se trata de un procedimiento de generación de representaciones espectrales de los campos de viento urbano a partir de LES y bases de datos experimentales para simulaciones aeroelásticas de aerogeneradores. Este proyecto persigue una explotación más eficiente de los recursos terrestres en general y de los recursos de energía eólica urbana en particular.

6.5 UNIVERSIDAD DE OVIEDO

El grupo FERES (*Fluids Engineering for Renewable Energy & Sustainability*) del Área de Mecánica de Fluidos, viene desarrollando desde 2016 diferentes actividades de I+D en la temática de turbinas eólicas de eje vertical como mostramos en los esquemas de la Figura 13.



Figura 13. Actividades del grupo FERES, en la Universidad de Oviedo [43]

Entre los trabajos desarrollados en el marco del proyecto “Desarrollo y construcción de turbinas eólicas de eje vertical para entornos urbanos (DEVTURB)” [43], ref. ENE 2017-89965, en el que destaca el desarrollo y aplicación de una metodología innovadora para el ensayo de prototipos a escala, de turbinas eólicas de eje vertical, en túneles de viento. Dicha metodología presenta ventajas relevantes frente a las convencionales, siendo capaz de obtener una profunda caracterización, y un gran número de puntos, sin incurrir en largos tiempos de ensayo. Además, los costes de infraestructura e instrumentación son moderados, gracias a la utilización de un elemento activo que permite solucionar los problemas derivados de la escala, no necesitándose instrumentos de medida de alto coste como pueden ser, los torquímetros. Los resultados obtenidos demuestran la utilidad de esta metodología para la validación de modelos analíticos y CFD y resulta especialmente interesante porque permite aislar los efectos de elementos secundarios, como la estructura o los brazos del rotor vertical. Asimismo, los resultados obtenidos coinciden con los resultados previsibles para una turbina de estas características y concuerdan con las referencias bibliográficas, permitiendo validar la metodología desarrollada. Resultados aún más fiables se podrían obtener si los coeficientes de arrastre fueran determinados experimentalmente, en lugar de ser extrapolados a partir de los encontrados en la bibliografía. También podría resultar interesante el desarrollo de algún tipo de corrección por el efecto de bloqueo para turbinas de eje vertical, debido a la configuración cerrada del ensayo y su posterior aplicación a los resultados presentados.

6.6 UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

Los investigadores del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cádiz desarrollaron, en 2018, un prototipo de aerogenerador de eje vertical que está instalado en el Laboratorio de Energías Renovables de la Escuela Superior de Ingeniería en el Campus de Puerto Real. El proyecto fue desarrollado mediante un contrato con la empresa Ventum S. L. y tuvo como objetivo su optimización para posterior aplicación en autoconsumo urbano y en el medio marino. El prototipo pesa alrededor de 600 kilogramos, con una estructura de acero y palas de aluminio, con una potencia nominal de 3,5 kW.

Se realizó la medición de la curva de producción de la máquina conectada a la red. Se realizó el diseño y ensayo del generador eléctrico. Posteriormente, se realizaría un proyecto de mejora que incluiría técnicas para incrementar su potencia, la sustitución de materiales metálicos por

compuestos, para aligerar y proteger su exterior en el caso de su instalación en entorno marino y la reducción de ruidos y vibraciones para su uso tanto en ciudades, como en el mar (offshore).

7 TENDENCIAS EN LA I+D

Los primeros desarrollos considerados propiamente como tecnología eólica de pequeña potencia eran aeroturbinas utilizadas para producir electricidad en lugares ventosos y remotos, razón esta última por la que no solían disponer de red eléctrica convencional. Este tipo de aeroturbinas se caracterizan por producir solamente una pequeña cantidad de kWh al mes, pero esta aparentemente pequeña contribución energética puede suponer una de las pocas vías de disponer de energía en dichos lugares.

Con el tiempo, este tipo de aeroturbinas han evolucionado y su aplicación principal hoy en día es la aplicación conectada a red siguiendo estrategias, implementadas principalmente en países desarrollados, de microgeneración distribuida o autoconsumo. En este caso, su objetivo es reducir la demanda de energía a nivel doméstica, residencial o industrial operando en cierta manera como una vía activa de ahorro de energía directamente en el punto de consumo.

