VNiVERSiDAD D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA Y DEL TERRENO

TESIS DOCTORAL

Análisis e Integración de Instalaciones de Autoconsumo en Viviendas en la Península Ibérica y Europa

Enrique González González

2024

Título

Análisis e Integración de Instalaciones de Autoconsumo en Viviendas en la Península Ibérica y Europa.

Programa de Doctorado

Geotecnologías Aplicadas a la Construcción, Energía e Industria

(Artículo 6 del R.D. 99/2011 de 28 de enero)

Tesis doctoral desarrollada bajo la modalidad de compendio de artículos

Universidad de Salamanca

Autor:

Enrique González González

Directoras:

Dra. Susana Lagüela López

Dra. Susana del Pozo Aguilera

Copyright © 2024 por Enrique González González

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación, protegida por los derechos de autor y propiedad intelectual, puede ser reproducida o utilizada en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, ya sea mediante fotocopiado, grabación, almacenamiento y recuperación de información, sin el consentimiento expreso por escrito del autor (egonzalezgonzalez@usal.es)

VNiVERSiDAD D SALAMANCA
Escuela **Politécnica Superior**
de Ávila

Informe de los Directores de Tesis

La presente tesis doctoral, titulada "*Análisis e Integración de Instalaciones de Autoconsumo en Viviendas en la Península Ibérica y Europa*", se presenta por la modalidad de compendio de artículos científicos por el doctorando D. Enrique González González y queda integrada en la línea de investigación *Análisis Geoespacial de Energías Renovables* del Grupo de Investigación Reconocido (GIR) y la Unidad de Investigación Consolidada (UIC) TIDOP de la Universidad de Salamanca (https://tidop.usal.es/).

Fruto de la actividad investigadora desarrollada por el doctorando durante el periodo de elaboración de su tesis, se han publicado diversos trabajos científicos en revistas internacionales de prestigio. Complementariamente, se ha desarrollado la patente *DISPOSOL – Dispositivo coplanario de posicionamiento para paneles solares (202130017),* y el registro de dos protecciones de la propiedad intelectual, *Ener3Dmap-SolarWeb* y *Ener3Dmap-SolarWeb-Cities* (*Nº Asiento Registral 00/2019/3965, y 00/2020/645* respectivamente). Además, también ha participado en la difusión del conocimiento a través de congresos científicos (Congreso *ICSC-CITIES 2021* con el trabajo *Smart Mobility in Cities: Solar E-bikes Share System Design in the City of Ávila*) y ha participado en proyectos de investigación.

En lo referente a las publicaciones incluidas en la tesis doctoral, y a fin de corroborar la validez y robustez de los trabajos científicos desarrollados, tres artículos científicos resultantes de estos trabajos fueron publicados en dos revistas científicas de alto impacto, posicionada en el primer cuartil (Q1), un artículo en *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, y los otros dos en *Applied Sciences*. Los datos de detalle son los siguientes:

- *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* revista de la editorial Elsevier, indexada en el Journal Citation Report y ubicada en el primer cuartil (Q1) en la categoría *Energy and Fuels*, ocupando la posición 40 del total de 170 revistas en la categoría.
- *Applied Sciences,* revista de la editorial MDPI, indexada en el Journal Citation Report y ubicada en el primer cuartil (Q1) en la categoría *Engineering, Multidisciplinary* ocupando la posición 44 del total de 179 revistas en la categoría.

Durante el desarrollo de su tesis doctoral, el doctorando ha participado activamente en proyectos de investigación de ámbito nacional (*EPESOL: RTC-2017-6291-3*), en contratos de investigación con empresas internacionales (Iberdrola España SAU) y entidades locales (desde el Ayuntamiento de Ávila a empresas como Nagami Design y Vortex Bladeless) en proyectos TCUE de transferencia del conocimiento al sector empresarial, así como proyectos propios como el *EFICAMPUS-Autoconsumo Solar y Eficiencia Energética en Edificios Universitarios con Paneles Fotovoltaicos*, que recibió el premio dentro del programa "Objetivo: Campus Sostenibles" por parte de la Universidad de Salamanca.

A tenor de los requerimientos para la presentación de tesis doctoral por compendio de artículos establecidos por la Universidad de Salamanca (https://posgrado.usal.es/TESIS%20NUEVA%202012/Formato_Tesis_compendio.pdf), se considera que los artículos principales y los méritos adicionales se ajustan óptimamente, validando así las metodologías, resultados y conclusiones presentadas en este documento.

Los resultados obtenidos durante la elaboración de la tesis han permitido avanzar en la integración de instalaciones de autoconsumo en viviendas en la Península Ibérica y Europa. Esto ha facilitado una variedad de estudios, incluyendo la investigación del ángulo óptimo de instalación de sistemas fotovoltaicos según la ubicación geográfica para maximizar su rendimiento. Además, se ha analizado y perfeccionado el funcionamiento de aerogeneradores sin palas, explorando su integración efectiva en entornos urbanos. También se ha mejorado el rendimiento de los aerogeneradores mediante el estudio y la evaluación de nuevos materiales para la fabricación del núcleo del alternador.

La tesis doctoral concluye con un apartado de Conclusiones donde se especifican de manera precisa y concretan las principales aportaciones realizadas, permitiendo su crítica y proyección hacia el desarrollo de futuros trabajos integrados en líneas de investigación del doctorando y del GIR TIDOP.

En Ávila, a 24 de julio de 2024,

Dra. Susana Lagüela López

Dra. Susana del Pozo Aguilera

Relación de Artículos Científicos

La presente tesis doctoral consiste en el compendio de tres artículos científicos publicados en revistas de alto impacto, de acuerdo a la normativa del programa de doctorado establecida por la Universidad de Salamanca. Adicionalmente se han incluido otros desarrollos fruto de las investigaciones desarrolladas durante la realización de la presente tesis doctoral. A continuación, se enumeran las publicaciones realizadas.

1. **Evaluating the standards for solar PV installations in the Iberian Peninsula: Analysis of tilt angles and determination of solar climate zones**

   E-González González[1], J. Martín-Jiménez[1], M. Sánchez-Aparicio[1], S. Del Pozo[1], S. Lagüela[1].

   [1] Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, Calle Hornos Caleros 50, 05003 Ávila, Spain

   Sustainable Energy Technologies and Assessments, Noviembre 2021.

   https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101684

2. **Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations**

   Enrique González-González[1], David J. Yáñez[2], Susana Del Pozo[1] and Susana Lagüela[1].

   [1] Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, Calle Hornos Caleros 50, 05003 Ávila, Spain.

   [2] Vortex Bladeless S.L., 05003 Ávila, Spain.

   Applied Sciences, Marzo 2024.

   https://doi.org/10.3390/app14072815

3. **3D-Printed SMC Core Alternators: Enhancing the Efficiency of Vortex-Induced Vibration (VIV) Bladeless Wind Turbines**

   Enrique González-González[1], David J. Yáñez[2], Arturo Hidalgo[2], Susana Del Pozo[1] and Susana Lagüela[1].

   [1] Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, Calle Hornos Caleros 50, 05003 Ávila, Spain.

   [2] Vortex Bladeless S.L., 05003 Ávila, Spain.

   Applied Sciences, Junio 2024.

   https://doi.org/10.3390/app14135512

Resumen

La integración de sistemas de autoconsumo en la Península Ibérica y Europa es esencial para abordar los desafíos del cambio climático y la creciente demanda energética. La adopción de tecnologías de origen renovable como la energía solar y eólica permite reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Este trabajo explora la optimización de estos sistemas mediante un análisis detallado de parámetros que afectan al rendimiento de este tipo de instalaciones en el ámbito del autoconsumo, especialmente en viviendas.

Respecto de los sistemas de autoconsumo de energía fotovoltaica, se realiza un análisis del potencial fotovoltaico de la Península Ibérica, actualizando la zonificación establecida en la normativa existente, a través de los datos de producción solar de cada municipio, con el fin de establecer un mapa actualizado de producción solar de dicha región. Además, se estudian diferentes metodologías para calcular la inclinación óptima de los sistemas de energía fotovoltaica. Este análisis incluye el cálculo de las pérdidas de producción debido a la variación del ángulo de inclinación de los paneles en comparación con la producción óptima estimada anual. Con estos datos, se establece un margen de parámetros aceptables que permiten cumplir la normativa española respecto a las pérdidas admitidas en este ámbito. Asimismo, el estudio de pérdidas se detalla separando los periodos de invierno y verano.

Por otro lado, la investigación sobre energía eólica se centra especialmente en los aerogeneradores sin palas. Estos estudios se enfocan en optimizar la generación de energía eólica mediante el análisis de la geometría y la rugosidad de la superficie de los materiales que componen dichos sistemas. Esta tecnología se presenta como una oportunidad para su uso en el ámbito de autoconsumo doméstico, ya que, a diferencia de la tecnología eólica convencional, no producen ruido y requiere un mantenimiento mínimo, asemejándose a las ventajas de los paneles solares. Los análisis realizados buscan optimizar el rendimiento energético de estos recolectores eólicos, investigando cómo la morfología (forma y rugosidad) influye en su rango de operación.

Continuando con el análisis y optimización de los aerogeneradores sin palas, la tesis aborda el uso de nuevos materiales con partículas magnéticas SMC (Soft Magnetic Composites) en la fabricación de núcleos de alternadores, utilizando tecnologías de fabricación aditiva. Los estudios comparativos demuestran que los núcleos SMC ofrecen una solución prometedora, permitiendo avances significativos en el desarrollo de estos materiales para la mejora de alternadores, mediante la fabricación de núcleos más eficientes y con geometrías complejas.

Esta tesis busca la integración y optimización de sistemas de autoconsumo en la Península Ibérica y Europa, basados en sistemas híbridos de energía solar y eólica. El análisis detallado de los parámetros que afectan al rendimiento de estos sistemas y la investigación de materiales innovadores proporcionan una base sólida para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la energía renovable, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático y a la seguridad energética.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a las responsables de que esta tesis haya tenido lugar. A pesar de mis escasos conocimientos iniciales como investigador y, sobre todo, como "autor", ellas han sido capaces de conseguir que hoy esté escribiendo estas palabras. Estas personas son mis directoras de tesis, Susi y Susa, puesto que todo este trabajo no habría sido posible sin su infinita paciencia, transformando aquellos borradores iniciales en artículos de alto impacto.

Quiero agradecer también al grupo de investigación TIDOP, que fue mi puerta de entrada al mundo de la investigación y el ámbito académico, en el que cada día me siento más contento. Gracias a la EPSA y a todos los compañeros del TIDOP, con quienes es un placer trabajar y compartir el tiempo, y con quienes espero continuar muchos años más. Considero a estos compañeros como amigos, un ejemplo en la forma de hacer las cosas y una fuente de motivación para quienes intentamos seguir sus pasos, mejorando tanto en el ámbito profesional como personal. Aunque no quiero citar a nadie en particular, para no cometer el error de olvidar a alguien y extenderme demasiado, debo agradecer de forma muy especial a Diego, por su apoyo y por todo el trabajo que realiza (aquí también me extendería demasiado).

También quiero dedicar unas palabras de agradecimiento para todo el equipo de Vortex, siempre dispuestos a colaborar y a transmitir todo su valioso conocimiento, y especialmente para David, mi sensei abulense, fuente de inspiración y de motivación. Curiosamente, nos conocimos en una charla durante mi época en Bilbao y, por una de esas casualidades de la vida, hemos terminado investigando juntos y, sobre todo, siendo buenos amigos.

Muchas gracias también al apoyo más importante de todos: mi familia y amigos, grandes responsables de que tomara una de las decisiones más importantes, o por lo menos que más me ha costado tomar (hasta ese momento). Esta decisión me llevó a de dejar todo lo que estaba haciendo para volver a Ávila después de tantos años, y comenzar de nuevo. Aún recuerdo con gracia, y creo que no las olvidaré, las primeras palabras que me dijeron al apuntarme al paro, después de acreditar mi título de ingeniero industrial, idiomas y experiencia profesional... La persona que me atendió me dijo: "Y tú aquí en Ávila, ¿A qué te vas a dedicar?". Y pensé, bueno si como ingeniero no consigo trabajar, también soy músico… Bromas aparte, y nada más lejos de estas palabras, que a día de hoy me parecen una tremenda ironía, creo que, si en ese momento hubiera imaginado un futuro prometedor que se hubiera hecho realidad a día de hoy, no sería tan afortunado como lo soy ahora.

Y si hasta ahora me he considerado una persona con suerte, no encuentro palabras para definirme después de vivir el momento más feliz de mi vida, el pasado mes de mayo, cuando nació mi hija Celia. Gracias a ella que también ha puesto de su parte para que estos últimos meses haya podido sacar tiempo y dar el último empujón para terminar la tesis.

Y hablando de futuro, de agradecimientos y de considerarme una persona muy afortunada, tengo que dedicar mi mayor agradecimiento a la persona más importante de todas las que tengo a mi lado: Laura, con quien espero seguir compartiendo muchos momentos felices por muchos años. Gracias de todo corazón.

GRACIAS POR ESTAR AHÍ.

Índice de Contenidos

1 Capítulo I: Introducción 14

1.1 Marco Contextual y Motivacional 14

1.2 Hipótesis de Trabajo 25

1.3 Objetivos 26

1.4 Estructura de la Tesis 27

2 Capítulo II: Evaluación de los estándares para instalaciones fotovoltaicas en la Península Ibérica: Análisis de ángulos de inclinación y determinación de zonas climáticas 30

2.1 Evaluating the standards for solar PV installations in the Iberian Peninsula: Analysis of tilt angles and determination of solar climate zones 30

3 Capítulo III: Análisis del diseño de aerogeneradores sin palas 44

3.1 Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations 44

4 Capítulo IV: Nuevos materiales para el desarrollo de alternadores en aerogeneradores sin palas 61

4.1 3D-Printed SMC Core Alternators: Enhancing the Efficiency of Vortex-Induced Vibration (VIV) Bladeless Wind Turbines 61

5 Capítulo V: Investigaciones adicionales y otros desarrollos 74

5.1 Cátedra Iberdrola VIII Centenario de la Universidad de Salamanca 74

5.2 Proyecto EPESOL: Nuevo Instrumento de Evaluación de la Penetrabilidad Solar en el Mercado Energético Español 75

5.3 Análisis de la Viabilidad de la Electrificación de la Flota de Autobuses Urbanos de Ávila 76

5.4 Nueva Herramienta de Evaluación de la Viabilidad de Autoconsumo Fotovoltaico Municipal 78

5.5 Evaluación de Funcionalidad de Seguidor Solar 93

5.6 Proyecto Eficampus: Autoconsumo Solar y Eficiencia Energética en Edificios Universitarios con Paneles Fotovoltaicos 95

5.7 Colaboración con Vortex Bladeless 96
6 Capítulo VI: Conclusiones y Trabajos Futuros 114
6.1 Conclusiones 114
6.2 Trabajos Futuros 116
7 Referencias 119
8 Anexo A: Indexación y Factor de Impacto de las Publicaciones Científicas 126
8.1 Sustainable Energy Technologies and Assessments 126
8.2 Applied Sciences 127
9 Anexo B: Otros Documentos 128
9.1 Propiedad Intelectual – Ener3Dmap – SolarWeb 128
9.2 Propiedad Intelectual – SolarWeb – Cities 131
9.3 Patente – DISPOSOL (Dispositivo Low-Cost de seguimiento solar) 134
9.4 Premio Proyecto Eficampus 143

Índice de Figuras

Figura 1: Crecimiento global de electricidad para el año 2026 [18]. 15

Figura 2: Proyecto ENER3DMAP. 74

Figura 3: Herramienta Ener3Dmap. 75

Figura 4: Prospectiva solar para la ciudad de Ávila: SolarWeb–Cities. 75

Figura 5: Herramienta SolarWeb–Cities. 76

Figura 6: Herramienta TCO. 77

Figura 7: Estudio orográfico para las líneas 1 y 2. 77

Figura 8: Herramienta de análisis de sombras. 78

Figura 9: Herramienta de gestión de recursos con información del Alumbrado público. 79

Figura 10: Ubicaciones propuestas para los puntos de recarga. 79

Figura 11: Análisis de sombras. 80

Figura 12: Modelo digital de elevaciones de las rutas de autobús en Ávila. 81

Figura 13: Puntos de recarga propuestos. 81

Figura 14: soporte fijo (izquierda) y soporte con seguimiento a 2 ejes (derecha). 93

Figura 15: Sensor de seguimiento solar coplanario 93

Figura 16: Datos de producción del sistema fijo (naranja) y con seguidor (azul). 94

Figura 17: Dispositivo diseñado y patentado como DIPOSOL. 94

Figura 18: Instalación de paneles del proyecto EFICAMPUS. 95

Figura 19: Instalación del primer prototipo Nano Vortex. 96

Figura 20: Tendencia Sustainable Energy Technologies and Assessments en el año 2023. 126

Figura 21: Tendencia Applied Sciences en el año 2023. 127

Abreviaturas

AM	Manufactura Aditiva
BWT	Bladeless Wind Turbines
CELs	Comunidades Energéticas Locales
COVE	Costo de la energía valorizada
CTE	Código Técnico de Edificación
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIS	Sistema de Información Geográfica
IA	Inteligencia Artificial
IDE	Infraestructura de Datos Espaciales
IEA	Agencia Internacional de la Energía
IoT	Internet of Things
LCOE	Costo nivelado de electricidad
Lock-In Range	Rango de Operación
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
P2P	Peer To Peer
PV	Sistemas Fotovoltaicos
SMC	Soft Magnetic Composites
TCO	Coste de Operación
TTN	The Things Network
VIV	Vibración Inducida por Vórtices

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Marco Contextual y Motivacional

1.1.1 Cambio Climático y su Impacto en el Sector Energético

La transición hacia sistemas energéticos sostenibles constituye un pilar fundamental en la lucha contra el cambio climático, un desafío global que amenaza la estabilidad de los ecosistemas terrestres, la prosperidad económica y el bienestar social a nivel mundial. En este contexto, el desarrollo e integración de tecnologías de autoconsumo energético basadas en fuentes renovables emerge como estrategia clave para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la sostenibilidad ambiental [1].

El cambio climático, uno de los desafíos más significativos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, se refiere a variaciones en el clima de la Tierra a largo plazo, causadas principalmente por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles [2], la deforestación [3] y diversas prácticas industriales [4]. Los efectos del cambio climático son globales y profundos, afectando a ecosistemas, economías y comunidades humanas.

Las evidencias del cambio climático son contundentes y se manifiestan en varios aspectos del entorno global. En primer lugar, los datos indican un aumento promedio de aproximadamente 1.2 °C en la temperatura global desde finales del siglo XIX, con un calentamiento más pronunciado en las últimas décadas, especialmente después del año 2000 [5]. En segundo lugar, los estudios muestran una significativa reducción en la masa de hielo en Groenlandia, la Antártida y en glaciares de montaña en todo el mundo, contribuyendo al aumento del nivel del mar y afectando gravemente a las comunidades costeras [6]. Finalmente, se han observado cambios en los patrones de precipitación, con algunas regiones experimentando sequías más severas y prolongadas, mientras que otras enfrentan inundaciones más frecuentes, impactando negativamente la agricultura, los recursos hídricos y la biodiversidad [7].

Las fuentes de energía tradicionales, como el carbón, el petróleo y el gas natural, han sido los pilares del desarrollo industrial y económico desde la Revolución Industrial. Sin embargo, la quema de estos combustibles es la principal fuente de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), responsables del calentamiento global [8]. Con el crecimiento de la población mundial y el aumento de la urbanización, la demanda de energía sigue en aumento. Este incremento se traduce en mayores emisiones de GEI si no se adoptan medidas para cambiar las fuentes de energía hacia opciones más sostenibles [9].

En respuesta a este desafío, las tecnologías subyacentes de la energía solar y eólica han avanzado significativamente en las últimas décadas, convirtiéndose en opciones viables y económicas para la generación de energía sin emisiones de GEI. La capacidad instalada de energía solar y eólica ha crecido exponencialmente, ayudando a reducir la dependencia de los combustibles fósiles [10]. Sin embargo, la electrificación de todos los consumos energéticos existentes, tanto eléctricos como térmicos, puede provocar un exceso de carga sobre la red eléctrica, dimensionada para el abastecimiento de los primeros. El desarrollo de sistemas de autoconsumo energético, como los paneles solares domésticos y las turbinas eólicas pequeñas (mini eólica), permite a los hogares y las empresas generar su propia electricidad. Esto no solo reduce las emisiones de GEI, sino que también disminuye la presión sobre las redes eléctricas y

promueve la sostenibilidad [8]. Además, la integración de tecnologías avanzadas como los sistemas de almacenamiento de energía, redes y medidores inteligentes, optimiza el uso de las energías renovables, mejorando la eficiencia energética y permitiendo una gestión más eficaz de la demanda y oferta de energía [11, 12].

Por todo ello, el cambio climático representa un desafío multifacético que requiere una respuesta global coordinada. Las políticas de mitigación deben centrarse en la reducción de las emisiones de GEI a través de la transición a fuentes de energía renovable, la mejora de la eficiencia energética, y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles. Un ejemplo clave de cooperación internacional es el Acuerdo de París de 2015 [13], donde los países se comprometieron a limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2.0 °C por encima de los niveles preindustriales, con esfuerzos para limitarlo a 1.5 °C [14]. La inversión en energías renovables, como la solar y la eólica, junto con el desarrollo de sistemas de autoconsumo, ha aumentado significativamente, siendo esenciales para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir estas emisiones [15]. Además, implementar estrategias de adaptación es crucial para aumentar la resiliencia de las comunidades vulnerables, incluyendo la construcción de infraestructuras resistentes al clima, la gestión sostenible del agua, y la conservación de ecosistemas naturales [16]. La transición hacia una economía de este tipo, conocida como “economía baja en carbono”, enfrenta desafíos económicos y políticos, incluyendo la resistencia política y los costos iniciales, pero los beneficios a largo plazo, como la creación de empleos verdes y la reducción de los impactos económicos del cambio climático, superan estos obstáculos [17]. La innovación en tecnologías limpias y sostenibles, como baterías más eficientes, la captura y almacenamiento de carbono, y la agricultura de precisión, emerge como una oportunidad significativa para abordar el cambio climático de manera efectiva.

1.1.2 Aumento del Consumo de Energía y sus Implicaciones

El aumento de la demanda energética global es impulsado principalmente por el crecimiento económico y demográfico. Según el informe "Electricity 2024" [18] de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), se proyecta un crecimiento de la demanda global de electricidad del 3.4% anual en los próximos años, hasta 2026. Este crecimiento se deberá principalmente a la electrificación en sectores residenciales, el transporte y la expansión de centros de datos, con China e India liderando la demanda (Figura 1). Las fuentes de energía de bajas emisiones, como las energías renovables, están previstas para cubrir todo el incremento de la demanda global, y se espera que superen al carbón como la principal fuente de generación eléctrica para 2025. El informe enfatiza la importancia de las políticas de apoyo para fomentar inversiones en energías limpias y asegurar una transición energética sostenible.

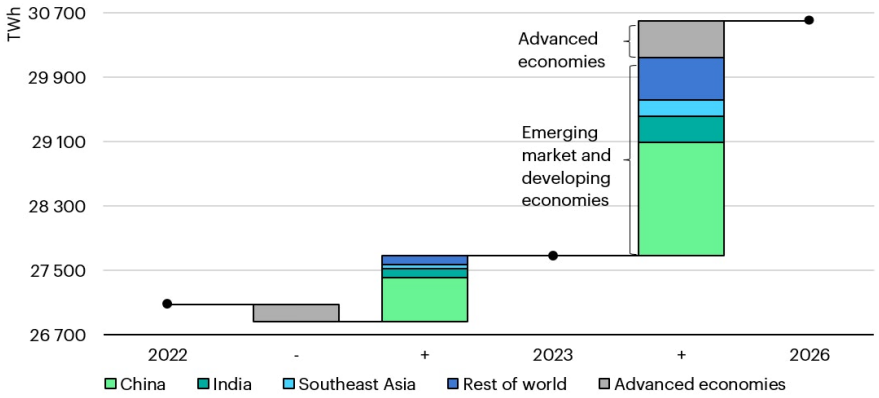


Figura 1: Crecimiento global de electricidad para el año 2026 [18].

Este aumento en la demanda energética tiene varias implicaciones significativas. Primero, se traduce en una mayor dependencia de los combustibles fósiles, ya que la infraestructura y la capacidad instalada para energías renovables aún no son suficientes para satisfacer la creciente demanda [19]. Esto conduce a un incremento en las emisiones de GEI, exacerbando el cambio climático y sus impactos negativos en el medio ambiente y la sociedad. Segundo, la creciente demanda energética puede poner una presión considerable sobre las redes eléctricas existentes [20] , especialmente en regiones donde la infraestructura es antigua o insuficiente. Esto puede resultar en fallos de suministro y apagones, afectando tanto a los hogares como a la industria [21].

Desde un punto de vista económico y geopolítico, el aumento del consumo de energía tiene implicaciones profundas tanto a nivel global [22] como local [23]. La necesidad de asegurar fuentes de energía confiables puede llevar a conflictos entre naciones, aumentando la volatilidad en los mercados energéticos globales y desestabilizando políticamente a regiones ricas en combustibles fósiles debido a la competencia por los recursos energéticos [24]. Además, el costo de la energía puede incrementarse debido a la demanda creciente, impactando negativamente en la economía de los hogares y las empresas, lo que puede llevar a un aumento de la pobreza energética [25], donde muchos hogares no pueden permitirse los costos básicos de energía, afectando a su calidad de vida y bienestar general.

Para mitigar estas implicaciones, es crucial fomentar el desarrollo y la adopción de tecnologías de energía renovable y mejorar la eficiencia energética. El uso de tecnologías de recursos renovables como la energía solar y eólica, junto con sistemas de almacenamiento de energía, puede ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y a minimizar las emisiones de GEI [26]. Asimismo, la implementación de redes inteligentes y sistemas de gestión de la demanda ayudan a optimizar el uso de la energía, reducir pérdidas y mejorar la estabilidad de las redes eléctricas.

La transición hacia una matriz energética más sostenible también requiere políticas gubernamentales robustas y un marco regulatorio que lo promueva [27, 28]. Además, es necesario fomentar la cooperación internacional para compartir conocimientos y tecnologías [29], y para desarrollar soluciones globales a los desafíos energéticos.

1.1.3 Transición hacia Fuentes de Energía Renovables

La transición a energías renovables es una necesidad imperiosa para abordar el cambio climático y mejorar la seguridad energética global. Sin embargo, esta transición enfrenta numerosos desafíos, incluyendo la necesidad de inversión significativa, la adaptación de infraestructuras y el desarrollo de políticas efectivas. Diferentes estudios [30-33] indican que, con un enfoque coordinado y decidido en políticas y tecnologías, es factible alcanzar una economía global basada en energías limpias para mediados del siglo XXI.

En [34],se ha evaluado la viabilidad de remplazar los combustibles fósiles por energías renovables para el año 2050, identificando ocho estrategias clave que incluyen el desarrollo de energías renovables, mejoras en la eficiencia energética, impuestos al carbono, y sistemas de captura y almacenamiento de carbono. Aquí, se concluyó que la producción de energía renovable necesita aumentar entre 6 y 8 veces los niveles de 2020 para lograr la independencia de los combustibles fósiles, destacando la importancia de políticas firmes de conservación y cooperación internacional.

Desde la perspectiva de los desafíos y oportunidades de la transición energética en el contexto de la seguridad y neutralidad del carbono, en [35] se han abordado estos aspectos. El análisis subraya la necesidad de diversificar las fuentes de energía, mejorar la eficiencia energética, y educar al público sobre cuestiones medioambientales. Se destacó que la adopción acelerada de energías renovables puede mejorar la seguridad energética y reducir la dependencia de importaciones.

Un estudio de caso en Dalian [36], China, demostró que un sistema integrado que combine energía tradicional y renovable puede reducir significativamente las emisiones de CO2 y los costos totales anuales. En dicho análisis se enfatizó que el apoyo político y las subvenciones son cruciales para aumentar la participación de la biomasa y otras fuentes renovable.

La transición hacia energías renovables ofrece múltiples beneficios socioeconómicos que van más allá de la mitigación del cambio climático. La creación de empleo, la mejora de la seguridad energética, la reducción de la pobreza energética y el fomento del desarrollo sostenible son algunos de los impactos positivos más destacados. La inversión en energías renovables puede generar una gran cantidad de empleos en diferentes sectores. Por ejemplo, [37] analiza las inversiones en energía renovable en Polonia, destacando que la expansión de las energías renovables, especialmente en la instalación de parques eólicos y sistemas fotovoltaicos, no solo contribuye a cumplir con los objetivos de la Unión Europea para 2030, sino que también crea empleos locales y promueve el desarrollo económico regional. La diversificación de las fuentes de energía a través de la adopción de energías renovables mejora significativamente la seguridad energética. Esto es particularmente relevante en contextos como el de la Unión Europea, donde la dependencia de las importaciones de combustibles fósiles es alta. En [35], se resalta cómo la diversificación energética, junto con el aumento de la eficiencia energética y la reducción del desperdicio de energía, puede llevar a una mayor independencia energética y a una mayor estabilidad económica en Europa.

1.1.4 Transición a Sistemas Energéticos Descentralizados

El sistema energético tradicional, que se basa en un sistema de generación centralizada, también enfrenta limitaciones en términos de eficiencia, especialmente debido a las pérdidas inherentes en el transporte de la energía a largas distancias, debido a que los puntos de generación y de consumo están alejados entre sí. A medida que la energía viaja desde las plantas de generación a través de la red eléctrica hasta llegar a los consumidores finales, una parte se pierde en forma de calor, lo que reduce la eficiencia global del sistema [38]

Una de las grandes diferencias de los sistemas distribuidos es que facilitan la integración de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, directamente en los lugares de consumo [39]. Esta proximidad reduce las pérdidas de transmisión y aprovecha las capacidades locales, contribuyendo a una matriz energética más limpia y verde. Esta descentralización de los puntos de generación de energía reduce la vulnerabilidad de los sistemas centralizados ante desastres naturales, ataques cibernéticos y fallos técnicos, que pueden dejar a grandes poblaciones sin acceso a la energía [40]. Los sistemas distribuidos, al estar basados en múltiples fuentes de generación más pequeñas y geográficamente dispersas, ofrecen una mayor resiliencia. En caso de fallo en una de las unidades de generación o parte de la red, el impacto sobre el suministro total de energía es mucho menos crítico, asegurando una mayor continuidad y seguridad energética [41].

La transición hacia un modelo distribuido también promete mejoras significativas en la eficiencia energética y la reducción de costos para consumidores y proveedores [42]. Al generar energía más cerca del punto de consumo, se minimizan las pérdidas asociadas con la transmisión de energía a larga distancia [43]. Además, la capacidad de los sistemas distribuidos para adaptarse a las fluctuaciones de la demanda en tiempo real, mediante el uso de tecnologías inteligentes[44] y sistemas de almacenamiento de energía, optimiza el uso de recursos y puede conducir a una reducción en los precios de la energía.

La descentralización de la energía no solo optimiza la eficiencia y la resiliencia, sino que también fomenta la participación activa de los consumidores en el sistema energético. Al transformarse en "prosumidores" (productores y consumidores al mismo tiempo), los usuarios pueden instalar paneles solares, aerogeneradores u otros generadores de energía en sus propiedades, contribuyendo al suministro energético general. Esto no solo reduce la carga sobre las grandes plantas generadoras y las redes de transmisión, sino que también permite a los prosumidores beneficiarse económicamente al vender el exceso de energía producida [45]. La posibilidad de participar en mercados de energía entre pares (P2P) y plataformas de intercambio basadas en blockchain proporciona un entorno seguro y transparente para las transacciones energéticas, promoviendo una distribución más equitativa de la energía y permitiendo a los prosumidores influir en los precios [46].

1.1.5 Redes de Consumo Inteligentes para la Gestión de la Demanda Energética: IoT e IA

Las redes de consumo inteligentes y la gestión de la demanda son fundamentales para el desarrollo y la implementación de un sistema de generación distribuido basado en fuentes de energía renovables [47], puesto que son capaces de adaptarse de forma dinámica a las fluctuaciones propias de este tipo de fuentes de energía [48].

Las redes de consumo inteligentes, o "smart grids", están revolucionando la forma en que se consume y gestiona la energía. Estas redes integran tecnología avanzada para monitorizar y gestionar la generación, distribución y consumo de electricidad de manera más eficiente y sostenible. Utilizando sensores, medidores inteligentes y sistemas de comunicación en tiempo real, las redes inteligentes permiten una interacción bidireccional entre proveedores de energía y consumidores, optimizando el flujo de energía y reduciendo pérdidas.

Uno de los pilares fundamentales de las redes de consumo inteligentes son los dispositivos IoT (Internet de las Cosas). Estos dispositivos, que incluyen todo tipo de instrumentos (desde termostatos inteligentes hasta electrodomésticos) conectados, recopilan y transmiten datos sobre el consumo de energía en tiempo real. Esta información permite a los operadores de red y a los consumidores finales tomar decisiones informadas sobre el uso de la energía, ajustando el consumo en función de la demanda y las tarifas variables. Los dispositivos IoT no solo mejoran la eficiencia energética [49], sino que también facilitan el mantenimiento predictivo y la gestión de recursos distribuidos[50], como paneles solares, aerogeneradores y sistemas de almacenamiento de energía.

Otro de los aspectos clave en la gestión de redes eléctricas es el mantenimiento de las mismas, buscando reducir y evitar la aparición de problemas que impliquen fallos o paradas en su mantenimiento. Para ello, los sistemas basados en IoT también presentan gran aplicación en el ámbito del mantenimiento predictivo [51]. Para esta aplicación, los sistemas IoT empleados se basan en sensores integrados para recopilar datos sobre el estado de los equipos y

componentes. Estos datos se analizan mediante modelos avanzados, como redes neuronales y algoritmos de aprendizaje automático, que permiten predecir fallos antes de que ocurran y planificar el mantenimiento de manera más eficiente. Este enfoque no solo aumenta la vida útil de los equipos, sino que también reduce los tiempos de inactividad y los costos asociados con el mantenimiento no planificado.

El desarrollo de nuevas tecnologías de inteligencia artificial (IA) está potenciando aún más las capacidades de las redes inteligentes [52]. Los algoritmos de IA pueden analizar grandes volúmenes de datos generados por dispositivos IoT para predecir patrones de consumo, detectar anomalías y optimizar la distribución de energía. Por ejemplo, mediante el aprendizaje automático, los sistemas de gestión de demanda pueden anticipar picos de consumo y ajustar automáticamente la oferta, evitando sobrecargas y reduciendo la necesidad de costosos aumentos de capacidad en la infraestructura de la red [53].

Además, la IA está facilitando la creación de sistemas de respuesta a la demanda más sofisticados. Estos sistemas permiten a los consumidores ajustar su consumo en respuesta a señales de precios dinámicos, incentivando el uso de energía durante períodos de baja demanda y reduciendo el consumo en momentos de alta demanda [54]. Esto no solo ayuda a equilibrar la red eléctrica, sino que también puede generar ahorros significativos para los consumidores y reducir la dependencia de fuentes de energía fósil.

Esta integración de dispositivos IoT y los desarrollos en IA están transformando las redes de consumo en sistemas más inteligentes, eficientes y sostenibles. Estas tecnologías no solo mejoran la gestión de la demanda y la eficiencia energética, sino que también promueven una mayor adopción de energías renovables, contribuyendo a la transición hacia un sistema energético más limpio y resiliente.

1.1.6 Sistemas de Autoconsumo Energético en la Península Ibérica

La Península Ibérica ha experimentado un crecimiento significativo en la adopción de sistemas de autoconsumo energético en los últimos años, especialmente los basados en energía solar y eólica. La integración de estos sistemas se debe a una combinación de factores geográficos, económicos y políticos que favorecen el desarrollo de energías renovables.

La latitud a la que se sitúa la Península Ibérica facilita la recepción de radiación solar. Según el Atlas de Radiación Solar de la Comisión Europea, esta región es una de las localizaciones europeas que tienen mayor potencial solar, con zonas que reciben hasta 2,000 kWh/m² al año [55] Esta alta disponibilidad de radiación solar convierte a la región en un lugar idóneo para la instalación de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo.

En [56], se realiza una evaluación del potencial fotovoltaico en edificios educativos utilizando un enfoque multicriterio. El estudio considera datos de simulación y cartografía, junto con una validación experimental, para determinar las áreas disponibles para la instalación de paneles solares, excluyendo obstáculos y zonas sombreadas. En el caso de la Universitat Politècnica de València, se encontró que el 48% de los techos eran aptos para la instalación solar, con diferentes capacidades de generación según el tamaño de la superficie disponible. La evaluación multicriterio demostró que la opción de instalar paneles en todas las superficies posibles es la más adecuada.

Por otro lado, las características orográficas y climáticas de la Península Ibérica crean condiciones óptimas para la generación de energía eólica. Zonas como Galicia, el Estrecho de

Gibraltar y la costa atlántica portuguesa tienen vientos fuertes y constantes, lo cual es adecuado para la operación eficiente de aerogeneradores. Esto hace que la capacidad instalada de energía eólica en España sea una de las más altas de Europa [57]. La modelización del potencial técnico de la energía eólica en tierra en España, realizada en [58], estima un potencial técnico total de aproximadamente 1,100 TWh/año, con unos 70 GW de capacidad eólica instalada que podría operar con factores de capacidad superiores al 24%, generando aproximadamente 190 TWh/año.

En [59], se realiza un estudio entre la relación entre la producción de energía eólica y la circulación atmosférica del Atlántico Norte sobre el noreste de la Península Ibérica. Los resultados destacan que las características orográficas y climáticas de esta región son propicias para la generación de energía eólica. En otro estudio, [60], se señala que la Península Ibérica, particularmente España, se beneficia de condiciones óptimas debido a la alta disponibilidad y rendimiento de los recursos eólicos, posicionando a la región como líder en la transición hacia fuentes de energía renovable.

En los últimos años ha aumentado notablemente el número de instalaciones de sistemas de autoconsumo fotovoltaico, impulsado por la notable reducción en los costos de instalación y sus avances tecnológicos [61]. Sin embargo, las instalaciones eólicas de autoconsumo no están tan extendidas en el ámbito doméstico debido a los problemas que presentan los aerogeneradores convencionales, como la contaminación acústica, la necesidad de mantenimiento, el impacto visual y ambiental. En este sentido, la aparición de nuevos aerogeneradores sin palas que solventan estos inconvenientes augura un impulso de integración de este tipo de sistemas de generación eólica en instalaciones de autoconsumo.

En este contexto, el paradigma de la generación de energía ha cambiado globalmente, con un número cada vez mayor de usuarios que consumen electricidad generada por fuentes de energía renovable. Consecuentemente, ha aumentado el interés en la microgeneración residencial de energía renovable entre los consumidores finales, o prosumidores en este caso, permitiéndoles generar su propia electricidad. Este incremento está relacionado con el cambio de paradigma en la red de distribución en los últimos años hacia un tipo de red distribuida. En países como España y Portugal, estos sistemas son predominantemente sistemas fotovoltaicos (PV) de baja capacidad, en el rango de unos pocos kW, que se conectan directamente a la red de distribución [62].

Actualmente, los sistemas de energía renovable, incluyendo los sistemas de almacenamiento, aún no son los recursos energéticos predominantes en el sector energético, den competencia con el gas natural y los combustibles fósiles. Sin embargo, estos sistemas están experimentando una tendencia de crecimiento anual a nivel mundial. Algunas de las ventajas incluyen el aumento de la innovación y el progreso técnico/tecnológico, así como la preservación del medio ambiente en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque también se presentan ciertas desventajas, como su gran dependencia de las condiciones meteorológicas. En [63] se sugiere la combinación de energía solar fotovoltaica y eólica offshore como una solución efectiva para estabilizar el suministro energético en el oeste de la Península Ibérica.

En esta situación de cambio de paradigma en las redes de distribución, el papel de los consumidores finales como productores de energía (prosumidores) puede ser interesante tanto desde una perspectiva técnica como económica, aunque requiere un análisis cuidadoso de los costos y beneficios involucrados. Normalmente, un consumidor residencial puede utilizar su

sistema de generación renovable, ya sea PV y/o eólico, de tres maneras diferentes: (i) dedicando la generación PV/eólica para el autoconsumo, importando la electricidad deficitaria de la red e incluso exportando el excedente a la red, lo que implica autoconsumo sin almacenamiento; (ii) empleando la generación PV/eólica para el autoconsumo, almacenando el excedente en el sistema de baterías para su uso posterior e importando la electricidad deficitaria de la red, implicando autoconsumo con almacenamiento; (iii) exportando toda la generación PV/eólica a la red eléctrica e importando todo el consumo de electricidad de la red, sin realizar autoconsumo.

En este aspecto se hace necesario evaluar la legislación y normativa aplicables en cada territorio, puesto que en función de los apoyos gubernamentales y medidas adoptadas por los diferentes estados condicionan la viabilidad económica, y por lo tanto el impulso y adopción de este tipo de sistemas por los ciudadanos.