Las estrategias energéticas hoy en día se basan principalmente en garantizar el suministro reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y ese objetivo se puede alcanzar mediante el uso de sistemas de generación basados en energías sostenibles como son las energías renovables y otras tecnologías que permitan evitar dichas emisiones, pero una de las estrategias más competitivas para alcanzar dichos objetivos son todas aquellas estrategias enfocadas al ahorro energético y este se puede obtener mediante el aumento de la eficiencia en el consumo de energía y mediante el aprovechamiento de todos los recursos que estén a nuestro alcance a través de sistemas de conversión modulares adaptables a la demanda de energía existente.

Es por esta razón que todas las estrategias enfocadas a la autogeneración al menos de pequeña potencia deberían ser potenciadas.

Por último, reseñar que la tecnología eólica de pequeña potencia ha evolucionado desde la aplicación rural aislada a la aplicación conectada a red, e incluso ha entrado en emplazamientos semiurbanos y residenciales e incluso urbanos para lo cual se ha desarrollado nueva tecnología de eje horizontal y sobre todo de eje vertical. La tecnología de aerogeneradores de eje vertical de pequeña potencia ha presentado una evolución al alza en los últimos años debido a sus ventajas para integración en entorno urbano (son más silenciosos y no necesitan orientarse). En la tecnología de aerogeneradores de eje vertical hay desarrollos tipo Savonius basados en arrastre y Darrieus basados en sustentación e híbridos que aprovechan las ventajas de ambos (HiVAWT o Kliux). Los aerogeneradores tipo Darrieus presentan además una mayor eficiencia en la conversión y existen varios tipos atendiendo al rotor: Los hay tipo *egg-beater* con palas curvas (ArborWind), tipo giromill o H con palas de perfil constante (Ropatec, Aeolos, Technowind o Windspire) o con palas helicoidales torsionadas tipo Gorlov (Aerogenerador Turby diseñado en la Universidad de Delft (Holanda), el aerogenerador Quiet Revolution QR6 de origen inglés, el norteamericano Urban Green Energy UGE ahora VisionAIR o Energy Wind Solutions EWI).

Respecto a las tendencias relativas a la I+D en los componentes utilizados en esta tecnología se observan mejoras en sistemas que se indican a continuación

7.1 PALAS

Una turbina tripala girará más suavemente que una de dos palas y por lo tanto su vida útil será mayor. Además, una turbina tripala logrará girar para velocidades de viento menores. También hay aerogeneradores de cuatro palas (Venus Inventus, ahora Easy Wind) pero pocos y para pequeñas potencias (microeólica) por debajo de 1 kW. Hay aeroturbinas de 5 y 6 palas o incluso más, que arrancan con una suave brisa (el aerogenerador español Bornay Bee 600 o los Rutland Windcharger de la inglesa Marlec).

En cualquier caso, la potencia extraída por la aeroturbina no dependerá del número de palas, dependerá de la bondad de su diseño y principalmente, del área barrida por las palas. Como conclusión, decir que el mejor rendimiento se alcanza con tres palas.

Hay algunos aerogeneradores de pequeña potencia que para limitar la emisión de ruido acústico y mejorar en términos de seguridad, disponen de un rotor carenado (el inglés Swift Wind Turbine de Renewable Devices), o con difusor aumentador (las norteamericanas Ducted Wind Turbines, Ogin, Enflo Windtec o Flodesign, la holandesa Donqi Urban Wind Turbine, etc) en cuyo caso aumentan levemente la eficiencia gracias al diseño del difusor siguiendo el principio de Bernouilli, por el cual se aprovecha la generación de vórtices en el borde de salida del difusor causando una aportación de momento de giro a la estela del rotor, reduciéndose la presión a la salida del difusor, por lo que consecuentemente aumenta la potencia entregada.

Los materiales utilizados para fabricar las palas fueron en un principio madera, tela, acero o aluminio, este último abandonado por sus malas propiedades frente a fatiga y han evolucionado hacia los materiales compuestos ligeros fabricados con resina epoxi reforzada con madera, poliamidas como el nylon o fibras de vidrio, fibra de carbono o ambos. Además de los materiales estructurales de la pala hay zonas en las que hay que rellenar los huecos para lo que se utilizan materiales muy ligeros y baratos como espuma de PVC o madera de balsa.

En cuanto al procedimiento de fabricación, la mayoría de las palas se fabrican mediante métodos artesanales. Normalmente los métodos son el posicionamiento manual de fibra en un molde, en el cual posteriormente se inyecta la resina con bolsas de vacío y finalmente se cura a temperatura controlada. Una vez curada, se desmoldea la pala y se lija para quitar las irregularidades y se aplica un revestimiento anti-radiación ultravioleta y anti-erosión normalmente en el borde de ataque (*gelcoat*). Este método da lugar a un acabado muy disperso y al ser intensivo en mano de obra el coste de producción es alto. Por el contrario, al disponer de un molde se pueden hacer perfiles más complejos. El otro método más utilizado es el de pultrusión de material plástico. Mediante este proceso se obtiene un buen acabado superficial con un coste de producción bajo, pero los perfiles tienen que ser simples, normalmente de sección constante.

Las palas se acoplan al eje mediante un buje o cubo, a través del cual transmiten el momento de giro. Este buje o cubo debe ser resistente y simple. Normalmente está fabricado en acero. El acoplamiento se hace mediante tornillos, en los que hay que vigilar que el hueco de paso en la pala disponga de casquillos ya que la fibra acaba cediendo.

Hay aerogeneradores con las palas acopladas al buje para un ángulo de paso fijo. En este caso las palas son más robustas y disponen de una mayor torsión para facilitar el arranque de la turbina. (Aerogeneradores como el español Windera, el norteamericano Xzeres Wind Skystream o el japonés Airdolphin de Zephyr Corp). Estos aerogeneradores normalmente están conectados a red a través de un convertidor que permite hacer que la entrada en pérdida sea activa variando las vueltas de giro del rotor.

Hay también aerogeneradores en los cuales el sistema pasivo de cambio del ángulo de paso de las palas está integrado en el buje, normalmente los sistemas accionados por la fuerza centrífuga sobre una masa (como los aerogeneradores españoles Windspot ya extinguido o Enair: ahora Ryse Energy), el sudafricano Kestrel Wind Turbines, los franceses Eoltec y Vergnet o el inglés Evance: ahora Britwind) que están ajustados en función de la velocidad de rotación del rotor. Este sistema de cambio de paso permite al rotor limitar la velocidad de rotación frente a situaciones de alta velocidad de viento o ráfagas, pero continuar produciendo potencia en el entorno de su valor nominal. Una característica importante es, que todas las palas cambien su ángulo de paso a la vez evitando desequilibrios dinámicos que pueden fatigar estructuralmente al aerogenerador.

Normalmente, todos los aerogeneradores de pequeña potencia tienen una pieza cónica o semiesférica fabricada en fibra de vidrio que hace de tapacubo o buje o también llamada nariz. Es conveniente que su diseño sea adecuadamente aerodinámico.

La mayoría de los aerogeneradores de pequeña potencia no disponen del denominado tren de potencia, ya que normalmente el buje o cubo está acoplado directamente al generador eléctrico, que normalmente es un generador síncrono de imanes permanentes. Hay algún modelo de aerogenerador de pequeña potencia con generador asíncrono de rotor cortocircuitado o también denominado de rotor de jaula de ardilla (el escocés Gaia wind: ahora Ryse Energy, el alemán Easy wind, el francés Vergnet, el australiano Aerogenesis, el danés THY Mollen, etc), pero no son muchos ya que al no poder diseñarse con un número de polos lo suficientemente grande para reducir su velocidad de sincronismo a la velocidad adecuada para el rotor, se requiere de una transmisión o caja multiplicadora que complica en cierta manera el mantenimiento y aumenta el peso.

7.2 TRANSMISIÓN

Hay muy pocos aerogeneradores de pequeña potencia que dispongan de generador tipo asíncrono o de inducción (Gaia Wind de 10 kW: ahora Ryse Energy, el Easy Wind de 6 kW, los antiguos Vergnet de 10 kW, el prototipo Aerosmart5, el Aerogenesis de 5 kW o el Thy Mollen de 10 kW, etc.) pero los que hay requieren de una transmisión mecánica o también denominada caja multiplicadora.

Esta transmisión en pequeños aerogeneradores suele ser de ejes paralelos de una o dos etapas y con una relación de transmisión de entre 1:8 y 1:12 para pasar de 100-200 rpm en el rotor de la turbina a 1000 o 1500 rpm en el rotor del generador asíncrono.