En Portugal, la publicación del Decreto-Ley 153/2014 [64] marcó un hito importante al permitir el modelo de autoconsumo energético, incentivando a los consumidores a invertir en energías renovables. En España, con el Real Decreto 244/2019 [65], se ha impulsado el autoconsumo de energía eléctrica. Este decreto simplifica los trámites y establece un marco favorable para que los consumidores puedan generar y consumir su propia energía, fomentando así la adopción de energías renovables.

Teniendo en cuenta los diferentes planteamientos para el autoconsumo, es importante distinguir entre los conceptos de net-metering y net-billing. El net-metering, que actualmente no está permitido en España ni Portugal, asume que el sistema eléctrico puede utilizarse como almacenamiento a largo plazo (como si fuera una batería), donde el exceso de energía generado se inyecta en la red y se almacena como crédito, el cual puede ser utilizado posteriormente para pagar el consumo, intercambiando energía vertida con energía consumida. En ambos países, actualmente se emplea el modelo de net-billing, en el que el exceso de energía se compensa a un precio pactado entre consumidor y comercializadora, y esta compensación servirá para poder reducir el importe de la factura de la energía consumida de la red, pero no como una forma para generar ingresos económicos.

1.1.7 Viabilidad Económica de los Sistemas de Autoconsumo Eólicos y Fotovoltaicos

La literatura científica presenta diversos estudios que proporcionan una evaluación económica de los sistemas eólicos y fotovoltaicos. A continuación, se presenta una breve revisión de la literatura sobre el tema.

En [66], se propone un modelo combinado de análisis de envolvente de datos y proceso de jerarquía analítica para la evaluación de recursos solares, considerando diversos factores cualitativos y cuantitativos. Los autores demuestran la efectividad de este modelo a través de un estudio de la energía solar en Taiwán, indicando que Tainan, Changhua y Kaohsiung son las ciudades más adecuadas para la construcción de sistemas de energía solar fotovoltaica. Se destacó que los mecanismos de apoyo, el costo de transmisión de energía eléctrica y la demanda de consumo eléctrico son los subcriterios más significativos en la toma de decisiones. Por su parte, en [67], se llevó a cabo una revisión de estudios centrados en temas relacionados con las tarifas eléctricas residenciales en el contexto del crecimiento de fuentes de energía renovable, planteando preocupaciones significativas sobre la equidad de precios y sugiriendo soluciones como cargos fijos más altos, tarifas de demanda y precios discriminatorios. Los impactos del consumo de energía renovable en el crecimiento económico de los 38 principales países

consumidores de energía renovable se evaluaron en [68], utilizando técnicas econométricas avanzadas, demostrando que el consumo de energía renovable tiene un efecto positivo significativo en el crecimiento económico a largo plazo en estos países.

En [69], se evalúa el apoyo financiero para instalaciones fotovoltaicas en el sector residencial de los principales mercados europeos como Bélgica, Alemania, Italia, España y Francia, y concluye que las políticas de apoyo para instalaciones fotovoltaicas residenciales son más rentables en Italia y que el autoconsumo mejora las ganancias en Alemania y España, pero no afecta en Flandes debido a su esquema de medición neta. En [70] se aborda un análisis técnico-económico del potencial de autoconsumo fotovoltaico considerando diferentes tipos de edificios, como residenciales y comerciales, en Alemania, Suiza y Austria. La investigación revela que, aunque los subsidios aumentan la rentabilidad, los sistemas fotovoltaicos pueden ser económicamente viables sin ellos si se optimiza el autoconsumo y se reducen los costos de instalación.

Un análisis económico de la integración de pequeños aerogeneradores en 88 regiones de Irán se llevó a cabo en [71]. Los resultados de este análisis indican que los pequeños aerogeneradores son rentables en aproximadamente el 30% de las 88 regiones estudiadas en Irán, especialmente en zonas con velocidades de viento superiores a 5 m/s. En [72], se realizó un estudio técnico-económico para sistemas híbridos eólicos/fotovoltaicos, considerando diversas técnicas de almacenamiento desde la perspectiva del consumidor rural. Los resultados indican que estos sistemas pueden ser económicamente viables dependiendo de la combinación de recursos y tecnologías de almacenamiento utilizadas, resaltando el potencial significativo de las energías renovables para mejorar el acceso a la electricidad en áreas rurales. En dicho estudio se evalúan diversas configuraciones de almacenamiento, encontrando que la tecnología de baterías de flujo de ácido plomo es la más adecuada. Un análisis técnico-económico bajo diferentes condiciones de radiación solar en Vietnam se realizó en [73].Los resultados muestran que la configuración óptima y la eficiencia de inversión de estas estaciones dependen significativamente de la irradiación solar y el precio de la tarifa de alimentación. La investigación en [74] evalúa la demanda residencial mínima mensual para consumidores ubicados en diferentes áreas de concesión de distribución en el sistema interconectado brasileño, garantizando la viabilidad económica de instalar sistemas fotovoltaicos. Los resultados de este estudio demuestran que la integración de sistemas fotovoltaicos distribuidos es técnica y económicamente viable en varias regiones de Brasil.

Diversos estudios en el contexto del net-metering presentan beneficios potenciales relacionados con el ahorro en las facturas desde la perspectiva de los consumidores residenciales. En [75] se establece una comparación entre el almacenamiento en baterías y el net-metering, tomando como referencia los techos fotovoltaicos. Los resultados muestran que, aunque ambas opciones son viables, el net-metering proporciona una mayor rentabilidad económica debido a la capacidad de vender el exceso de energía a la red. Sin embargo, el almacenamiento en baterías ofrece una mayor autonomía y resiliencia energética, permitiendo a los consumidores reducir su dependencia de la red eléctrica. En [76] se llevó a cabo una evaluación desde la perspectiva técnica y económica, evaluando la eficiencia de los subsidios de net-metering de China para sistemas fotovoltaicos distribuidos residenciales. Los autores concluyen que la eficiencia del net-metering debe considerar tanto las diferencias regionales a diferentes niveles de demanda eléctrica y radiación solar. Un estudio comparativo de dimensionamiento de PV y almacenamiento en baterías en un contexto de net-metering y sistemas sin excedentes se discute en [77]; donde los resultados indican que los sistemas de net

metering son más rentables y permiten mayores tamaños de PV (hasta 323 kW) en comparación con los sistemas sin excedentes (85 kW). La capacidad de almacenamiento óptima también es mayor en sistemas de net metering. En [75], se accede a una discusión sobre las implicaciones de aplicar diferentes métodos de net-metering en los intercambios de energía de un prosumidor con la red y el consecuente efecto en el autoconsumo y los costos. Los resultados muestran que, para un hogar danés, el autoconsumo aumenta del 38% al 53% al cambiar de una medición neta instantánea a una medición neta horaria. Las importaciones de energía anuales disminuyen de 1459 kWh a 1087 kWh, suponiendo un ahorro anual de unos 50 euros.

La intersección convencional del precio de la electricidad producida por un sistema de energía renovable, como un sistema eólico/fotovoltaico, y el precio de la producción de electricidad convencional puede definirse como paridad de red. Una evaluación de la paridad de red para diferentes situaciones, considerando tres mercados: Alemania, Suiza e Italia, se puede encontrar en [78].Los autores sugieren entornos políticos estables, que eviten el riesgo del mercado, para promover la inversión continua en energía solar y minimizar los costos en la sociedad. En [79] se investiga y evalúa el impacto de diferentes escenarios de paridad de red considerando inversiones en energía eólica regionales en China. Los autores concluyen que las regiones con buenos recursos eólicos pueden no tener un retorno de inversión garantizado debido a la incertidumbre de los precios de la electricidad y se sugiere diseñar esquemas de apoyo alternativos (por ejemplo, contratos a largo plazo) y políticas de salvaguardia para reducir la incertidumbre de los precios de la electricidad y compensar los incentivos de inversión creados por los subsidios

En [80], se presenta una evaluación de la efectividad de la implementación de pequeñas unidades fotovoltaicas en la ciudad de Quito, Ecuador. Esta investigación evalúa el costo nivelado de electricidad (LCOE) incurrido por la construcción y operación de un sistema fotovoltaico y lo compara con el precio de compra de energía de la red de distribución eléctrica. Los resultados destacan que los mecanismos de incentivos son esenciales para mejorar la rentabilidad de estos sistemas. Además, se sugiere que la reducción de costos de instalación y el aumento de la eficiencia de los paneles solares pueden potenciar aún más la adopción de la energía solar en el país. Una evaluación del LCOE, considerando varias implicaciones en el diseño de energía renovable, como los sistemas eólicos y fotovoltaicos, se puede encontrar en [81]. En este estudio se recomienda el costo de la energía valorizada (COVE), en lugar del LCOE, para diseñar y valorar futuros sistemas de energía renovable, incluidos los compromisos de integración de almacenamiento. La investigación en [82] discute las mejoras en el LCOE y la paridad de red considerando la vida útil de las tecnologías fotovoltaicas en lugar de solo la vida útil financiera, a través del caso de estudio de Egipto. Los resultados muestran que la vida útil efectiva tiene un impacto significativo en el LCOE y la producción de energía a lo largo de la vida útil del sistema. Además, la paridad de red se puede alcanzar en ciertas localidades del sur de Egipto, especialmente con tecnologías como a-Si, mono-Si y CdTe con seguimiento solar de un eje.

1.1.8 Sistemas Híbridos de Energía Eólica y Solar en Entornos Urbanos.

Tal y como se ha descrito en apartados anteriores, dentro de las energías renovables, la energía solar y la eólica son opciones interesantes. En el caso de los sistemas de producción fotovoltaica, su expansión está muy extendida tanto a nivel de grandes instalaciones (huertas solares) como en el ámbito urbano. Sin embargo, para el caso de la energía eólica, normalmente este tipo de instalaciones se basa en grandes aerogeneradores que se instalan en parques eólicos lejos de los puntos de consumo, puesto que los sistemas de producción de energía eólica

convencionales para instalaciones a pequeña escala (mini eólica), sobre todo en el ámbito urbano, aún no están tan extendidos. Esto es debido a que aún tienen aspectos que necesitan mejorar, como las molestias acústicas, impacto visual, influencia con las aves y la necesidad de un mantenimiento periódico de los sistemas.

A este respecto, en los últimos años han aparecido nuevos modelos de aerogeneradores, como los desarrollados por la empresa Vortex Bladeless [83]. Esta empresa ha desarrollado un modelo de aerogenerador sin palas que puede ser esencial para el uso de los aerogeneradores en un sistema de producción distribuida, ya que su instalación es similar a la de los paneles fotovoltaicos.

Los aerogeneradores sin palas (Bladeless Wind Turbines - BWT), basados en el fenómeno de vibración inducida por vórtices (VIV), han emergido como una alternativa prometedora a las turbinas eólicas convencionales. A diferencia de las turbinas tradicionales, los BWT no utilizan palas giratorias para capturar la energía del viento, sino que aprovechan las vibraciones inducidas por el flujo de aire alrededor de un cilindro fijo. Esta tecnología ofrece varias ventajas, incluyendo menores costos de mantenimiento, reducción del impacto ambiental y menor impacto visual y acústico. Primero, al eliminar las partes móviles como las palas y los engranajes, se reducen significativamente el mantenimiento y los costos operativos. Además, se minimizan los impactos negativos sobre la fauna aviar, al reducir los riesgos de colisión, y tienen un menor impacto visual y acústico, lo que los hace adecuados para entornos urbanos y residenciales

Sin embargo, los BWT también enfrentan desafíos técnicos, particularmente en relación con su eficiencia y el rango operativo. La generación de energía de los BWT depende en gran medida de las condiciones del viento y su capacidad para mantenerse en resonancia con las vibraciones inducidas por los vórtices. Este rango de operación, conocido como "rango de Lock-In", limita la eficiencia de este tipo de aerogeneradores y varía en función de las diferentes condiciones de viento.

La instalación de aerogeneradores sin palas en entornos residenciales y urbanos es altamente prometedora debido a su diseño compacto y silencioso. Los BWT son ideales para techos de viviendas y edificios donde las turbinas eólicas tradicionales no son viables. Además, su bajo mantenimiento e impacto acústico y visual los convierten en una opción viable para mejorar la resiliencia energética en comunidades urbanas.

El desarrollo de sistemas híbridos que combinan BWT con paneles solares fotovoltaicos también está ganando atención. Esta combinación puede proporcionar un suministro de energía más constante y confiable, aprovechando la generación eólica durante la noche o en condiciones de baja irradiación solar.

La combinación de energía solar y eólica en un sistema híbrido de autoconsumo ofrece varias ventajas significativas. Los sistemas híbridos pueden aprovechar la complementariedad de los recursos solares y eólicos, garantizando una producción de energía más estable y continua. Durante el día, la energía solar puede ser la principal fuente de generación, mientras que durante la noche o en días nublados, la energía eólica puede suplir las necesidades energéticas. Este enfoque reduce la dependencia de una sola fuente de energía y mejora la resiliencia del sistema frente a las fluctuaciones del recurso renovable [84].

1.2 Hipótesis de Trabajo

Partiendo de los antecedentes expuestos en el apartado anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se pueden optimizar e integrar eficazmente las instalaciones de autoconsumo en viviendas en la Península Ibérica y Europa, considerando las barreras regulatorias, económicas y tecnológicas, para maximizar la eficiencia energética y contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero?

Para dar respuesta a esta pregunta, se plantean las siguientes hipótesis de trabajo que guiarán las líneas de investigación de la presente tesis doctoral.

1.2.1 Hipótesis 1: Condiciones Climáticas y Eficiencia Energética

En la Península Ibérica, las condiciones climáticas favorables (alta irradiación solar y potencial eólico) permiten una mayor eficiencia en la integración de sistemas híbridos de energía solar y eólica en viviendas. La optimización de estos sistemas puede superar las barreras técnicas y mejorar el rendimiento energético general.

1.2.2 Hipótesis 2: Barreras Regulatorias y Económicas

La identificación y superación de barreras regulatorias y económicas específicas en la Península Ibérica y Europa facilitarán la adopción generalizada de sistemas de autoconsumo híbrido. La adaptación de políticas y estrategias económicas puede promover una implementación más eficiente y accesible de estas tecnologías en el ámbito doméstico.

1.2.3 Hipótesis 3: Aspectos Sociales y Aceptación Tecnológica

Los factores sociales y regulatorios tienen un impacto significativo en la aceptación y expansión de sistemas de autoconsumo híbrido en viviendas. Un enfoque integral que aborde estas dimensiones facilitará una mayor integración y optimización de las instalaciones, incrementando su adopción y efectividad.

1.2.4 Hipótesis 4: Impacto en la Reducción de Emisiones y Gestión de Recursos

La implementación eficaz de sistemas de autoconsumo híbrido en viviendas contribuirá significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a una gestión más eficiente y sostenible de los recursos energéticos. Esta integración ayudará a cumplir los objetivos establecidos en los Acuerdos de París y en las directivas europeas en materia de energía y clima.

1.2.5 Hipótesis 5: Transformación del Panorama Energético

La adopción generalizada de instalaciones de autoconsumo híbrido puede transformar el panorama energético al permitir una mayor independencia energética en viviendas. Esto, a su vez, reducirá la dependencia de combustibles fósiles y promoverá una transición hacia un modelo energético más sostenible y eficiente

1.3 Objetivos

De acuerdo con todo lo expuesto anteriormente, el **objetivo general** de la presente tesis doctoral es analizar y evaluar la integración de sistemas de autoconsumo en viviendas de la Península Ibérica. Este estudio se centrará en dos fuentes de energía renovables y complementarias: la solar y la eólica. A través de un enfoque integral y detallado, se pretende no solo identificar los beneficios y desafíos de implementar estos sistemas, sino también proporcionar recomendaciones prácticas para su adopción y optimización, contribuyendo así a una transición energética más sostenible y eficiente en la región.

A partir del objetivo general que se busca conseguir con el desarrollo de las diferentes tareas de investigación, se establecen **tres objetivos principales** que marcarán el desarrollo de la tesis doctoral. Estos a su vez **se desglosan en objetivos específicos**, definidos teniendo en consideración de que la tesis doctoral se presenta por la modalidad de compendio de artículos científicos:

- Investigar el ángulo óptimo de instalación de sistemas fotovoltaicos según la ubicación geográfica para maximizar su rendimiento.
    - Actualizar la zonificación climática de la Península Ibérica basada en la radiación solar: revisar y actualizar los mapas de zonificación climática considerando datos actuales de radiación solar, y proporcionar una base precisa para el diseño eficiente de sistemas fotovoltaicos.
    - Analizar los ángulos de inclinación óptimos según diferentes metodologías de cálculo: Comparar y evaluar diversas metodologías de cálculo para determinar los ángulos ideales de inclinación de paneles solares en la Península Ibérica, e identificar las metodologías más efectivas y precisas para maximizar la captación de energía solar.
    - Evaluar las pérdidas de producción causadas por variaciones en el ángulo de inclinación de los paneles solares: cuantificar y analizar las pérdidas de producción energética causadas por desviaciones respecto al ángulo óptimo de inclinación, y proponer estrategias para minimizar estas pérdidas.
- Analizar y perfeccionar el funcionamiento de aerogeneradores sin palas, explorando su integración efectiva en entornos urbanos.
    - Optimizar el diseño y funcionalidad de turbinas eólicas sin palas: investigar y desarrollar mejoras en el diseño de turbinas eólicas sin palas para aumentar su eficiencia y adaptabilidad a entornos urbanos, y poner el foco en la optimización aerodinámica y estructural para mejorar el rendimiento y reducir el impacto ambiental.
    - Analizar la morfología y rugosidad de las superficies en turbinas eólicas sin palas: estudiar cómo la morfología y rugosidad de las superficies afectan el rendimiento y la eficiencia de las turbinas eólicas sin palas, y proporcionar recomendaciones para el diseño para maximizar la captura de energía eólica.
    - Estudio del rango de lock-in en turbinas eólicas sin palas para facilitar su integración en entornos residenciales.
- Mejorar el rendimiento de los aerogeneradores mediante el estudio y la evaluación de nuevos materiales para la fabricación del núcleo del alternador.

- Investigación de nuevos materiales para alternadores de aerogeneradores: evaluar el potencial de nuevos materiales como los materiales con partículas magnéticas (SMC), en la fabricación de alternadores, y analizar las características magnéticas y mecánicas para optimizar la eficiencia y durabilidad de los sistemas de generación de energía eólica.
- Desarrollar un prototipo de alternador empleando materiales SMC mediante fabricación aditiva.
- Evaluar el rendimiento del alternador con núcleo SMC frente a alternativas convencionales.

1.4 Estructura de la Tesis

La presente tesis doctoral se desarrolla conforme a la regulación vigente para programas de doctorado de la Universidad de Salamanca, adoptando la modalidad de compendio de artículos científicos. Esta modalidad requiere la aceptación y publicación de, al menos, tres artículos científicos en revistas internacionales de alto impacto, garantizando así la transferencia del conocimiento científico generado. La estructura consiste en un total de seis capítulos que se enumeran a continuación:

- Capítulo I: Introducción
- Capítulo II: Evaluación de los estándares para instalaciones fotovoltaicas en la Península Ibérica: Análisis de ángulos de inclinación y determinación de zonas climáticas.
- Capítulo III: Análisis de la geometría y rugosidad de aerogeneradores sin palas para optimizar su rendimiento
- Capítulo IV: Nuevos materiales para el desarrollo de alternadores en aerogeneradores sin palas.
- Capítulo V: Investigaciones adicionales y otros desarrollos.
- Capítulo VI: Conclusiones y trabajos futuros.

Además de los seis capítulos principales, se incluyen dos apéndices que contienen información complementaria relevante:

- Apéndice A: detalla el factor de impacto de las revistas donde se han publicado los artículos científicos.
- Apéndice B: presenta las patentes y registros de propiedad intelectual derivados del desarrollo de la tesis doctoral y detallados en el Capítulo V.

A continuación, se detalla el contenido específico de cada capítulo:

Capítulo I: Introducción

En este capítulo se ofrece una contextualización inicial del estado del arte y los fundamentos teóricos relevantes. A continuación, se plantea la motivación subyacente y se presentan las hipótesis de trabajo que guían la investigación. Finalmente, se delinean los objetivos generales y específicos perseguidos y se detalla la estructura general de la tesis doctoral.

Capítulo II: Evaluación de los estándares para instalaciones fotovoltaicas en la Península Ibérica: Análisis de ángulos de inclinación y determinación de zonas climáticas

Este capítulo introduce el primer artículo científico de la tesis titulado "Evaluating the standards for solar PV installations in the Iberian Peninsula: Analysis of tilt angles and determination of solar climate zones". El estudio se centra en la zonificación climática de la Península Ibérica con el objetivo de optimizar las instalaciones fotovoltaicas. Se exploran diversas metodologías para determinar el ángulo de inclinación óptimo de los paneles solares y se evalúan las pérdidas de producción asociadas a desviaciones de este ángulo de inclinación óptimo. Este análisis proporciona una base sólida para mejorar la eficiencia energética y optimizar la planificación de proyectos solares en diferentes zonas climáticas de la región.

Capítulo III: Análisis de la geometría y rugosidad de aerogeneradores sin palas para optimizar su rendimiento

En este capítulo se presenta el segundo artículo científico de la tesis titulado "Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations". El estudio se centra en investigar la morfología y la estructura superficial de las turbinas eólicas sin palas (Bladeless Wind Turbines - BWT) para maximizar la captura de energía eólica. Se analiza cómo la forma y la rugosidad afectan al rango de operación (Lock-In Range) de estos aerogeneradores. Los resultados revelan una correlación significativa entre las variaciones geométricas y el rango de operación a diferentes números de Reynolds, lo cual se formula en una ecuación que permite ajustar la operación y mejorar la eficiencia de estos innovadores dispositivos de generación de energía eólica.

Capítulo IV: Nuevos materiales para el desarrollo de alternadores en aerogeneradores sin palas.

En este capítulo se presenta el tercer artículo científico de la tesis titulado "3D-Printed SMC Core Alternators: Enhancing the Efficiency of Vortex-Induced Vibration (VIV) Bladeless Wind Turbines". El estudio se centra en la investigación del uso de nuevos materiales como los SMC (Soft Magnetic Composites) en la fabricación de núcleos de alternadores empleando tecnologías de manufactura aditiva. Se realiza un análisis comparativo entre prototipos con núcleos de aire, de SMC y de hierro, evaluando el rendimiento en términos de frecuencia de resonancia, histéresis magnética, y generación de energía. Los resultados destacan el potencial de los SMC para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las turbinas eólicas sin palas, abriendo nuevas posibilidades en el campo de la generación de energía renovable.

Capítulo V: Investigaciones adicionales y otros desarrollos

Muestra los otros trabajos relevantes realizados durante el desarrollo de la tesis doctoral como proyectos con empresas y estudios técnicos de investigación, además de los resultados obtenidos como patentes, registros de propiedad intelectual y desarrollos de dispositivos.

Capítulo VI: Conclusiones y trabajos futuros.

Este es el último capítulo de la tesis en el que se exponen las conclusiones obtenidas del desarrollo de las diferentes tareas realizadas durante la misma, añadiendo las posibles líneas futuras de investigación fruto de los resultados de los estudios realizados.

CAPÍTULO II:

EVALUACIÓN DE LOS ESTÁNDARES PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA: ANÁLISIS DE ÁNGULOS DE INCLINACIÓN Y DETERMINACIÓN DE ZONAS CLIMÁTICAS

2 CAPÍTULO II: EVALUACIÓN DE LOS ESTÁNDARES PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS EN LA PENÍNSULA IBÉRICA: ANÁLISIS DE ÁNGULOS DE INCLINACIÓN Y DETERMINACIÓN DE ZONAS CLIMÁTICAS

2.1 Evaluating the standards for solar PV installations in the Iberian Peninsula: Analysis of tilt angles and determination of solar climate zones

Este capítulo contiene el artículo *Evaluating the standards for solar PV installations in the Iberian Peninsula: Analysis of tilt angles and determination of solar climate zones* publicado en la revista científica de alto impacto Sustainable Energy Technologies and Assessments en 2021.

2.1.1 Resumen

Uno de los factores principales para la determinación del rendimiento energético de los sistemas fotovoltaicos (PV) es la irradiación solar entrante, la cual depende de (i) la configuración espacial de los paneles PV con respecto al Sol en (ii) cada ubicación. El objetivo de este trabajo es determinar el potencial fotovoltaico en la Península Ibérica, atendiendo a estos dos criterios principales. En cuanto a (i), se analizan diferentes métodos para la estimación del ángulo de inclinación óptimo de los paneles PV en la Península Ibérica y cómo este parámetro influye en la producción fotovoltaica. Con respecto a (ii), se propone una zonificación climática para la Península Ibérica que sirva como referencia para la estimación de la radiación solar en cada ubicación. El estudio se lleva a cabo utilizando datos experimentales de las capitales de la Península Ibérica (España y Portugal). Además, se comparó la producción anual de energía fotovoltaica para varias configuraciones de ángulo de inclinación con el fin de estimar las pérdidas energéticas por unidad de ángulo en comparación con la energía producida con el ángulo de inclinación óptimo. Los resultados muestran que el ángulo de inclinación puede fijarse en 34° para toda la Península Ibérica, siendo las pérdidas anuales de producción fotovoltaica inferiores al 1%. Las diferencias obtenidas entre los distintos enfoques existentes en la literatura para calcular el ángulo de inclinación óptimo fueron menores al 1%, demostrando que, aunque el ángulo de inclinación es un parámetro clave que influye en la producción de energía fotovoltaica, su variación debe ser significativa para tener un impacto en las pérdidas de producción.

2.1.2 Artículo I

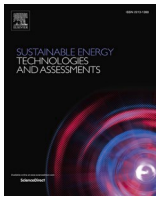
https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101684

Sustainable Energy Technologies and Assessments 49 (2022) 101684

Contents lists available at ScienceDirect

Sustainable Energy Technologies and Assessments

journal homepage: www.elsevier.com/locate/seta



Original article

Evaluating the standards for solar PV installations in the Iberian Peninsula: Analysis of tilt angles and determination of solar climate zones

E. González-González *, J. Martín-Jiménez, M. Sánchez-Aparicio, S. Del Pozo, S. Lagüela

Department of Cartographic and Land Engineering, University of Salamanca, Calle Hornos Caleros, 50, Ávila 05003, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Photovoltaic energy
Solar potential
Roofs
Solar model
Tilt
Solar zoning

ABSTRACT

One of the main factors for the determination of the energy yield of photovoltaic (PV) systems is the incoming solar irradiation, which is a function of (i) the spatial configuration of the PV panels with respect to the Sun for (ii) each location. The aim of this work is to determine the PV potential in the Iberian Peninsula, attending to the two main criteria. Regarding (i), different methods for the estimation of the optimal PV tilt angle in the Iberian Peninsula, and how this parameter influences the PV production, are analysed. With respect to (ii), a climate zoning is proposed for the Iberian Peninsula, to be used as reference for the estimation of solar radiation for each location. The study is performed using experimental data from capital cities of the Iberian Peninsula (Spain and Portugal). In addition, the annual PV production was compared for several tilt angle configurations in order to estimate the energy losses per unit angle with respect to the energy produced with the optimal tilt angle. Results show that the tilt angle can be fixed as 34° for all the Iberian Peninsula, being the annual PV production losses lower than 1%. Differences lower than 1% were obtained between the different approaches existing in literature to calculate the optimal tilt angle, showing that although the tilt angle is a key parameter that influences the PV energy production, its variation must be significant in order to have an impact on production losses.

Introduction

Energy poverty is a manifestation of the economic scarcity and social exclusion concerns [1–4]. The increase in energy-poor citizens exacerbates the problem and thus awareness is raising among citizens globally [5,6]. Proof of this awareness is the inclusion of the energy availability problem in the Sustainable Development Goals of the United Nations Development Program [7]. According to this program, Goal number 7 refers to "Affordable and Clean Energy", with the main aim of ensuring access to affordable, reliable, sustainable and modern energy as key to solve the energy poverty worldwide. However, there are more goals impacted by the energy issue, such as Goal number 11 (Sustainable Cities and Communities) and Goal number 12 (Responsible Consumption and Production).

Renewable energy resources have shown to be the alternative towards the reduction of the energy poverty and the sustainability of the energy supply [8,9]. One of the strengths of the renewable energy resources is their spatial availability [10], which enables their exploitation at large-scale, in energy farms [11], but also at small-scale, in such way that the consumers can supply their own energy demand [12]. Self-consumption appears as the solution to energy poverty, since it can reduce the energy prices [13,14], and also to the lack of energy connection by isolated populations: in the Canary Islands (Spain) water and energy were supplied with water and hydrogen resources [15], while isolated rural areas search for the total energy supply with different combinations of renewable energy resources [16,17].

Among all renewable energy resources, the solar energy stands as the most adequate for its use at small-scale, thanks to the adaptability of the technology to be installed in different locations close to the user, such as building roofs [18]. Recent studies suggest that the EU rooftops could potentially produce up to 24.4% of electricity demand with PV [19]. Thus, this framework facilitates the inclusion of PV systems in urban buildings allowing self-consumption either individual or shared [20], reducing greenhouse gases emissions, and improving energy efficiency and sustainability.

Enabling residents of multi apartment buildings to commonly use electricity generated by a PV system (collective self-consumption) is a relatively new development [21]. In the Spanish context, Shared PV systems have been recently regulated [22], facilitating the integration of PV installations on shared rooftops in apartment buildings owned by different neighbours. The summation of energy demands from different

* Corresponding author.
E-mail addresses: egonzalezgonzalez@usal.es (E. González-González), joseabula@usal.es (J. Martín-Jiménez), mar_sanchez1410@usal.es (M. Sánchez-Aparicio), s.p.aguilera@usal.es (S. Del Pozo), sulaguela@usal.es (S. Lagüela).

https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101684
Received 9 March 2021; Received in revised form 13 October 2021; Accepted 20 October 2021
Available online 2 November 2021
2213-1388/© 2021 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Nomenclature

Em	average monthly energy production [kW·h]
Hm	average monthly sum of global irradiation per square meter [kW·h/m^2]
N	north
W	west

Greek letters

α	azimuth angle [°].
β	tilt angle [°].
β_{opt}	optimal tilt angle [°].
$\beta_{opt\text{-}PVGIS}$	optimal tilt angle [°] calculated by PvGis.
ϕ	latitude [°].

users, within a radius of 500 m distance, as is the case of Spain, results in a maximization of the self-consumption of the energy generated, with very little over-production and almost no energy fed into the grid. According to [23], maximizing self-consumption from PV systems will be the most effective way to reduce energy poverty in households across most regions of the world, since self-consumption reduces the effect of the regulations and prices in the electricity market on the users. The aim of this paper is to analyse the performance of PV installations with different configurations (tilt angles), providing a range of tilt angles that optimize the production, especially thinking in those installations where the space available for solar panels is not enough to cover all the demand, as in shared PV systems.

Although PV systems have become much cheaper in recent years [24], it is important to know how much energy production is expected from the different possible PV configurations in order to consider all the aspects of influence in the decision of the design of the installation: economic advantages, energy efficiency and performance [25]. Regarding materials and efficiency, the coverage of PV modules has been improved based on plasmonics, which increase the absorption in PV modules due to the considerable reduction in the physical thickness of the absorber layers [26]. However, power ratings in PV modules are usually tested under standard conditions that involve perpendicular incident light, although the real angles of incidence differ from being perpendicular to the surface of the PV panel, which results in a decrease in the real performance of the panels due to the reflection effect mainly induced by the air-glass interface. This phenomenon has been studied in different works, such as [27,28].

Thus, depending on the spatial configuration of PV systems there will be a great variation in the generation of electricity. If the PV panels are coplanar to the roof surface, tilt and azimuth angles are not usually optimal. In this regard, the location is the basis for the determination of the annual PV energy production since it determines the angles of incidence of the Sun throughout the year.

In the case that supports are used to install the PV panels with the optimal tilt and azimuth angles, energy production can be generally maximized or optimized to the interest of the users so that production is maximum in the time frames where the user has the greatest demand or in the hours with higher prices for electricity. An example of optimization with azimuth angles in Spain is the South orientation for maximum annual production (maximum production rates at midday), while West-East orientation of the PV panels will have lower peak production but more extended during the day (earliest beginning and latest end of the production).

Estimating the losses of production due to the variation of the angles with respect to the optimal ones is essential to evaluate the economic feasibility and productive capacity of PV systems. This paper calculates the optimal PV tilt angles for the Iberian Peninsula and estimates the energy losses due to tilt angle variations with respect to the optimal.

In addition, this study leads to the determination of a map of solar climate zones, that can be used as a reference to know the maximum energy demand that can be supplied by solar PV panels in each point of the Iberian Peninsula, divided in provinces and districts in Spain and Portugal, respectively.

Some organizations have developed software tools to estimate the PV energy production [29], such as PvGis [30] created by the European Commission, PvWatts [31] developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) of the US, and RETScreen [32] from the Government of Canada. The works presented through this article have been performed using PvGis estimation utility as it appears to be the most accurate for small variations in real data and for the chosen study area [33].

State of the art of the solar energy yield optimization

The solar energy production of PV panels depends on several parameters. Among them, their spatial configuration, defined by the latitude, azimuth and tilt angle, is the basis in the energy yield of the PV system [34–36]. In this regard, there are different studies that deal with energy PV production by means of the optimal tilt angle and the best PV configuration. For example, according to [37], the optimal PV tilt angle varies between 0° and 65° throughout the year in Turkey, being the optimal angle of 0° in June and 65° in December. Other researchers have done similar studies for each season of the year, as the works reported by [38] developed in Madinah, Saudi Arabia.

Regarding maximum energy PV production, some studies have quantified the increase of energy performance in about 30.79% for a PV panel with double axis sun-tracking system with respect to a fixed PV system [39,40]. When the use of tracking systems is not possible, the performance of the PV system can be optimized with respect to a fixed system as well. The analysis of the performance of tracking systems demonstrates that adjusting tilt angles six times per year could harvest 99.5% of the solar radiation compared to a PV system with daily tracking and panel adjustment in Saudi Arabia location [41].

Since the current framework of distributed energy generation with renewable sources impulses Building Integrated PhotoVoltaic (BIPV) installations in urban areas, the study of the energy yield of PV systems installed on building rooftops is essential. In this frame, the azimuth and the tilt angle of the roofs do not usually match the optimal for PV system. Thus, evaluating losses in production is necessary in order to determine the economic feasibility as well as the production capability of the PV installation [42,43]. However, an advantage of PV systems integrated in building roofs is the reduction of cooling energy demand in warm days thanks to the shadow produced by the panels covering the roof surface [44].

Finally, it should be noted that dusty environments could lead to PV energy losses. The decrease in PV production due to soiling could be up to 10% for a slightly dirty panel and up to 40% for a very dirty panel. In this sense, this production decrease would be reduced with slanted panels instead of horizontal panels [45–47].

Tilt angle-latitude relationship

If the focus is brought to the optimal PV spatial configuration in order to maximize the annual energy performance, the optimal azimuth angle depends on the Hemisphere in which the case study is located. For the North Hemisphere, southward orientation is the optimal, while for the South Hemisphere, optimization is obtained with northward orientations [48]. Once the azimuth angle is established, the optimal tilt angle to maximize annual PV energy production depends on the latitude of the case study.

Different investigations have been performed in order to determine the optimal tilt angle for a known latitude. Thus, considering the tilt angle equal to the latitude of the PV system location in order to validate the reliability of a BIPV (Eq. (1)), [49] demonstrated that the

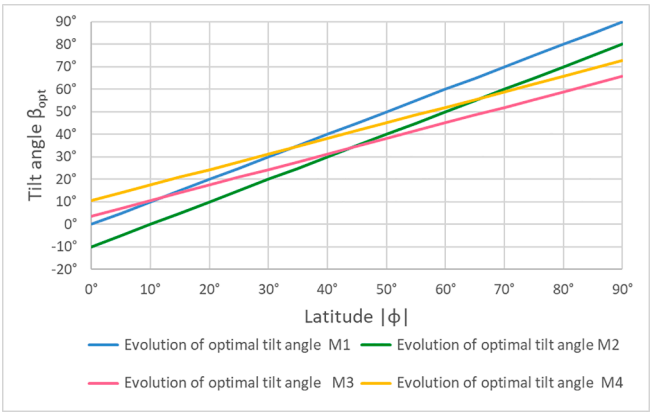


Fig. 1. Evolution of the optimal tilt angle with latitude, for the four methodologies analysed.

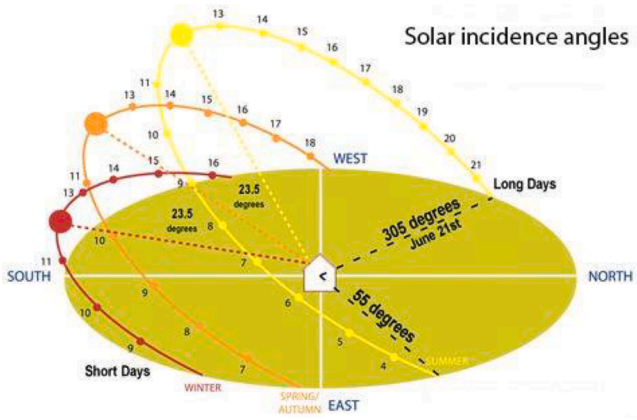


Fig. 3. Solar trajectories for 45° N latitude.

performance of PV systems is almost the same (98.5%) than that obtained with the estimated optimal angle for a range of latitudes from 0° to 85° in the North Hemisphere. Other studies stated that the optimal angle is the one obtained after subtracting 10° from the latitude (Eq. (2)) [50] for latitudes starting from 36° to 46°, while others added some constants to increase the accuracy in the relation between latitude and optimal tilt angle. In this way, [51] stated that the optimal tilt angle is the result of multiplying 0.69 to latitude and then adding 3.7° (Eq. (3)); where dust accumulation in the surfaces of the panels can be reduced increasing 10° for low latitudes ((Eq. (4)), being the loses less than 1% for deviations of the optimal tilt angle close to 10° [52]. More information about each equation can be found in the corresponding references. It should be noted that if the target is to maximize the PV production at a specific season instead of considering the entire year, the result is different. Thus, when maximizing the PV production for wintertime, the tilt angle should be higher than the angle obtained for maximizing PV production for the whole year. The opposite happens in the case of maximizing the PV production in summertime: the optimal tilt angle should be lower than the value obtained when maximizing production for the whole year. Some studies suggested a fixed value to vary the optimal annual tilt angle between ±15° [53], or ±20° [54], for the aim of maximizing the PV production in winter or summer.

In order to consider the different approaches existing in the literature, the following methodologies (M1-M4) have been analysed to obtain reliable conclusions about the optimum tilt angle of PV panels:

$$\text{M1: } \beta_{opt} = |\phi| \tag{1}$$

$$\text{M2: } \beta_{opt} = |\phi| - 10 \tag{2}$$

$$\text{M3: } \beta_{opt} = 3.7 + 0.69 \cdot |\phi| \tag{3}$$

$$\text{M4: } \beta_{opt} = 3.7 + 0.69 \cdot (|\phi| + 10) \tag{4}$$

being ϕ the latitude in degrees and β_{opt} the optimal tilt angle in degrees.

All these methodologies focus on an optimal annual PV production for fixed PV systems. Fig. 1 shows how latitude variations affect the optimal PV tilt angle for the four methods analysed. Despite the different results obtained depending on the methodology applied, a common tendency is observed in which the optimal PV tilt angle has a direct correlation with latitude.

Climate zoning

Climate zoning is performed for several reasons, from providing guidelines for energy efficiency in buildings to performing Urban Heat Island analysis [55]. Regarding solar photovoltaic (PV) installations, the existence of climate zones can serve as a guide for the design of PV installations regarding the determination of both the best locations and the optimal tilt angle.

Climate maps are based on climatic parameters such as temperature, precipitation rate and solar irradiation. General climate maps are based on heating degree-days, temperature, and precipitation rate, while climate maps used for building sciences mainly use degree-days (heating and cooling) and moisture.

Regarding the computation of solar potential, the climate map required is based on the parameter of solar irradiation. In this case, the number of climate zones depends on the focus of the map: global irradiation or direct irradiation; and on the solar energy model used for the computation of the energy ratios. Thus, for example, global climate maps present Spain divided in two or three climate zones [56], while specific climate maps in the Iberian Peninsula classify the terrain in 5 or more zones [57] (Fig. 2).