7.3 GENERADOR

Los aerogeneradores con generador asíncrono o de inducción deben de estar siempre conectados a la red o a una fuente de potencia reactiva que sirva de excitación. La velocidad de rotación del aerogenerador en este caso es casi constante una vez conectado este a la red eléctrica y será proporcional a la frecuencia de la señal de la red y al número de polos del generador. Es muy común que dispongan de generadores con conmutación de polos pudiendo operar a dos velocidades de rotación.

Por el contrario, el generador síncrono, normalmente dispone de excitación propia mediante electroimanes o imanes permanentes, lo que hace que pueda operar aislado de la red fácilmente, variando su velocidad de rotación, normalmente aumentando con la velocidad de viento. Al variar la velocidad de rotación, variara la frecuencia de la señal alterna de salida, por lo que este aerogenerador dispondrá de un rectificador o convertidor alterna continua conectado a la salida del generador eléctrico para poder obtener tensión continua y después incluirá un regulador-cargador de baterías en el caso de opere aislado de la red eléctrica o un convertidor continua alterna o inversor en caso de operar conectado a la red eléctrica. Este generador tendrá una velocidad de sincronismo menor que el generador asíncrono, debido a su mayor número de polos, por lo que se no hace falta ningún dispositivo que adapte la relación par-velocidad del rotor y del generador, simplificando su diseño al no requerir de transmisión o caja multiplicadora.

7.4 CONTROL

En la regulación de los aerogeneradores de pequeña potencia se puede distinguir entre la regulación de potencia que comienza cuando la velocidad del viento hace que el aerogenerador alcance su potencia nominal en la salida, la cual no debe superarse y que por lo tanto evita situaciones de sobrevelocidad y la regulación de velocidad de rotación que se realiza cuando el aerogenerador está operando a potencia parcial, por debajo de su potencia nominal. Hay algunos aerogeneradores de muy pequeña potencia (< 100 W) que incluso se diseñan sin sistema de regulación de potencia como los Marlec de origen británico muy utilizados en barcos veleros para carga de baterías en puerto o el Bee 600 de Bornay.

Normalmente la regulación de potencia se logra mediante el propio diseño de las palas o actuando de forma pasiva sobre el ángulo de las palas o sobre el plano del rotor. El sistema de regulación de potencia también sirve obviamente también para proteger al aerogenerador de situaciones de sobrevelocidad de giro protegiéndolo en caso de situaciones de velocidades de viento extremas o desconexiones de la red o de la carga.

Las técnicas más aplicadas son las siguientes:

- Regulación por entrada en pérdida aerodinámica (en inglés Stall) Este sistema de regulación permite mediante el adecuado diseño de las palas que actúe de inmediato a partir de una cierta velocidad del viento y velocidad de rotación del rotor. El ángulo de ataque de la pala aumenta al aumentar la velocidad de viento ya que una mayor velocidad de viento provoca el aumento de velocidad de rotación del rotor. Y entonces se produce el paso de régimen laminar a turbulento progresivamente desde la punta de la pala hacia la raíz. Esta técnica produce un aumento equivalente del área barrida por el rotor, lo cual produce un aumento de la fuerza de arrastre normal. Esta solución es muy fiable ya que no requiere de partes móviles o mecanismos. La regulación por entrada en pérdida se utiliza normalmente en aerogeneradores de velocidad de rotación cuasi fija, por ejemplo con generadores asíncronos conectados a la red eléctrica directamente (por ejemplo el aerogenerador británico Gaia Wind de 11 kW o el holandés WES Tulipo de 2.5 kW, aunque también se puede utilizar con aerogeneradores con control de velocidad y por lo tanto operando a velocidad variable y en este caso normalmente la regulación se denomina por pérdida activa, ya que se puede producir la entrada en pérdida aerodinámica aumentando o disminuyendo la velocidad de rotación mediante el control del par del generador realizado electrónicamente (el español Winder de 4 kW fabricado por Ennera, el aerogenerador norteamericano fabricado por la empresa Zzeres Corp denominado Skystream 3.7, el español Vento 5000 de 5 kW fabricado en su día por la extinguida Windeco, el pequeño aerogenerador japonés Airdolphin de 1 kW de la empresa Zephyr o el nuevo aerogenerador de 15 kW de la norteamericana Bergey Windpower Co, el Excell 15). Cuando la pala entra en pérdida se producen vibraciones con lo que se obtiene un incremento del ruido acústico. Con este sistema de regulación hace falta algún sistema de protección contra sobrevelocidad que se logra mediante la combinación de varios sistemas como desorientación, control de par mediante el convertidor electrónico o en los aerogeneradores algo más grandes y de velocidad de rotación casi fija (AOC 15/50) mediante el uso de aerofrenos. Los aerofrenos son un sistema de cambio de paso de la sección de punta de cada pala, que se despliega cuando la velocidad de rotación supera un determinado valor, situándose en un ángulo de paso muy ineficiente para aportar momento de giro al rotor y provocando la reducción de la velocidad de rotación del mismo inmediatamente, protegiéndolo. Una vez superado el evento, la posición original del aerofreno se puede recuperar mediante un sencillo electroimán accionado desde el control, lo cual permitirá al aerogenerador continuar produciendo en condiciones normales.
- Regulación por cambio del ángulo de paso de la pala (en inglés Pitch): Este tipo de regulación aumenta mediante un accionamiento mecánico, hidráulico o eléctrico el ángulo de paso de la pala a partir de una determinada velocidad de viento lo que provoca una cierta reducción de la velocidad de rotación. Estos sistemas que en pequeños aerogeneradores normalmente son pasivos están basados en contrapesos con muelles que voltean progresivamente la pala según la velocidad de rotación aumenta ya que a la vez aumenta la fuerza centrífuga ejercida sobre la masa o contrapeso. Si el sistema está correctamente diseñado, esta solución es la mejor para extraer la máxima potencia para valores de velocidad de viento por encima de la nominal. Es importante conseguir que todas las palas modifiquen su ángulo de forma sincronizada para

evitar desequilibrios dinámicos en el rotor que podrían dañarlo. Esta solución facilita el arranque a bajos vientos ya que el diseño y la posición de las palas es adecuado para ello, aumentando el ángulo progresivamente de manera que mantiene la velocidad de rotación de la turbina óptima para cada velocidad e viento. El inconveniente es la dificultad de fabricación y la fiabilidad del sistema. En aerogeneradores de pequeña potencia esta tecnología ha sido utilizada por varios tecnólogos como los antiguos windchargers en Estados Unidos o los pequeños aerogeneradores franceses de Aerowat, los también franceses Vergnet ya descatalogados. Hoy en día, existen varios modelos de aerogeneradores en el mercado con este sistema como los aerogeneradores españoles Enair de 3, 5 y 10 kW (ahora Ryse Energy) o los británicos Evance R9000 de 5 kW (ahora Britwind). Por último, hay algún fabricante con aerogeneradores con cambio del ángulo de paso de la pala activo, mediante accionamiento eléctrico como el italiano Tozzi Nord con sus modelos de 10 y 20 kW. Este sistema de regulación permite diseñar de forma más liviana al aliviar cargas, lo que se traduce en una reducción del coste de la torre y del rotor.

- Regulación por desorientación o plegado del rotor (en inglés furling). Se trata de sacar el rotor del plano en el que es perpendicular al flujo de viento, logrando que se reduzca la superficie expuesta del rotor, haciendo que la potencia extraída se mantenga o reduzca con velocidades de viento crecientes. El plegado o desorientación opera reduciendo el ángulo de ataque, lo cual reduce la resistencia inducida de la sustentación del rotor, así como la superficie total barrida por el rotor. Una de las mayores dificultades para el diseñador es obtener sistemas de plegado lo suficientemente rápidos como para filtrar ráfagas súbitas de viento evitando que la turbina se acelere. Una aeroturbina totalmente plegada o desorientada tiene el borde de la pala frente al viento. El plegado o la desorientación puede producirse con respecto al eje vertical o sea desorientación lateral que puede ser solo del rotor (plegado de rotor) o del conjunto rotor y generador (plegado de cola). Ejemplos de aerogeneradores con sistema de regulación por desorientación o plegado lateral hay varios como el aerogenerador de origen norteamericano Bergey de 1 y 10 kW o los aerogeneradores holandeses de Fortis Wind Energy, en el caso de desorientación con respecto al eje horizontal hay también dos tipos, cabeceo en el que solo se inclina el rotor y el generador como por ejemplo el aerogenerador Whisper, o el Windstream o inclinándose hacia arriba todo el conjunto rotor más generador más timón de cola como por ejemplo los aerogeneradores españoles de la serie Inclín fabricados por Bornay. Por último, hay un sistema de plegado por conicidad en el rotor tiene que estar a sotavento de la torre para que las palas puedan plegarse reduciendo el área útil del rotor. Este sistema requiere de un buje articulado mediante muelles que fuerzan a las palas a su posición original una vez que la velocidad del viento ha bajado. Este sistema fue utilizado por la extinta empresa escocesa Proven y ahora lo comercializa la empresa irlandesa SD Wind Energy. Como ya se ha comentado, todos los sistemas de plegado, cuando la velocidad de viento baja disponen de la solución para volver a la posición original en la cual el plano del rotor está correctamente alineado con la dirección del viento. Lo consiguen mediante muelles en el caso de los plegados verticales y cónicos y mediante equilibrio de masas en los horizontales. Estos sistemas también se pueden accionar manualmente