Regarding solar energy models, their resolution also affects the map that can be generated. For example, comparing the two most common energy models, PvGis [30] and PVWatts [31], the first tool is made by the European Commission and calculates solar irradiation from satellite

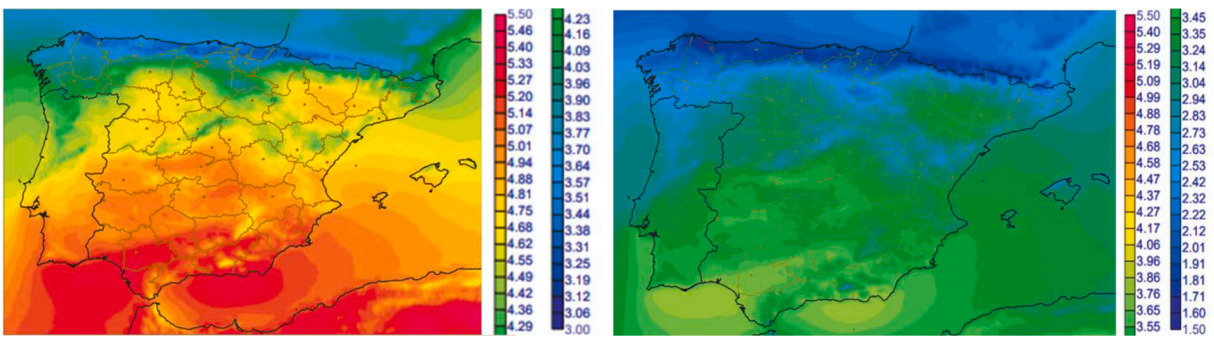


Fig. 2. Maps of solar climate zones in Spain: (a) annual global irradiation (kWh/m^{2}day); (b) annual direct irradiation (kWh/m^{2}day).

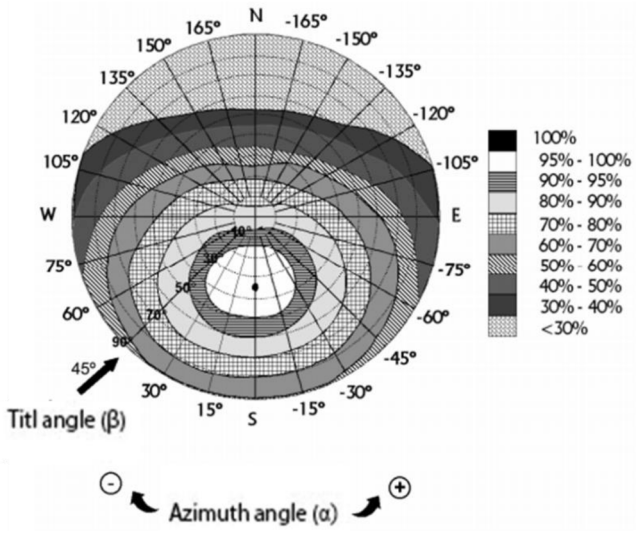


Fig. 4. PV production losses for a position 41° latitude.

data, climate reanalysis and historical data from 566 ground meteorological stations located in the European subcontinent [58]. However, PVWatts is developed by the USA National Renewable Energy Laboratory (NREL), and relies on a database covering the Americas, the Indian subcontinent and parts of Central Asia [59]. For this reason, when using PVWatts for studies in the European subcontinent, the irradiation value computed is the same for all the locations within a province.

Considerations

Solar trajectory

The maximum yield production of a PV system is obtained when the panel is facing the sunlight beams perpendicularly. During the day and along the year, the azimuth angle and the solar height vary periodically. The optimal tilt angle is not always the same neither through the year nor through the day. The longer the beams are perpendicular to the panel the better PV performance is achieved. Fig. 3 shows the different angles of the Sun trajectory over time for different times of the day and for different seasons for a latitude of 45° N. In order to receive the maximum irradiation, tracking systems could be used to adjust angle values through the day to optimize the panel position.

When the PV installation lacks a tracking system, optimal azimuth and tilt angles must be calculated for each location to compute the production with fixed PV panels. Regarding azimuth, South orientation is considered optimal for the North Hemisphere, and North orientation is the optimal for the South hemisphere. For both cases, the maximum energy production is obtained at the central time of the day.

In some cases, when the production is prioritized either at the beginning or the end of the day, the azimuth angle is variated to the East or to the West to maximize incoming radiation (and consequently, energy production) at the first or the last hours, respectively. The production curve is moved to the sunrise or sunset depending on the azimuth angle variation.

Maximum production losses due to PV orientation and tilt angle

In Spain, the Technical Edification Code (CTE) - HE section no. 5 [60] determines the methodology for the computation of production losses due to different PV spatial configurations. This methodology is based on the losses chart represented by Fig. 4, which is applicable for 41° latitude.

According to this regulation, South orientation (0°) is considered as reference and Eq. (5) is the mathematical statement for estimating the PV production losses.

$$PV\ production\ losses\ (\%) = 100 \bullet [1.2 \bullet 10^{-4} \bullet (\beta - \beta_{opt})^2] \quad (5)$$

being β the tilt angle configured in degrees and β_{opt} the optimal tilt angle in degrees.

The CTE regulation in section no. 5 also establishes the maximum PV loss allowed (Table 1), that depends on the type of the PV system: general, superimposed or integrated. "Architectural integration" refers to the PV panels that have the double mission of being an architectural part of the building at the same time as an energy installation, substituting other construction elements such as cladding or envelope. "Superposition" refers to the PV panels that are placed parallel to the building envelope, not substituting the construction elements that form the envelope: for example, PV panels installed on the tiles of the roof. Last, "general" defines all PV installations that are neither integrated nor superposed, as can be PV panels supported by inclined structures.

Assuming the general case, the maximum percentage of PV production losses due to the PV azimuth and tilt angle with respect to the optimal production is 10%. This value has been considered as error threshold in this study for the Iberian Peninsula, because it is the most restrictive value.

Table 1
Maximum percentage of production losses allowed for photovoltaic panels in Spain according to the CTE [60].

TYPE OF SYSTEM	AZIMUTH AND TILT	SHADOWS	TOTAL
General	10%	10%	15%
Superposition	20%	15%	30%
Architectural Integration	40%	20%	50%

Methodology

Analysis of optimal tilt for PV installations

The determination of the optimal tilt angle for PV installations in the Iberian Peninsula is performed through the computation of the optimal tilt angle for all the capital cities as representative locations of the provinces or districts, with a homogeneous spatial distribution. The computation of the energy production for each tilt angle, used to determine the tilt angle that results in the maximum production, is performed with PvGis [30]. The PV azimuth angle considered for all cases was 0° (South orientation).

The first step of the analysis was determining the optimal tilt angle of each location, according to the different methodologies under study. In addition to the optimal tilt angles defined with Eqs. (1)–(4) (also denoted as M1–M4), the optimal tilt angle (slope of the PV modules that gives the highest energy output for the whole year if the slope and azimuth angles stay fixed) provided by PvGis is considered as M6 (Eq. (7)) [58]. Since the average optimal tilt angle for all locations was 34°, this value was added to the analysis as fifth methodology, denoted as M5 (Eq. (6)). Thus:

$$M5:\ \beta_{opt} = 34° \quad (6)$$

$$M6:\ \beta_{opt} = \beta_{opt\text{-}PVGIS} \quad (7)$$

Once all the methodologies involved were defined and the value of optimal tilt angle was calculated from each of them, the PV production for all locations (the capital cities) was computed.

The next analysis was to estimate the influence of the variation of the tilt angle in the PV energy production. With this aim, the PV production is estimated, for each location, for tilt angles from 0° to 90° with 5° steps.

The PV potential for all tilt angles was calculated with the proper query to the PvGis tool, as this tool is considered as reference in this study. These queries were performed through the PvGis Application

Table 2
Average monthly solar energy production for PvGis optimal tilt angle per location.

Location	Latitude	Longitude	Optimal tilt angle (M6)	*Hm [kW·h/m^2]	Optimal tilt angle (M1)	Optimal tilt angle (M2)	Optimal tilt angle (M3)	Optimal tilt angle (M4)	Optimal tilt angle (M5)
Vitoria-Gasteiz	42.846	−2.668	35°	133	43°	33°	33°	40°	34°
Albacete	38.998	−1.860	34°	166	39°	29°	31°	38°	34°
Alicante	38.345	−0.481	35°	173	38°	28°	30°	37°	34°
Almería	36.840	−2.468	33°	188	37°	27°	29°	36°	34°
Ávila	40.656	−4.700	34°	158	41°	31°	32°	39°	34°
Badajoz	38.879	−6.970	33°	173	39°	29°	31°	37°	34°
Barcelona	41.388	2.170	38°	172	41°	31°	32°	39°	34°
Burgos	42.341	−3.700	33°	146	42°	32°	33°	40°	34°
Cáceres	39.476	−6.371	33°	171	39°	29°	31°	38°	34°
Cádiz	36.530	−6.293	32°	181	37°	27°	29°	36°	34°
Castellón de la Plana	39.986	−0.038	36°	171	40°	30°	31°	38°	34°
Ciudad Real	38.986	−3.927	33°	169	39°	29°	31°	38°	34°
Córdoba	37.885	−4.779	33°	174	38°	28°	30°	37°	34°
Coruña (A)	43.371	−8.396	34°	127	43°	33°	34°	41°	34°
Cuenca	40.072	−2.134	34°	161	40°	30°	31°	38°	34°
Girona	41.982	2.824	38°	160	42°	32°	33°	40°	34°
Granada	37.176	−3.598	33°	180	37°	27°	29°	36°	34°
Guadalajara	40.630	−3.166	35°	164	41°	31°	32°	39°	34°
Donostia-San Sebastián	43.321	−1.984	36°	126	43°	33°	34°	40°	34°
Huelva	37.257	−6.950	33°	188	37°	27°	29°	36°	34°
Huesca	42.140	−0.409	37°	167	42°	32°	33°	40°	34°
Jaén	37.766	−3.790	32°	174	38°	28°	30°	37°	34°
León	42.600	−5.572	36°	163	43°	33°	33°	40°	34°
Lleida	41.614	0.626	36°	165	42°	32°	32°	39°	34°
Logroño	42.466	−2.450	35°	143	42°	32°	33°	40°	34°
Lugo	43.012	−7.556	34°	137	43°	33°	33°	40°	34°
Madrid	40.417	−3.700	35°	170	40°	30°	32°	38°	34°
Málaga	36.720	−4.420	33°	181	37°	27°	29°	36°	34°
Murcia	37.983	−1.130	34°	173	38°	28°	30°	37°	34°
Pamplona	42.817	−1.647	35°	142	43°	33°	33°	40°	34°
Ourense	42.340	−7.865	34°	151	42°	32°	33°	40°	34°
Oviedo	43.360	−5.845	38°	135	43°	33°	34°	41°	34°
Palencia	42.012	−4.531	34°	157	42°	32°	33°	40°	34°
Pontevedra	42.434	−8.648	35°	152	42°	32°	33°	40°	34°
Salamanca	40.965	−5.663	33°	160	41°	31°	32°	39°	34°
Santander	43.461	−3.808	36°	126	43°	33°	34°	41°	34°
Segovia	40.949	−4.119	33°	153	41°	31°	32°	39°	34°
Sevilla	37.383	−5.996	32°	178	37°	27°	29°	36°	34°
Soria	41.764	−2.465	36°	160	42°	32°	33°	39°	34°
Tarragona	41.119	1.245	37°	171	41°	31°	32°	39°	34°
Teruel	40.344	−1.107	35°	159	40°	30°	32°	38°	34°
Toledo	39.857	−4.024	35°	169	40°	30°	31°	38°	34°
Valencia	39.470	−0.377	36°	172	39°	29°	31°	38°	34°
Valladolid	41.653	−4.728	33°	157	42°	32°	32°	39°	34°
Bilbao	43.257	−2.923	35°	124	43°	33°	34°	40°	34°
Zamora	41.504	−5.744	34°	161	42°	32°	32°	39°	34°
Zaragoza	41.656	−0.877	36°	164	42°	32°	32°	39°	34°
Lisboa	38.722	−9.139	32°	165	39°	29°	30°	37°	34°
Leiria	39.750	−8.808	34°	163	40°	30°	31°	38°	34°
Santarém	39.236	−8.685	33°	170	39°	29°	31°	38°	34°
Setúbal	38.525	−8.894	34°	182	39°	29°	30°	37°	34°
Beja	38.015	−7.863	33°	177	38°	28°	30°	37°	34°
Faro	37.019	−7.930	33°	193	37°	27°	29°	36°	34°
Évora	38.571	−7.914	33°	175	39°	29°	30°	37°	34°
Portalegre	39.297	−7.428	33°	169	39°	29°	31°	38°	34°
Castelo Branco	39.823	−7.497	33°	172	40°	30°	31°	38°	34°
Guarda	40.539	−7.265	33°	165	41°	31°	32°	39°	34°
Coimbra	40.203	−8.410	34°	160	40°	30°	31°	38°	34°
Aveiro	40.641	−8.654	35°	164	41°	31°	32°	39°	34°
Viseu	40.657	−7.912	34°	163	41°	31°	32°	39°	34°
Bragança	41.806	−6.757	34°	163	42°	32°	33°	39°	34°
Vila Real	41.301	−7.742	33°	158	41°	31°	32°	39°	34°
Porto	41.158	−8.629	35°	159	41°	31°	32°	39°	34°
Braga	41.545	−8.427	35°	155	42°	32°	32°	39°	34°
Viana do Castelo	41.692	−8.834	35°	158	42°	32°	32°	39°	34°

*Hm: Average monthly sum of global irradiation per square meter [kW·h/m^2].

Table 3
Annual production losses for all locations respect to variations in tilt angle.

Location	Tilt Angle																		
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
Albacete	13%	10%	7%	4%	2%	1%	1%	0%	1%	2%	4%	5%	8%	11%	16%	20%	25%	30%	36%
Alicante	14%	10%	7%	5%	3%	1%	1%	0%	1%	2%	3%	5%	8%	12%	16%	20%	25%	30%	36%
Almería	13%	10%	7%	4%	3%	1%	1%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	12%	16%	21%	26%	31%	37%
Aveiro	14%	10%	7%	5%	3%	1%	1%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	34%
Ávila	13%	9%	6%	4%	3%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	35%
Badajoz	12%	9%	6%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	3%	6%	9%	12%	16%	21%	25%	31%	37%
Barcelona	16%	12%	9%	6%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	3%	6%	9%	13%	17%	22%	27%	32%
Beja	12%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	12%	16%	21%	25%	31%	37%
Bilbao	13%	10%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	10%	13%	17%	22%	26%	32%
Braga	14%	10%	7%	5%	3%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	5%	7%	10%	14%	18%	23%	28%	34%
Bragança	13%	10%	7%	5%	2%	1%	1%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	34%
Burgos	12%	8%	5%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	12%	15%	19%	24%	29%	35%
Cáceres	13%	9%	6%	4%	2%	1%	1%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	12%	16%	20%	25%	30%	36%
Cádiz	12%	9%	6%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	13%	17%	22%	27%	32%	38%
Castellón de la Plana	15%	11%	8%	5%	3%	1%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	7%	10%	14%	18%	23%	28%	33%
Castelo Branco	13%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	5%	8%	12%	16%	20%	25%	30%	36%
Ciudad Real	12%	9%	7%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	12%	16%	21%	25%	31%	36%
Coimbra	13%	9%	7%	4%	3%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	34%
Córdoba	12%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	3%	6%	9%	13%	16%	21%	26%	31%	37%
Coruña (A)	11%	8%	6%	3%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	2%	5%	7%	10%	13%	17%	22%	27%	32%
Cuenca	14%	10%	7%	5%	2%	1%	1%	1%	1%	2%	3%	6%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	35%
Donostia-San Sebastián	13%	10%	7%	5%	3%	2%	1%	0%	1%	2%	2%	5%	7%	10%	13%	17%	21%	26%	31%
Évora	13%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	3%	6%	9%	12%	16%	21%	25%	31%	36%
Faro	13%	10%	7%	4%	3%	1%	1%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	12%	17%	21%	26%	32%	37%
Girona	16%	13%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	13%	16%	21%	26%	31%
Granada	13%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	12%	17%	21%	26%	31%	37%
Guadalajara	13%	10%	7%	5%	2%	1%	1%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	34%
Guarda	13%	10%	7%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	5%	8%	12%	16%	20%	25%	30%	36%
Huelva	13%	10%	7%	4%	2%	1%	1%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	12%	16%	21%	26%	31%	37%
Huesca	16%	11%	8%	5%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	7%	10%	13%	17%	22%	27%	32%
Jaén	12%	9%	6%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	3%	6%	9%	12%	16%	21%	25%	31%	37%
Leiria	13%	9%	7%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	34%
León	15%	11%	8%	6%	3%	2%	1%	0%	1%	1%	2%	5%	7%	10%	14%	18%	23%	28%	34%
Lisboa	12%	8%	5%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	5%	8%	12%	16%	21%	25%	31%	36%
Lleida	15%	11%	8%	5%	3%	1%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	7%	10%	14%	18%	22%	28%	33%
Logroño	13%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	4%	7%	10%	14%	18%	22%	27%	33%
Lugo	12%	9%	7%	4%	3%	1%	1%	1%	1%	2%	4%	6%	8%	12%	15%	19%	24%	29%	34%
Madrid	14%	11%	7%	5%	3%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	35%
Málaga	13%	9%	7%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	13%	17%	21%	26%	31%	38%
Murcia	13%	10%	7%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	3%	6%	8%	12%	16%	20%	25%	30%	36%
Ourense	13%	9%	7%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	5%	7%	11%	15%	19%	23%	28%	34%
Oviedo	15%	11%	8%	5%	3%	1%	1%	0%	0%	1%	1%	4%	6%	8%	12%	16%	20%	24%	30%
Palencia	13%	10%	7%	4%	3%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	34%
Pamplona	13%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	4%	7%	11%	14%	18%	23%	27%	33%
Pontevedra	14%	10%	7%	5%	3%	1%	1%	0%	0%	1%	3%	5%	7%	11%	14%	18%	23%	28%	34%
Portalegre	12%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	12%	16%	20%	25%	30%	36%
Porto	13%	10%	7%	4%	3%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	4%	8%	11%	14%	19%	23%	28%	34%
Salamanca	13%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	6%	8%	11%	16%	19%	24%	29%	35%
Santander	13%	10%	7%	5%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	7%	10%	13%	17%	21%	26%	31%
Santarém	12%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	5%	8%	12%	16%	20%	25%	31%	36%
Segovia	12%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	12%	16%	20%	24%	29%	35%
Setúbal	13%	9%	7%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	5%	8%	12%	15%	20%	25%	30%	36%
Sevilla	12%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	12%	16%	21%	26%	31%	37%
Soria	14%	11%	8%	5%	3%	1%	1%	0%	0%	1%	3%	4%	7%	10%	14%	18%	23%	28%	33%
Tarragona	16%	12%	8%	5%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	4%	6%	9%	13%	17%	22%	27%	32%
Teruel	14%	10%	8%	5%	3%	1%	1%	1%	1%	2%	3%	5%	8%	11%	14%	19%	24%	29%	34%
Toledo	14%	10%	7%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	30%	35%
Valencia	14%	10%	8%	5%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	2%	4%	7%	10%	14%	18%	23%	28%	34%
Valladolid	13%	10%	6%	4%	3%	1%	0%	0%	1%	2%	3%	6%	8%	11%	15%	20%	24%	29%	35%
Viana do Castelo	14%	10%	7%	4%	3%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	4%	8%	11%	14%	18%	23%	28%	34%
Vila Real	12%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	20%	25%	30%	35%
Viseu	13%	10%	7%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	5%	8%	11%	15%	19%	24%	29%	34%
Vitoria-Gasteiz	12%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	2%	2%	5%	8%	11%	14%	18%	23%	28%	33%
Zamora	12%	9%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	6%	8%	11%	16%	19%	24%	30%	35%
Zaragoza	15%	11%	7%	5%	3%	1%	0%	0%	0%	1%	2%	4%	7%	10%	13%	18%	23%	27%	33%

Program Interface (API). This API request uses as input data the location and azimuth and tilt angles desired. The web-based tool outputs the PV energy production (monthly data output, denoted as Hm) applying the solar model implemented in PvGis [30]. The results, in comma-separated values (CSV) format, were collected in a macro programmed in Visual Basic for Applications (VBA) to be sorted in a spreadsheet. The analysis and mapping of the result plots were performed within the framework of this spreadsheet.

Computation of total solar radiation

From the monthly PV potential computed for the optimal tilt angle

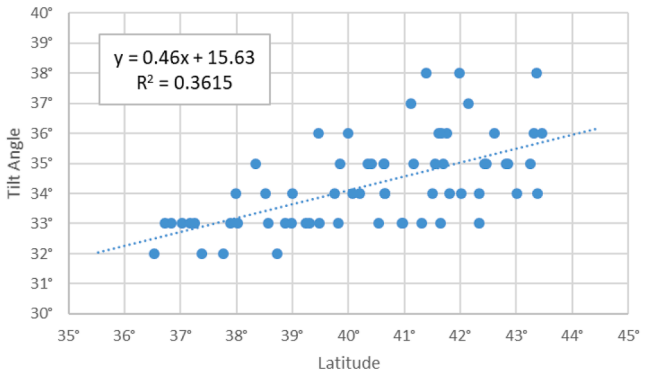


Fig. 5. Relationship between the latitude and the optimal PV tilt angle.

(M6) and South orientation, the Equivalent Sun Hours (ESH) are estimated, per representative location in the Iberian Peninsula. The location of reference for each administrative area is the capital city. That is, one request is made per capital city, regarding the monthly PV potential, and the values from the most favorable and least favorable months are considered for the classification of each area in the corresponding solar climate zone.

Results

With all the data computed, the optimal PV tilt angle was sorted for each location as well as its annual production that will be considered as reference value for further studies. Table 2 shows the production results for all locations under study, considering a PV installation with South orientation (0°) and the optimal tilt angle calculated by PvGis (M6). The optimal tilt angles according to methodologies M1 to M5, are also shown in the table.

Latitude vs optimal tilt angle

Fig. 5 shows the optimal PV tilt angle value for all the locations under study obtained with PvGis. Despite the existence of different tilt values for the same latitude, the tendency line shows that the more the latitude, the higher the tilt angle. The trend line equation has been calculated as Eq. (8):

$$\beta = 0.462 \cdot \phi + 15.639 \quad (8)$$

where β is the tilt angle and ϕ is the latitude, both in degrees.

The discrepancy observed between similar latitudes that present different values of optimal tilt angle could be caused by the fact that PvGis considers more parameters to obtain the optimal tilt angle than the other methods, such as historical cloudy index and terrain shadows. This shows that, although the latitude is the most influential parameter regarding optimal tilt angle, the other parameters considered also play a role in its definition.

Determination of solar climate zones

As a result of the maximum and minimum solar radiation received monthly in each location of the Iberian Peninsula, the territory can be divided in six solar climate zones, according to the classification established in the Spanish CTE:

- Zone 1: from 1186.8 to 1319.0 kJ/m^2
- Zone 2: from 1319.0 to 1451.3 kJ/m^2
- Zone 3: from 1451.3 to 1583.5 kJ/m^2
- Zone 4: from 1583.5 to 1715.8 kJ/m^2
- Zone 5: from 1715.8 to 1848.0 kJ/m^2
- Zone 6: minimum potential higher than 1848.0 kJ/m^2

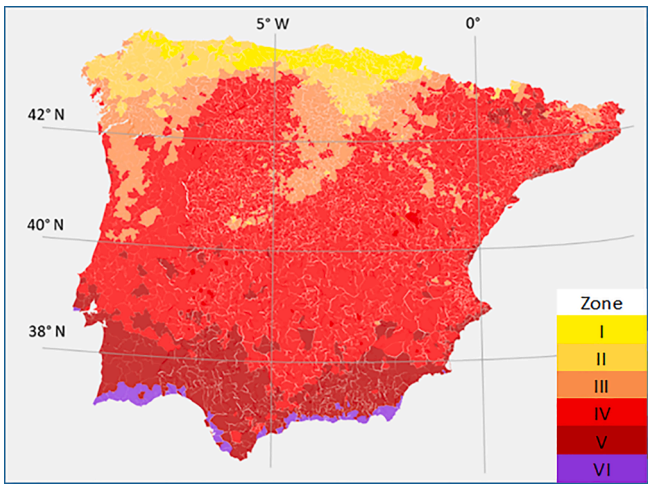


Fig. 6. Map of solar climate zones of the Iberian Peninsula.

According to these values and using the solar radiation values computed per location with PvGis tool, a new proposal of map of solar climate zones of the Iberian Peninsula can be made, Fig. 6.

Discussion

Optimal tilt angle in the Iberian Peninsula

Figure shows the annual energy production losses for different tilt angles ranging from 0° to 90° with 5° steps, for all locations listed in Table 2. Results were compared to the curve of the CTE equation (Eq. (5)), considering 34° as optimal PV tilt angle and 0° as optimal azimuth angle.

Considering as threshold value the 10% (Fig. 7 – green dashed line) of maximum losses allowed in the "General case" of the CTE [60], the PV tilt angle can range between 10° and 60° in the Iberian Peninsula.

In the same way and taking into account that the optimal tilt angle varies if the maximum production is aimed for the whole year or only seasonally (maximum energy production in winter, or maximum energy production in summer). Fig. 8 shows the curves for the annual and seasonal losses for different tilt angles. The average PV production loss per city and that obtained from the CTE equation were represented, considering as optimal PV tilt angles 34° for maximizing production over a year. Winter seasonal production implies an increase in the optimal tilt angle of 21° (55°) and for the summer, the seasonal production tilt angle is decreased 14° (20°).

As a result of this comparison, it was observed that the CTE methodology (defined in Eq. (5)) results in a parabolic curve almost identical to the curve resulting from the mean of the values of energy production losses computed specifically from data of the cities; that is, considering 34° as the optimal tilt angle for annual production in the Iberian Peninsula.

Winter and summer seasonal optimal tilt angles have been obtained with the data extracted from the tilt analysis from 0° to 90° with 5° steps, considering as summer months: April, May, June, July, August and September, and as winter months: January, February, March, October, November and December. Thus, the optimal tilt angle is the average optimal tilt angle for all locations (maximum irradiation). If a maximum loss of 10% is allowed, the optimal tilt angle range is from 10° to 60° considering annual production; from 0° to 45° in summer; and from 30° to 80° in winter. Fig. 9 shows the optimal tilt angles computed for different locations, as representatives for the rest of the Iberian Peninsula.

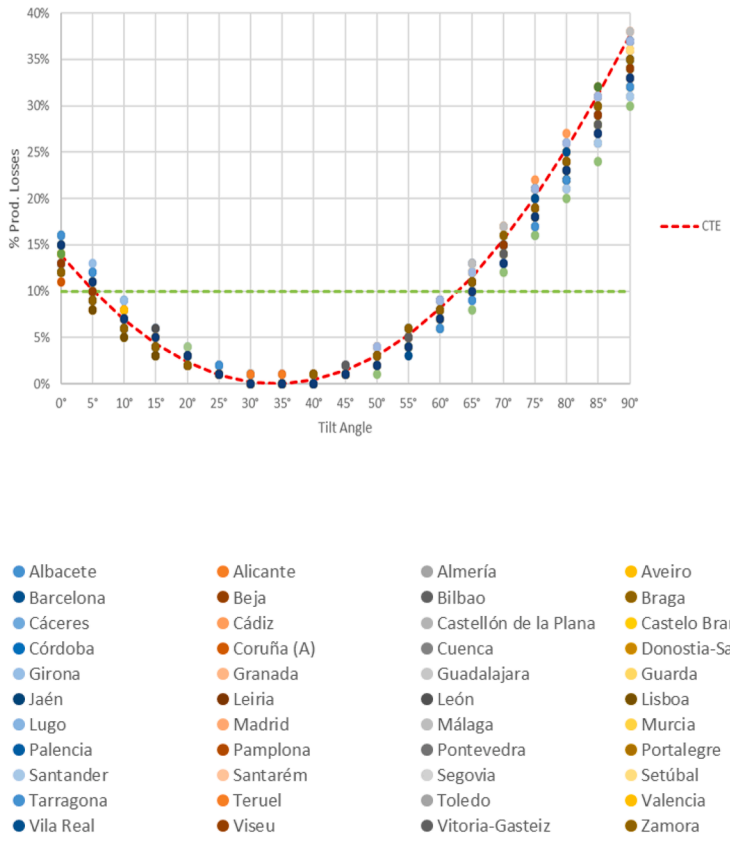


Fig. 7. Annual production losses with respect to variations in tilt angle. Although they cannot be seen, all tilt angles have been tested for all locations. In the following Table 3 all values are shown.

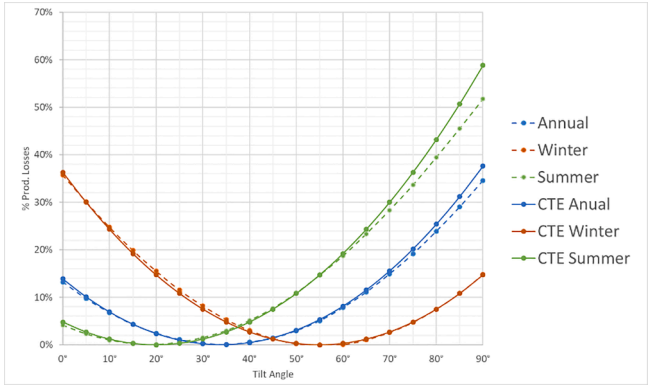


Fig. 8. Comparison of annual and seasonal production losses per tilt angle according to the computation of the PvGis tool (dashed line) and the CTE Eq. (5) (continuous line).

Comparison of methodologies to estimate the optimal annual tilt angle

Comparing the production values obtained for each methodology and the production losses caused by the tilt angle with respect to the optimal production (Table 2), Fig. 9 shows the production losses for all locations in the Iberian Peninsula. Separated maps have been generated in order to classify which methodology is more accurate.

a) Fixed Optimal Tilt Angle (M5: $\beta = 34°$)

Fig. 10(a) shows the energy losses with respect to the maximum annual performance for a fixed PV system with tilt angle (β) equal to the average of the optimal tilt angles calculated (34°). It is observed that the

Vitoria - Winter	
Tilt	0° - Orien.
0 °	65.98
5 °	71.30
10 °	76.28
15 °	80.88
20 °	85.23
25 °	89.02
30 °	92.20
35 °	94.92
40 °	96.98
45 °	98.58
50 °	99.53
55 °	99.95
60 °	99.55
65 °	98.78
70 °	97.32
75 °	95.35
80 °	92.70
85 °	89.40
90 °	85.75

Zaragoza - Summer	
Tilt	0° - Orien.
0 °	197.50
5 °	202.00
10 °	205.00
15 °	207.00
20 °	208.17
25 °	207.50
30 °	205.67
35 °	203.00
40 °	199.33
45 °	194.33
50 °	188.17
55 °	180.67
60 °	172.50
65 °	163.17
70 °	153.00
75 °	141.83
80 °	129.83
85 °	117.33
90 °	104.32

Fig. 9. Seasonal solar radiation values for different tilt angles.

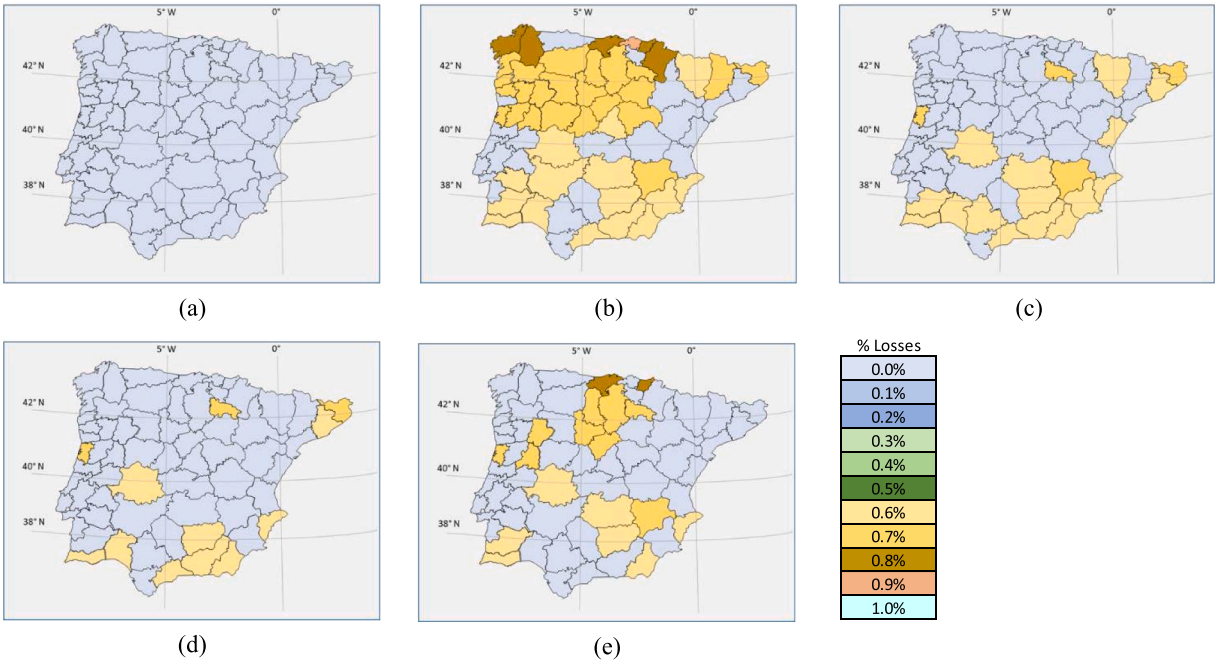


Fig. 10. Energy losses with respect to the reference production (M6), as computed with: (a) M5; (b) M1; (c) M2; (d) M3; (e) M4.

performance is almost 100% (0% losses) for all the locations of the Iberian Peninsula.

b) M1 (tilt angle $\beta = |\phi|$)

Fig. 10(b) shows the energy losses with respect to the maximum annual performance for a fixed PV system with tilt angle (β) equal to latitude (ϕ), It can be seen that the maximum losses are located in the north of Iberian Peninsula, reaching its maximum at 0.9% for the city of Bilbao.

c) M2 (tilt angle $\beta = |\phi| - 10$)

Fig. 10 (c) shows the energy losses regarding the maximum annual performance for a fixed PV system with tilt angle (β) equal to latitude ($\phi - 10$), It can be appreciated that the losses are lower than in M1, especially in the North locations, being the maximum loss value 0.7% for the cities of Girona, Logroño, Aveiro and Albacete.

d) M3 (tilt angle $\beta = 3.7 + 0.69 \cdot |\phi|$)

Fig. 10(d) presents the energy losses in reference to the maximum annual performance for a fixed PV system with tilt angle calculated as a result of methodology 3. The losses are a bit lower than in the methodology 2, being the maximum value 0.7% for the cities of Girona, Logroño and Aveiro.

e) M4 (tilt angle $\beta = 3.7 + 0.69 \cdot (|\phi| - 10)$)

Fig. 10(e) shows the energy losses with respect to the maximum annual performance for a fixed PV system with tilt angle calculated as a result of methodology 4. It can be appreciated that the losses are higher than in methodology 3, especially in the Northern locations, and similar to the results of methodology 2, being the maximum loss value 0.8% for the cities of Santander and San Sebastián.

Once the different expressions to calculate the optimal tilt angle are compared, the results show that the estimated annual production does not present great variations for each methodology, since the maximum production losses are always below 1% (the highest loss is 0.9% in M1), being the best methodology M5 ($\beta = 34°$), followed by M3 ($\beta = 3.7 + 0.69 \cdot |\phi|$).

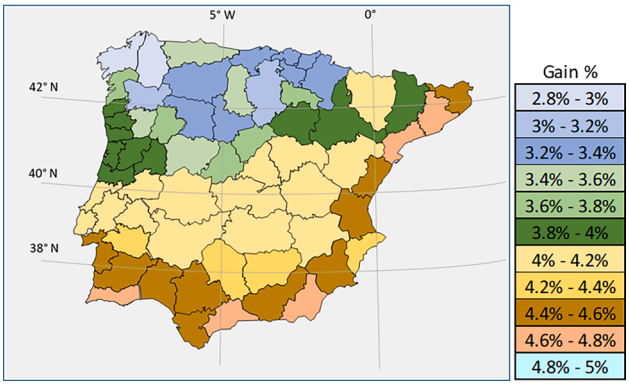


Fig. 11. Energy gain obtained with installations with two tilt angles (winter/summer) with respect to the annual reference production.

Comparison of production for seasonal optimal tilt angles with the production for annual optimal tilt angle

Considering the seasonal optimal tilt angles for winter (55°) and summer (20°) as mentioned in section above, the following Fig. 11 shows the energy gain for a two angles configuration PV system with respect to a fixed PV system with the same annual angle (34°).

The mean gains in energy production are 4%, with a clear division in the northeast-southwest direction.

Comparison of updated climate zones with the standard

Solar production values (Hm) computed per city with PvGis have been used to calculate the mean monthly production (Em) and the annual and seasonal (winter and summer) reference equivalent hours (Figs. 12–14, respectively). Reference equivalent hours are used to classify each province/district in 5 groups, the same number as in the CTE [60], with equitable production ranges, so that the difference

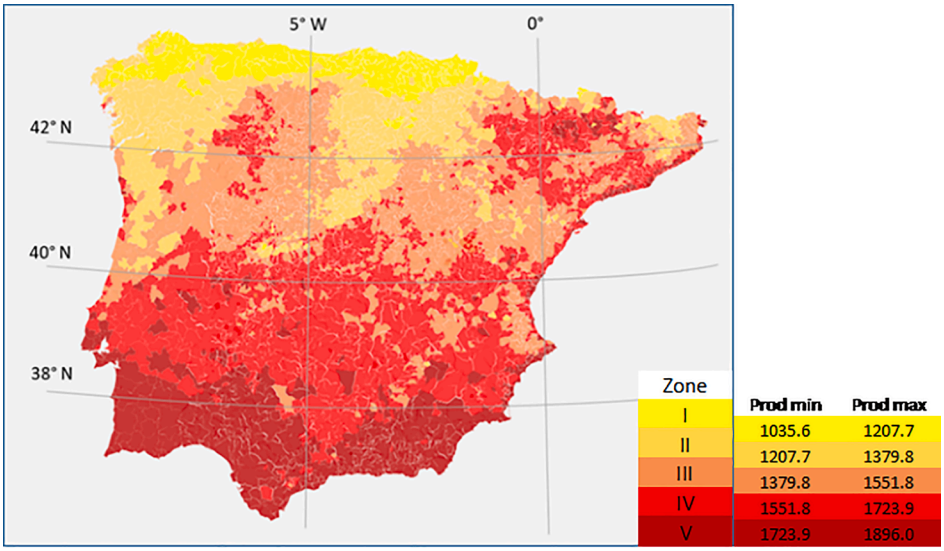


Fig. 12. Update climate zones in the Iberian Peninsula according to the annual solar energy production.

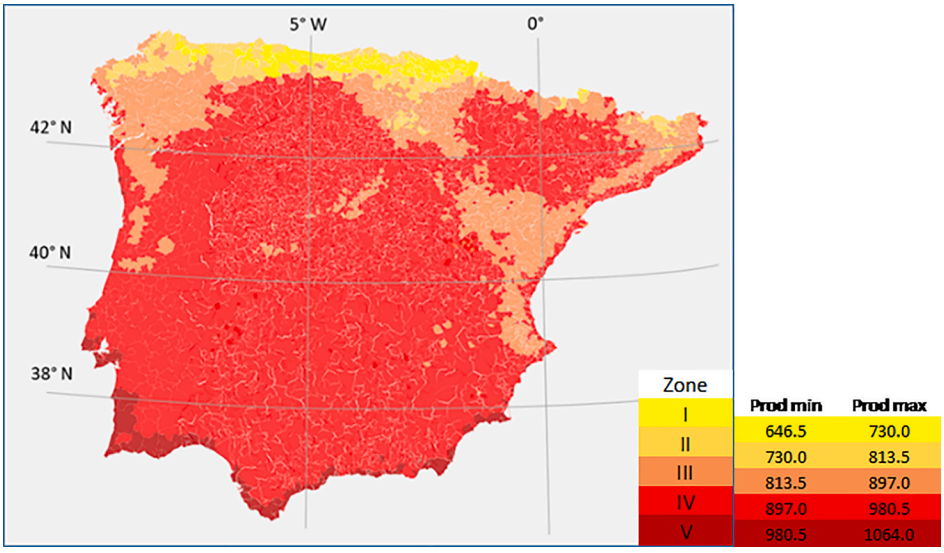


Fig. 13. Update climate zones in the Iberian Peninsula according to the seasonal (summer) solar energy production.

between maximum and minimum production values is equal for all groups.

Conclusions

After analysing the results, it can be concluded that for the Iberian Peninsula the optimal PV tilt angle can be established in 34° when maximizing the annual production is the target, since this is the tilt angle with lowest losses in the annual analysis. PV systems have annual production losses of less than 0.1% regarding that obtained for each optimal tilt angle. Considering that the Spanish national regulations for buildings set the maximum production loss due to tilt and azimuth angles allowed of 10%, the range for a yearly fixed tilt angle could be from 10° up to 60° in the Iberian Peninsula. However, when maximizing the seasonal PV production, the optimal tilt angles are 20° for summertime and 55° for wintertime, −14° and +21° regarding the optimal annual tilt angle, respectively, being both values within the range established by the CTE.

Comparing the different approaches existing in literature to calculate the optimal tilt angle, differences lower than 1% were obtained between them. Thus, although the tilt angle is a key parameter that influences the PV energy production, its variation must be significant in order to have an impact on production losses.

When the PV systems are installed coplanar to the roof surfaces, tilt and orientation angles are not usually optimal. In these cases, the economic feasibility of the support installation depends on both the production losses and the support system installation costs. In this line, PV systems with not tilt angle fixed supports could be analysed, in order to modify this angle through the year, increasing the energy production from 2.8% up to 4.8% (two seasonal tilt angles configuration).

Finally, future works will deal with (i) the performance of an analysis of the azimuth angle similar to the present study about the tilt angle, (ii) the combination of the results of this study with those in [18] will make possible the classification of all the roofs of a city by their PV performance, and (iii) the energy gain considering four different seasonal tilt angles (Winter, Spring, Summer, Autumn).

CRediT authorship contribution statement

E. González-González: Formal analysis, Methodology, Writing –

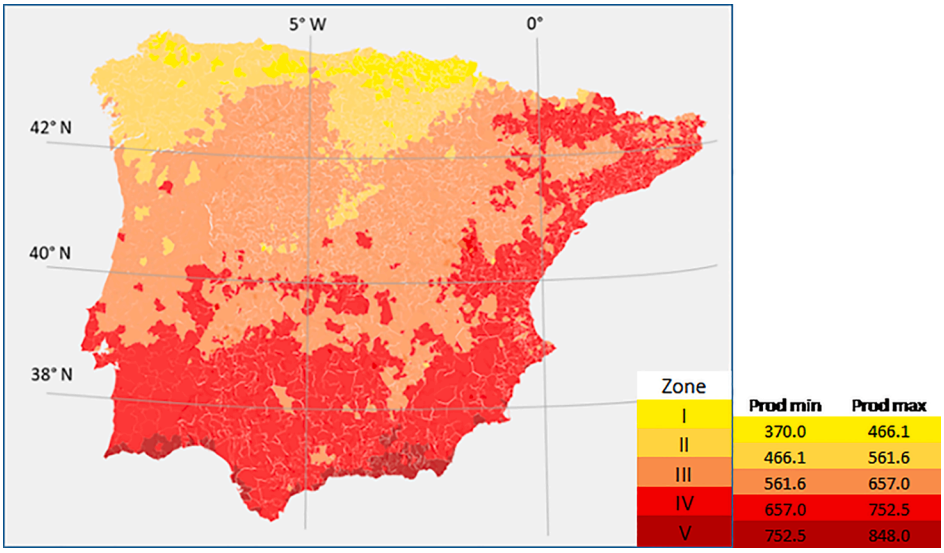


Fig. 14. Update climate zones in the Iberian Peninsula according to the seasonal (winter) solar energy production.

original draft. **J. Martín-Jiménez:** Data curation, Software. **M. Sánchez-Aparicio:** Resources, Validation. **S. Del Pozo:** Investigation. **S. Lagüela:** Conceptualization, Funding acquisition, Project administration, Writing - review & editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

Authors would like to thank Iberdrola S.L. and University of Salamanca for the funding provided through Cátedra Iberdrola VIII Centenary. We also express our gratitude to the Ministry of Science, Innovation and Universities for the funding given for the project RTC-2017-6291-3. Authors also want to thank to the Ministry of Education and the European Social Fund for the financial support given for pre-doctoral research staff (EDU/601/2020).

Funding

This work was supported by the Ministry of Science, Innovation and Universities of Spain [project RTC-2017-6291-3]; the Ministry of Education [EDU/601/2020]; and Cátedra Iberdrola-USAL VIII Centenary.

References

[1] Boemi S-N, Papadopoulos AM. Monitoring energy poverty in Northern Greece: the energy poverty phenomenon. Int J Sustainable Energy 2019;38(1):74–88.
[2] González-Eguino M. Energy poverty: an overview. Renewable Sustainable Energy Rev 2015;47:377–85.
[3] Mashhoodi B, Stead D, van Timmeren A. Spatial homogeneity and heterogeneity of energy poverty: a neglected dimension. Ann Gis 2019;25(1):19–31.
[4] Aristondo O, Onaindia E. Counting energy poverty in Spain between 2004 and 2015. Energy Policy 2018;113:420–9.
[5] Day R, Walker G, Simcock N. Conceptualising energy use and energy poverty using a capabilities framework. Energy Policy 2016;93:255–64.
[6] Okushima S. Gauging energy poverty: a multidimensional approach. Energy 2017;137:1159–66.
[7] Jackson RB, Le Quéré C, Andrew RM, Canadell JG, Korsbakken JI, Liu Z, et al. Global energy growth is outpacing decarbonization. Environ Res Lett 2018;13(12):120401. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf303.
[8] Lee J, Shepley MM. Benefits of solar photovoltaic systems for low-income families in social housing in Korea: renewable energy applications as solutions to energy poverty. J Build Eng 2020;28:101016.
[9] Wang Z, Zhu Y. Do energy technology innovations contribute to CO2 emissions abatement? A spatial perspective. Sci Total Environ 2020;726:138574. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138574.
[10] Chu C-T, Hawkes AD. A Geographic Information System-based global variable renewable potential assessment using spatially resolved simulation. Energy 2020;193:116630. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116630.
[11] Laha P, Chakraborty B, Østergaard PA. Electricity system scenario development of India with import independence in 2030. Renewable Energy 2020;151:627–39.
[12] Huang P, Lovati M, Zhang X, Bales C, Hallbeck S, Becker A, et al. Transforming a residential building cluster into electricity prosumers in Sweden: optimal design of a coupled PV-heat pump-thermal storage-electric vehicle system. Appl Energy 2019;255:113864. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113864.
[13] Mills AD, Levin T, Wiser R, Seel J, Botterud A. Impacts of variable renewable energy on wholesale markets and generating assets in the United States: a review of expectations and evidence. Renewable Sustainable Energy Rev 2020;120:109670. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109670.
[14] Müsgens F. Equilibrium prices and investment in electricity systems with CO2-emission trading and high shares of renewable energies. Energy Econ 2020;86:104107. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.028.
[15] Prieto-Prado I, Del Río-Gamero B, Gómez-Gotor A, Pérez-Báez SO. Water and energy self-supply in isolated areas through renewable energies using hydrogen and water as a double storage system. Desalination 2018;430:1–14.
[16] Sokolnikova P, Lombardi P, Arendarski B, Suslov K, Pantaleo AM, Kranhold M, et al. Net-zero multi-energy systems for Siberian rural communities: a methodology to size thermal and electric storage units. Renewable Energy 2020;155:979–89.
[17] Huang J, Li W, Guo L, Hu Xi, Hall JW. Renewable energy and household economy in rural China. Renewable Energy 2020;155:669–76.
[18] Martín-Jiménez J, Del Pozo S, Sánchez-Aparicio M, Lagüela S. Multi-scale roof characterization from LiDAR data and aerial orthoimagery: automatic computation of building photovoltaic capacity. Autom Constr 2020;109:102965. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102965.
[19] Bódis K, Kougias I, Jäger-Waldau A, Taylor N, Szabó S. A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union. Renewable Sustainable Energy Rev 2019;114:109309. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109309.
[20] Fina B, Auer H, Friedl W. Cost-optimal economic potential of shared rooftop PV in energy communities: evidence from Austria. Renewable Energy 2020;152:217–28.
[21] Jäger-Waldau A, et al. Self-consumption of electricity produced with photovoltaic systems in apartment buildings - Update of the situation in various IEA PVPS countries. In: 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC); 2020. p. 0938–50. https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300442.
[22] Ministerio para la Transición Ecológica, Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica, vol. BOE-A-2019-5089. 2019, pp. 35674–35719. Accessed: Jul., 2021. [Online]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/04/05/244>.
[23] Keiner D, Ram M, Barbosa LDSNS, Bogdanov D, Breyer C. Cost optimal self-consumption of PV prosumers with stationary batteries, heat pumps, thermal energy storage and electric vehicles across the world up to 2050. Sol Energy 2019;185:406–23.
[24] Vartiainen E, Masson G, Breyer C, Moser D, Román-Medina E. Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelized cost of electricity. Progress Photovoltaics. Special Issue: EU PVSEC 2019;28(6):439–53.
[25] Zhong Q, Tong D. Spatial layout optimization for solar photovoltaic (PV) panel installation. Renewable Energy 2020;150:1–11.

[26] Harry A, Atwater and Albert Polman. Plasmonics for improved photovoltaic devices. Mater Sustainable Energy 2010:1–11. https://doi.org/10.1142/9789814317665_0001.
[27] Sjerps-Koomen EA, Alsema EA, Turkenburg WC. A simple model for PV module reflection losses under field conditions. Sol Energy 1996;57(6):421–32.
[28] Martín N, Ruiz JM. Annual angular reflection losses in PV modules. Prog Photovoltaics: Res Appl 2005;13(1):75–84. https://doi.org/10.1002/pip.585.
[29] Psomopoulos CS, Ioannidis GC, Kaminaris SD, et al. Environ Process 2015;2(Suppl 1):175. https://doi.org/10.1007/s40710-015-0092-4.
[30] Joint Research Centre. Photovoltaic geographical information system. <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html>.
[31] NREL PVWatts Calculator. National Renewable Energy Laboratory. <https://pvwatts.nrel.gov/>. [last access: 10/November/2019].
[32] Natural Resources Canada (NRCan) CANMET Energy Technology Centre for renewable energy technologies analysis. <http://www.nrel.gov/>. [last access: 05/March/2021].
[33] Sánchez-Aparicio M, Martín-Jiménez J, Del Pozo S, González-González E, Lagüela S. Ener3DMap-SolarWeb Roofs: a geospatial web-based platform to compute photovoltaic potential. Renewable Sustainable Energy Rev 2021;135:110203. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110203.
[34] Odeh S. Analysis of the performance indicators of the PV power system. J Power Energy Eng 2018;06(06):59–75.
[35] Sharma S, Kurian CP, Paragond LS. Solar PV system design using PVsyst: a case study of an academic Institute. In: 2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCCT). IEEE; 2018. p. 123–8.
[36] Odeh S. The development of a performance indicator for PV power generators. In: Transition Towards 100% Renewable Energy. Cham: Springer; 2018. p. 295–309.
[37] Bakirci K. General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. Renewable Sustainable Energy Rev 2012;16(8):6149–59. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.009.
[38] Benghanem M. Optimization of tilt angle for solar panel: case study for Madinah, Saudi Arabia. Appl Energy 2011;88(4):1427–33. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.001.
[39] Sumathi V, Jayapragash R, Bakshi A, Kumar Akella P. Solar tracking methods to maximize PV system output–a review of the methods adopted in recent decade. Renewable Sustainable Energy Rev 2017;74:130–8.
[40] Eke R, Senturk A. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. Sol Energy 2012;86(9):2665–72. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.006.
[41] Kaddoura Tarek O, Ramli Makbul AM, Al-Turki Yusuf A. On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia. Renewable Sustainable Energy Rev 2016;65:626–34. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.032.
[42] Al Garni HZ, Awasthi A, Wright D. Optimal orientation angles for maximizing energy yield for solar PV in Saudi Arabia. Renewable Energy 2019;133:538–50.
[43] Hafez AZ, Soliman A, El-Metwally KA, Ismail IM. Tilt and azimuth angles in solar energy applications–a review. Renewable Sustainable Energy Rev 2017;77:147–68.
[44] Liu S, Yan Y, Zhang Z, Bai J. Effect of distributed photovoltaic power station on cooling load induced by roof for sunny day in summer. Therm Sci Eng Progress 2019;10:36–41.
[45] Ullah A, Imran H, Maqsood Z, Butt NZ. Investigation of optimal tilt angles and effects of soiling on PV energy production in Pakistan. Renewable Energy 2019;139:830–43.
[46] Babatunde AA, Abbasoglu S, Senol M. Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants. Renewable Sustainable Energy Rev 2018;90:1017–26.
[47] Fountoukis C, Figgis B, Ackermann L, Ayoub MA. Effects of atmospheric dust deposition on solar PV energy production in a desert environment. Sol Energy 2018;164:94–100.
[48] Guo M, Zang H, Gao S, Chen T, Xiao J, Cheng L, et al. Optimal tilt angle and orientation of photovoltaic modules using HS algorithm in different climates of China. Appl Sci 2017;7(10):1028. https://doi.org/10.3390/app7101028.
[49] Cheng CL, Charles S, Jimenez Sanchez, Lee Meng-Chieh. Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans. Renewable Energy 2009;34:1644–50. https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.025. ISSN 0960-1481.
[50] Gharakhani Siraki A, Pillay P. Study of optimum tilt angles for solar panels in different latitudes for urban applications. Sol Energy 2012;86(6):1920–8.
[51] Lorenzo E. Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos. Sevilla: Progensa; 2006.
[52] Lamigueiro O P. Energía Solar Fotovoltaica. Available at: <https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>. (last access: March/2021).
[53] Elminir HK, Ghitas AE, El-Hussainy F, Hamid R, Beheary MM, Abdel-Moneim KM. Optimum solar flat-plate collector slope: case study for Helwan, Egypt. Energy Convers Manag 2006;47(5):624–37. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.05.015.
[54] Yellott H. Utilization of sun and sky radiation for heating and cooling of buildings. ASHRAE J 1973;15.
[55] Cardoso RS, Amorim MCCT. Urban heat island analysis using the 'local climate zone' scheme in Presidente Prudente, Brazil. Investigaciones Geográficas 2018;69:107–18. https://doi.org/10.14198/INGEO2018.69.07.
[56] Global Solar Atlas. World Bank Group. Available at: <https://globalsolaratlas.info/map>. (last access: 05/March/2021).
[57] Sancho JM, Riesco J, Jiménez C, Sánchez MC, Montero J, López M. Atlas de radiación solar en España utilizando datos del SAF de clima de EUMETSAT. Spain: Agencia Estatal de Meteorología; 2012.
[58] PVGIS Meteorological Data. Institute for Energy and Transport, Joint Research Centre, European Commission. Available at: <https://www.pvsyst.com/help/meteo_source_pvgis.htm>. (last access: 05/March/2021).
[59] PVWatts Calculator. NREL. Available at: <https://pvwatts.nrel.gov/version_6.php>. (last access: 05/March/2021).
[60] Spanish Building Technical Code. Available at: <https://www.coit.es/system/files/link_group/he_5_contribucion_fotovoltaica_minima_de_energia_electrica_77f479a7.pdf>. (last access: 05/March/2021).

CAPÍTULO III:

ANÁLISIS DEL DISEÑO DE
AEROGENERADORES SIN PALAS

3 CAPÍTULO III: ANÁLISIS DEL DISEÑO DE AEROGENERADORES SIN PALAS

3.1 Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations

Este capítulo contiene el artículo *Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations* publicado en la revista científica de alto impacto Applied Sciences en 2024.

3.1.1 Resumen

Este estudio presenta una exploración exhaustiva centrada en la morfología y estructura superficial de los aerogeneradores sin aspas (BWT) con el objetivo de optimizar su capacidad de captación de energía eólica. A diferencia de la tecnología eólica convencional, donde la vibración inducida por vórtices (VIV) se considera problemática debido a la resonancia aeroelástica, este efecto resulta ventajoso en los recolectores de energía de BWT, ya que carecen de contacto friccional o engranajes. El objetivo principal de este estudio es desarrollar un diseño óptimo de BWT para maximizar la producción de energía. Específicamente, este estudio se centra en optimizar el rendimiento energético de estos recolectores de energía eólica VIV, investigando cómo la geometría (forma y rugosidad) influye en su rango de operación, conocido como rango de "Lock-In". Los resultados demuestran cómo las variaciones en la geometría (convergente, recta o divergente) pueden desplazar el rango de "Lock-In" a diferentes números de Reynolds (Re), modelados por la ecuación: Re (máx Lock-In) = 0.30 α + 4.06. Como resultado, este estudio destaca el impacto mínimo de la rugosidad dentro de las condiciones de prueba consideradas.

3.1.2 Artículo II

https://doi.org/10.3390/app14072815

applied sciences

MDPI

Article

Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations

Enrique González-González [1,*], David J. Yáñez [2], Susana Del Pozo [1] and Susana Lagüela [1]

[1] Department of Cartographic and Land Engineering, University of Salamanca, Hornos Caleros, 50, 05503 Ávila, Spain; s.p.aguilera@usal.es (S.D.P.); sulaguela@usal.es (S.L.)
[2] Vortex Bladeless S.L., 05001 Ávila, Spain; david@vortexbladeless.com
* Correspondence: egonzalezgonzalez@usal.es

Abstract: This study presents a comprehensive exploration centred on the morphology and surface structure of bladeless wind turbines (BWTs) aimed at optimizing their wind energy harvesting capability. Unlike conventional wind technology where vortex-induced vibration (VIV) is seen as problematic due to aeroelastic resonance, this effect becomes advantageous in BWT energy harvesters, devoid of frictional contact or gears. The primary objective of this study is to develop an optimal BWT design for maximizing energy output. Specifically, this study delves into optimizing the energy performance of these VIV wind energy harvesters, investigating how the geometry (shape and roughness) influences their operating range, known as Lock-In range. The results demonstrate how variations in geometry (convergent, straight, or divergent) can shift the Lock-In range to different Reynolds numbers (Re), modelled by the equation: Re (max Lock-In) = 0.30 α + 4.06. Furthermore, this study highlights the minimal impact of roughness within the considered test conditions.

Keywords: wind energy; vortex-induced vibration (VIV); bluff body; VIV fluid–structure; Strouhal number; wind energy harvester; bladeless wind turbines (BWTs)

check for updates

Citation: González-González, E.; Yáñez, D.J.; Del Pozo, S.; Lagüela, S. Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 2815. https://doi.org/10.3390/app14072815

Academic Editor: Sergio Montelpare

Received: 28 February 2024
Revised: 18 March 2024
Accepted: 24 March 2024
Published: 27 March 2024

Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Currently, the energy sector is undergoing significant changes, shifting from centralized fossil fuel-based systems to decentralized models that rely on renewable energies [1]. In this context, the lower intensity of renewable energy resources and the possible network saturation underscore the importance of situating energy generation closer to consumption points [2]. Consequently, governmental initiatives have emerged to promote self-consumption facilities, that help in this energy transition [3].

In recent years, there has been notable progress in the development of innovative wind energy harvesting designs [4]. These innovations involve triboelectric nanogenerator (TENG) technology [5], as well as wind-induced vibrations. Notably, vortex-induced vibration (VIV) energy harvesters boast versatility [6], offering promise in establishing wind energy within distributed energy production framework [7], as seen in bladeless models developed by Vortex Bladeless [8–10]. The integration of BWTs through the interaction with multiple energy system technologies introduces new challenges as well as opportunities within future energy systems [11].

These BWT energy harvesters address several drawbacks associated with traditional turbines [12–14]. They mitigate negative impacts on bird wildlife [15] by minimizing collision risks [16] and environmental impact [17], minimize electromagnetic interference with communication frequencies, and have negligible visual and acoustic impacts. Their installation in residential settings, owing to the absence of gears and low maintenance needs, opens possibilities for hybridizing this technology with solar photovoltaics for self-consumption, optimizing energy availability even during low-solar-radiation periods or at night [18].

Maintaining stationary alignment irrespective of wind direction is crucial for these turbines, similar to the principles outlined in [19] utilizing cylindrical shapes. Furthermore, modifying parameters like taper ratio [20] and surface roughness [21] allows for optimizing vibration characteristics at different wind speeds, thereby maximizing energy generation, as evidenced by studies such as [22,23].

Despite their advantages, these energy harvesters have limitations, notably a narrow operational wind speed range called "Lock-In range" [24]. Efforts to address this include analysing monostable softening behaviour in the broadband VIV energy harvesting.

The novelty of this work lies in the exploration of VIV dynamics in bluff bodies supported by a cantilever rod, exhibiting circular oscillation rather than linear. Thus, both from an aerodynamic and functional point of view, these devices are akin to single-blade horizontal-axis wind turbines, differing significantly in their rotation angles, as shown in Figure 1.

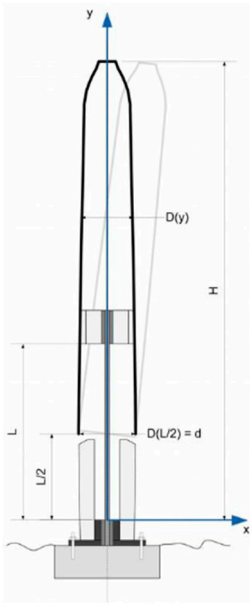


Figure 1. Angle of rotation for a VIV wind generator. Reproduced with permission from D.J. Yáñez, Vortex Bladeless; published by Vortex Bladeless, 2018 [25].

The choice of geometries studied here is consistent with their rotational nature, wherein the diameter of the mast section correlates with the distance to the rotation axis. Specifically, the investigation focuses on scaled models akin to Vortex Bladeless prototypes [26], spanning from the Vortex Nano models (0.85 m height, 0.07 m diameter, and 1.70 Kg weight) to the Vortex Atlantis models (9 m height, 0.72 m diameter, and 1300 Kg weight), as shown in Figure 2.

To achieve this, a series of controlled experiments were conducted in a wind tunnel, covering a range of Reynolds numbers from 2 K to 6 K. This study considered different surface conditions (smooth and rough) as well as various cylindrical mast geometries (convergent, straight, and divergent). This comprehensive analysis aims at elucidating the impact of surface characteristics and geometric parameters on the overall efficiency and energy generation potential of BWT energy harvesters.

The paper is organized as follows. After the introductory Section 1, Section 2 details the theoretical background underpinning the VIV principles for prototype design; Section 3 outlines the methodology for prototype development and testing; Sections 4 and 5 include the test results and their discussion; and Section 6 presents the conclusions reached after the performance of the study.

(**a**) (**b**)

Figure 2. Vortex Nano with a height of 0.85 m (**a**), and Vortex Atlantis with a height of 9 m (**b**).

The findings of this research highlight critical advancements in the field of bladeless wind turbines, providing essential insights into the decisive influence of geometry and diameter on the Lock-In range, a key factor for optimizing energy efficiency. The provided equation for predicting the maximum Lock-In range value, with its high predictive capacity, enables the accurate forecasting of the performance of these devices, marking a significant step forward in the development and application of bladeless wind energy technologies.

2. Theoretical Background

When solid objects or bluff bodies interact with fluid flows, they experience drag and lift forces influenced by their shape and orientation within the stream [27]. The distribution of fluid velocity along the body surface can induce oscillatory movement through vortex shedding, a phenomenon elucidated by Karman [28], Bearman [29], and Gerrard [30], explaining the vibration caused in bodies by VIV. Historically, aerodynamic effects have been studied as a detrimental effect of wind on structures, which is typically sought to be avoided, like in [31] to avoid risk in high-rise buildings.

Roshko [32] established the relation between shedding frequency and wake width, known as the Strouhal number ($St = f \cdot D/U$, where f is the frequency, D is the diameter, and U is the fluid velocity). Following this, ref. [33] stated that the correlation between the Strouhal (St) and Reynolds (Re) numbers is such that St number consistently maintains a value of 0.2 with slight variation between a smooth surface and a rough surface, across a wide Re range ($250 < Re < 2 \times 10^5$).

BWT energy harvesters are pioneering designs that aim to capture wind energy without traditional rotating blades. The basic main components, outlined in [19], encompass the mast, central base, suspension and tuning system, alternator, and power storage unit.

The inherent frequency of oscillation within a rigid structure remains constant, limiting the range of wind velocities where resonance and the resulting VIV phenomenon occur, commonly known as the "Lock-In range" [34]. Considering that the VIV can be approximated as a simple harmonic motion of a body with a mass (m) connected to an elastic element with a spring constant (k), the resonance frequency (f) of this oscillation can be determined using Equation (1) [35].

$$f = 1/2\,\pi\,\sqrt{(k/m)} \quad (1)$$

Ongoing BWT research mainly focuses on expanding this range through design extensions, as done in [36], where an interfering cylinder analysis is conducted. In addition, ref. [25] introduces an electro-mechanical device serving both as an energy generation (alternator) and a tuning system, aiming to broaden the Lock-In range.

Within this context, numerous tests have been performed to analyse how the shape and surface roughness of the structure influence the aerodynamic design of BWTs.

3. Methodology

3.1. Prototype Design

The blueprint for the prototype was meticulously crafted, considering multiple factors to ensure its functionality and efficacy. This prototype served as both a proof of concept and a testbed, enabling a comprehensive evaluation of the bladeless wind turbine's performance based on VIV.

Commencing with material selection, the design process prioritized materials possessing robustness, durability, and lightweight properties essential for operational efficiency. The structural components were designed to withstand dynamic wind forces, wich produce vibrations.

Aerodynamic optimization formed a cornerstone, focusing on shaping and refining surface characteristics to facilitate the vortex generation and shedding, thereby promoting VIV. In this way, wind tunnel tests were employed to analyse and refine the turbine's aerodynamic efficiency.

In the present work, the prototype used incorporates sensors and data acquisition systems to real-time monitor some critical parameters, like wind speed and vibration amplitudes. These data proved instrumental in evaluating the prototype's performance and identifying avenues for further enhancements.

Derived from [35], the prototype used in this study adheres to the dimensions illustrated in Figure 3.

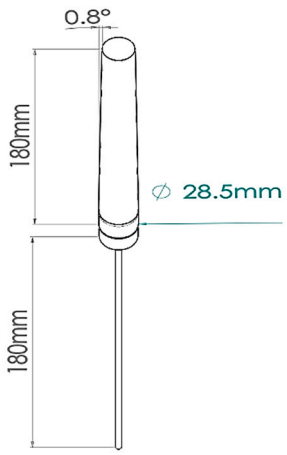


Figure 3. Dimensioned drawing of the model used in the experiments.

Expanding the study, two additional modified models were subjected to testing alongside the original model shown in Figure 4. The original model features a cylindrical section of 28.50 mm transitioning into a convergent conical section with a $-0.80°$ angle. The modifications include a pure cylindrical section model (0° angle), and another with a cylindrical section transitioning into a divergent conical section (0.80° angle). A total of six models (Figure 4) were tested, each test under both smooth and rough surface conditions.

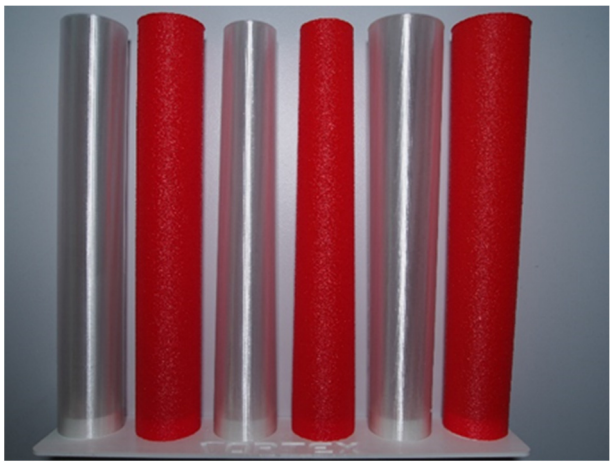


Figure 4. From left to right: straight geometry, convergent (original model), and divergent for the prototypes tested with smooth surfaces (transparent) and rough surfaces (red).

Figure 4 displays the six prototypes designed and manufactured to analyse the effect of geometry and roughness on the performance of BWT energy harvesters. The red surfaces represent the rough prototypes, while the transparent surfaces represent the smooth prototypes.

Fabrication employed additive manufacturing via 3D printing technology using Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) [37]. For the smooth models, a constant diameter was maintained for each layer, whereas for the rough-surfaced ones, specific parameters (a 0.3 mm ripple thickness and a 0.80 mm spacing between ripples) were applied to each layer (Figure 5). The printing process maintained a layer thickness of 0.10 mm.

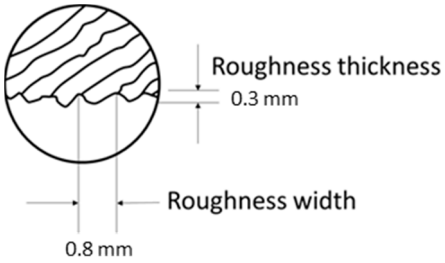


Figure 5. Dimensioned drawing of the tested roughness in the experiments.

While the joining part with the mast retained a consistent diameter (28.50 mm) across all prototypes, variations in mass occurred due to differing fabrication materials and geometries (convergent, straight, and divergent) as well as surface finishes (smooth and rough). Table 1 provides details of the masses of the six tested prototypes.

Table 1. Masses of the different prototypes tested.

Surface/Geometry	Convergent	Straight	Divergent
Smooth	7.33 g	8.02 g	8.72 g
Rough	8.02 g	8.66 g	9.36 g

To simplify the prototype used in the experiments, certain elements from the original model, such as coatings and casings, were omitted. Only the upper segment responsible for wind energy harvesting was tested. This segment was connected centrally (via a rib) to a 4 mm diameter fiberglass rod (200 mm long) serving as the mast, anchoring the turbine to a fixation point. The fixation involved securing 20 mm of the mast into a mandrel, further anchored to the ground. The vibration sensor, positioned 180 mm from the fixation to the

rib, was minimally invasive due to the fact that the dynamics of a body subjected to an aerodynamic resonance phenomenon is influenced by its m* (characteristic mass) and/or its inertia I*. The location of the sensor in a position very close to the bottom recess of the rod minimizes the added inertia and aims to be minimally invasive by alternating as little as possible the dynamics of the device compared to the same in the case of not being monitored. In addition, the greatest bending of the rod occurs at the bottom of the rod and thus maximizes the signal produced by the piezoelectric sensor. Figure 6 provides an overview of these parameters and the placement of the prototype within the wind tunnel's test chamber.

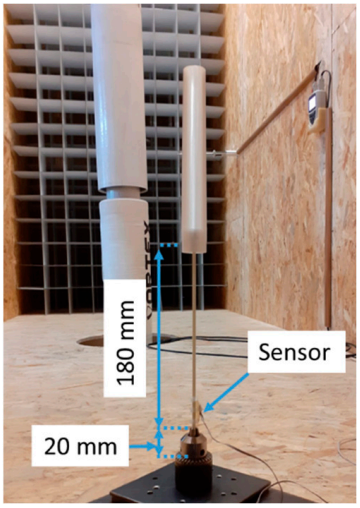


Figure 6. Placement of the prototype inside the test chamber.

3.2. Wind Tunnel Test and Data Logging

Testing was conducted in the Vortepsa wind tunnel (Figure 7), situated at the Higher Polytechnic School of Ávila, Spain. This facility boasts a symmetrical wind tunnel (geometry in eight) of a total length of 9.1 m, whose working section is 3.2 m high by 1.4 m wide, and a distance between the laminarizing lattice and the study model of 3.7 m. The air is driven by 8 fans, model SODECA HCH-80-4T-3/PL IE3 of 2.2 kW of electrical power, arranged in 2 vertical arrays of 4 fans each, and the tunnel generates a collective power of 60 kW. Through a variable frequency drive, the wind speed can be precisely controlled, allowing velocities of up to 30 m/s to be achieved.

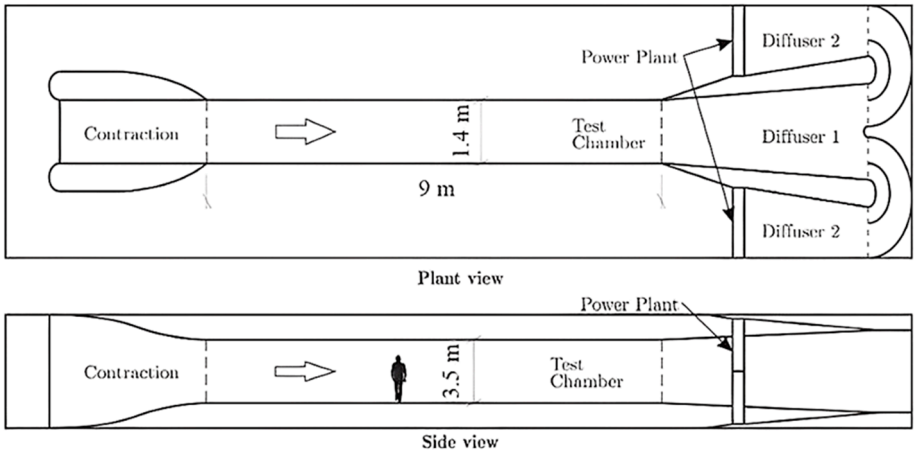


Figure 7. Vortepsa wind tunnel scheme. (**Top**) Plant view. (**Bottom**) Side view.

In the selection of the sensors, high acquisition frequency, reproducibility, and simplicity were prioritized. A piezoelectric diaphragm CPT-2065-L100 zirconate-lead titanate transducer was used, which produces an analogical signal when a deformation is induced in it. For its adaptation to the rod, a plastic support (PETG) was manufactured using 3D printing so that its bending is induced in the middle axis of the piezoelectric disc. As it is evident, with this sensor we do not obtain or try to measure net values of deformation, but to acquire comparative measures of greater or lesser bending.

For data acquisition, a piezoelectric sensor [38] was strategically placed where the maximum bending moment occurs in a cantilever rod, at the base of each prototype's mast during testing. This sensor, connected to an oscilloscope, facilitated the assessment of each model's behaviour under different wind speeds. The oscilloscope, an Owon model SDS1022 [39] manufactured by Fujian Lilliput Optoelectronics Technology Co. from Zhangzhou, China, recorded mast oscillation frequency and magnitude at a rate of 25 measurements per second. Data were stored in *.CSV format on a USB memory device for subsequent analysis and interpretation.

3.3. Test Speed Range

The study of the VIV phenomenon in laminar and turbulent environment is well known and perhaps sufficiently studied in the available literature [40]. In the present case, the wind tunnel is intended to sufficiently mimic fluid conditions similar to those that such a device might encounter in a standard wind turbine farm. However, as usual, the "fine-grained" turbulence content is possibly higher than the airflow that would be encountered in the natural environment.

The experimental speed range for testing was determined based on the operating conditions and limitations of the wind tunnel. Controlled by a frequency converter governing fan speed, the wind speed was gauged using a hot-wire anemometer, specifically the Almemo 2470 model [41] manufactured by Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH from Munich, Germany, positioned within the test chamber.

The natural frequency of each prototype primarily depends on the mast length, stiffness, and mass distribution it supports. Although the mast remains consistent across the prototypes, variations in the surface or geometry of the top segment cause slight mass discrepancies, which leads to empirically measuring the natural frequency of each prototype. Table 2 presents these frequencies.

Table 2. Natural frequency of prototypes.

Surface/Geometry	Convergent	Straight	Divergent
Smooth	10.25 Hz	10.01 Hz	9.77 Hz
Rough	10.10 Hz	9.85 Hz	9.52 Hz

Given that the prototype geometry determines its natural frequency, this frequency is used to estimate the wind speed where VIV occurs, aligning the structure's natural frequency with vortex frequency. The theoretical resonance velocity (V), calculated using Equation (2) [8], stands at 1.46 m/s, considering S_t = 0.2 (Figure 2), f = [9.52–10.25] Hz (Table 2), and ∅ = 28.5 mm (Figure 4).

$$f = S_t \times V/\varnothing \quad (2)$$

The selection of the test velocity range, grounded in theoretical calculations and starting from the calculated minimum resonance velocity (1.50 m/s) to the maximum experimentally determined velocity (10 m/s), ensures that the frequency range (5.50–10 Hz) aligns perfectly with the operational speeds of the wind turbine. Within this range of velocities, the behaviour of the six prototypes and their operational velocities (Lock-In range) were evaluated. Therefore, the velocities for the tests were fixed according to equivalent frequency drive values (5.50–10 Hz). By considering the common base diameter

of the cylinder (∅) of 28.50 mm for all prototypes, the corresponding Reynolds number (Re) for each value (Table 3) was computed using Equation (3).

$$\mathrm{Re} = \mathrm{V} \times \varnothing / \upsilon \quad (3)$$

where V is the air velocity, and υ is the kinematic viscosity of air (1.46×10^{-5}).

Table 3. Range of Reynolds numbers.

Frequency Drive [Hz]	Velocity [m/s]	Re
5.50	1.50	2928
6.00	1.70	3318
6.50	1.90	3709
7.00	2.10	4099
7.50	2.25	4392
8.00	2.40	4685
8.50	2.55	4978
9.00	2.70	5271
9.50	2.85	5563
10.00	3.00	5856

4. Results

The experimental results rely on the signals captured by the oscilloscope through the piezoelectric sensor. These signals quantify the response of each prototype to different wind velocities, offering insights into the experienced VIV and the mechanical energy absorbed through vibration. For instance, Figure 8 illustrates an example of the superimposed signal values from the piezoelectric sensor, depicting three instances of the convergent-shaped prototype with a smooth surface, at different Reynolds numbers (Re = 3.32 K, 3.71 K, and 4.10 K).

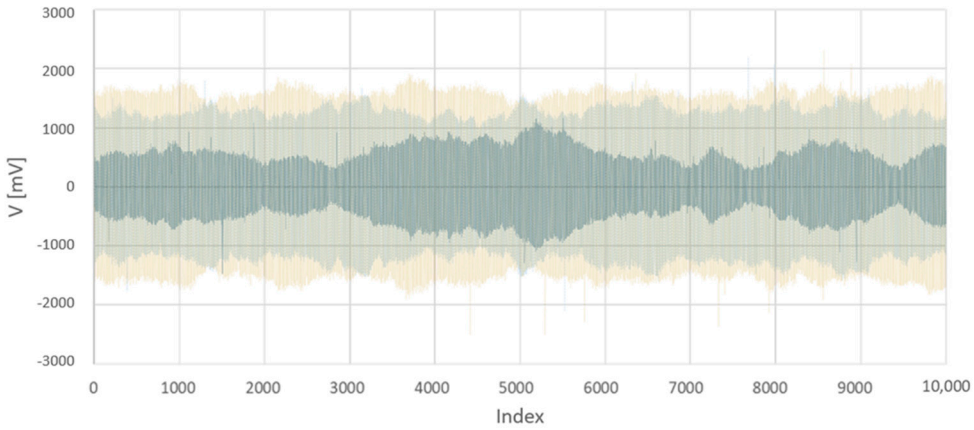


Figure 8. Values of the signals recorded for the convergent prototype with a smooth surface. Blue: Re = 3.32 K; Grey: Re = 3.71 K; Yellow: Re = 4.10 K.

The results obtained from the tests conducted on the different surfaces within the specified range (Table 3) are summarized in Figure 9. Here, the *X*-axis represents the Re values, while the *Y*-axis represents the Root Mean Square (RMS) of the registered signals for each prototype.

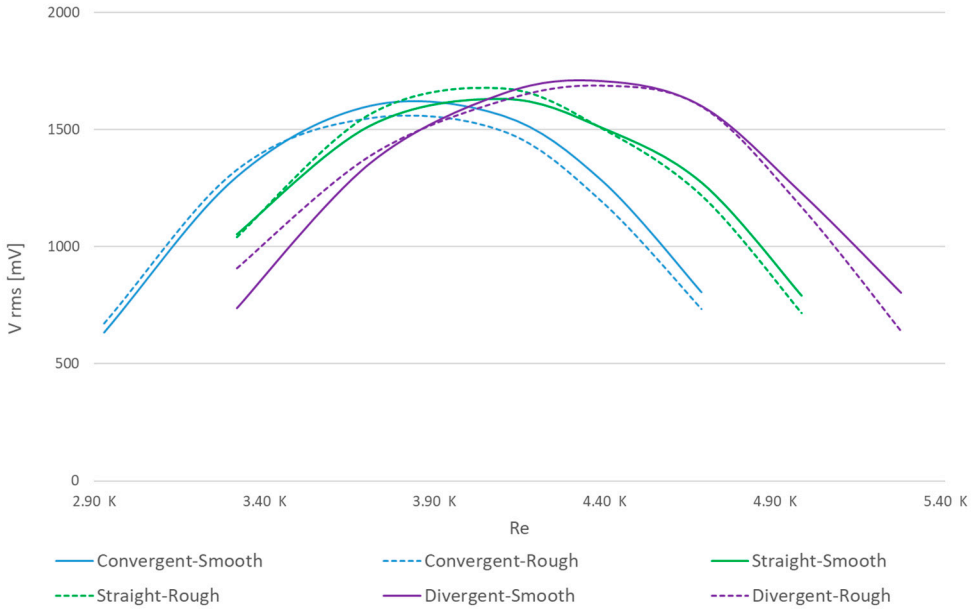


Figure 9. RMS of the signals obtained for the six prototypes subjected to different Reynolds numbers.

Analysing these test outcomes reveals that the divergence angle significantly influences the behaviour of the wind energy harvester, while the considered surface roughness demonstrates minimal impact on its aerodynamic performance. In pursuit of deeper insights, further tests were conducted using two additional prototypes featuring a smooth surface but differing in divergence angles. Building upon the original dimensions (Figure 5), these two additional prototypes were designed and manufactured with doubled (1.6°) and quadrupled (3.2°) divergence angles. Convergence angles were dismissed due to physical and operational limitations. Figure 10 showcases results from these tests, highlighting the maximum Lock-In range points corresponding to Re values for each prototype.