utilizándolos en este caso de sistema de frenado. Una característica intrínseca a estos sistemas de regulación y protección es que suelen ser ruidosos cuando entran en acción, pero hay que tener en cuenta que suelen ser situaciones de alto viento en cuyo caso el ruido producido por el aerogenerador se camufla con el ruido de fondo debido al propio viento. Este sistema de regulación permite diseñar de forma más liviana al aliviar cargas lo que se traduce en una reducción del coste de la torre y del rotor.

Para lograr el frenado de la turbina en caso de falta de carga ya sea por estar la batería totalmente cargada en sistemas aislado o por falta de red eléctrica, hay varias técnicas como por ejemplo el disponer de contrapesos cerca de la punta de la pala (ver aerogeneradores Bergey Excell 10 o los distintos aerogeneradores Velter de Solenersa) que produzcan la torsión de las secciones en torno a la punta de la pala a velocidades altas de viento y por tanto reduzcan la velocidad de rotación de rotor, recuperándose la posición original cuando esta velocidad de rotación se reduce al reducirse la fuerza centrífuga. También se puede utilizar resistencias eléctricas de volcado o disipación a las cuales se puede derivar la energía convertida por la turbina en situaciones de velocidad de viento alta y no disponer donde inyectarla por ejemplo en caso de baterías cargadas en sistemas aislados de red o en caso de falta de red en aerogeneradores conectados a la red eléctrica. Una potencial optimización es en vez de disipar esta energía conviviéndola en energía térmica para calentar el aire utilizarla para algo útil como calentar agua en sistemas ACS.

No hay muy pocos aerogeneradores de pequeña potencia que dispongan de sistema de freno mecánico. La razón es la dificultad de alojarlo y de actuarlo. Para que un sistema de freno mecánico actuado eléctricamente sea a prueba de fallo tiene que estar permanentemente alimentado, para que en el momento que falle la red eléctrica por ejemplo este actúe y bloquee el rotor, pero el consumo por pequeña que sea la potencia, es alto al estar permanentemente consumiendo energía. En algunos países se exige este tipo de freno por lo que los fabricantes lo incluyen en sus diseños (Aircon 10 kW).

7.5 ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA

Los inversores o convertidores continua/alterna utilizados en los aerogeneradores de pequeña potencia normalmente son convertidores monofásicos que admiten un ancho rango de tensiones continuas de entrada, operan a alta frecuencia (disponen de IGBT) y su eficiencia es alta incluso a carga parcial (por encima del 96%).

El modelo de más éxito dispone de transformador de alta frecuencia que garantiza el aislamiento galvánico sin requerir de transformador convencional, que es muy pesado y voluminoso. Normalmente son configurables y se pueden adaptar a la mayoría de los códigos de red existentes.

La mayoría de los inversores permiten programar la curva de potencia de la aeroturbina, con alta precisión, de forma que se obtiene una alta productividad. Normalmente el inversor dispone de un programa de seguimiento de la curva de potencia. Disponen de capacidad de sobrecarga. Otros disponen de capacidad de programar la curva de potencia en forma polinómica.