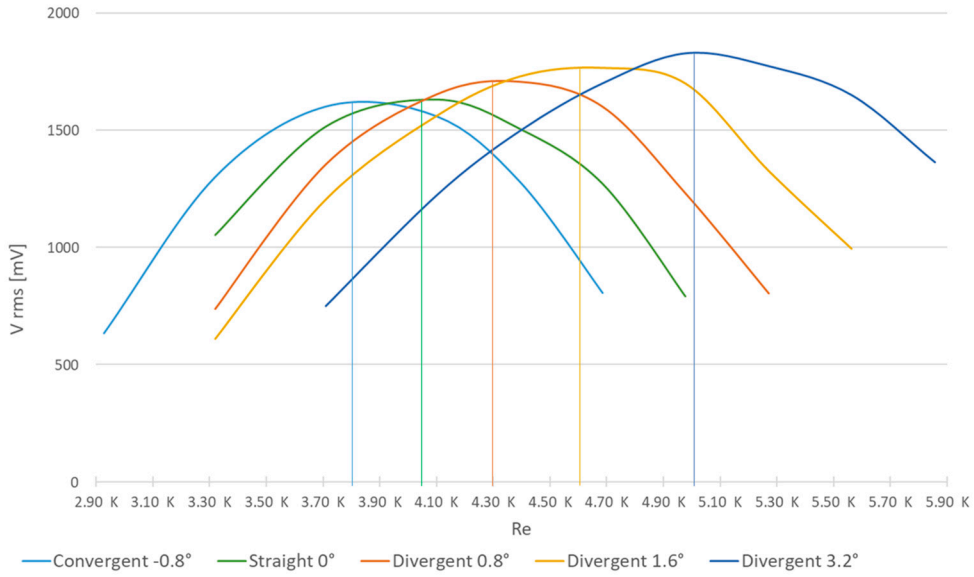


Figure 10. RMS of the signals obtained for the five prototypes subjected to different Reynolds numbers.

In the analysis of our experimental outcomes, the Coefficient of Variation (CV) [42] has proven to be indispensable for evaluating the relative dispersion of our data sets in relation to their mean values. This statistical measure provides a unitless ratio of the standard deviation to the mean, offering a standardized means to assess the variability of our experimental data.

In Figure 11, the data analysis for the first six geometries is shown, corresponding to the results depicted in Figure 9. This visual representation elucidates the relationships and variances among the geometrical configurations under study, providing a comprehensive overview of their performance metrics and experimental outcomes.

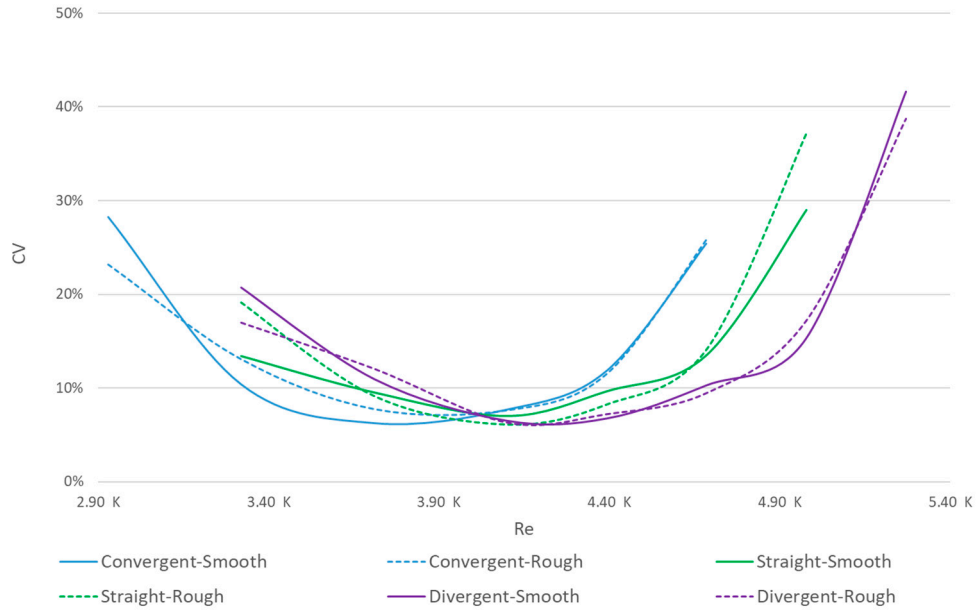


Figure 11. CV of the signals illustrated in Figure 9 subjected to different Reynolds numbers.

Regarding the outcomes presented in Figure 10, Figure 12 illustrates the data from our Coefficient of Variation (CV) analysis. This graphical representation enables a clear comparison of the variability inherent to each set of experimental data, contextualizing the CV findings within the broader scope of our study.

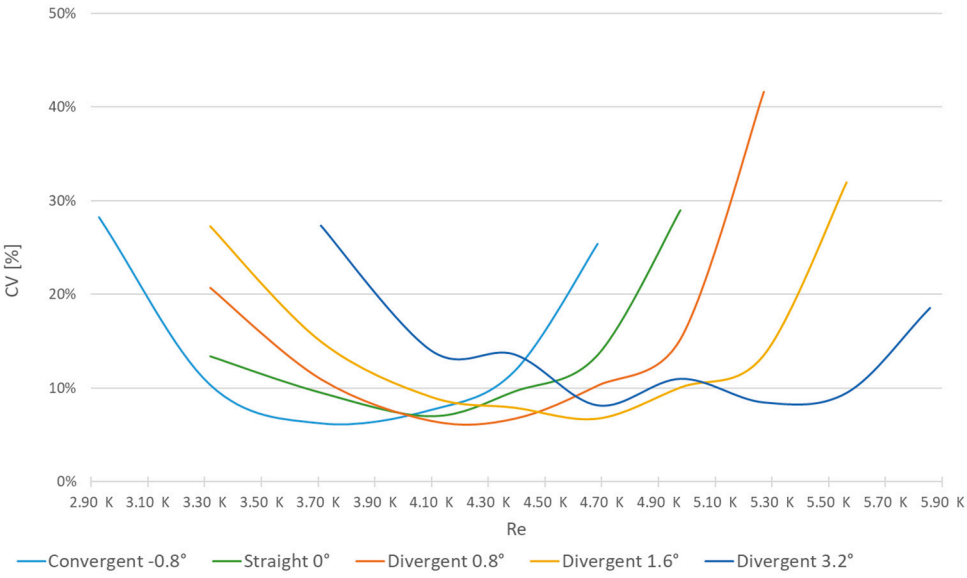


Figure 12. CV of the signals illustrated in Figure 10 subjected to different Reynolds numbers.

5. Discussion

As mentioned in the Section 4, it is evident that the initial prototype shape (variation in convergence/divergence angle) holds significant influence, while surface roughness has minimal impact. Figure 12 clearly illustrates how diverse geometries shift the Lock-In range

towards higher Reynolds numbers as the upper diameter expands due to geometric changes. This relationship aligns with Equation (3), linking wind velocity, Reynolds number, cylinder diameter, and the natural frequency of the prototype. The diameter variation outweighs the impact of mass differences among the prototypes. The mass disparity directly affects the natural frequency, making the mass impact less significant across the different prototype types. Consequently, this shift towards higher Reynolds numbers results in an increased Lock-In range, as evidenced by higher RMS values and peak readings recorded by the piezoelectric sensor. Table 4 showcases Reynolds numbers corresponding to the maximum Lock-In range values.

Table 4. Max Re of the Lock-In range.

Prototype	Angle	VRMS [mV]	Re (Max Lock-In)
Convergent −0.8°	−0.8°	1601	3800
Straight 0°	0.0°	1631	4050
Divergent 0.8°	0.8°	1708	4300
Divergent 1.6°	1.6°	1766	4600
Divergent 3.2°	3.2°	1829	5000

The validity of these findings is shown by the results of the Coefficient of Variation (CV) around a value of 10% in maximal Re Lock-In points, which provide a nuanced interpretation within the context of experimental data analysis. A CV value close to 10% suggests a moderate level of variability relative to the mean of the data set. This indicates that while there is some dispersion in the data points, it is not excessively high, suggesting a relatively stable set of measurements or observations.

Based on these findings, Figure 13 delineates the relationship between convergence/divergence angles of the prototype and their corresponding peak Lock-In range points.

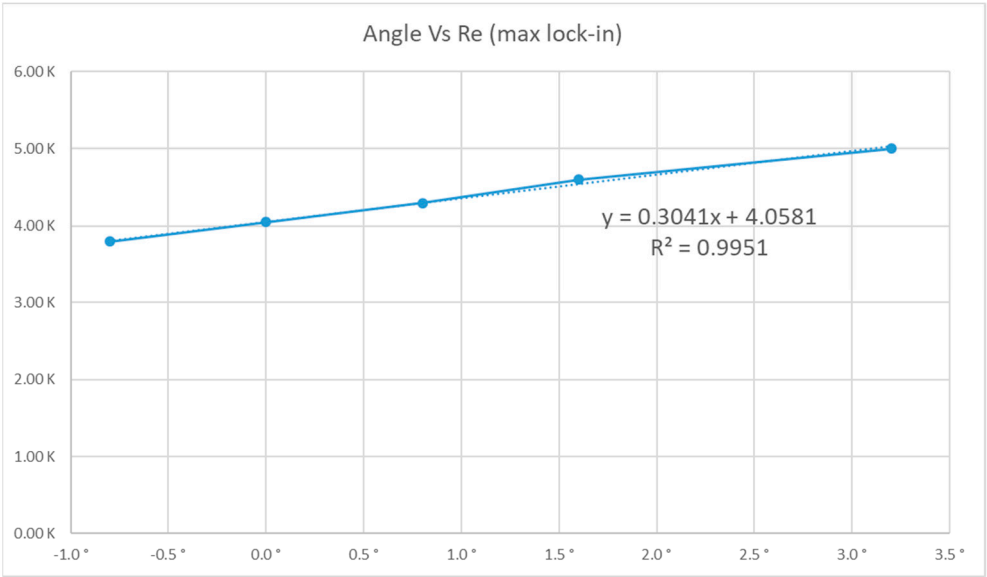


Figure 13. Relationship between angle and max Lock-In value.

A linear regression analysis led to Equation (4):

$$\text{Re (max Lock-In value)} = 0.30\ \alpha + 4.06, \text{ with an } R^2 \text{ value of } 0.99 \quad (4)$$

Lock-In values increase for higher Re values that suppose higher wind velocities (Equation (3)), increasing the energy available due to the fundamental principles governing the conversion of wind energy into electrical energy. Equation (5) indicates that the energy

content of the wind striking a wind turbine (P) is directly related to the air density (ρ), the area (A) swept by the turbine's blades, and, most critically, the cube of the wind velocity (V).

$$P = 1/2\ \rho\ A\ V^3 \quad (5)$$

Assuming all parameters as constants, and relating Equations (4) and (5), the relationship between the power and the angle could be expressed by Equation (6), where P is the power, α is the angle, and k stands in this case as a constant value that relates both variables:

$$P = k\ (0.30\ \alpha + 4.06)^3 \quad (6)$$

Considering surface type, despite its relatively minor influence, observations in Figure 11 depict VIV tending to decrease as Re rises for rough surfaces within each geometry. This phenomenon aligns with the behaviour of the wind turbine, which can be assimilated to a mass–spring system. As previously mentioned, the spring constant relies on mast stiffness (constant across all models). Therefore, the oscillation frequency inversely relates to the square root of the body's mass (Equation (1)); thus, when roughness increases the mass, the natural frequency decreases. This explains the decline in Lock-In range for rough surfaces at higher Re values: increased mass, compared to smooth surfaces, reduces the natural oscillation frequency. However, for rough surfaces, the increased irregularities cause an earlier transition to turbulence [33]. This early transition can enhance the energy and momentum transfer between the fluid layers and the surface, affecting the formation and shedding of vortices. Those effects underscore the reduction in Lock-In range for rough surfaces at higher Re values.

BWT technology remains in the developmental phase and is characterized by the challenges associated with emerging technologies. In [43], a comparative study between BWTs and traditional horizontal axis wind turbines (HAWTs) reveals distinct advantages and limitations of each technology. As an example of the limitations of BWTs, these show an efficiency (power usage to power output ratio) of 70%, while HAWTs reach 80% efficiency.

6. Conclusions

Based on the experiment results, it can be concluded that the geometry's shape, particularly its impact on the diameter, significantly affects the Lock-In range. This influence either extends the range towards higher Reynolds number (Re) values or reduces and shifts it towards lower Re values. Predicting the maximum Lock-In range value is feasible using the equation Re (max Lock-In) = 0.30 α + 4.06, boasting a high predictive capacity with an R2 of 0.99. Considering that the power extracted by the wind turbine is related to the cube of the velocity, this equation is equally related to the cube with respect to the power, considering that the rest of the parameters are constant, as stated in Equation (6).

Moreover, higher diameters correspond to increased maximum RMS values, indicating elevated energy generation. Specifically, a 3.2° divergence angle displays roughly a 12% surge in maximum RMS value compared to a straight shape at 0°.

While surface roughness showed a slight impact, causing a marginal reduction in the Lock-In range, its influence was not pronounced. Nevertheless, this suggests that increased surface roughness might diminish the Lock-In range, potentially affecting the performance of slender circular-shaped wind energy harvesters based on VIV, as evidenced in this study.

These results provide insights into the performance expectations for large-scale wind energy harvesters across different scales, underscoring the pivotal role of geometric adjustments in enhancing energy capture efficiency. The demonstrated ability to predict the Lock-In range with high precision paves the way for optimizing bladeless wind turbine designs, potentially leading to more effective and adaptable wind energy solutions. The findings signify a leap towards maximizing the energy generation potential of wind harvesters, crucial for advancing renewable energy technologies and meeting global energy demands sustainably.

Through this study, significant strides in bladeless wind turbine technology are underscored, emphasizing the pivotal role of geometry and diameter in determining the Lock-In range, a crucial aspect for enhancing energy efficiency. The derived predictive equation for the maximum Lock-In range value, renowned for its precision, empowers precise projections of device performance, heralding a notable advancement in the utilization and evolution of bladeless wind energy systems.

In addition, it should be considered that BWT technology is still under development and suffers from the limitations of an immature and developing technology. In fact, to date, there is no unequivocal evidence of its potential success or overtaking conventional wind technology in general. It is true that there are niches in the market not adequately covered by traditional wind machines, both vertical axis- (Sabonius, Darrieus) and horizontal axis-ones (three-blade, etc.), for example, the distributed energy environment, where the user rarely wants to go up to the roof to change parts or lubricate the device. This new technology could overcome this clear barrier for rotating machines. Another area with potential for BWTs is environments that suffer from very low temperature events. It is well known that classical devices are blocked by ice, and resonant wind turbines do not have shafts that can be frozen. In any case, the market and technological development will prove in the future the suitability of a wind machine approach such as the one studied in this work.

Building upon these findings and considerations, future investigations may expand to examine more factors influencing vortex-induced vibrations (VIVs) in bladeless wind turbines. Investigating variations in turbine geometry, such as hyperbolic diameter profiles or modifications to the leading-edge design, presents a promising avenue. Moreover, assessing external influences, including the spatial arrangements and orientations of turbine arrays, and the interference effect for these arrangements of multiple BWT, offers potential for uncovering further insights critical for the advancement of this field. These explorations could unlock new dimensions of efficiency and performance in wind energy harvesting technologies.

Author Contributions: Conceptualization, E.G.-G.; methodology, E.G.-G. and D.J.Y.; validation, D.J.Y.; formal analysis, E.G.-G.; investigation, E.G.-G.; writing—original draft preparation, E.G.-G.; writing—review and editing, E.G.-G., D.J.Y., S.D.P. and S.L.; visualization, E.G.-G.; supervision, S.D.P. and S.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors would like to thank the European Union for the funding provided through the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 101021714 (Project LAW-GAME). Views and opinions expressed are those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Research Executive Agency. Neither the European Union nor the European Research Executive Agency can be held responsible for them.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data is contained within the article.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Vortex Bladeless S.L. for their technical support.

Conflicts of Interest: Author David J. Yáñez was employed by the company Vortex Bladeless S.L. The remaining authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

References

1. Energy Transition in the EU | Think Tank | European Parliament. Available online: https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2023)754623 (accessed on 4 December 2023).
2. Xu, T.; Gao, W.; Qian, F.; Li, Y. The implementation limitation of variable renewable energies and its impacts on the public power grid. *Energy* **2022**, *239*, 121992. [CrossRef]

3. Gjorgievski, V.Z.; Cundeva, S.; Georghiou, G.E. Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: A review. *Renew. Energy* **2021**, *169*, 1138–1156. [CrossRef]
4. Lei, K.; Tang, Z.; Sun, Z. Harvesting airflow energy from circular cylinder wake via a thin polyvinylidene fluoride film. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **2022**, *231*, 105235. [CrossRef]
5. Ren, Z.; Wu, L.; Pang, Y.; Zhang, W.; Yang, R. Strategies for effectively harvesting wind energy based on triboelectric nanogenerators. *Nano Energy* **2022**, *100*, 107522. [CrossRef]
6. Zhang, B.; Song, B.; Mao, Z.; Tian, W.; Li, B. Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement. *Energy* **2017**, *133*, 723–736. [CrossRef]
7. Barrows, S.E.; Homer, J.S.; Orrell, A.C. Valuing wind as a distributed energy resource: A literature review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *152*, 111678. [CrossRef]
8. Vortex Technical Paper—Bladeless Wind Turbines explained. Vortex Bladeless Wind Power. Available online: https://vortexbladeless.com/download-green-paper/ (accessed on 20 July 2023).
9. García, J.C.C.; Houzeaux, G.; Yáñez, D.J.; Mier-Torrecilla, M. SHAPE Project Vortex Bladeless: Parallel Multi-Code Coupling for Fluid-Structure Interaction in Wind Energy Generation. 2016. Available online: https://upcommons.upc.edu/handle/2117/88263 (accessed on 20 July 2023).
10. View of Aerodynamic Characteristic of Vortex Bladeless Wind Turbine: A Short Review. Available online: https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/rpmme/article/view/1981/567 (accessed on 20 July 2023).
11. Jadidbonab, M.; Mohammadi-Ivatloo, B.; Marzband, M.; Siano, P. Short-Term Self-Scheduling of Virtual Energy Hub Plant Within Thermal Energy Market. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2021**, *68*, 3124–3136. [CrossRef]
12. Dai, K.; Bergot, A.; Liang, C.; Xiang, W.-N.; Huang, Z. Environmental issues associated with wind energy—A review. *Renew. Energy* **2015**, *75*, 911–921. [CrossRef]
13. Enevoldsen, P. Onshore wind energy in Northern European forests: Reviewing the risks. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *60*, 1251–1262. [CrossRef]
14. Torres Sibille, A.d.C.; Cloquell-Ballester, V.-A.; Cloquell-Ballester, V.-A.; Darton, R. Development and validation of a multicriteria indicator for the assessment of objective aesthetic impact of wind farms. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13*, 40–66. [CrossRef]
15. Estudio Comparativo de los Impactos Ambientales Producidos por los Aerogeneradores con palas vs. Aerogeneradores Vortex Bladeless. Available online: https://seo.org/wp-content/uploads/2015/06/Informe-Vortex_SEO_BIRDLIFE_Def_.pdf (accessed on 20 July 2023).
16. la Puente, A.B.-D.; Balmori, A. Flight Type and Seasonal Movements Are Important Predictors for Avian Collisions in Wind Farms. *Birds* **2023**, *4*, 85–100. [CrossRef]
17. Marques, A.T.; Batalha, H.; Bernardino, J. Bird Displacement by Wind Turbines: Assessing Current Knowledge and Recommendations for Future Studies. *Birds* **2021**, *2*, 460–475. [CrossRef]
18. Lakatos, L.; Hevessy, G.; Kovács, J. Advantages and Disadvantages of Solar Energy and Wind-Power Utilization. *World Futures* **2011**, *67*, 395–408. [CrossRef]
19. Tandel, R.; Shah, S.; Tripathi, S. A state-of-art review on Bladeless Wind Turbine. *J. Phys. Conf. Ser.* **2021**, *1950*, 012058. [CrossRef]
20. Vallès, B.; Andersson, H.I.; Jenssen, C.B. Oblique Vortex Shedding Behind Tapered Cylinders. *J. Fluids Struct.* **2002**, *16*, 453–463. [CrossRef]
21. Han, X.; Tang, Y.; Meng, Z.; Fu, F.; Qiu, A.; Gu, J.; Wu, J. Surface roughness effect on cylinder vortex-induced vibration at moderate Re regimes. *Ocean Eng.* **2021**, *224*, 108690. [CrossRef]
22. Piccirillo, P.S.; Atta, C.W.V. An experimental study of vortex shedding behind linearly tapered cylinders at low Reynolds number. *J. Fluid Mech.* **1993**, *246*, 163–195. [CrossRef]
23. Papangelou, A. Vortex shedding from slender cones at low Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* **1992**, *242*, 299–321. [CrossRef]
24. Fang, S.; Du, H.; Yan, T.; Chen, K.; Li, Z.; Ma, X.; Lai, Z.; Zhou, S. Theoretical and experimental investigation on the advantages of auxetic nonlinear vortex-induced vibration energy harvesting. *Appl. Energy* **2024**, *356*, 122395. [CrossRef]
25. Yáñez, D.J. VIV Resonant Wind Generators. June 2018. Available online: https://www.researchgate.net/profile/David-J-Yanez/publication/331345449_VIV_resonant_wind_generators/links/5c74f3c3299bf1268d25c051/VIV-resonant-wind-generators.pdf (accessed on 20 July 2023).
26. Vortex Bladeless—Energía Eólica sin Palas. Vortex Bladeless Wind Power. Available online: https://vortexbladeless.com/es/ (accessed on 20 July 2023).
27. Simiu, E.; Scanlan, R.H. *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*, 3rd ed.; John Wiley: New York, NY, USA, 1996.
28. Von Kármán, T. Ueber den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt. Nachrichten Von Ges. *Wiss. Zu Gött. Math.-Phys. Kl.* **1911**, *1911*, 509–517.
29. Bearman, P.W. Vortex Shedding from Oscillating Bluff Bodies. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **1984**, *16*, 195–222. [CrossRef]
30. Gerrard, J.H. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies. *J. Fluid Mech.* **1966**, *25*, 401–413. [CrossRef]
31. Yuan, K.; Hui, Y.; Chen, Z. Effects of facade appurtenances on the local pressure of high-rise building. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **2018**, *178*, 26–37. [CrossRef]
32. Roshko, A. *On the Drag and Shedding Frequency of Two-Dimensional Bluff Bodies*; National Advisory Committee for Aeronautics: Kitty Hawk, NC, USA; California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA, 1954.

33. Flow Induced Vibration by Robert D. Blevins-2nd Ed | PDF | Reynolds Number | Boundary Layer. Scribd. Available online: https://www.scribd.com/doc/42602999/Flow-Induced-Vibration-by-Robert-D-Blevins-2nd-Ed (accessed on 20 July 2023).
34. Bourguet, R.; Karniadakis, G.E.; Triantafyllou, M.S. Lock-in of the vortex-induced vibrations of a long-tensioned beam in shear flow. *J. Fluids Struct.* **2011**, *27*, 838–847. [CrossRef]
35. Hidalgo, M.Á.S.; Pascual, R.A.; VIllareal, D.Y. Diseño y optimizacion de una estructura geométrica cilindica para un desprendimiento uniforme de vortices de von karman. *Tecnol. Desarro.* **2017**, *15*. Available online: https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/view/1181 (accessed on 20 July 2023).
36. Zhang, L.; Dai, H.; Abdelkefi, A.; Wang, L. Improving the performance of aeroelastic energy harvesters by an interference cylinder. *Appl. Phys. Lett.* **2017**, *111*, 073904. [CrossRef]
37. Velasco, M.A.; Quevedo, Y.N.; Bonilla, C.A. Determinación de Propiedades Mecánicas a Tensión y Compresión de PETG Procesado Mediante Fabricación Por Filamento Fundido. 2022. Available online: https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A2_179.pdf (accessed on 8 June 2023).
38. Zalazar, M.A.; Guarnieri, F.A. Análisis y Evaluación del Comportamiento de Sensores Piezoeléctricos. *Mecánica Comput.* **2010**, *29*, 67.
39. OWON SDS1000 Series Super Economical Type Digital Oscilloscope Technical spec.s.pdf. Available online: https://files.owon.com.cn/specifications/OWON%20SDS1000%20Series%20Super%20Economical%20Type%20Digital%20Oscilloscope%20technical%20spec.s.pdf (accessed on 18 January 2023).
40. Pastò, S. Vortex-induced vibrations of a circular cylinder in laminar and turbulent flows. *J. Fluids Struct.* **2008**, *24*, 977–993. [CrossRef]
41. 0allge.pdf. Available online: https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap01/eng/0allge.pdf (accessed on 19 January 2023).
42. Brown, C.E. Coefficient of Variation. In *Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences*; Brown, C.E., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1998; pp. 155–157. [CrossRef]
43. Bardakjian, A.; Mandadakis, P.; Tingle, A. Efficiency comparison of horizontal axis wind turbines and bladeless turbines. *PAM Rev. Energy Sci. Technol.* **2017**, *4*, 59. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

CAPÍTULO IV:

NUEVOS MATERIALES PARA EL DESARROLLO DE ALTERNADORES EN AEROGENERADORES SIN PALAS

4 CAPÍTULO IV: NUEVOS MATERIALES PARA EL DESARROLLO DE ALTERNADORES EN AEROGENERADORES SIN PALAS

4.1 3D-Printed SMC Core Alternators: Enhancing the Efficiency of Vortex-Induced Vibration (VIV) Bladeless Wind Turbines

Este capítulo contiene el artículo *3D-Printed SMC Core Alternators: Enhancing the Efficiency of Vortex-Induced Vibration (VIV) Bladeless Wind Turbines* publicado en la revista científica de alto impacto Applied Sciences en 2024.

4.1.1 Resumen

Este estudio investiga la aplicación de materiales compuestos magnéticos blandos (SMC) en la fabricación de núcleos de alternadores para aerogeneradores sin aspas que operan bajo el principio de vibración inducida por vórtices (VIV), utilizando tecnologías de fabricación aditiva (AM). A través de un análisis comparativo de prototipos de alternadores con núcleos de aire, SMC y hierro, la investigación tiene como objetivo evaluar el rendimiento de los materiales SMC como alternativa al material más comúnmente utilizado (hierro) en BWTs VIV. Para ello, se analiza la amortiguación, la frecuencia de resonancia, la histéresis magnética y la generación de energía. Los resultados indican que, aunque los alternadores con núcleos de hierro exhiben una generación de energía superior (alcanzando un pico de 3830 mV y un voltaje RMS de 1019 mV), aquellos con núcleos SMC ofrecen un compromiso prometedor con un voltaje pico de 1150 mV y un voltaje RMS de 316 mV, mitigando las pérdidas por corrientes parásitas atribuibles a la histéresis magnética. Notablemente, los núcleos SMC logran una tasa de amortiguación del 60%, mejorando el 67% de los núcleos de aire y cerca del 59% de los núcleos de hierro, mostrando su potencial para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los aerogeneradores sin aspas (BWTs). Además, la adaptabilidad de la fabricación aditiva en la optimización de diseños y la acomodación de formas intrincadas presenta ventajas significativas para futuros avances. Este estudio subraya el papel fundamental de los materiales innovadores y los procesos de fabricación en el impulso hacia soluciones de energía renovable más eficientes y sostenibles.

4.1.2 Artículo III

https://doi.org/10.3390/app14135512

applied sciences

MDPI

Article

3D-Printed SMC Core Alternators: Enhancing the Efficiency of Vortex-Induced Vibration (VIV) Bladeless Wind Turbines

Enrique González-González [1,*], David J. Yáñez [2], Arturo Hidalgo [2], Susana Del Pozo [1] and Susana Lagüela [1]

[1] Department of Cartographic and Land Engineering, Universidad de Salamanca, Calle Hornos Caleros 50, 05003 Ávila, Spain; s.p.aguilera@usal.es (S.D.P.); sulaguela@usal.es (S.L.)
[2] Vortex Bladeless S.L., 05001 Ávila, Spain; david@vortexbladeless.com (D.J.Y.); ahidalgo@vortexbladeless.com (A.H.)
* Correspondence: egonzalezgonzalez@usal.es

Abstract: This study investigates the application of soft magnetic composite (SMC) materials in alternator core manufacturing for bladeless wind turbines operating under the principle of vortex-induced vibration (VIV), employing additive manufacturing (AM) technologies. Through a comparative analysis of alternator prototypes featuring air, SMC, and iron cores, the investigation aims to evaluate the performance of SMC materials as an alternative to the most commonly used material (iron) in VIV BWT, by assessing damping, resonance frequency, magnetic hysteresis, and energy generation. Results indicate that while alternators with iron cores exhibit superior energy generation (peaking at 3830 mV and an RMS voltage of 1019 mV), those with SMC cores offer a promising compromise with a peak voltage of 1150 mV and RMS voltage of 316 mV, mitigating eddy current losses attributed to magnetic hysteresis. Notably, SMC cores achieve a damping rate of 60%, compared to 67% for air cores and 59% for iron cores, showcasing their potential to enhance the efficiency and sustainability of bladeless wind turbines (BWTs). Furthermore, the adaptability of AM in optimizing designs and accommodating intricate shapes presents significant advantages for future advancements. This study underscores the pivotal role of innovative materials and manufacturing processes in driving progress towards more efficient and sustainable renewable energy solutions.

Keywords: soft magnetic composite (SMC); additive manufacturing (AM); bladeless wind turbines (BWTs); vortex-induced vibration (VIV); alternator cores; magnetic hysteresis; energy generation efficiency

Citation: González-González, E.; Yáñez, D.J.; Hidalgo, A.; Del Pozo, S.; Lagüela, S. Three-Dimensionally Printed SMC Core Alternators: Enhancing the Efficiency of Vortex-Induced Vibration (VIV) Bladeless Wind Turbines. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 5512. https://doi.org/10.3390/app14135512

Academic Editor: Mark J. Jackson

Received: 8 May 2024
Revised: 14 June 2024
Accepted: 22 June 2024
Published: 25 June 2024

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The evolution of additive manufacturing (AM), also known as 3D printing, has revolutionized the manufacturing process by enabling the direct creation of components layer by layer from a Computer-Aided Design (CAD) model. This approach not only expedites prototyping but also reduces material waste, rendering it an increasingly competitive option across industries [1]. Moreover, AM's capacity for rapid prototyping accelerates product development cycles, distinguishing it from traditional subtractive manufacturing methods [2].

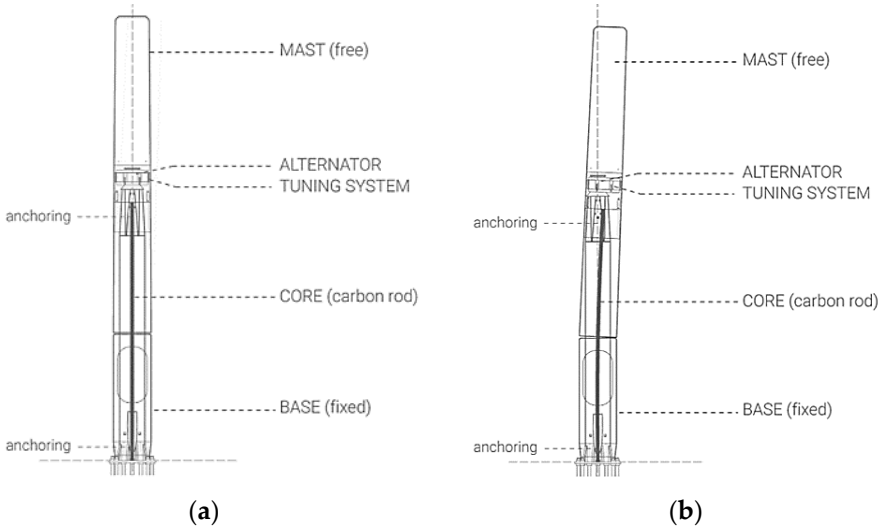
In the realm of electrical machines, there is a growing interest in exploring new materials propelled by advancements in AM [3–5]. Soft magnetic materials (SMMs) and soft magnetic composites (SMCs) have emerged as promising candidates for additive manufacturing in electrical machine components, boasting magnetic, thermal, mechanical, and electrical properties conducive to the manufacturing process [6]. Additionally, AM facilitates the utilization of challenging-to-process alloys like soft ferrites, opening up new possibilities for electrical machine applications by leveraging their high electrical resistivity [7].

The versatility of SMCs spans various industrial and technological fields, offering a broad range of applications [8,9]. Manufacturing SMCs through AM not only enhances the production process but also potentially reduces costs compared to traditional methods [10–12]. The innovative properties achieved through AM in SMCs allow for diverse applications in sectors like robotics and power electronics [13]. These advancements improve mechanical properties while enhancing the magnetic characteristics of cores, thus increasing magnetic flux densities [14].

In the domain of electrical machines, SMC materials offer several advantages [15], including low eddy current losses and reduced manufacturing costs. Notably, they enable more versatile and efficient designs due to their three-dimensional magnetic characteristics [16,17]. That is why they have been used as a composite material for different electrical machine elements [18–20].

This article focuses on investigating the integration of SMC through AM in alternator cores for wind turbines operating under vortex-induced vibration (VIV) [21,22].

This study fills a gap in research carried out in SMC applied to electrical machines by specifically addressing the integration of SMC in alternator designs tailored for VIV conditions, contributing to the advancement of wind turbine technologies. VIV-based wind turbines, particularly bladeless ones (Figure 1, [23]), exploit VIV to generate electricity, presenting a sustainable alternative to traditional propeller-type turbines.



(**a**) (**b**)

Figure 1. Main elements of a VIV-based wind turbine [23] for its central (**a**) and lateral (**b**) positions.

Three prototypes of alternator models have been developed for bladeless wind turbines (BWTs), each featuring cores composed of different materials:

- Air core or no-core prototype constructed from polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG) material [24], exhibiting properties similar to air;
- SMC core prototype manufactured using polylactic acid (PLA) filament infused with carbon steel particles [25], offering medium magnetic conductivity and high electrical resistivity;
- Iron core prototype composed of S275 mild steel [26] and M270-50A silicon steel [27], known for their high magnetic and electrical conductivity properties.

The SMC core prototype demonstrates intermediate electrical conductivity properties between air and iron cores, showing enhanced performance relative to air cores while maintaining high electrical resistivity [28,29]. Although SMC core prototypes have not yet matched the energy generation performance of iron cores, their ability to enhance performance while minimizing losses marks significant progress. Future research may explore heat treatment to optimize SMC properties further [30].

This study presents a comprehensive investigation into the application of SMC materials for manufacturing alternator cores, particularly for bladeless wind turbines operating under VIV. It underscores the pivotal role of innovative materials and manufacturing processes in advancing efficient and sustainable renewable energy solutions. Based on detailed experimental analysis and taking into account the theoretical background of alternators in VIV BWT and alternator cores [31–40], the study offers valuable insights into the performance characteristics of different core materials, highlighting the transformative impact of SMC cores on the design and manufacture of electrical machines, particularly alternators for wind turbines.

The paper is organized as follows. After the introductory Section 1, Section 2 outlines the methodology for prototype development and testing. Sections 3 and 4 include the test results and their discussion, while Section 5 presents the conclusions reached after the performance of the study.

2. Methodology

To investigate the efficacy of an alternator with a core composed of SMC material with high-carbon steel particles [25], a prototype was developed using fused filament fabrication (FFF) [41] with a printer Prusa-MK3S [42]. The process utilized a 1 mm nozzle and a layer height of 0.3 mm. Additionally, two other cores were manufactured to perform a comparative analysis, namely one simulating an air core with PETG [24], a material with low magnetic conductivity, using FFF with a 0.4 mm nozzle and 0.2 mm of layer height, and another with iron, known for its high magnetic and electrical conductivity, using traditional manufacturing methods. The choice of PETG is justified based on its insulating properties, which are like those of air. Additionally, PETG is widely used in 3D printing due to its mechanical toughness, heat resistance, and ease of printing. The prototype's design enables easy assembly and disassembly by attaching it to the stationary shaft of a VIV wind turbine, characterized by its dimensions of 0.85 m in height and 0.07 m in diameter, weighing 1.70 kg; it operates effectively at wind speeds around 7 m/s. This prototype comprises several essential parts: a housing for the copper winding, a winding produced from a 0.4 mm diameter enameled copper wire, the core (including a central cylinder, a top cover, and a bottom cover), and two permanent magnets attached to the core (on the top and bottom covers).

2.1. Prototype Design

The alternator prototype has been developed featuring a single-wound stator and an H-shaped core, with two concentric rings of permanent magnets having vertically ascending magnetic field lines. The design aims to achieve radial symmetry, ensuring that regardless of the wind direction, the oscillation of the machine similarly affects its interaction with the alternator. This contrasts with the vertically descending magnetic field of the central magnet ring of the "oscillator" (equivalent to the rotor in conventional alternators). The detailed components of the developed alternator prototype are illustrated in Figure 2.

The operating principle for the design of the alternator prototype is based on altering the magnetic field in its core, induced by the oscillation of the wind turbine. This shift in the core's magnetic field is crucial for the fluctuation of the magnetic flux that passes through the stator winding, a fundamental principle in generating electrical energy through alternators. The oscillatory motion causes the magnetic field lines of the "oscillator" (moving part) to approach and move away from the magnetic field lines of the stator's magnetic rings (fixed part). Since the field lines are opposite, the magnetic field traversing the alternator's core is reversed. This change in the magnetic field induces an electromotive force in the stator winding. In Figure 3, the positions and directions of the aforementioned field lines are described within a section of the alternator's central plane.

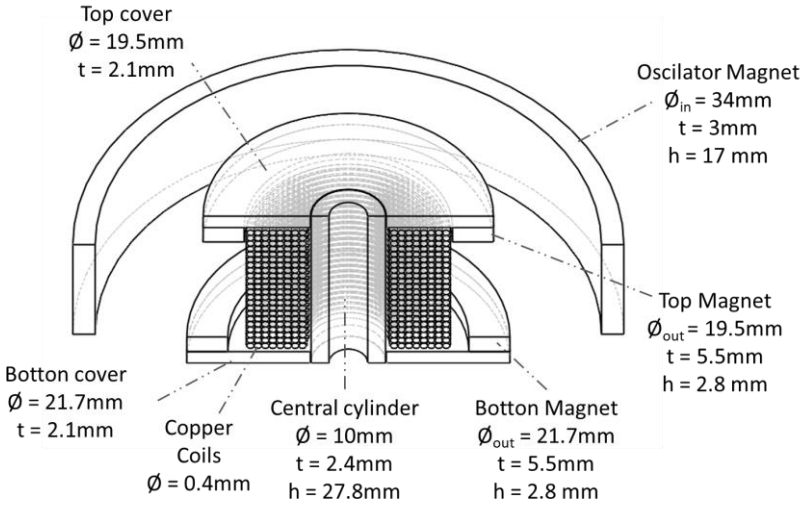
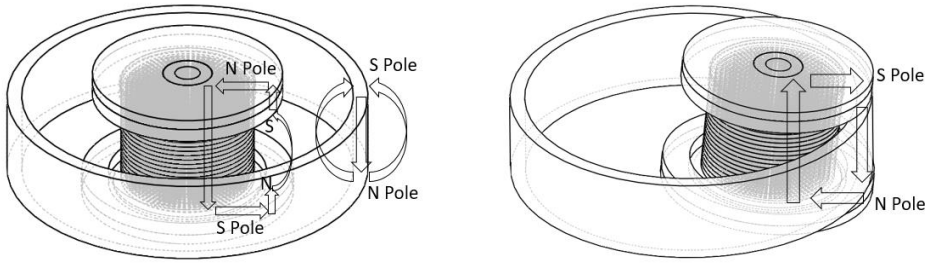


Figure 2. CAD design of the alternator prototype.



(**a**) (**b**)

Figure 3. Magnetic field lines in (**a**) central position, and (**b**) lateral position of the prototype designed and manufactured for this work.

In the development of the circular alternator prototype described herein, an innovative approach was employed involving the placement of magnets within the stator. This design not only aims to alternate the polarity of the field lines in the alternator's core but also ingeniously utilizes the physical properties of magnetostatic interactions to produce dynamically variable repulsion forces with the oscillator. This design principle enhances the aerodynamic and structural tuning of the system, thereby optimizing the interaction between the mechanical oscillation and electromagnetic responses.

2.2. Prototype Characterization

Due to the differing properties of the materials used to manufacture the alternator cores, a test was conducted to determine the inductance of the alternator for each type of material used. In similar studies, equivalent methodologies have been utilized to excite the core of a copper wire coil and thereby determine its inductance [43]. In our case, a resonant LC circuit was employed, the operating principle of which is based on the energy being alternately absorbed between a capacitor and a coil. Equation (1) shows the relationship between the parameters of an LC circuit

$$f = 1/2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C} \quad (1)$$

where f is the resonance frequency of the circuit, L the inductance of the coil, and C the capacitance of the capacitor.

The test conducted involves connecting the alternator coil with a capacitor of known capacity and monitoring the discharge curve for the different prototypes using an oscilloscope. By analyzing the response signal of the LC circuit and rearranging Equation (1), the inductance can be calculated using Equation (2).

$$L = C/(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \quad (2)$$

In addition to characterizing the inductance of the alternator, the damping of each cycle can also be analyzed, which refers to the losses per period of a damped system by examining the losses that occur in each cycle in the LC circuit. This damping is indicative of the energy losses that will occur in the alternator's core. Therefore, the greater the damping, the greater the losses produced in the alternator and the lower its performance. For the execution of the tests, a 10-pF capacitor charged to a voltage of 15 V was used.

2.3. Alternator Performance in Wind Tunnel

Performance tests were conducted in a wind tunnel (Figure 4) named Vortepsa. This facility, situated at the Higher Polytechnic School of Ávila, Spain, boasts a closed return setup for low-speed conditions, featuring a squared test section measuring 1.4 m in width, 3.2 m in height, and 9 m in length. Notably, this wind tunnel is suitable for simulating the atmospheric boundary layer. Equipped with 8 fans arranged in 2 vertical arrays of 4 fans each, positioned on opposing sides, the tunnel generates a collective power of 60 kW, with each fan rated at 7.5 kW. Through a variable frequency drive, the wind speed can be precisely controlled, allowing velocities of up to 30 m/s to be reached.

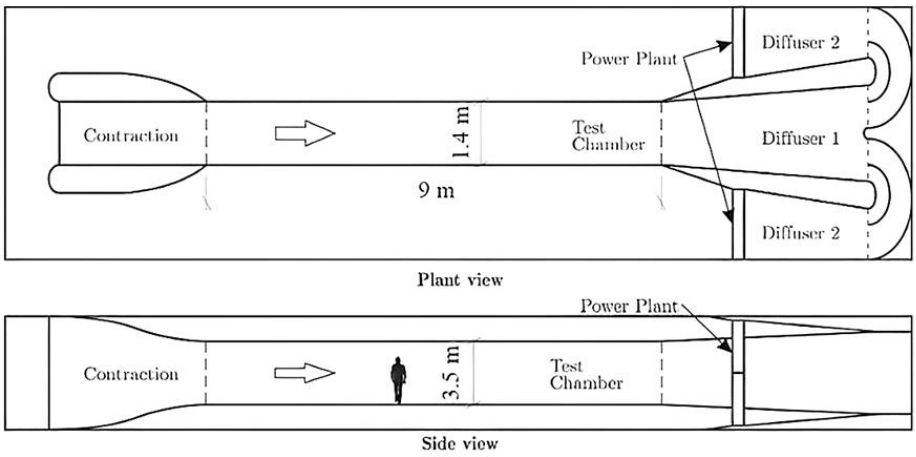


Figure 4. Vortepsa wind tunnel scheme. (**Top**) Plant view. (**Bottom**) Side view.

For data acquisition purposes, to assess the behavior of each prototype, the alternator was connected to an Owon SDS1022 oscilloscope [44].

The test speed range for the experiments was determined based on the operating conditions of the VIV bladeless wind turbine selected for the testing of the alternator prototypes (the three prototypes were tested in the same turbine in order to allow for a consistent comparison of results). Therefore, all the tests were conducted at a speed of 7 m/s, velocity within the operating range. To verify the wind speed, a hot-wire anemometer, specifically the Almemo 2470 model [45], was positioned inside the test chamber.

3. Results

The results for the LC resonant circuit test, aimed at characterizing the behavior of each type of alternator core, are based on calculating the resonance frequency to determine the inductance using the given Equation (2) and analyzing the damping. This approach allows for a detailed comparison of how different core materials impact the alternator's

performance, which are critical for optimizing the efficiency and output of alternators in practical applications.

Figure 5 represents the comparative response signals for the LC circuit of the alternators with different core materials (air, SMC, and iron). It highlights the variations in resonance frequency, inductance, and damping characteristics for each core type.

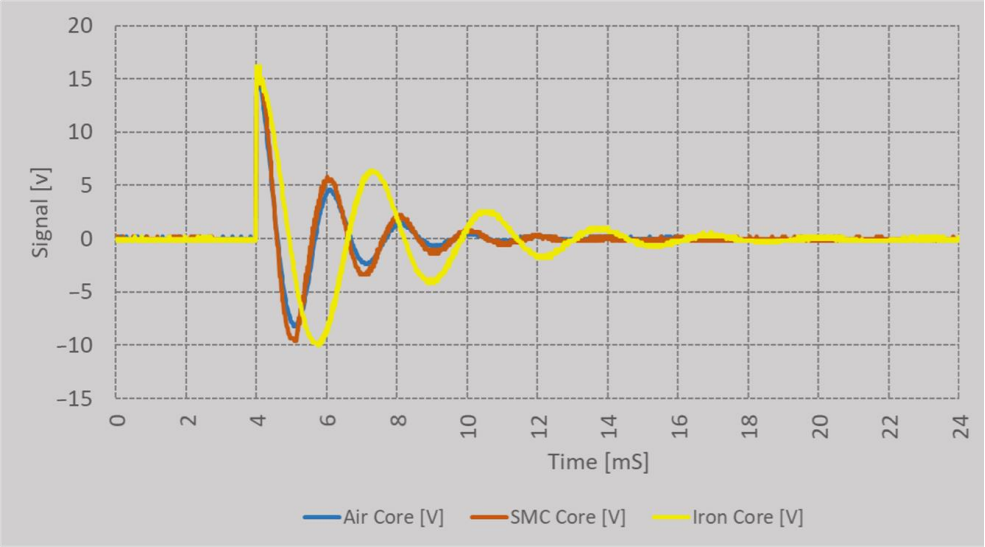


Figure 5. Damping response curves for all alternator prototypes.

As observed, the air and SMC cores exhibit a resonance frequency of 501.5 Hz and similar inductance values of 10.07 pH. However, they differ in damping characteristics, with the air core at 67% and the SMC core at 60%. In contrast, the iron core displays a notably lower resonance frequency of 309.12 Hz, a higher inductance of 27.15 pH, and similar damping value of 59%. Table 1 summarizes the results for the three types of alternators tested, according to the core material.

Table 1. Results for the three types of alternators for the LC test.

Core	Frequency [Hz]	Capacitance [µF]	Inductance [pH]	Damping
Air	501.50	10	10.07	67%
SMC	501.50	10	10.07	60%
Iron	309.12	10	27.15	59%

Regarding the performance test results, the signal generated in an open circuit for the different alternator prototypes were analyzed (Vpeak and Vrms). The tests were conducted by setting a constant wind speed of 7 m/s in the wind tunnel test chamber, a speed within the operational range of the VIV bladeless wind turbine selected for the testing.

Furthermore, Figure 6 represents the comparative signals generated by the alternator prototypes with different core materials (air, SMC, and iron), allowing for a comparative analysis of their performance test under a constant wind speed of 7 m/s.

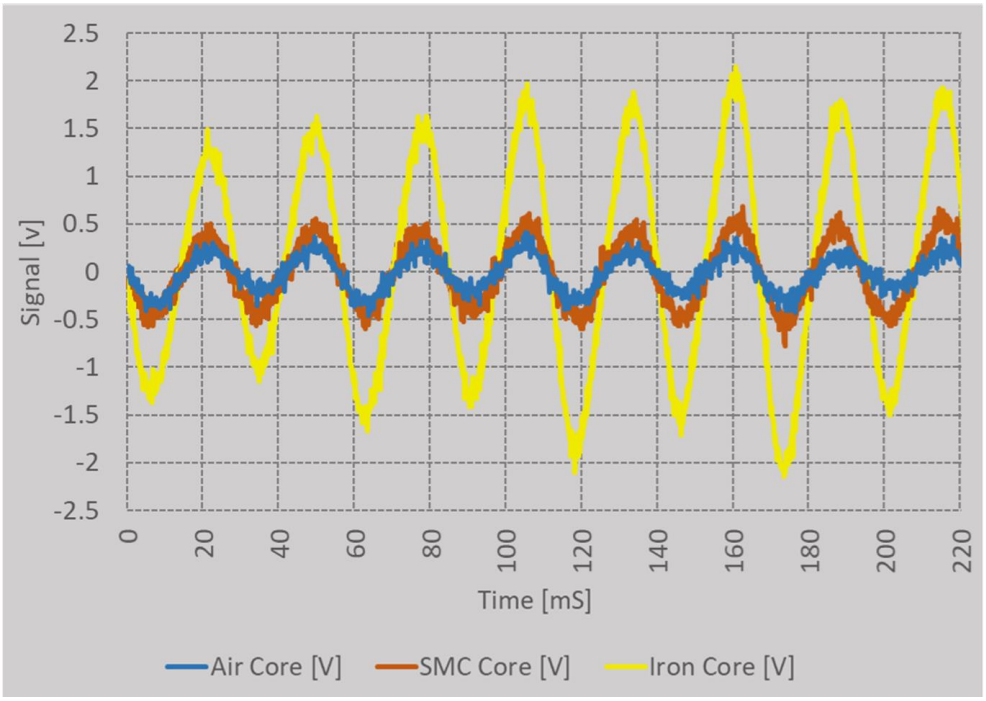


Figure 6. Signals generated for all alternator prototypes.

As can be seen, all prototype cores exhibit the same frequency of 30.92 Hz but differ in their voltage outputs. The air core has a Vpeak and Vrms values of 763 mV and 216 mV, respectively, while the SMC core shows higher values of 1150 mV and 316 mV. In contrast, the iron core displays a significantly higher Vpeak of 3830 mV and Vrms of 1019 mV, while maintaining the same frequency of 30.92 Hz. This demonstrates the superior performance of the iron core, followed by the SMC core and, lastly, the air core for the alternators of VIV bladeless wind turbines.

Finally, Table 2 summarizes the results obtained from the performance tests for the 3 types of alternators tested, according to their core material.

Table 2. Results for the three types of alternators for the performance test.

Core Material	Vrms [mV]	Vpeak [mV]	Frequency [Hz]
Air	216	763	30.92
SMC	316	1150	30.92
Iron	1019	3830	30.92

4. Discussion

The findings of this study reveal a significant correlation between the type of core used in alternator prototypes and their efficiency in terms of damping and energy generation. This analysis considers the three types of alternators tested, with air, SMC, and iron cores, from various perspectives relevant to the application and design of alternators in energy generation systems.

4.1. Alternator with Air Core

The air core alternators demonstrated a high damping percentage, specifically 67%, indicating their ability to minimize losses due to magnetic hysteresis and eddy currents. This phenomenon can be explained by the absence of ferromagnetic material, which facilitates a more uniform magnetic field and reduces interference in the generation of electromotive force (EMF). The high resonance frequency of 501.50 Hz for these prototypes sug-

gests optimal efficiency in high-frequency applications where quick response and the minimization of energy losses are crucial. However, the energy generation measured in terms of Vrms and Vpeak was the lowest among the three types.

4.2. Alternator with SMC Core

The alternators with SMC cores displayed intermediate performance in both damping and energy generation, with a 60% damping rate and Vrms and Vpeak values higher than those of the air core but lower than those of the iron core. The use of SMC as a core material presents an attractive compromise solution, as it adequately combines magnetic properties with manufacturing ease, allowing for complex shapes that can be optimal for specific alternator designs. The match in resonance frequency with the air core prototype suggests that SMC cores could be effectively used in similar applications, with the added advantage of greater energy generation.

4.3. Alternator with Iron Core

The excellent performance of the alternator with an iron core in terms of energy generation, showcasing the highest Vrms and Vpeak values, underscores its suitability for applications where maximum energy output is crucial. Despite these alternators having the lowest resonance frequency and slightly lower damping compared to the other prototypes, the high inductance of 27.15 picohenries facilitates the generation of a strong EMF. This type of core is particularly advantageous in contexts where energy demands are significant and constant, such as in stationary power generation or heavy industrial applications.

Choosing the type of core in an alternator involves balancing damping efficiency, resonance frequency, and energy generation capacity. While air and SMC cores offer advantages in high-frequency applications with strict damping requirements, iron cores stand out in applications demanding a high energy output. This diversity in performance highlights the importance of a careful and considered alternator design, tailored to the specifications and needs of each application.

5. Conclusions

This study has meticulously examined the damping, resonance, and energy generation characteristics of alternators with air, SMC, and iron cores, culminating in quantitative results that provide valuable insights into core material selection for electromechanical applications.

From a damping standpoint, the air core alternator showcased the highest damping, achieving a remarkable 67% reduction between cycles. Following closely, the SMC core alternator demonstrated a commendable 60% reduction between cycles, underscoring its efficacy in damping vibrations. Comparatively, the iron core alternator exhibited a slightly lower reduction of 59% between cycles, suggesting its ability to mitigate oscillations but to a lesser extent compared to air and SMC cores.

Resonance frequency analysis unveiled a harmonious resonance frequency of 501.50 Hz shared by both air and SMC core alternators, significantly higher than the iron core alternator at 305.44 Hz. This indicates the suitability of air and SMC cores for high-frequency applications, emphasizing the adaptability and performance of SMC cores in dynamic environments.

In terms of energy generation, the iron core alternator led with the highest output, evidenced by its peak voltage of 3830 mV and RMS voltage of 1019 mV, catering to applications demanding a high energy output. However, the SMC core alternator displayed promising energy generation capacity, boasting a peak voltage of 1150 mV and RMS voltage of 316 mV, offering an enticing compromise between energy output and efficiency.

The study highlights the challenge of selecting the right core material for alternators, balancing damping efficiency and energy generation capacity. While air cores and iron

cores have their strengths, SMC cores offer a versatile middle ground, minimizing losses while optimizing energy generation and design flexibility.

In wind turbine alternator design, SMC materials appear as a promising solution for revolutionizing core manufacturing, despite not yet matching iron cores in energy generation. This advancement implies a significant step forward in renewable energy technology.

The research significantly progresses the development of efficient wind energy technologies, paving the way for optimized bladeless wind turbines. Future improvements in SMC materials hold potential for even greater performance, offering efficient solutions for future wind energy generation.

Overall, the study emphasizes the unique properties of SMC materials and their role in alternator core manufacturing, laying a strong foundation for further research into enhancing SMC properties through thermal processes.

Author Contributions: Conceptualization, E.G.-G., S.D.P. and S.L.; methodology, E.G.-G., D.J.Y. and A.H.; validation, E.G.-G., D.J.Y., A.H., S.D.P. and S.L.; formal analysis, E.G.-G., D.J.Y. and A.H.; investigation, E.G.-G.; writing—original draft preparation, E.G.-G., D.J.Y. and A.H.; writing—review and editing, S.D.P. and S.L.; supervision, S.D.P. and S.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors would like to thank the European Union for the funding provided through the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 101021714 (Project LAW-GAME). Views and opinions expressed are those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Research Executive Agency. Neither the European Union nor the European Research Executive Agency can be held responsible for them.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data is contained within the article.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Vortex Bladeless S.L. for their technical support.

Conflicts of Interest: Authors David J. Yáñez and Arturo Hidalgo were employed by the company Vortex Bladeless S.L. The remaining authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

References

1. Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M. *Additive Manufacturing Technologies*; Springer: New York, NY, USA, 2021. Available online: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-2113-3 (accessed on 15 April 2024).
2. Tofail, S.A.M.; Koumoulos, E.P.; Bandyopadhyay, A.; Bose, S.; O'Donoghue, L.; Charitidis, C. Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Mater. Today* **2018**, *21*, 22–37. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001.
3. Tiismus, H.; Kallaste, A.; Vaimann, T.; Rassõlkin, A. State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machines. *Addit. Manuf.* **2022**, *55*, 102778. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102778.
4. Wu, F.; El-Refaie, A.M. Toward Additively Manufactured Electrical Machines: Opportunities and Challenges. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **2020**, *56*, 1306–1320. https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2960250.
5. Selema, A.; Ibrahim, M.N.; Sergeant, P. Advanced Manufacturability of Electrical Machine Architecture through 3D Printing Technology. *Machines* **2023**, *11*, 900. https://doi.org/10.3390/machines11090900.
6. Krings, A.; Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Sprague, S. Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2016**, *64*, 2405–2414. https://doi.org/10.1109/tie.2016.2613844.
7. Rodriguez-Vargas, B.R.; Stornelli, G.; Folgarait, P.; Ridolfi, M.R.; Pérez, A.F.M.; Di Schino, A. Recent Advances in Additive Manufacturing of Soft Magnetic Materials: A Review. *Materials* **2023**, *16*, 5610. https://doi.org/10.3390/ma16165610.
8. Shokrollahi, H.; Janghorban, K. Soft magnetic composite materials (SMCs). *J. Mater. Process. Technol.* **2007**, *189*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.034.
9. Goll, D.; Schuller, D.; Martinek, G.; Kunert, T.; Schurr, J.; Sinz, C.; Schubert, T.; Bernthaler, T.; Riegel, H.; Schneider, G. Additive manufacturing of soft magnetic materials and components. *Addit. Manuf.* **2019**, *27*, 428–439. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.021.

10. Ehrmann, G.; Blachowicz, T.; Ehrmann, A. Magnetic 3D-Printed Composites—Production and Applications. *Polymers* **2022**, *14*, 3895. https://doi.org/10.3390/polym14183895.
11. Giannotta, N.; Sala, G.; Bianchini, C.; Torreggiani, A. A Review of Additive Manufacturing of Soft Magnetic Materials in Electrical Machines. *Machines* **2023**, *11*, 702. https://doi.org/10.3390/machines11070702.
12. Wei, X.; Jin, M.-L.; Yang, H.; Wang, X.-X.; Long, Y.-Z.; Chen, Z. Advances in 3D printing of magnetic materials: Fabrication, properties, and their applications. *J. Adv. Ceram.* **2022**, *11*, 665–701. https://doi.org/10.1007/s40145-022-0567-5.
13. Lamichhane, T.N.; Sethuraman, L.; Dalagan, A.; Wang, H.; Keller, J.; Paranthaman, M.P. Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines—A review. *Mater. Today Phys.* **2020**, *15*, 100255. https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100255.
14. Liu, C.; Wang, Y.; Lei, G.; Guo, Y.; Zhu, J. Design and analysis of a 3D-flux flux-switching permanent magnet machine with SMC cores and ferrite magnets. *AIP Adv.* **2017**, *7*, 056632. https://doi.org/10.1063/1.4974524.
15. Ferraris, L.; Pošković, E.; Franchini, F. New Soft Magnetic Composites for electromagnetic applications with improved mechanical properties. *AIP Adv.* **2016**, *6*, 056209. https://doi.org/10.1063/1.4943413.
16. Okoruwa, L.; Sameni, F.; Borisov, P.; Sabet, E. 3D Printing Soft Magnet: Binder Study for Vat Photopolymerization of Ferrosilicon Magnetic Composites. *Polymers* **2023**, *15*, 3482. https://doi.org/10.3390/polym15163482.
17. Wu, S.; Hu, W.; Ze, Q.; Sitti, M.; Zhao, R. Multifunctional magnetic soft composites: A review. *Multifunct. Mater.* **2020**, *3*, 042003. https://doi.org/10.1088/2399-7532/abcb0c.
18. Wang, H.; Lamichhane, T.; Paranthaman, M. Review of additive manufacturing of permanent magnets for electrical machines: A prospective on wind turbine. *Mater. Today Phys.* **2022**, *24*, 100675. https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100675.
19. Shea, A.; Ludois, D.C. Reduction of permanent magnets in small-scale wind turbines. In Proceedings of the 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA, 15–19 September 2013; pp. 5105–5111. https://doi.org/10.1109/ecce.2013.6647390.
20. Chen, Y.; Pillay, P. Axial-flux PM wind generator with a soft magnetic composite core. In Proceedings of the Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, Hong Kong, China, 2–6 October 2005; Volume 1, pp. 231–237. https://doi.org/10.1109/IAS.2005.1518315.
21. Sethuraman, L.; Vijayakumar, G.; Ananthan, S.; Paranthaman, M.P.; Keller, J.; King, R. MADE3D: Enabling the next generation of high-torque density wind generators by additive design and 3D printing. *Forsch. Ingenieurwes.* **2021**, *85*, 287–311. https://doi.org/10.1007/s10010-021-00465-y.
22. Yáñez, D.J. VIV Resonant Wind Generators. June 2018. Available online: https://www.researchgate.net/profile/David-J-Yanez/publication/331345449_VIV_resonant_wind_generators/links/5c74f3c3299bf1268d25c051/VIV-resonant-wind-generators.pdf (accessed on 18 January 2024).
23. Vortex Bladeless. How It Works? Available online: https://vortexbladeless.com/technology/ (accessed on 18 January 2024).
24. Guessasma, S.; Belhabib, S.; Nouri, H. Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling. *Polymers* **2019**, *11*, 1220. https://doi.org/10.3390/polym11071220.
25. The-Virtual-Foundry-TDS-High-Carbon-Iron-24-04-2.pdf. Available online: https://thevirtualfoundry.com/wp-content/uploads/2024/04/The-Virtual-Foundry-TDS-High-Carbon-Iron-24-04-2.pdf (accessed on 24 January 2024).
26. Parapurath, S.; Jacob, L.; Gunister, E.; Vahdati, N. Effect of Microstructure on Electrochemical Properties of the EN S275 Mild Steel under Chlorine-Rich and Chlorine-Free Media at Different pHs. *Metals* **2022**, *12*, 1386. https://doi.org/10.3390/met12081386.
27. Leuning, N.; Jaeger, M.; Schauerte, B.; Stöcker, A.; Kawalla, R.; Wei, X.; Hirt, G.; Heller, M.; Korte-Kerzel, S.; Böhm, L.; et al. Material Design for Low-Loss Non-Oriented Electrical Steel for Energy Efficient Drives. *Materials* **2021**, *14*, 6588. https://doi.org/10.3390/ma14216588.
28. Jassal, A.; Polinder, H.; Ferreira, J. Literature survey of eddy-current loss analysis in rotating electrical machines. *IET Electr. Power Appl.* **2012**, *6*, 743–752. https://doi.org/10.1049/iet-epa.2011.0335.
29. Hu, Q.; Wang, M.; Chen, Y.; Si, Z.; Zhang, D. Effects of sintering temperatures on the microstructure and mechanical properties of S390 powder metallurgy high-speed steel. *Front. Mater.* **2023**, *10*, 1198776. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1198776.
30. Pošković, E.; Franchini, F.; Ferraris, L.; Fracchia, E.; Bidulska, J.; Carosio, F.; Bidulsky, R.; Grande, M.A. Recent Advances in Multi-Functional Coatings for Soft Magnetic Composites. *Materials* **2021**, *14*, 6844. https://doi.org/10.3390/ma14226844.
31. Zhang, Z.; Hu, L.; Wang, R.; Zhang, S.; Fu, L.; Li, M.; Xiao, Q. Advances in Monte Carlo Method for Simulating the Electrical Percolation Behavior of Conductive Polymer Composites with a Carbon-Based Filling. *Polymers* **2024**, *16*, 545. https://doi.org/10.3390/polym16040545.
32. Kinsler, P. Faraday's Law and Magnetic Induction: Cause and Effect, Experiment and Theory. *Physics* **2020**, *2*, 150–163. https://doi.org/10.3390/physics2020009.
33. Wood, L.T.; Rottmann, R.M.; Barrera, R. Faraday's law, Lenz's law, and conservation of energy. *Am. J. Phys.* **2004**, *72*, 376–380. https://doi.org/10.1119/1.1646131.
34. Energía Eólica Sin Palas. Available online: https://vortexbladeless.com/es/ (accessed on 13 February 2024).
35. Boehm, A.; Hahn, I. Comparison of soft magnetic composites (SMCs) and electrical steel. In Proceedings of the 2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, Germany, 15–18 October 2012; pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/EDPC.2012.6425119.
36. Walker, J. The theory of the inductor alternator. *J. Inst. Electr. Eng.-Part II Power Eng.* **1942**, *89*, 227–241. https://doi.org/10.1049/ji-2.1942.0037.

37. Frljić, S.; Trkulja, B.; Žiger, I. Calculation of the Eddy Current Losses in a Laminated Open-Type Transformer Core Based on the A→T→−A→ Formulation. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 11543. https://doi.org/10.3390/app112311543.
38. Scheerlinck, B.; De Gersem, H.; Sergeant, P. 3-D Eddy Current and Fringing-Flux Distribution in an Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine with Stator in Laminated Iron or SMC. *IEEE Trans. Magn.* **2015**, *51*, 1–4. https://doi.org/10.1109/tmag.2015.2443555.
39. Wang, X.; Zhou, S.; Wu, L.; Zhao, M.; Hu, C. Iron Loss and Thermal Analysis of High Speed PM motor Using Soft Magnetic Composite Material. In Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 11–14 August 2019; pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8922504.
40. Pyo, H.-J.; Jeong, J.W.; Yu, J.; Nam, D.-W.; Yang, S.-H.; Kim, W.-H. Eddy Current Loss Reduction in 3D-Printed Axial Flux Motor Using 3D-Printed SMC Core. In Proceedings of the 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 11–15 October 2020; pp. 1121–1125. https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9235442.
41. Fico, D.; Rizzo, D.; Casciaro, R.; Esposito Corcione, C. A Review of Polymer-Based Materials for Fused Filament Fabrication (FFF): Focus on Sustainability and Recycled Materials. *Polymers* **2022**, *14*, 465. https://doi.org/10.3390/polym14030465.
42. Original Prusa i3 MK3S+ 3D Printer|Original Prusa 3D Printers Directly from Josef Prusa. Available online: https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-3d-printer-3/#specs (accessed on 3 June 2024).
43. Li, Y.; Wan, Z.; Sun, H.; Liu, H. Magnetic measurement and analysis of c-type amorphous by an improved adjustable air gap tester. *AIP Adv.* **2021**, *11*, 015352. https://doi.org/10.1063/9.0000209.
44. SDS1000 Series Oscilloscopes Technical Specifications. Available online: https://files.owon.com.cn/specifications/OWON_SDS1000_Series_Oscilloscope_technical_spec.s.pdf (accessed on 10 April 2024).
45. ALMEMO® Measuring Instruments. Available online: https://www.ahlborn.com/assets/uploads/general/Produkte/Datenlogger-Messgeraete/Almemo-2470/ALMEMO-2470-english.pdf (accessed on 10 April 2024).

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

CAPÍTULO V:

INVESTIGACIONES ADICIONALES

Y OTROS DESARROLLOS

5 CAPÍTULO V: INVESTIGACIONES ADICIONALES Y OTROS DESARROLLOS

Fruto de la realización de la presente tesis doctoral se han obtenido resultados de investigación adicionales a los artículos científicos presentados en los capítulos anteriores, asociados a la actividad realizada por el autor a lo largo de estos años.

5.1 Cátedra Iberdrola VIII Centenario de la Universidad de Salamanca

En primer lugar, en el marco de la Cátedra VIII Centenario de la Universidad de Salamanca en la que se desarrolló primer artículo de investigación, se desarrolló el proyecto ENER3DMAP (Gestión de Clientes y Recursos Energéticos Distribuidos: Mapeado Energético). El objetivo principal fue la creación de una herramienta apoyo a la evaluación y seguimiento de viabilidad de una instalación solar en base a una predicción precisa de producción solar, accesible desde web. Todo ello, a partir de modelos predictivos para el cálculo del potencial solar, en los que la incorporación de variables geoespaciales supone un aumento de la precisión de los resultados. Dicha herramienta representa la información espacial en tres dimensiones, en formato de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) 3D, y permite el establecimiento de perfiles horarios de capacidad de producción solar para distintos tipos de usuarios. En la siguiente Figura 2 se ilustra de forma esquematizada el proyecto.

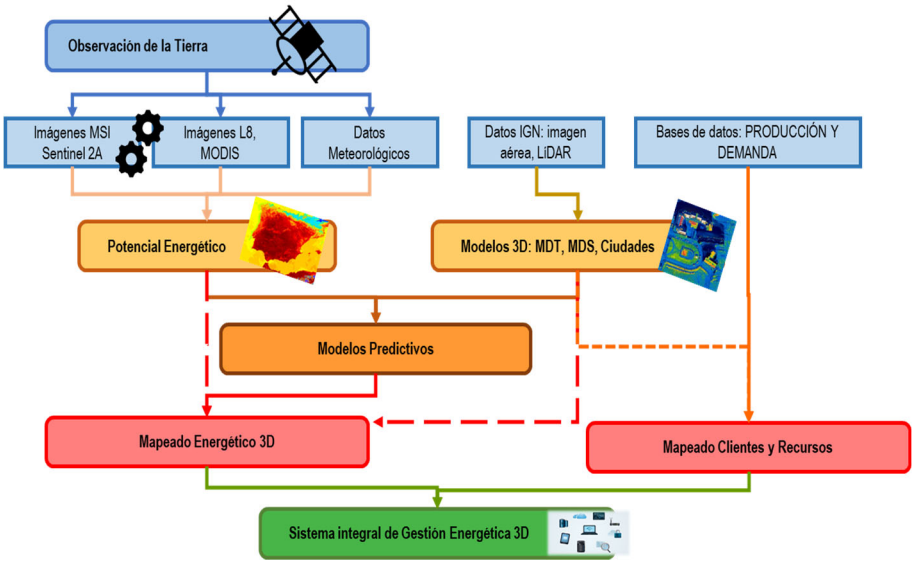


Figura 2: Proyecto ENER3DMAP.

5.1.1 Ener3Dmap–SolarWeb

Uno de los desarrollos más importantes durante el proyecto de la Cátedra Iberdrola VIII Centenario de la Universidad de Salamanca, fue la herramienta Ener3Dmap–SolarWeb, que consiste en una aplicación web que permite a un usuario conocer el potencial solar presente en el tejado de su vivienda actual de manera automática, así como introducir datos de forma manual, de cara a proyectar instalaciones en futuros edificios y en parcelas no construidas, tomando como dato de partida su localización. Esta herramienta dio lugar a un registro de propiedad intelectual (ver Anexo B). A continuación, se muestra en la Figura 3 una captura de la plataforma web desarrollada.

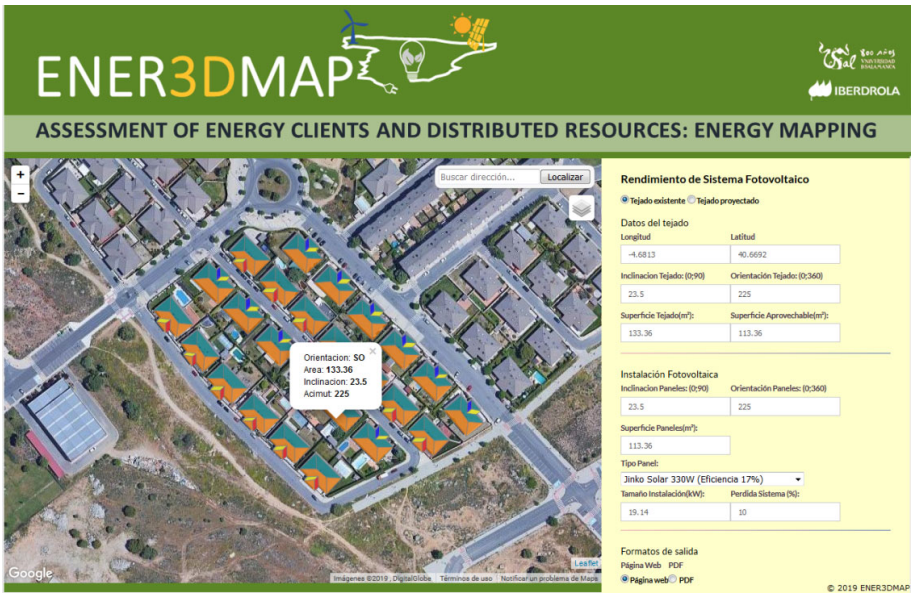


Figura 3: Herramienta Ener3Dmap.

5.2 Proyecto EPESOL: Nuevo Instrumento de Evaluación de la Penetrabilidad Solar en el Mercado Energético Español

El proyecto EPESOL: Nuevo instrumento de evaluación de la penetrabilidad solar en el mercado energético español, es un proyecto presentado junto con Iberdrola en la convocatoria Retos Colaboración 2018, del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. El objetivo principal fue la creación de una herramienta de apoyo para la evaluación y seguimiento de la viabilidad de proyectos energéticos mediante estudios de prospectiva, gestión de producción y demanda a gran escala, basada en los conocimientos adquiridos en el anterior desarrollo enfocado a usuarios particulares Ener3Dmap–SolarWeb. A continuación, se muestra en la Figura 4 una captura de la prospectiva solar para la ciudad de Ávila calculada con dicha aplicación.

Figura 4: Prospectiva solar para la ciudad de Ávila: SolarWeb–Cities.

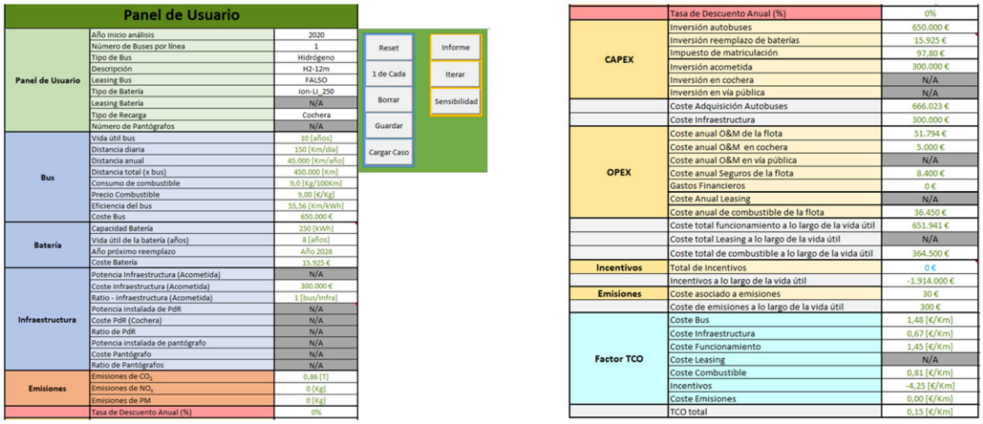
5.2.1 SolarWeb-Cities

Durante el proyecto EPESOL se desarrolló SolarWeb-Cities, que consiste en una aplicación web que permite realizar una prospectiva del potencial solar a gran escala, como por ejemplo de una ciudad completa, procesando la orientación e inclinación de los tejados de manera automática y calculando su potencial solar en base a estos parámetros. Esta herramienta es accesible desde una plataforma web, y la representación de la información se realiza a través de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), permitiendo la identificación de Comunidades Energéticas Locales (CELs) potenciales y de los agentes más interesantes para su desarrollo, con un enfoque especial en posibles productores. Esta herramienta dio lugar a un registro de propiedad intelectual (ver Anexo B). A continuación, se muestra en la Figura 5 una captura de la interfaz gráfica de dicha aplicación.

Figura 5: Herramienta SolarWeb–Cities.

5.3 Análisis de la Viabilidad de la Electrificación de la Flota de Autobuses Urbanos de Ávila

Este proyecto se formaliza entre la Universidad de Salamanca e Iberdrola España, incorporándose posteriormente el Ayuntamiento de Ávila como parte interesada. Este estudio técnico se centra en el análisis de la viabilidad de la electrificación de la flota de autobuses urbanos de Ávila, buscando la identificación y análisis integral de los parámetros involucrados en la electrificación total del servicio de transporte público urbano, con un enfoque en el aprovechamiento de recursos energéticos renovables, específicamente el potencial solar fotovoltaico de la provincia de Ávila. El análisis de viabilidad contempla diferentes análisis técnicos, como el impacto de la orografía y el clima en la autonomía de los autobuses eléctricos, y económicos, como el desarrollo de una herramienta de cálculo del coste de operación (TCO). En la siguiente Figura 6 se muestra una captura de la herramienta de TCO.



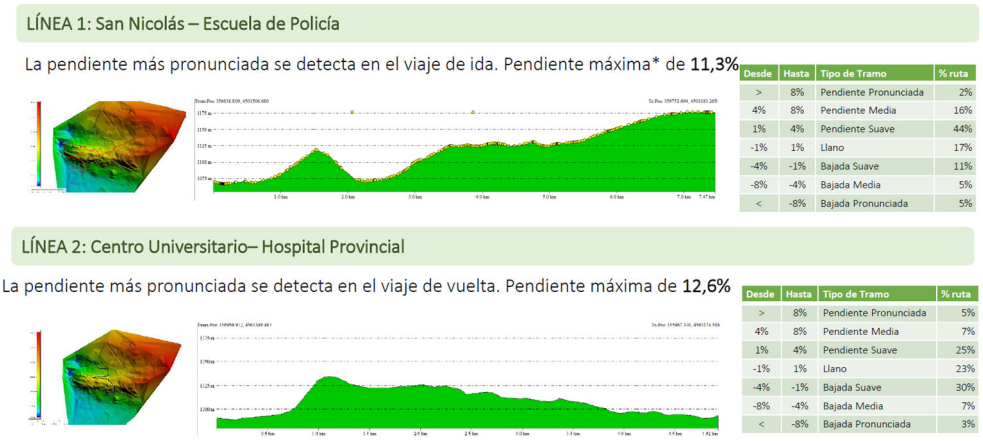
Panel de Usuario		
Panel de Usuario	Año inicio análisis	2020
	Número de Buses por línea	1
	Tipo de Bus	Hidrógeno
	Descripción	H2-12m
	Leasing Bus	FALSO
	Tipo de Batería	ion-Li_250
	Leasing Batería	N/A
	Tipo de Recarga	Cochera
	Número de Pantógrafos	N/A
Bus	Vida útil bus	10 [años]
	Distancia diaria	150 [km/día]
	Distancia anual	45.000 [km/año]
	Distancia total (x bus)	450.000 [Km]
	Consumo de combustible	9,0 [kg/100km]
	Precio Combustible	9,00 [€/kg]
	Eficiencia del bus	55,56 [km/kWh]
	Coste Bus	650.000 €
Batería	Capacidad Batería	250 [kWh]
	Vida útil de la batería (años)	8 [años]
	Año próximo reemplazo	Año 2028
	Coste Batería	15.925 €
Infraestructura	Potencia Infraestructura (Acometida)	N/A
	Coste Infraestructura (Acometida)	300.000 €
	Ratio - infraestructura (Acometida)	1 [bus/infra]
	Potencia instalada de PdR	N/A
	Coste PdR (Cochera)	N/A
	Ratio de PdR	N/A
	Potencia instalada de pantógrafo	N/A
	Coste Pantógrafo	N/A
	Ratio de Pantógrafos	N/A
Emisiones	Emisiones de CO_2	0,86 [T]
	Emisiones de NO_x	0 [Kg]
	Emisiones de PM	0 [Kg]
	Tasa de Descuento Anual (%)	0%

Reset | Informe | 1 de Cada | Iterar | Borrar | Sensibilidad | Guardar | Cargar Caso

	Tasa de Descuento Anual (%)	0%
CAPEX	Inversión autobuses	650.000 €
	Inversión reemplazo de baterías	15.925 €
	Impuesto de matriculación	97,80 €
	Inversión acometida	300.000 €
	Inversión en cochera	N/A
	Inversión en vía pública	N/A
	Coste Adquisición Autobuses	666.023 €
	Coste Infraestructura	300.000 €
OPEX	Coste anual O&M de la flota	31.794 €
	Coste anual O&M en cochera	5.000 €
	Coste anual O&M en vía pública	N/A
	Coste anual Seguros de la flota	8.400 €
	Gastos Financieros	0 €
	Coste Anual Leasing	N/A
	Coste anual de combustible de la flota	36.450 €
	Coste total funcionamiento a lo largo de la vida útil	651.941 €
	Coste total Leasing a lo largo de la vida útil	N/A
	Coste total de combustible a lo largo de la vida útil	364.500 €
Incentivos	Total de Incentivos	0 €
	Incentivos a lo largo de la vida útil	-1.914.000 €
Emisiones	Coste asociado a emisiones	30 €
	Coste de emisiones a lo largo de la vida útil	300 €
Factor TCO	Coste Bus	1,48 [€/Km]
	Coste Infraestructura	0,67 [€/Km]
	Coste Funcionamiento	1,45 [€/Km]
	Coste Leasing	N/A
	Coste Combustible	0,81 [€/Km]
	Incentivos	-4,25 [€/Km]
	Coste Emisiones	0,00 [€/Km]
	TCO total	0,15 [€/km]

Figura 6: Herramienta TCO.