La mayoría de los inversores disponen de capacidad de arranque suave. Algunos de ellos disponen de una caja de protección frente tensiones de entrada en continua excesivamente altas mediante la derivación una vez rectificadas de la corriente hacia una resistencia de disipación, mediante la cual, el aerogenerador reduce su velocidad de rotación, permitiendo seguir inyectando energía a la red eléctrica. El puente del inversor está protegido frente a sobretensiones puntuales mediante varistores.

La mayoría cumplen con la normativa de Compatibilidad electromagnética EMC (Según las normas EN 50178, AS/NZS3100, AS/NZS 60950, EN 61000-6-2, EN 61000-6-4, EN 61000-3-11, EN 61000-3-12) y con los códigos de red de ENEL en Italia, VDE 0126-1-1 en Alemania, AS4777 en Australia, G83/1 en Reino Unido, EN 50438 en Europa.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arribas L., García Barquero C., Cruz I., Avia F. El mercado de aerogeneradores de pequeña potencia en España. Informe técnico CIEMAT nº 1483, 2020.
- [2] Norma UNE-EN 61400-2 Página web de AENOR. Disponible en <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0054627> .
- [3] Página web de Bornay Aerogeneradores. Disponible en: <https://www.bornay.com/es/cms/idi-20151006>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [4] Página web del Instituto Interuniversitario de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico (IDM). Disponible en: <https://www.uv.es/uvweb/instituto-interuniversitario-investigacion-reconocimiento-molecular-desarrollo-tecnologico/es/investigacion-transferencia/contratos-empresas-1286069557991.html>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [5] Página web de Bornay Aerogeneradores. Disponible en: <https://www.bornay.com/es/cms/investigacion-desarrollo-innovacion>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [6] Bornay Rico D., Berbegal Pastor V. Dispositivo para regular el paso de las palas de un aerogenerador. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/WO2010034861A1/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [7] Página web de Enair. Enair Certificada por su I+ D. Disponible en: <https://www.enair.es/es/actualidad/noticia/enair-certificada-por-su-i-d>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [8] Página web de Enair. Certificación de los aerogeneradores Enair. Disponible en: <https://www.enair.es/es/actualidad/noticia/ciemat-soria-e800-e70pro> . Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [9] Página web de Enair. PROYECTO IMIDCA/2020/17. Disponible en: <https://www.enair.es/es/actualidad/noticia/desalacion-aerogenerador-osmosis-inversa>. Accedido el 10 de noviembre de 2022.
- [10] Navarro D. The sinuous way to small wind turbines' design and certification. 5th world Summit for Small Wind, Hussum (Alemania). 2014.
- [11] Palacio Argüelles J., Martín Fernández JI., Ausín Calvo JC. Pala de aerogenerador. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/ES2391016B1/es>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.

- [12] Aerogenerador Enerlim; Informe de la tecnología. Disponible en: <https://docplayer.es/12407410-Aerogenerador-enerlim-informe-de-la-tecnologia.html> .
Accedido el 10 de noviembre de 2022.
- [13] Disponible en: <https://zientzia.eus/artikuluak/haize-pres1/es/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [14] Baiwind. «Autoconsumo»: La Minieólica, un «pata» del Empoderamiento Energético. Bazkide Eguna 2018. Disponible en: <https://coop2020.eu/upload/file/presentacion-goienar-03-03-18-baiwind.pdf> . Accedido el 8 de noviembre de 2022.
- [15] Página web de Argolabe Ingeniería. Aerogenerador de 100 kW. Disponible en: <http://www.argolabe.es/aerogenerador-100kw.html> . Accedido el 8 de noviembre de 2022.
- [16] Disponible en: <https://www.elcorreo.com/alava/araba/201610/16/alava-cuenta-primera-bodega-20161016130515.html>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [17] 14Mendieta Echevarría F. Aerogenerador de eje vertical con bajo impacto visual. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/WO2015086872A1/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [18] Página web de ADES Tempero Group. I+D+I. Disponible en: <http://www.ades.tv/es/idi/proyectos/id/12>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [19] Página web de Norvento. Aerogeneradores de media potencia. Disponible en: <https://www.norvento.com/productos/aerogeneradores-de-media-potencia/>. Accedido el 8 de noviembre de 2022.
- [20] Disponible en: <https://www.pemade.com/ensayos-singulares> . Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [21] Disponible en: <https://www.energias-renovables.com/eolica/norvento-inaugura-en-galicia-el-primer-parque-20221010>. Accedido el 7 de noviembre de 2022.
- [22] Eguizabal Garcia JJ. Wind power machine. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/USD708136S1/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [23] Página web de Kliux. Disponible en: www.kliux.com/. Accedido el 8 de noviembre de 2022.
- [24] Eguizabal Garcia JJ, Cerezo Lotina JL. Vertical-axis wind rotor. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/US20200025169A1/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [25] Yañez Villarreal DJ. Aerogenerador resonante por vorticidad. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/WO2012017106A1/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.