El estudio también analizó el efecto de la orografía en la autonomía de las baterías de vehículos eléctricos, especialmente en autobuses. Se realizaron estudios detallados de las rutas de transporte público, estableciendo la ciudad de Ávila como caso de estudio, para estimar el impacto de las pendientes y otros factores geográficos en el consumo energético y la viabilidad de la electrificación del transporte. Se seleccionaron diversas líneas de autobús municipal en Ávila para este análisis, evaluando las pendientes y las distancias recorridas. En la siguiente Figura 7 se muestra un ejemplo de los estudios orográficos realizados.



LÍNEA 1: San Nicolás – Escuela de Policía

La pendiente más pronunciada se detecta en el viaje de ida. Pendiente máxima* de **11,3%**

Desde	Hasta	Tipo de Tramo	% ruta
>	8%	Pendiente Pronunciada	2%
4%	8%	Pendiente Media	16%
1%	4%	Pendiente Suave	44%
-1%	1%	Llano	17%
-4%	-1%	Bajada Suave	11%
-8%	-4%	Bajada Media	5%
<	-8%	Bajada Pronunciada	5%

LÍNEA 2: Centro Universitario– Hospital Provincial

La pendiente más pronunciada se detecta en el viaje de vuelta. Pendiente máxima de **12,6%**

Desde	Hasta	Tipo de Tramo	% ruta
>	8%	Pendiente Pronunciada	5%
4%	8%	Pendiente Media	7%
1%	4%	Pendiente Suave	25%
-1%	1%	Llano	23%
-4%	-1%	Bajada Suave	30%
-8%	-4%	Bajada Media	7%
<	-8%	Bajada Pronunciada	3%

Figura 7: Estudio orográfico para las líneas 1 y 2.

El análisis de la orografía reveló que las pendientes tienen un impacto significativo en el consumo energético de los vehículos eléctricos, pero los autobuses eléctricos disponibles en el mercado pueden operar en condiciones de pendientes de hasta 18%.

También, se evaluó el potencial solar fotovoltaico en las marquesinas de autobuses, y se propusieron posibles ubicaciones para las cocheras de autobuses, considerando sus rutas, el potencial solar fotovoltaico y la cercanía a puntos de conexión a la red. El estudio de potencial fotovoltaico se realizó teniendo en cuenta las diferentes ubicaciones de las marquesinas y el efecto de las sombras sobre las mismas de otros elementos, empleando una herramienta de análisis de sombras. En la siguiente Figura 8 se muestra una captura de los resultados ofrecidos por dicha herramienta.

Hour	Months											
	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
6.00					YES	YES	YES					
7.00				YES	YES	YES	YES	YES	YES			
8.00		YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES	
9.00	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES
10.00	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES
11.00	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES
12.00	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES
13.00	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES
14.00	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES
15.00	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES
16.00	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES	YES	YES
17.00	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	YES
18.00	NO	NO	NO	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES		
19.00				YES	YES	YES	YES	YES	YES			
20.00					YES	YES	YES	YES				

NO The bus shelter is **NOT** overshadowed YES The bus shelter **IS** overshadowed

Figura 8: Herramienta de análisis de sombras.

5.4 Nueva Herramienta de Evaluación de la Viabilidad de Autoconsumo Fotovoltaico Municipal

A partir de los resultados obtenidos del estudio técnico anterior, se desarrolló este proyecto, titulado “Nueva Herramienta De Evaluación De La Viabilidad De Autoconsumo Fotovoltaico Municipal” y cuyo investigador principal fue el doctorando autor de la presente tesis doctoral. El objetivo principal fue analizar la viabilidad del autoconsumo solar en servicios municipales de alumbrado público y transporte urbano, específicamente mediante la integración de paneles solares en marquesinas de paradas de autobuses en la ciudad de Ávila. Este estudio se alinea con los compromisos europeos de descarbonización y reducción de emisiones, aprovechando el alto potencial de energía solar en España. Este proyecto se realizó gracias a la concesión de una beca concedida en la convocatoria “Ayudas a la Investigación en Energía y Medio Ambiente 2020” convocada por la Fundación Iberdrola.

El proyecto se centró en desarrollar una herramienta de evaluación que permitiera analizar las necesidades energéticas del alumbrado público y la viabilidad de integrar paneles solares en marquesinas. Además, se buscó evaluar el impacto de la orografía en la autonomía de las baterías de vehículos eléctricos, analizando la viabilidad de los vehículos de movilidad personal, como las bicicletas eléctricas, así como desarrollar estrategias geoespaciales para la ubicación óptima de puntos de recarga mediante energía solar. La metodología se implementó y validó en un caso piloto en la ciudad de Ávila.

Para evaluar la viabilidad de autoconsumo para el alumbrado público, se realizó un inventario detallado de las luminarias y se estimó el consumo energético basado en la potencia y las horas de funcionamiento. Paralelamente, se evaluó la producción potencial de energía mediante paneles solares instalados en marquesinas de paradas de autobuses. Este análisis incluyó el estudio de dos configuraciones: marquesinas con paneles publicitarios digitales y sin ellos, así como diferentes opciones de integración de paneles solares en marquesinas de diseño tradicional y marquesinas con paneles flexibles y tejado curvo, evaluando tanto el consumo energético como la capacidad de producción.

Para optimizar la ubicación de los puntos de recarga de bicicletas eléctricas, se desarrollaron estrategias geoespaciales basadas en el análisis del flujo de desplazamiento de los usuarios y el potencial de generación solar en diferentes puntos de la ciudad. Se identificaron ubicaciones estratégicas para los puntos de recarga, teniendo en cuenta la accesibilidad y la capacidad de integración con el mobiliario urbano existente. Además, se desarrolló una

herramienta de gestión de recursos y demandas energéticas municipales basada en SIG-3D, que incluye capas de información sobre alumbrado público, mobiliario de transporte y rutas urbanas. Esta herramienta permite una planificación eficiente y toma de decisiones informadas. En la siguiente Figura 9 se muestra una captura de la herramienta con la información del alumbrado público.

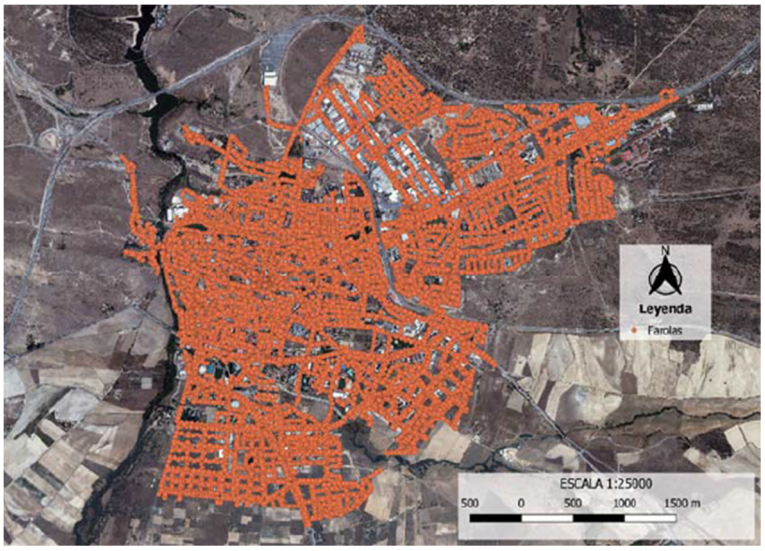


Figura 9: Herramienta de gestión de recursos con información del Alumbrado público.

El caso piloto en la ciudad de Ávila permitió aplicar la metodología desarrollada y validar los resultados. Se realizaron estudios detallados de producción energética considerando las sombras y se evaluó la capacidad de recarga de las marquesinas con paneles solares. Los resultados mostraron un porcentaje de autoconsumo significativo, aunque variable según la orientación y las condiciones de sombra de cada ubicación. En promedio, se logró un autoconsumo del 50-70% en las marquesinas evaluadas.

Las estrategias geoespaciales permitieron identificar ubicaciones óptimas para los puntos de recarga, considerando tanto el uso del transporte público como el potencial de energía solar. En la siguiente Figura 10 se muestra el resultado de las ubicaciones propuestas para los puntos de recarga, con un radio de influencia de 5Km (trayecto medio considerado).

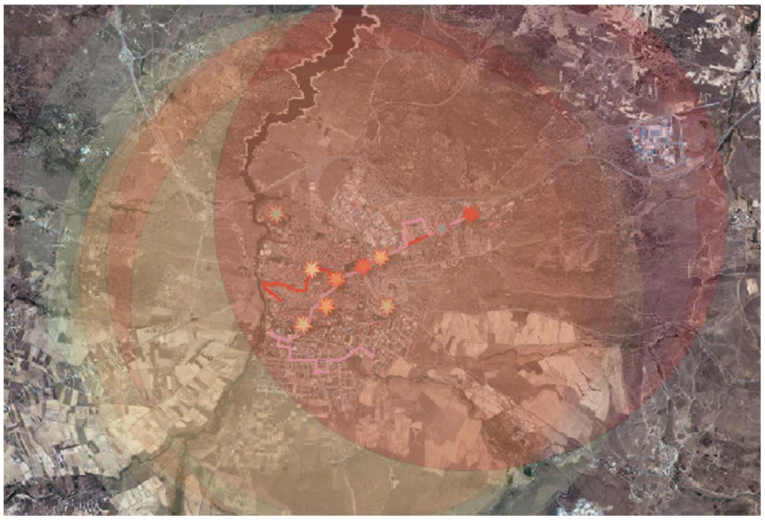


Figura 10: Ubicaciones propuestas para los puntos de recarga.

El proyecto demostró la viabilidad del autoconsumo solar en servicios municipales, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética. La herramienta SIG-3D desarrollada y las estrategias geoespaciales proporcionan una base sólida para futuras implementaciones. La metodología aplicada en Ávila valida el enfoque y su potencial replicabilidad en otros entornos urbanos.

5.4.1 Artículo presentado en congreso internacional ICSC–CITIES 2021.

Gracias a los estudios previos realizados en el apartado 5.3 y a la ejecución de este proyecto, se dio difusión a los resultados a través de la presentación de varios artículos en el congreso internacional ICSC-CITIES del año 2020 [85] y del año 2021 [86].

El primer artículo, titulado “Smart Mobility in Cities: GIS analysis of solar PV potential for lighting in bus shelters in the city of Ávila” se centra en la evaluación del potencial de energía solar fotovoltaica (PV) para la iluminación de marquesinas de autobuses en la ciudad de Ávila. La investigación analiza cómo la instalación de paneles solares en las marquesinas puede no solo satisfacer las necesidades energéticas de éstas, sino también contribuir a la generación de energía excedente para otros usos municipales. Utilizando un Sistema de Información Geográfica (GIS) y un modelo de radiación solar, el estudio determina que la configuración óptima de los paneles (orientados al sur y con una inclinación de 35º) podría generar hasta 3500 kWh/año por marquesina, suficiente para cubrir sus demandas energéticas y aportar al suministro urbano. La metodología incluye un análisis tridimensional del entorno urbano para evaluar el impacto de las sombras en la generación de energía (Figura 11) y la consideración de distintos diseños de paneles (convencionales, horizontales y flexibles) para maximizar la producción y la integración estructural. Los resultados indican que, aunque los paneles convencionales con inclinación óptima son los más eficientes, la integración visual y estructural es mejor con paneles flexibles, a pesar de una reducción significativa en la producción de energía.

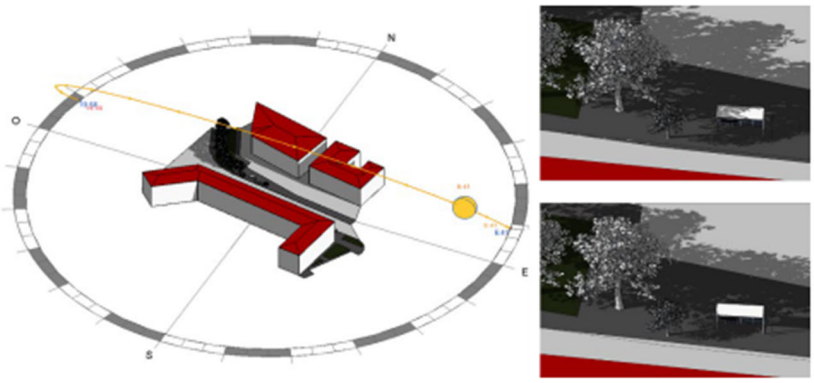


Figura 11: Análisis de sombras.

El segundo artículo, titulado “Analysis of the orography for the study of the technical feasibility of urban electric buses in Ávila” examina las rutas de transporte urbano, enfocándose en el uso de autobuses eléctricos en diversas líneas de la ciudad de Ávila, evaluando la viabilidad de la electrificación de la flota de autobuses. Para ello, se analizan los factores orográficos del terreno (Figura 12) para comprender su impacto en la eficiencia del transporte, categorizando diferentes segmentos de ruta según la inclinación del terreno, desde pendientes suaves hasta pronunciadas. Como resultado de estos estudios, el artículo proporciona un análisis detallado de cómo las condiciones orográficas influyen en la operación de las rutas de autobuses en la

ciudad de Ávila, subrayando la importancia de considerar estos factores en la planificación y gestión del transporte urbano para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad.

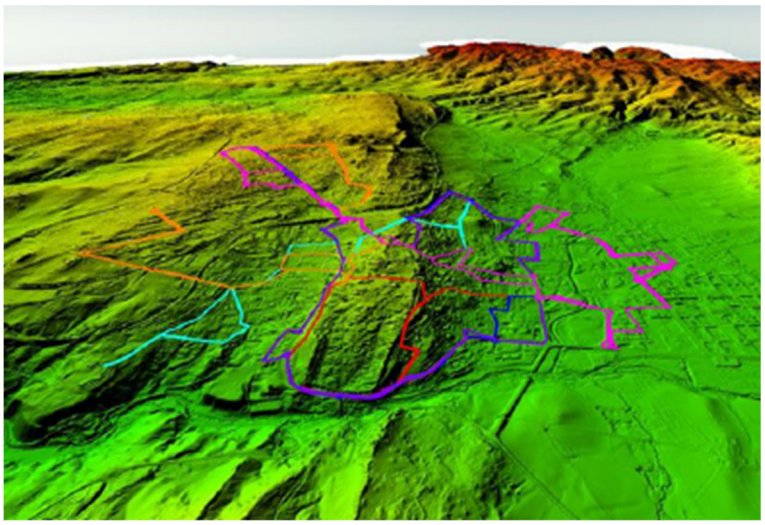


Figura 12: Modelo digital de elevaciones de las rutas de autobús en Ávila.

El tercer artículo, cuyo autor principal es el autor de esta tesis doctoral, titulado "Smart Mobility in Cities: Solar E-bikes Share System Design in the City of Ávila", presenta una propuesta para implementar un sistema de bicicletas eléctricas compartidas alimentadas por energía solar en la ciudad de Ávila, España. La integración de energía solar en el mobiliario urbano, como paradas de autobús, permite recargar las bicicletas eléctricas, reduciendo las emisiones de CO2 y mejorando la movilidad sostenible. Se estima que el sistema diseñado (Figura 13) pueda proporcionar hasta 810 km diarios de capacidad de carga en los meses más favorables, suficientes para unos 160 usuarios diarios con viajes promedio de 5 km. Se identificaron 10 puntos de carga estratégicamente ubicados en función del uso de rutas de autobús y puntos de interés urbano. El consumo energético de las bicicletas eléctricas varía según la orografía, pero se estima un promedio de 20 Wh/km en mediciones empíricas realizadas en diferentes rutas en la ciudad de Ávila. La producción de energía solar y la demanda de bicicletas eléctricas varían estacionalmente, siendo menor en los meses de invierno. Se concluye con una recomendación sólida para la implementación del sistema y se sugiere futuras investigaciones para optimizar el rendimiento de diferentes modelos de bicicletas eléctricas.

Figura 13: Puntos de recarga propuestos.

Smart Mobility in Cities: Solar E-bikes share system design in the city of Ávila

E. González-González [1][0000-0002-8025-2464], M. Sánchez-Aparicio[1][0000-0002-7931-9561], S. Lagüela[1][0000-0002-9427-3864], J. Martín-Jiménez[1][0000-0003-4383-9386], S. Del Pozo[1][0000-0003-4869-3742] and P. de Andrés[1][0000-0001-7708-3260]

[1] University of Salamanca, Ávila 05003, Spain
sulaguela@usal.es

Abstract. Electric bicycles (e-bikes) are considered a sustainable alternative to fuel vehicles because of their capacity to reduce pollutant emissions in cities. In spite of all the benefits offered by conventional bicycles offer, e-bikes are more accepted by users thanks to being faster, more comfortable and allowing longer trips with the same effort by the user. If, solar power is used for battery recharging, the CO_2 emissions of e-bikes are the same as those from conventional bikes. This research is based on the city of Ávila, where previous BIPV (Building Integrated PhotoVoltaics) studies in urban furniture allowed to determine the capacity of a net of recharge points for e-bikes thanks to the surplus energy of the bus shelters. Data showed that the maximum capacity of the system proposed is 810 solar kilometers, considering the maximum consumption for an e-bike (20Wh per Km) in the city of Ávila. This capacity could cover the demand for 160 users per day considering displacements of 5 km each.

Keywords: solar energy, e-bikes, BIPV bus shelters, municipal self-consumption.

1 Introduction

Most air pollutant emissions in urban environments are caused by transport [1]. For years, government authorities have been promoting the development of emission-free mobility and supporting sustainable strategies to change the current mobility model, which is based on fossil fuels and private vehicles, to a mobility model using cycling as one of the main alternatives [2].

Comparing the bicycle as a means of urban transport with other alternatives (public buses, vehicles, motorbikes), it is the most efficient means of transport for distances under 5 km [3]. In recent years, the promotion of e-bikes has led to a significant increase in their use in urban environments, also increasing the average distance of journeys [4]. Combining the use of renewable energies with the recharging of public e-bike share systems increases the benefits of this means of transport by further reducing its carbon footprint [5].

ISBN 978-607-99960-0-0

The implementation of self-consumption strategies associated with the use of renewable energies presupposes a reduction in municipal economic expenditure [1]. Furthermore, this possibility improved the penetration of renewable energies in the urban area, as well as the transport supply. The consequent reduction of greenhouse gas emissions would lead to an improvement in the liveability of municipalities through improved air quality.

At the urban level, the Sustainable Development Goal of "sustainable cities and communities" requires the promotion of the use of alternative individual transport, such as bicycles and scooters, which allow for faster mobility and can be managed in a way that is accessible to all users and integrated with other means of public transport [6].

The use of e-bikes allows users to reach speeds similar to cars in urban environments, which homogenises the range of possibilities, increasing the perception of safety for cyclists and reducing the risk of accidents, as well as attracting users who are discouraged from cycling by the city's orography and their physical fitness [7].

Planning the distribution and sizing the different solar installations to supply the energy demand of municipal services requires prior knowledge of the particular needs of each component of this demand [8]. The optimal location of solar-powered recharging points for all the types of transport considered requires a detailed study of the autonomy of the most used batteries, as well as the influence that both the orography and the climatic conditions of the municipality have on them.

2 Integration of e-bike in cities

The evolution of the use of e-bikes in urban environments has grown considerably in recent years. Nowadays, an increasing number of cities around the world have adopted public bicycle sharing systems as a transport option. According to the Bike Sharing World Map [9], there are 1892 bike-share programs in operation worldwide and 254 being planned or under construction. Cities such as Beijing, Shanghai or London [10, 11] have implemented public e-bike share systems that have led to significant reductions in energy consumption and pollutant gas emissions [1]. The combination of these systems with other means of public transport considerably reduces the dependency on private vehicles [2] and therefore reduces traffic congestion in urban environments.

A public e-bike share system needs an individual monitoring system that allows the traceability of each e-bike in order to optimise and monitor their use [9], increase the security of the e-bikes against possible acts of vandalism, and calculate autonomy and distances in real time, as well as monetise their use if necessary. This real-time control of the system allows information to be displayed to the users immediately, allowing them to know the status and availability of the network, improving user experience and acceptance [12]. Diverse technologies can be used for communication, but the casuistic of this case requires the properties of networks with low energy consumption and large coverage area. Low Power Wide Area Networks (LPWAN), such as LoRaWAN, are the best solution for monitoring public e-bike share systems [13], also improving the management and optimizing the system [14, 15].

ISBN 978-607-99960-0-0

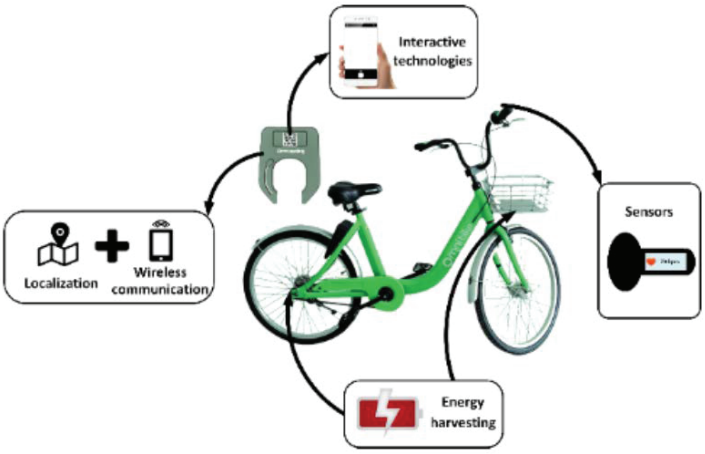


Fig. 1. E-Bike IoT monitoring. Source: [15]

2.1 Charging points for e-bikes.

The sizing of the e-bike fleet and the location of the charging points is a strategic decision that directly affects the achievement of the system objectives. The design of the network of services is based on an optimisation model, called the facility location model, based on decision variables such as location, capacity, coverage area and other types of properties [16, 17].

In addition, other factors can be considered, such as minimising costs and satisfying user demand as much as possible. For the case of e-bike share systems, [18] proposes a method that considers the interest of users and investors to determine the number and location of charging points, including the stock of e-bikes at the charging points in [19].

Considering the maximization of the revenue, the method presented in [16] optimizes the location of shared e-bike stations assuming a fleet size and bicycle relocation calculation for a regular operating day.

Other methods consider an optimization method that relates public bikes to private cars [20]. The methodology is essentially a bi-level mathematical programming model that optimizes the location of public bicycle stations.

GIS methodologies are also considered to estimate the potential trip demand and its spatial distribution, the location of the stations, the station capacity and demand profiling for stations [21].

Bike share system in the city of Hangzhou [22], the program Vélib in Paris (France) [23], or Bicimad in Madrid (Spain) [24], located their stations every 200 – 300 m. In small cities such as Drama (Greece) with a population close to 60K residents, a bike-sharing scheme has been introduced with 50-60 bikes in 3-5 docking stations [25].

ISBN 978-607-99960-0-0

2.2 Solar e-bikes integration with urban furniture.

Considering the strategic location of the urban furniture of public transport, such as bus stops or metro stations, within the urban core, the location of e-bike charging points next to this type of furniture is the most appropriate. This type of furniture, such as bus shelters, also allows the integration of photovoltaic energy installations [8], generating its own energy and discharging surpluses into the grid when possible. These surpluses could be used to recharge e-bikes by integrating the charging points with the urban furniture.

2.3 E-bikes power assistant regulation

Regulation (EU) No 168/2013 [26] on the approval and market surveillance of two- or three-wheel vehicles and quadricycles provides that all electric bicycles except those with a maximum speed of 25 km/h and a continuous rated motor output of 250 W are subject to type approval. These levels, therefore, are the maximum power levels for electric bicycles in the EU.

Other jurisdictions, such as the United States in the H.R.727 [27], consider that 'low-speed electric bicycles' are those with a motor output lower than 750 W and a maximum speed of 20 mph or 32 km/h. These are, therefore, not considered to be motor vehicles.

Considering EU regulations, a typical e-bike can travel up to 25 km/h, with motor power up to 250Watts, a battery of 24 V, 36 V or 48 V, and capacity depending of the manufacturer and model (Fiido D11 - 11.6 Ah [28], Fiido D2S – 7.8 Ah [29], Elops 120 – 8.7 Ah [30], Elops 920 – 11.6 Ah [31]).

The power assistance is commonly provided through either a hub motor (front or rear) or through direct drive to the chain near the crank. There can be a torque sensor built into the cranks which results in higher power assistance being provided when the rider is working the hardest (e.g. standing up or riding uphill). The controls on some models allow the user to completely turn off assistance or to vary the power assistance level. Some models include a regenerative energy feature to put power back into the battery either under braking or when traveling downhill. They can also add to the drag in the motor (compared to models with no regenerative function) which can have the advantage of moderating the speed on downhills but the disadvantage of harder pedalling once the battery is flat. [32]

3 Analysis of solar e-bikes integration in Ávila

3.1 Solar energy in bus shelters in Ávila

Taking into account that one of the criteria followed when selecting the locations of the charging points throughout the city of Ávila was the proximity to bus shelters with the possibility of installing solar panels on their roofs in order to use part of the energy produced at the charging points, this section aims to analyse in more detail the energy that could be used by the charging points.

ISBN 978-607-99960-0-0

Considering the results obtained in the study of installing solar panels on bus shelters in the city of Avila [8], the following table shows the surplus energy for the case of flexible panels in the different months of the year.

Table 1. Energy surplus for flexible panels installed on bus shelters in Ávila

Month	Energy surplus [Wh/day]
Jan.	0
Feb.	0
Mar.	445
Apr.	799
May	1208
Jun.	1493
Jul.	1625
Aug.	1333
Sep.	839
Oct.	25
Nov.	0
Dec.	0

3.2 Consumption of e-bikes in Ávila.

To determine the consumption of an e-bike in the city of Avila, different energy consumption studies have been performed considering the influence of real conditions such as the city orography, which is quite steep. These studies were carried out with the Fido D1 e-bike model [33], with a fully charged battery (36v, 10.7Ah, 385Ah), with a cyclist weight of 90 kg travelling along different routes throughout the city. The theoretical consumption indicated by manufacturer is about 10Wh per km. Nevertheless, the results obtained offer different consumptions, from 20Wh per km in steeper routes to 15Wh in normal routes.

Therefore, considering a consumption of 20Wh per kilometre (the most unfavourable data obtained) for an electric bicycle in the city of Ávila, the autonomy estimated would be 17.5 km, which is enough to travel from one point to another in the city of Ávila. It should be noted that the model of e-bike used does not have gear shift, which reduces the force delivered by the cyclist's pedalling in the most unfavourable conditions (start-up and slope). This consumption value can be reduced by improving this aspect of the e-bike.

ISBN 978-607-99960-0-0

3.3 Location of charging points for e-bikes in Ávila.

The success of the bicycle share system as a public transport alternative depends on the use that people make of bicycles to make their journeys within a city. Therefore, it is necessary to know the flow of people and their movements, in order to choose the optimal locations where there may be more demand from users to place the delivery and return systems of the bicycles.

For this study, 10 charging points have been proposed for the city of Ávila, analysing the journeys made by its inhabitants using public transport (urban buses). The following table shows the use of the different urban bus routes in the city of Avila on a working day.

Table 2. Daily bus users for a working day.

Bus route	Total daily users	Ratio %
Line 1	1739	27%
Line 2	472	7%
Line 3	1186	18%
Line 4	581	9%
Line 5	947	15%
Line 6	1594	24%

Taking into account the routes and uses of each line, being lines 1 and 6 the most popular, with more than 50% of total daily passengers between them, and urban points of interest such as hospitals, shopping centres and universities, we can propose the following locations for the e-bike charging points (Fig. 2).

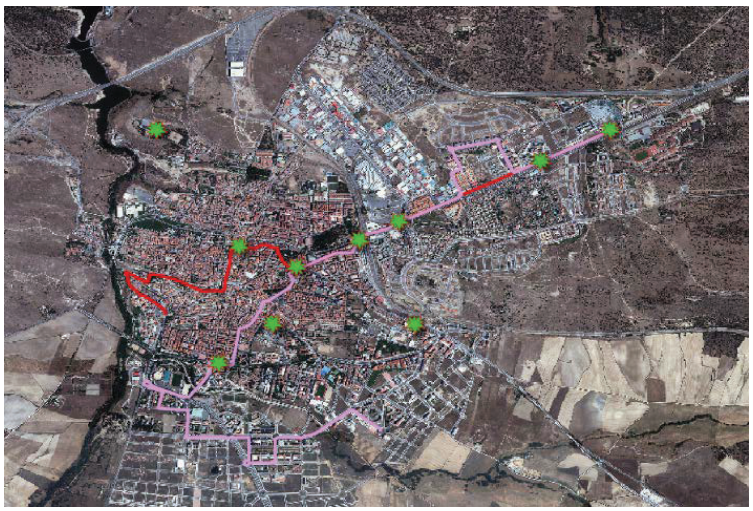


Fig. 2. Urban map of Ávila with the charging points proposed. Red line (Route 1) and Pink line (Route 6) show the bus routes most used.

ISBN 978-607-99960-0-0

Analysing the number of passengers throughout the day (working day), an average of 10 users is observed, with two peaks of increase, at the beginning of the working day (8:30h) and at midday (15:00h), as well as a small rise in the evening (19:30h - 20:00h). This data gives an idea of the total number of bicycles in the fleet of the municipal bicycle loan system, as well as helping in the management of the recharging process.

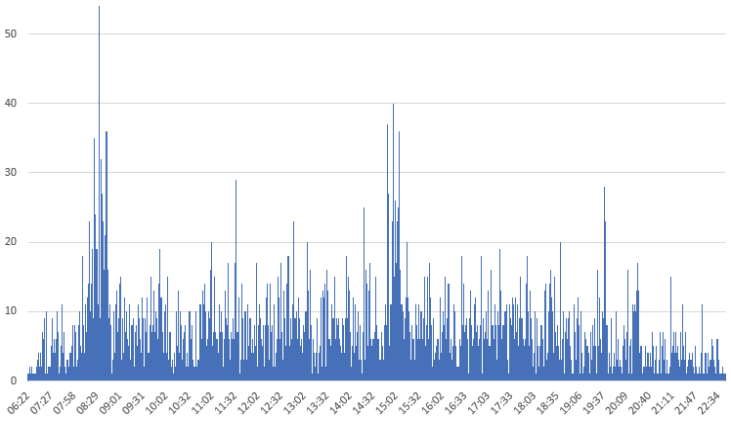


Fig. 3. Daily bus users in a working day by hours

4 Discussion

Considering the most conservative case of consumption obtained from the studies carried out (20Wh) and taking into account the surplus energy coming from the photovoltaic installations integrated in the bus shelters, the following graph has been made showing the number of km per day available, for each month of the year.

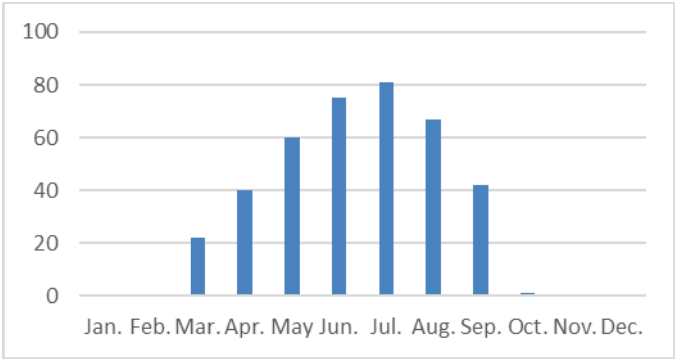


Fig. 4. Surplus energy kilometres per bus shelter by month.

ISBN 978-607-99960-0-0

The 10 charging points proposed for the city of Avila would obtain a maximum charging capacity in the most favourable month (July) of 81 km each, so that the total capacity would mean a range of 810 km per day for the fleet of e-bikes.

Analysing the travel distances for the different routes in the city of Ávila, considering any proposed charging point as a starting point, it is possible to cover the entire area of the city and part of the surrounding municipalities with a radius of 5 km. The following figure shows the 5 km buffer areas of influence for the proposed charging points.

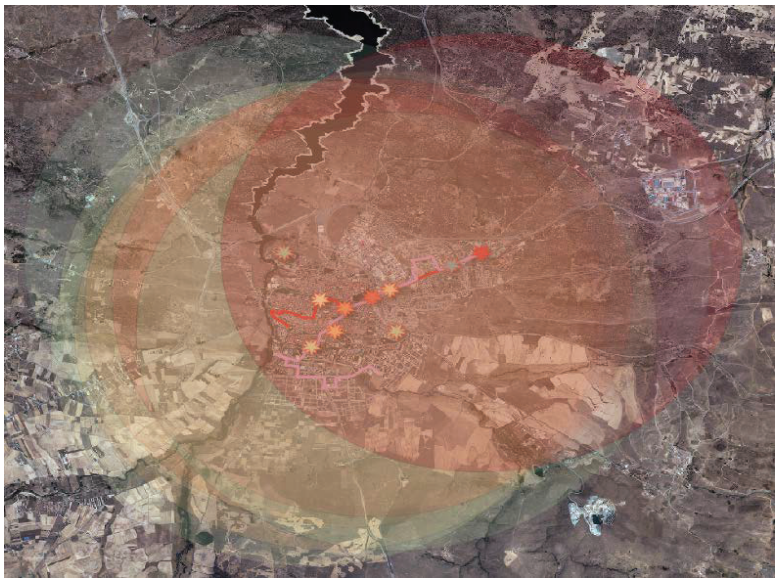


Fig. 5. Buffer areas (5 km) for the charging points proposed.

The full capacity of the system proposed (810 km per day) is able to reduce 99 kg of CO_2 emissions regarding the use of a private car, with an average emission of 122.3 g CO_2 per kilometer for new cars released in 2019 [34].

5 Conclusions

Considering an average trip of 5 km per e-bike user per day, with the solar charging capacity of flexible solar PV panels installed on bus shelters (810 km), we can estimate a capacity of 160 users per day for the most favourable month. For the most unfavourable months (Nov., Dec., Jan and Feb.) in which there is no surplus to allow e-bike charging, the demand for e-bikes is also estimated to be lower due to the possibility of low temperatures and the snow precipitations [35]. For this reason, the production of solar energy can be considered directly related to the demand for e-bikes, which increases the benefit and advantages of the proposed system.

The city size plays an important role in affecting cycling safety (small cities are safer than bigger ones) and the very marginal cost compared to other transport investments

ISBN 978-607-99960-0-0

for a city similar to Avila regarding size and economy. This study concludes with a robust recommendation of implementing e-bikes share system in the city of Ávila.

Further research will deal with energy consumption from different models of e-bikes, with gear shift that would reduce the power demand during start-up and slope routes, because the force delivered by the cyclist's pedalling increases. This kind of improvements must be analysed in order to optimize the performance of the e-bike share system proposed.

References

1. 'Air quality in Europe - 2020 report — European Environment Agency'. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report (accessed Sep. 30, 2021).
2. K. Martens, 'The bicycle as a feedering mode: Experiences from three European countries', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 9, pp. 281–294, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.trd.2004.02.005.
3. 'La bicicleta como medio de transporte - Diputación Foral de Bizkaia, 2002'. Accessed: Sep. 23, 2021. [Online]. Available: https://www.bizkaia.eus/home2/Archivos/DPTO6/Temas/Pdf/La%20bicicleta.pdf?hash=a3e7a49e7ed01243f5632d0c35dfd2c2
4. A. Fyhri and N. Fearnley, 'Effects of e-bikes on bicycle use and mode share', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 36, pp. 45–52, May 2015, doi: 10.1016/j.trd.2015.02.005.
5. G. Apostolou, A. Reinders, and K. Geurs, 'An Overview of Existing Experiences with Solar-Powered E-Bikes', *Energies*, vol. 11, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2018, doi: 10.3390/en11082129.
6. L. Böcker, E. Anderson, T. P. Uteng, and T. Throndsen, 'Bike sharing use in conjunction to public transport: Exploring spatiotemporal, age and gender dimensions in Oslo, Norway', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 138, pp. 389–401, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.tra.2020.06.009.
7. B. Muñoz, A. Monzon, and D. Lois, 'Cycling Habits and Other Psychological Variables Affecting Commuting by Bicycle in Madrid, Spain', *Transportation Research Record*, vol. 2382, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2013, doi: 10.3141/2382-01.
8. M. Sánchez-Aparicio, S. Lagüela, J. Martín-Jiménez, S. Del Pozo, E. González-González, and P. Andrés-Anaya, 'Smart Mobility in Cities: GIS Analysis of Solar PV Potential for Lighting in Bus Shelters in the City of Ávila', in *Smart Cities*, Cham, 2021, pp. 154–166. doi: 10.1007/978-3-030-69136-3_11.
9. 'The Meddin Bike-sharing World Map'. https://bikesharingworldmap.com/ (accessed Oct. 02, 2021).
10. Y. Tang, H. Pan, and Q. Shen, 'Bike-sharing systems in Beijing, Shanghai, and Hangzhou and their impact on travel behavior (No. 11-3862).', vol. 11, Jan. 2011.

ISBN 978-607-99960-0-0

11. H. Li, Y. Zhang, H. Ding, and G. Ren, 'Effects of dockless bike-sharing systems on the usage of the London Cycle Hire', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 130, pp. 398–411, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.tra.2019.09.050.
12. 'Bike Share Map', *Bike Share Map*. http://bikesharemap.com/ (accessed Oct. 02, 2021).
13. D. Ibrahim and D. Hussein, *Internet of Things Technology based on LoRaWAN Revolution*. 2019. doi: 10.1109/IACS.2019.8809176.
14. A. R. Al-Ali *et al.*, 'IoT-Based Shared Community Transportation System Using e-Bikes', in *2021 5th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*, Jun. 2021, pp. 61–65. doi: 10.1109/ICSGSC52434.2021.9490509.
15. S. Shen, Z.-Q. Wei, L.-J. Sun, Y.-Q. Su, R.-C. Wang, and H.-M. Jiang, 'The Shared Bicycle and Its Network—Internet of Shared Bicycle (IoSB): A Review and Survey', *Sensors*, vol. 18, p. 2581, Aug. 2018, doi: 10.3390/s18082581.
16. I. Frade and A. Ribeiro, 'Bike-sharing stations: A maximal covering location approach', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 82, pp. 216–227, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.tra.2015.09.014.
17. C. S. Revelle and H. A. Eiselt, 'Location analysis: A synthesis and survey', *European Journal of Operational Research*, vol. 165, no. 1, pp. 1–19, 2005, doi: 10.1016/j.ejor.2003.11.032.
18. J.-R. Lin and T.-H. Yang Ta-Hui, 'Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints', *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 47, no. 2, pp. 284–294, 2011, doi: 10.1016/j.tre.2010.09.004.
19. J.-R. Lin, T.-H. Yang, and Y.-C. Chang, 'A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution', *Computers & Industrial Engineering*, vol. 65, no. 1, pp. 77–86, May 2013, doi: 10.1016/j.cie.2011.12.006.
20. J. P. Romero, A. Ibeas, J. L. Moura, J. Benavente, and B. Alonso, 'A Simulation-optimization Approach to Design Efficient Systems of Bike-sharing', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 54, pp. 646–655, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.782.
21. J. C. García-Palomares, J. Gutiérrez, and M. Latorre, 'Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach', *Applied Geography*, vol. 35, no. 1, pp. 235–246, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.apgeog.2012.07.002.
22. S. Shaheen, S. Guzman, and H. Zhang, 'Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia', *Transportation Research Record*, no. 2143, pp. 159–167, 2010, doi: 10.3141/2143-20.
23. 'Vélib' Métropole - Location de vélos en libre-service'. https://www.velib-metropole.fr/ (accessed Oct. 02, 2021).
24. 'BiciMAD'. https://www.bicimad.com/index.php?s=que (accessed Oct. 02, 2021).
25. A. Nikitas, 'Understanding bike-sharing acceptability and expected usage patterns in the context of a small city novel to the concept: A story of "Greek Drama"', *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 56, pp. 306–321, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.trf.2018.04.022.
26. 'Regulation (EU) No 168/2013 of the European Parliament and of the Council of 15 January 2013 on the approval and market surveillance of two- or three-wheel vehicles and quadricyclesText with EEA relevance', p. 77.
27. C. Stearns, 'Text - H.R.727 - 107th Congress (2001-2002): To amend the Consumer Product Safety Act to provide that low-speed electric bicycles are consumer products subject to such

ISBN 978-607-99960-0-0

Act.', Apr. 12, 2002. https://www.congress.gov/bill/107th-congress/house-bill/727/text (accessed Oct. 03, 2021).
28. 'FIIDO D11 Folding Sport Electric Bike', *Fiido*. https://www.fiido.com/products/fiido-d11 (accessed Oct. 03, 2021).
29. 'Fiido D2S Folding Sport Electric Bike', *Fiido*. https://www.fiido.com/products/fiido-d2s (accessed Oct. 03, 2021).
30. 'BICICLETA URBANA ELECTRICA ELOPS EBIKE 120 CUADRO BAJO NEGRO'. https://www.decathlon.es/es/p/bicicleta-urbana-electrica-elops-ebike-120-cuadro-bajo-negro/_/R-p-305582 (accessed Oct. 03, 2021).
31. 'BICICLETA URBANA ELÉCTRICA ELOPS EBIKE 920 CUADRO BAJO BLANCO'. https://www.decathlon.es/es/p/bicicleta-urbana-electrica-elops-ebike-920-cuadro-bajo-blanco/_/R-p-300604 (accessed Oct. 03, 2021).
32. G. Rose, 'E-bikes and urban transportation: emerging issues and unresolved questions', *Transportation*, vol. 39, no. 1, pp. 81–96, Jan. 2012, doi: 10.1007/s11116-011-9328-y.
33. 'Fiido Electric Bike, E-Scooter, Sea-Scooter | Fiido E-Power Sports', *Fiido*. https://www.fiido.com/ (accessed Oct. 03, 2021).
34. 'CO2 performance of new passenger cars in Europe'. https://www.eea.europa.eu/ims/co2-performance-of-new-passenger (accessed Nov. 22, 2021).
35. A. E. de Meteorología, 'Datos climatológicos - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España'. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos (accessed Nov. 22, 2021).