- [26] Página web de CTC. Disponible en: <https://centrotecnologicoctc.com/2013/10/03/estudio-comportamiento-aerodinamico-turbina-del-aerogenerador-winspot-35-kw/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [27] Página web de ECOTICIAS.COM. Disponible en: <https://www.ecoticias.com/energias-renovables/51890-noticias-medio-ambiente-medioambiente-medioambiental-ambiental-contaminacion-climatico-calentamiento-ecologia-responsabilidad-rsc-eco-sostenible-co2-ingenieria-energias-renovables-eolica-geoterm>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [28] Forte Ortega J. Aerogenerador perfeccionado para aplicaciones de baja potencia. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/WO2004076854A1/es>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [29] Informes de la tarea 27 del Acuerdo Eólico de la Agencia Internacional de la Energía. Disponible en: <https://iea-wind.org/task27/>. Accedido el 7 de noviembre de 2022.
- [30] Página web de CIRCE. Proyecto SWIP. Disponible en: <https://www.fcirce.es/energias-renovables/swip>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [31] Página web del Proyecto SWIP. Disponible en: <http://swipproject.eu/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [32] Página web del Proyecto SWTOMP. Disponible en: <http://swtomp.ciemat.es/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [33] Rural-RES Project. Guía de buenas prácticas mini-eólicas. Disponible en: <http://lacc.diphuelva.es/galerias/docs/95.pdf>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [34] Página web del Proyecto WICO. Disponible en: <http://www.marinesoutheast.co.uk/wico/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [35] EnerAgem. Ficha de instalaciones de autoconsumo. Disponible en: <https://www.autoconsumoaldetalle.es/wp-content/uploads/2017/03/Ejemplo-MINI-EOLICA-HUELVA.pdf>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [36] Página web de la red REGEDIS, de CYTED. Disponible en: <https://www.cytmed.org/es/regedis>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [37] Final Report Summary - WINDUR (Small Wind Turbine for Urban Environments). FP7. CORDIS, European Commission. 2016. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/605067/reporting>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [38] Página web del Proyecto ECIWIND. Disponible en: <http://www.eciwind.enair.es/>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.

- [39] Página web del Proyecto NEW CONCEPT OF AFFORDABLE WIND ENERGY GENERATORS WITHOUT BLADES. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/726776> . Accedido el 8 de noviembre de 2022.
- [40] LIFE COOP2020: pilot for rural smart grids through optimization of energy use and innovative renewable biomass sources. Informe final. 2019. Disponible en: <https://coop2020.eu/upload/file/20180127-final-report-short.pdf> .
- [41] Página web de ERA-LEARN, Eurostars Cut-off 3. Disponible en: <https://www.era-learn.eu/network-information/networks/eurostars-2/eurostars-cut-off-3/new-hybrid-autonomous-power-supply-system-for-the-energy-independence-of-isolated-off-grid-sites>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [42] Página web de Barlovento Recursos. Disponible en: <https://www.barloventorecursos.com/es/destacados/ensayos-de-pequenos-aerogeneradores>. Accedido el 4 de noviembre de 2022.
- [43] Fernández JM. Grupo FERES, Universidad de Oviedo. Turbinas de eje VERTICAL (VAWT). Webinar sobre tecnologías disruptivas en el sector eólico. REOLTEC. 2022.
- [44] Santamaria Bertolin L., Velarde Suárez S. Desarrollo y aplicación de una metodología innovadora para el ensayo de prototipos a escala de turbinas eólicas de eje vertical en túneles de viento. Trabajo de Fin de Máster Universitario en Ingeniería Energética, de la Universidad de Oviedo. 2020. Disponible en: https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/56032/TFM_LuisSantamariaBertolin.pdf?sequence=6&isAllowed=y. Accedido el 7 de noviembre de 2022.