ISBN 978-607-99960-0-0

5.5 Evaluación de Funcionalidad de Seguidor Solar

Con el objetivo de comprender mejor el funcionamiento de los sistemas de generación fotovoltaicos se realizaron diferentes estudios. Uno de los estudios consistió en evaluar la funcionalidad de un seguidor solar. Para ello, se diseñó un dispositivo de seguimiento solar basado en tecnologías Open Source, y se realizó un estudio comparativo de producción para dos paneles fotovoltaicos con los mismos parámetros (2,5Wp, 130x150mm): un panel con orientación fija, inclinación de 34° y orientación sur (óptima posición fija anual), y el otro panel se ha instalado en un sistema de seguimiento con 2 ejes. A continuación, en la Figura 14 se muestra un boceto de los soportes de los prototipos realizados:

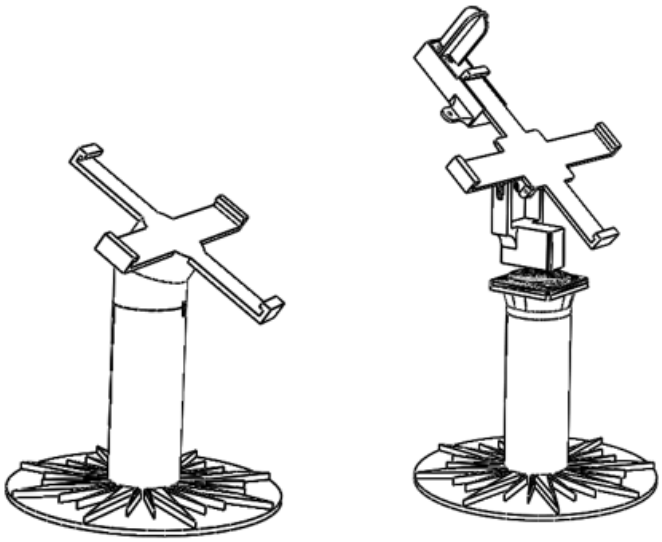


Figura 14: Soporte fijo (izquierda) y soporte con seguimiento a 2 ejes (derecha).

Para el sistema de seguimiento solar se diseñó un sensor coplanario de posicionamiento con 4 fotorresistencias. El sensor está formado por una cruceta de fotorresistencias, colocadas de forma coplanaria al panel solar, de forma que, a través de la detección de sombras proyectadas se puede comprobar si los rayos solares inciden de forma perpendicular en la superficie del panel. En la siguiente Figura X se muestra el diseño de dicho sensor.

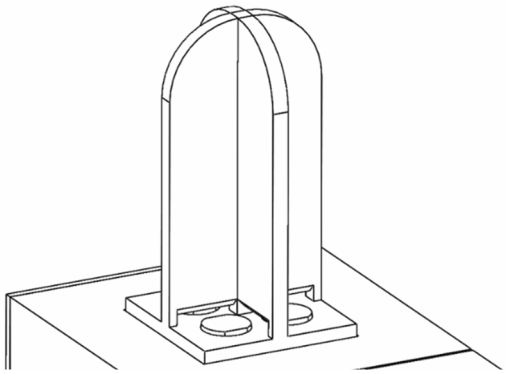


Figura 15: Sensor de seguimiento solar coplanario

Gracias a la monitorización, mediante dispositivos IoT desarrollados ad hoc, de estos dos paneles en dos soportes se evaluaron las diferencias de producción. En la siguiente Figura X se

pueden observar los datos registrados por cada uno de los sistemas, en concreto, para un día del mes de septiembre.

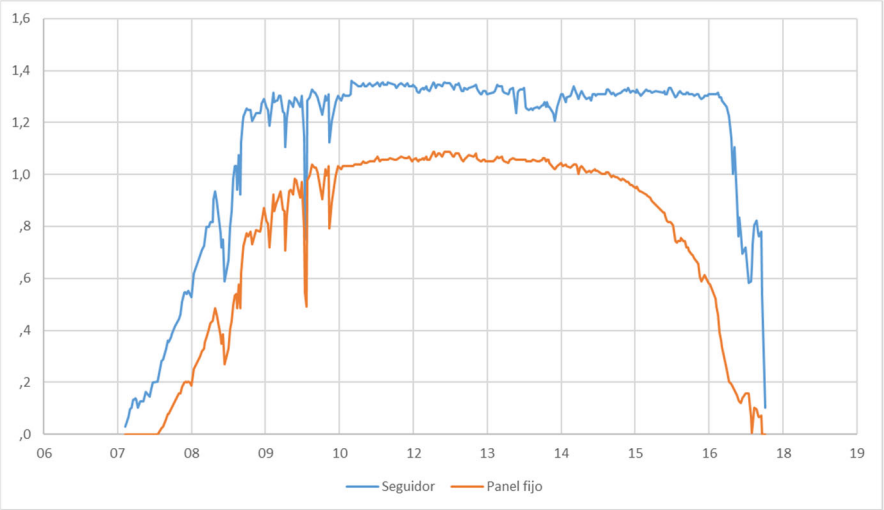


Figura 16: Datos de producción del sistema fijo (naranja) y con seguidor (azul).

Analizando los datos de registrados por cada uno de los paneles, se puede observar el aumento de producción en el panel con sistema de seguimiento (50% aprox.), y por lo tanto verificar el correcto funcionamiento del dispositivo de seguimiento solar.

Una vez analizado y verificado el correcto funcionamiento del dispositivo de seguimiento solar, se realizó un dispositivo con diseño universal y portable para verificar la posición de paneles solares. Este diseño dispone de un enganche ajustable para diferentes medidas de perfiles normalizados, para que sea compatible con cualquier tipo de paneles. El dispositivo integra la capacidad de comprobar el posicionamiento óptimo de paneles que disponen de un sistema de seguimiento solar, adaptándose al perfil de los mismos. De esta forma, puede ser utilizado como sistema de bajo coste de comprobación del funcionamiento de sistemas complejos de seguimiento solar. Este dispositivo se registró como la **patente de invención DIPOSOL** (ver Anexo B). En la siguiente Figura 17 se muestra el diseño de este dispositivo.

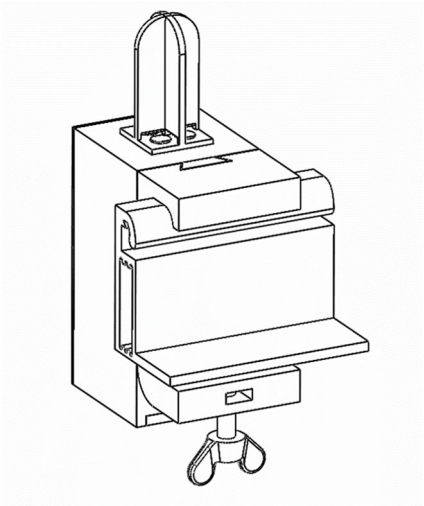


Figura 17: Dispositivo diseñado y patentado como DIPOSOL.

5.6 Proyecto Eficampus: Autoconsumo Solar y Eficiencia Energética en Edificios Universitarios con Paneles Fotovoltaicos

Otro proyecto que permitió comprender y evaluar los sistemas de producción de energía fotovoltaica fue EFICAMPUS. El autor de la presente tesis doctoral ha sido el investigador principal del mismo. Este proyecto consistía en la instalación y puesta en marcha de un sistema fotovoltaico de autoconsumo con la intención de evaluar y comprender los diferentes tipos de instalaciones fotovoltaicas: aisladas y conectadas a red (con y sin excedentes).

El proyecto EFICAMPUS: Autoconsumo Solar y Eficiencia Energética en Edificios Universitarios con Paneles Fotovoltaicos, se centró en el autoconsumo solar y la eficiencia energética en edificios universitarios mediante la instalación de paneles fotovoltaicos. Este proyecto formó parte de una iniciativa más amplia promovida por el Servicio de Asuntos Sociales de la Universidad de Salamanca (Usal), dentro de la convocatoria de ayudas a proyectos 2021 denominada "Promoción de la Innovación Social y la Sostenibilidad en Ávila, Béjar, Salamanca y Zamora". Esta convocatoria tenía como objetivo fomentar la innovación social y la sostenibilidad en distintas localidades, y EFICAMPUS contribuyó significativamente a estos fines, y como consecuencia **fue galardonado con el premio al mejor proyecto en la categoría de desarrollo económico** (ver Anexo B).

La instalación se realizó en la azotea de la Escuela Politécnica Superior de Ávila, con una estructura de soporte apoyada en el suelo tal y como muestra la siguiente Figura 18.

Figura 18: Instalación de paneles del proyecto EFICAMPUS.

Durante la monitorización de esta instalación (del 12 de julio de 2021 hasta el 31 de octubre de 2021), el proyecto alcanzó importantes objetivos, incluyendo la instalación y puesta en marcha de un sistema de generación de energía fotovoltaica. Este sistema produjo 432.2 kWh de energía eléctrica, lo que resultó en un ahorro estimado de 86.44 euros y una reducción significativa en la huella de carbono de 82.12Kg de CO_2. Además, se simularon diferentes configuraciones de instalación, tanto aisladas como conectadas a la red, para evaluar diversos escenarios utilizando un inversor híbrido conectado a la red con baterías. A través de la monitorización de los datos de la instalación con los diferentes tipos de configuraciones: con vertido a red, aislada y conectada a la red sin vertido. Estas

actividades permitieron evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema en diversas condiciones y asegurar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

5.7 Colaboración con Vortex Bladeless

Otro hecho que marcó el desarrollo de la tesis fue la colaboración con la empresa Vortex Bladeless, cuyo objetivo principal fue investigar y conocer de primera mano la tecnología de aerogeneradores sin palas, que dicha empresa desarrolla, para realizar estudios y análisis que permitan optimizar y avanzar en el desarrollo de sus productos. Esta colaboración comenzó con la instalación y puesta en marcha del primer prototipo de aerogenerador del modelo Nano Vortex dentro del programa de beta testers, para realizar un registro de datos en tipo real del rendimiento del equipo y así como de las condiciones de operación en un entorno real. Dicha instalación, que se realizó en la azotea de la Escuela Politécnica de Ávila (Figura 19), permitió comenzar a estudiar el comportamiento de este tipo de aerogeneradores en el ámbito urbano y su hibridación con sistemas fotovoltaicos.

Figura 19: Instalación del primer prototipo Nano Vortex.

5.7.1 Artículo presentado en congreso internacional ICSC–CITIES 2022

De la necesidad de monitorizar este tipo aerogeneradores de una manera específica con registro en tiempo real de manera remota, surgió el desarrollo de un dispositivo IoT. Para el diseño del mismo, se tuvieron en cuenta los requisitos de que fuese autónomo y basado en redes de larga distancia y bajo consumo (LPWAN) basado en el protocolo de comunicación LoRaWAN. Este tipo de redes se caracterizan por permitir la transmisión de pequeños paquetes de datos a largas distancias, con un consumo de energía muy bajo, siendo ideales para conectar dispositivos dispersos geográficamente en áreas extensas. Dicho dispositivo se empleará para monitorizarla producción de energía de cuatro aerogeneradores del modelo Atlantis Vortex de unos 9m de altura, que se instalarán en la ciudad The Line [87] perteneciente al proyecto Neom [88]. "The Line" es un proyecto urbanístico revolucionario en Arabia Saudita, que tiene como objetivo construir una ciudad lineal de 170 kilómetros de largo sin carreteras, automóviles o

emisiones de carbono. Concebida para alojar a 9 millones de personas, "The Line" se diseñará con una infraestructura ultramoderna que prioriza la sostenibilidad y la eficiencia energética. La ciudad será impulsada por energía 100% renovable y ofrecerá servicios esenciales como educación, salud y entretenimiento a una distancia máxima de cinco minutos a pie para sus residentes. Con un enfoque en la inteligencia artificial y tecnologías avanzadas, "The Line" busca redefinir el concepto de vida urbana en el siglo XXI. El desarrollo de este dispositivo dio lugar a la presentación de un artículo en el ICSC-CITIES 2022 [89].

El artículo "Dispositivo IoT para monitorizar aerogeneradores Vortex" se centra en el desarrollo de un data logger autónomo con conectividad LoRaWAN para monitorear y analizar el funcionamiento de aerogeneradores sin palas, desarrollados por la empresa Vortex Bladeless. El desarrollo del dispositivo IoT se basó en dos principios fundamentales: autonomía energética y conectividad de largo alcance. Para lograr la autonomía energética, el dispositivo se alimenta mediante una batería recargada con paneles solares fotovoltaicos. La tecnología LoRaWAN se utilizó para la comunicación de los datos medidos por el dispositivo diseñado, permitiendo la transmisión de datos a largas distancias con bajo consumo de energía. El dispositivo incluye componentes como un microcontrolador, un módulo GPS, un acelerómetro y una batería LiPo, entre otros. En las pruebas de comunicación realizadas, se verificó que el dispositivo podía alcanzar distancias de comunicación de hasta 17 km, cumpliendo así con los requisitos de alcance establecidos. Las pruebas de consumo energético, realizadas en laboratorio, demostraron que el dispositivo podía recargar la batería durante las horas de sol, permitiendo una autonomía suficiente para su funcionamiento continuo. Los datos se transmitieron a una base de datos mediante la infraestructura de The Things Network (TTN), una red global de IoT-LPWAN de código abierto. Las conclusiones del proyecto muestran la efectividad de las redes LoRaWAN para comunicaciones de largo alcance y la capacidad de recarga de la batería con energía solar, lo que garantiza la autonomía del dispositivo. Además, se sugiere que el consumo energético del dispositivo podría mejorarse mediante la detección de eventos específicos para registrar datos solo cuando el aerogenerador esté en movimiento, reduciendo así el consumo durante los periodos de inactividad.

Dispositivo IoT para monitorizar aerogeneradores Vortex

E. González-González [1][0000-0002-8025-2464], S. Lagüela[1][0000-0002-9427-3864], M. Sánchez-Aparicio[1][0000-0002-7931-9561], P. Andrés-Anaya[1][0000-0001-7708-3260], J. Martín-Jiménez[1][0000-0003-4383-9386] and S. Del Pozo[1][0000-0003-4869-3742]

[1] Universidad de Salamanca, Ávila 05003, Spain
egonzalezgonzalez@usal.es

Resumen. Un pilar esencial para el desarrollo de las ciudades inteligentes es la conectividad de dispositivos capaces de enviar y recibir datos que permitan tener la información necesaria en tiempo real. La tecnología que se emplea en dichos dispositivos depende del uso que se le dé a la red de comunicación, es decir, de la cantidad de datos que transfiera, del rango de cobertura que ofrezca, y del consumo de energía que tenga, entre otros. En el campo de las energías renovables, los sistemas que monitorizan el funcionamiento de las diferentes fuentes generadoras de energía están en pleno auge. En el presente trabajo se propone el desarrollo de un *data logger* autónomo con conectividad *LoRaWAN* para monitorizar y analizar el funcionamiento de aerogeneradores sin palas en tiempo real. Las pruebas realizadas demuestran el gran potencial de este tipo de redes en aplicaciones de registro de datos de ciudades, gracias a su largo alcance y bajo consumo.

Keywords: IoT-Devices, LoRaWAN, Smart-cities, Wind-Energy, Bladeless Wind Turbine, Vortex-Bladeless

1 Introducción

Con la aparición de nuevas tecnologías de comunicación se han desarrollado multitud de dispositivos conectados a internet (IoT, del inglés *internet of things*) capaces de enviar y transmitir información en tiempo real. Esto ha permitido el desarrollo de aplicaciones inteligentes y, con ello, la aparición del concepto de ciudades inteligentes [1].

El prototipo de IoT está definido por la conectividad entre diferentes dispositivos capaces de interactuar unos con otros y de realizar acciones autónomas [2] a través de una red global.

La existencia de gran variedad de sensores IoT permite que estos puedan ser empleados para monitorizar distintas actividades y lugares: supervisión de ciclistas, flujo de vehículos, aparcamientos públicos, o calidad del aire [3], entre otros. Dichos proyectos se basan en un control y análisis de datos recogidos por distintos sensores en tiempo real, por lo que es necesario contar con una red de conexión que permita transmitir dichos datos en todo momento. En función de la cantidad de datos, la frecuencia

ISBN 978-9942-44-109-6

de envío y la autonomía del dispositivo de medición (en caso de alimentación por baterías), será más o menos conveniente el empleo de un tipo de tecnología de comunicación u otra.

1.1 Aerogeneradores sin palas

En el contexto de la transición energética, la monitorización tanto de los elementos de generación como de los puntos de consumo se establecen como una aplicación de interés creciente para los sensores IoT. En el caso de la primera aplicación, los sensores IoT facilitan el control de la energía generada por diferentes tecnologías de explotación de recursos energéticos renovables, permitiendo por tanto su ajuste para optimizar la producción [4].

De entre las tecnologías emergentes para maximizar el aprovechamiento energético renovable, los nuevos diseños de aerogeneradores aparecen como un avance para la integrabilidad de la explotación del viento para generación de electricidad, favoreciendo el uso de dicho recurso energético para aplicaciones de autoconsumo, y por tanto democratizando su utilización de las grandes plantas generadoras a los usuarios finales. Considerando los puntos más desfavorables de los aerogeneradores convencionales, el diseño de aerogeneradores sin palas reduce la influencia en la fauna avícola, los efectos de interferencia en las bandas electromagnéticas de comunicación, mientras que el impacto visual y acústico es prácticamente nulo. Un ejemplo de este tipo de dispositivos es el modelo "Vortex Nano" de la empresa Vortex Bladeless [5]. Por su menor tamaño en comparación con los aerogeneradores convencionales, que permite su instalación en cubiertas de edificios o en jardines de viviendas, y por su mantenimiento (prácticamente nulo), estos modelos pueden equipararse a los paneles fotovoltaicos [6]. Además de ser tecnologías de aprovechamiento de recurso energético de características similares, la propuesta de hibridación de ambas (eólica sin palas y solar fotovoltaica) surge como una opción óptima para maximizar la disponibilidad de energía, compensando los aerogeneradores la falta de producción de los paneles fotovoltaicos durante periodos nocturnos o meses de menor radiación solar.

El funcionamiento de estos aerogeneradores se basa en el fenómeno conocido como vibración inducida por vórtices (VIV), recogiendo la energía producida en la parte superior de los mismos (que oscila) gracias a su diseño circular. Esta energía se transforma en electricidad gracias a un alternador alojado en su parte central.

Este trabajo presenta el desarrollo de un dispositivo para monitorizar aerogeneradores sin aspas de mayores dimensiones (modelo "Vortex Atlantis" de 7-10 m de altura), ubicados en zonas periféricas y próximas a entornos urbanos o puntos de consumo. Por lo tanto, la necesidad de comunicación de largo alcance (5-10 Km) hace necesario el empleo de una red *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) con alimentación independiente y autónoma que permita minimizar los costes asociados al despliegue de infraestructuras de red o de energía. La Fig. 1 muestra diferentes tamaños y modelos de aerogeneradores sin palas.

ISBN 978-9942-44-109-6

Fig. 1. Modelos de aerogeneradores desarrollados por la empresa Vortex Bladeless [7].

2 Necesidades y planteamiento

La monitorización del funcionamiento de aerogeneradores sin palas se planteó para un caso piloto con el modelo "Vortex Atlantis" de Vortex Bladeless. El sensor fue ubicado en el interior de la base del aerogenerador (Fig. 2), escogiendo una red LPWAN para la transmisión de datos. Este tipo de red se caracteriza por ser de bajo consumo y largo alcance. Concretamente, se seleccionó la tecnología *Long Range* (LoRa) y el protocolo de comunicación *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) a través de la plataforma *The Things Network* (TTN) [8] configurada como servidor y aplicación de red. Los datos fueron enviados a una base de datos para su registro y posterior visualización y análisis telemáticos.

Fig. 2. Ubicación del dispositivo para la monitorización de datos de un aerogenerador sin palas.

ISBN 978-9942-44-109-6

2.1 Estado del arte

El avance de las tecnologías de comunicación y la aparición de nuevos sensores interconectados, han impulsado el desarrollo de las redes de sensores inalámbricas WSNs (del inglés *Wireless Sensor Networks*). El uso de WSNs tiene infinidad de aplicaciones en diferentes sectores como el industrial [9], el de las ciudades inteligentes [10], el transporte [11], el del ámbito sanitario [12], el de la agricultura [13] o el del control medioambiental [14].

El elevado coste que tienen los dispositivos convencionales condiciona la adopción de este tipo de soluciones por parte de los diferentes sectores productivos. Como resultado, han aparecido soluciones de bajo coste que permiten abaratar costes y elevar el grado de adaptación de este tipo de sensores a diferentes casos de uso [15].

La mejora tecnológica ofrecida por los sensores de bajo coste permite realizar una instrumentación más escalable y manejable, además de mejorar en aspectos como la adaptación a entornos y aplicaciones específicas reduciendo costes de componentes innecesarios [16].

Las redes LPWAN se caracterizan por alcanzar grandes distancias de comunicación con un bajo consumo de energía y una velocidad de trasferencia de datos baja. Por lo tanto, no es una tecnología pensada para transmitir señales de audio o vídeo, pero sí es ideal para dar conectividad a dispositivos en lugares remotos alimentados por baterías y con transmisiones de bajo volumen de datos [17].

LoRa es una tecnología de radio inalámbrica que permite la comunicación de un punto a otro alcanzando distancias kilométricas (en torno a 10-15 km en entornos rurales).

Las redes LoRaWAN son un tipo de redes LPWAN que utilizan la tecnología de comunicación LoRa. El protocolo de comunicación LoRaWAN especifica los parámetros requeridos en la arquitectura de red para gestionar el acceso y control de dispositivos dentro de la red, empleando para ello la tecnología de comunicación LoRa, que habilita la comunicación de largo alcance [18]. La Fig. 3 muestra la infraestructura de este tipo de redes.

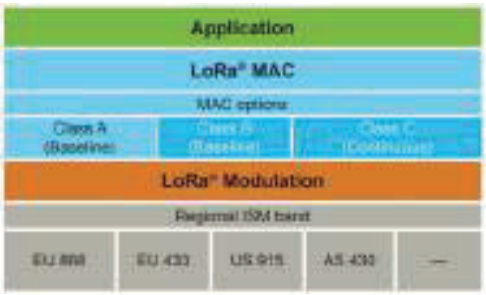


Fig. 3. Infraestructura de LoRaWAN [18].

Si bien es cierto que ya existen soluciones comerciales de dispositivos con conectividad LoRaWAN, estos dispositivos están diseñados para realizar registros con una cadencia

ISBN 978-9942-44-109-6

de tiempo grande para reducir el consumo y preservar la autonomía de las baterías. Por ello, se descartó hacer uso de este tipo de soluciones comerciales y desarrollar una propia que cumpliera con los requisitos que se precisan para monitorizar en tiempo real el funcionamiento de aerogeneradores sin palas. El dispositivo de medición diseñado, aparte de ofrecer la transferencia de datos en tiempo real, garantiza la alimentación al contar con un pequeño panel fotovoltaico como fuente de alimentación alternativa a la batería (finita). Además, cabe destacar que la apuesta por un diseño propio permite integrar los componentes periféricos y los sensores a medida de las necesidades o variables que se pretendan medir, reduciendo así los costes en componentes periféricos y otros requeridos en caso de haber hecho uso de una solución comercial.

2.2 Características del dispositivo

El dispositivo ha de cumplir dos principios básicos de diseño: autonomía energética y conectividad de largo alcance.

Para lograr autonomía energética, este dispositivo se alimenta de una batería que se recarga a través de paneles solares fotovoltaicos. Además, para prolongar la autonomía del dispositivo se redujo su consumo en la medida de lo posible reduciendo la cantidad de datos transmitidos. Esta solución fue adoptada para garantizar que la energía generada por los paneles fotovoltaicos fuera suficiente para recargar la batería, y que la capacidad de la batería fuera suficiente para alimentar el dispositivo ante periodos nocturnos, de días nublados o días lluviosos.

Las medidas realizadas con el dispositivo fueron: producción de energía, aceleraciones y geolocalización del dispositivo. Concretamente, el diseño supone la hibridación de los siguientes componentes:

- Microcontrolador Adafruit Feather M0 con señal RFM95 de LoRa [19].
- Módulo GPS Adafruit Ultimate GPS FeatherWing MTK3339 [20].
- Acelerómetro de 3 ejes ADXL343 [21].
- Batería LiPo 6000mAh / 3.7V [22].
- Cargador de batería solar para baterías LiPo de 3.7V [23].
- Placa solar de 5V y 500mAh [24].

2.3 Configuración de la red de comunicación

Red de largo alcance y bajo consumo - Low Power Wide Area Network (LPWAN)
Las redes LPWAN se caracterizan por alcanzar grandes distancias de comunicación con un bajo consumo de energía y una velocidad de trasferencia de datos baja. Por lo tanto, no es una tecnología pensada para transmitir señales de audio o vídeo, pero sí es ideal para dar conectividad a dispositivos en lugares remotos, alimentados por batería y con transmisiones de bajo volumen de datos. [25]

Este tipo de redes se configuran con una topología en estrella, donde un gateway recibe mensajes de los diferentes dispositivos o nodos. Las tasas de transferencia van de 10 Kbps hasta 100 Kbps, las tramas de datos transmitidas son de decenas de bytes y

ISBN 978-9942-44-109-6

el ciclo de envío está limitado para no saturar las bandas de frecuencia ISM (del inglés Industrial, Scientific and Medical) que usan este tipo de redes. Este rango de frecuencias ISM sin licencia se destinan a uso industrial, científico y médico y tienen una legislación dependiente de cada territorio. El uso de estas bandas de frecuencia y la potencia de transmisión dentro de ellas están reguladas por las legislaciones de radiofrecuencias correspondientes, y varían en función del territorio. [26]

Tecnología LoRa (Long Range).

LoRa es una tecnología de comunicación que utiliza una modulación de amplio espectro. Esto le permite tolerar ruido, múltiples caminos de señal y el efecto Doppler, manteniendo un muy bajo el consumo de energía. Como aspecto negativo, el ancho de banda es muy bajo comparado con otras tecnologías.
Las frecuencias de trabajo de LoRa emplean las bandas de radio ISM, que están por debajo de 1GHz y dependen de la legislación del territorio correspondiente [27], por ejemplo 433 MHz, 868 MHz, o 915 MHz.

The Thing Network - TTN.

Dentro de las redes LoRaWAN los nodos no están asociados con una puerta de enlace determinada, sino que los nodos emiten los datos y son las puertas de enlace las encargadas de transmitir los paquetes recibidos hasta el servidor de red.

La inteligencia y la administración de la red recaen en el servidor de red, que administra y filtra paquetes redundantes, comprueba la seguridad, y realiza ajustes en la transmisión de datos (ADR – del inglés Adaptative Data Rate) entre otros.

Por lo tanto, el servidor de red es uno de los pilares básicos dentro de la configuración de la comunicación del dispositivo de registro de mediciones o *data logger* a desarrollar.

Existen diferentes opciones a la hora de elegir un servidor de red, pudiendo ser de gestión propia o externa, y dentro de las gestiones externas, públicos o privados. La gestión propia del servidor de red supondría aumentar la complejidad del desarrollo del proyecto debido a la configuración del mismo, por lo que se optó por una gestión de terceros. Dentro de esta opción, se escogió el servidor público de redes de las cosas (TTN, del inglés *The Thing Networks*) debido a las ventajas que supone el empleo de su infraestructura de red ya existente de manera gratuita [8]. La Fig. 4 muestra el despliegue actual de la red TTN.

ISBN 978-9942-44-109-6

Fig. 4. Despliegue actual de la red TTN [28].

TTN es una iniciativa para establecer una red mundial de IoT-LPWAN, de código abierto, donde se permite construir e integrar una red de datos de IoT descentralizada, operada y mantenida por los propios usuarios. Las puertas de enlace TTN son de uso público, con lo cual se opta por aprovechar esta infraestructura ya existente y, dado el caso, colaborar en el despliegue de la red aumentando la cobertura de la misma e impulsando el uso de dispositivos IoT en una zona determinada [28].

Dentro de TTN también está la aplicación de red que gestiona los datos desde el nodo hasta la aplicación final del usuario y permite realizar integraciones con servicios. Dichos datos tienen una doble encriptación (AES-128), una de servidor y otra de aplicación, puesto que los datos son privados y sólo el usuario final tiene acceso a ellos [29]. La Fig. 5 se muestra los cifrados de la red a modo de esquema.

ISBN 978-9942-44-109-6

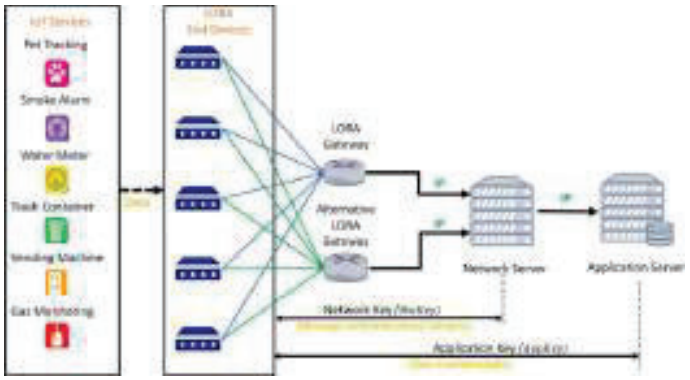


Fig. 5. Seguridad en las redes LoRaWAN [29].

3 Desarrollo y configuraciones

El *data logger*, tiene como objetivo principal analizar el comportamiento de los aerogeneradores que generan energía por la VIV. Por ello, además de monitorizar la energía producida, se analizaron las aceleraciones producidas en las oscilaciones del eje del aerogenerador.
La frecuencia de envío de datos se configuró respetando el uso de la red que establece TTN [30]. Las mediciones del estado del aerogenerador se establecieron cada 10 segundos, registrando el valor medio de producción energética durante este periodo y los valores de aceleración del mástil para analizar su actividad y los tiempos de reacción del aerogenerador. Adicionalmente, se envió la geolocalización del dispositivo, con la intención de evitar posibles robos de los equipos.
Otro pilar del diseño fue la autonomía del dispositivo. Por ello, se optó por una alimentación con baterías con capacidad para recargarse con la energía generada por paneles fotovoltaicos.
La autonomía del dispositivo se evaluó una vez desarrollado y con medidas de consumo reales ya que, en función de las potencias de transmisión (distancia al *gateway*), el consumo y el tiempo de envío varían significativamente.

3.1 Transmisión y registro de datos

Una vez que los datos se han transmitido a través de la red LoRaWAN, el servidor de red gestiona los paquetes de datos hasta las aplicaciones correspondientes, donde los datos son decodificados y recibidos por el usuario. Dentro de la consola de configuración de TTN se pueden configurar integraciones para transmitir los datos recibidos en otras aplicaciones, a modo de base de datos. En el caso que se plantea, se hizo uso de los siguientes softwares *open source*: NodeRed [31] para realizar una conexión a través del protocolo Mqtt [32] y transmitir los datos desde TTN a una base de datos Influxdb

ISBN 978-9942-44-109-6

[33]. Una vez registrados los datos en la base de datos, estos se visualizan a través de la plataforma Grafana [34].

La Fig. 6 muestra el flujo de datos seguido de forma general y la Fig. 7 la configuración del flujo de datos dentro del programa NodeRed.

Fig. 6. Esquema general de transmisión y registro de datos.

Fig. 7. Configuración de flujo en Node Red.

3.2 Pruebas de comunicación

Debido a que el propósito del uso de una red LoRaWAN es alcanzar grandes distancias de comunicación, se realizaron pruebas de cobertura a través de la plataforma TTN Maper [28], integrada dentro de TTN, para geolocalizar las señales recibidas por los diferentes *gateways* de la red y analizar la calidad de los paquetes de datos recibidos. Adicionalmente, dicha plataforma permite dejar registro de estos datos para que se puedan comprobar las zonas que ya cuentan con cobertura de la red TTN y la calidad de la misma. Tras comprobar dichas zonas, se estableció la zona de pruebas en la ciudad de Ávila (España) y más concretamente en la zona del Valle Amblés, por tratarse de un caso de uso de la red TTN favorable, pues su orografía permite la transmisión de datos en línea de visión directa (VLOS, del inglés Visual Line of Sight) prácticamente para toda su extensión (Fig. 8), condición necesaria para alcanzar grandes distancias de comunicación (10-15Km.)

.

ISBN 978-9942-44-109-6

Fig. 8. Perfil orográfico de la zona de pruebas ubicada en el Valle Amblés (Ávila, España) [33].

Además, esta zona contaba con una infraestructura de la red TTN (5 gateways) y bastó con emitir mensajes desde el dispositivo para comprobar la calidad de la señal recibida a través de los diferentes gateways. La Fig. 9 muestra las diferentes señales recibidas en la zona de pruebas.

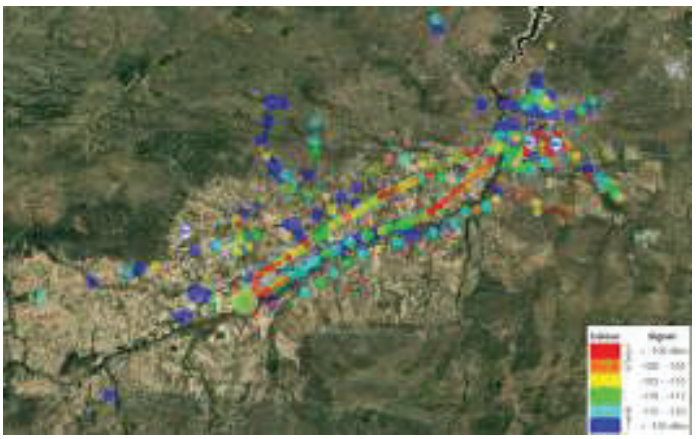


Fig. 9. Cobertura de Red TTN en la ciudad de Ávila y el Valle Amblés [26].

ISBN 978-9942-44-109-6

3.3 Pruebas de autonomía

Con el objetivo de verificar el funcionamiento del dispositivo, la capacidad de recarga, y el consumo del mismo, se realizó una prueba de laboratorio disponiendo un panel solar [24] en posición horizontal en el poyete de una ventana orientada al este. Esta ubicación fue seleccionada de manera aleatoria, para testear la capacidad de generación del panel en cualquier condición posible, fuera de las condiciones más favorables (como sería la orientación sur, para el hemisferio norte) y así obtener resultados de autonomía más ajustados al uso del sistema por un usuario real. El panel fotovoltaico recibió radiación solar desde las 8:30h hasta las 13:00h durante dos días consecutivos en los que las condiciones meteorológicas fueron favorables (sin nubosidad). La Fig. 10 muestra la disposición del dispositivo próximo a la ventana donde se realizaron las pruebas.

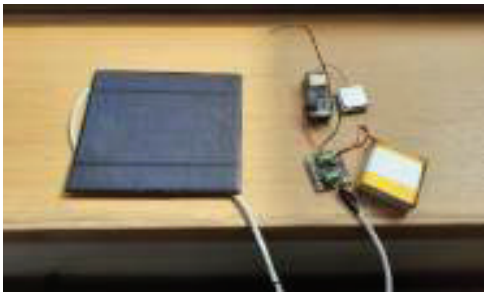


Fig. 10. Pruebas de laboratorio para analizar la autonomía del dispositivo de recogida y envío de datos.

4 Resultados

4.1 Resultados de comunicación

Se comprobó la recepción de datos en la zona de estudio establecida, cubriendo distancias de 17 Km en términos de máxima comprobada, considerándose suficiente. La Fig. 11 muestra el nivel de señal recibido por cada *gateway* durante las pruebas de cobertura.

ISBN 978-9942-44-109-6

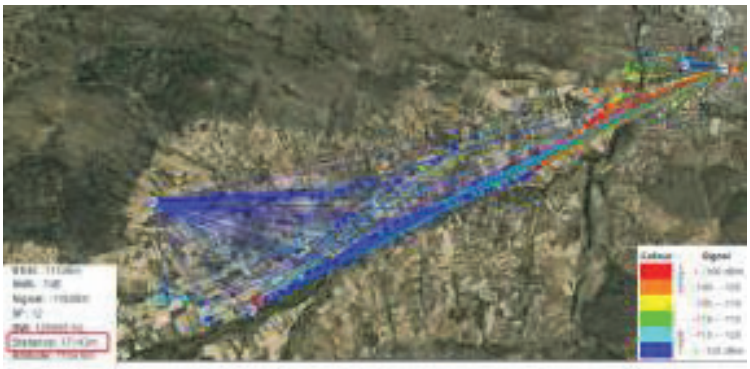


Fig. 11. Pruebas de cobertura del dispositivo desarrollado.

4.2 Resultados de consumo

Los datos de consumo energético y de autonomía se extrajeron de las pruebas efectuadas en el laboratorio durante dos días de funcionamiento continuo.

Como se ha mencionado, el dispositivo se ubicó en ventana con orientación este con incidencia solar directa sobre el panel fotovoltaico de 8:30h a 13:00h. Con esta energía solar disponible, el dispositivo fue capaz de recargar la batería para el resto del día, compensando la energía necesaria durante las horas sin radiación solar.

El gráfico de la Fig.12, creado a través de la aplicación de Grafana [32], muestra los niveles de tensión de la batería registrados en un intervalo de tiempo de dos días. Las pendientes ascendentes muestran la recarga de la batería cuando el sol incide de forma directa sobre el panel fotovoltaico, y las pendientes descendentes, relativas al consumo de la batería, al ser menos pronunciadas permiten compensar la energía generada y consumida y por tanto se consigue el balance energético neto.

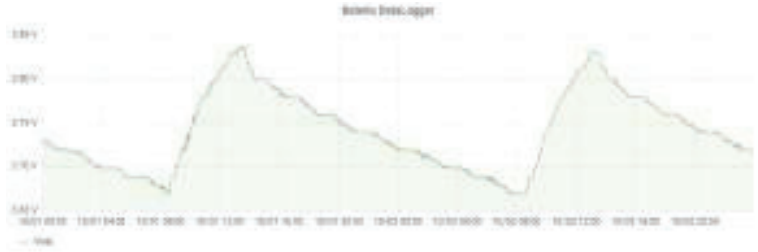


Fig. 12. Datos de recarga de la batería

ISBN 978-9942-44-109-6

5 Conclusiones

Los resultados obtenidos tras las pruebas de cobertura y autonomía permiten pronosticar que las necesidades iniciales de diseño serán cubiertas de manera satisfactoria una vez que el dispositivo sea instalado de forma definitiva en el aerogenerador.

Los resultados de cobertura, cuya distancia de comunicación máxima a sido de 17 Km, demuestra la efectividad de las redes LoRaWAN para realizar comunicaciones a largas distancias. Aunque el alcance de cobertura de las redes depende de la orografía y de la ubicación de los *gateways* (zonas elevadas y con VLOS alcanzan mayores distancias), el uso de la red TTN permite la configuración y la integración de nuevos *gateways* para crear o reforzar la cobertura en una zona geográfica determinada.

Respecto de la autonomía del dispositivo, se ha verificado la capacidad de recarga de la batería con un panel fotovoltaico [24] a lo largo de un diferentes días soleados con inclinación horizontal y orientación este, por lo que la óptima colocación del panel (orientación sur) hará posible el aumento de horas de producción solar con respecto a las disponibles durante las pruebas de laboratorio. Así, la producción diaria de energía será mayor que el consumo, lo que permitirá dotar de mayor autonomía a la batería para compensar los días en los que la radiación solar sea menor (días nublados o con precipitaciones).

Cabe destacar que, aunque las pruebas iniciales han sido satisfactorias, hay capacidad de mejora en el consumo energético del dispositivo. Una de ellas, sería analizando las aceleraciones del aerogenerador y mediante detección de eventos (sacudidas), registrar datos de funcionamiento solo en los intervalos en los que el generador esté en movimiento, reduciendo el consumo de energía durante los periodos de inactividad.

Referencias

1. A. R. Al-Ali *et al*., 'IoT-Based Shared Community Transportation System Using e-Bikes', in *2021 5th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*, Jun. 2021, pp. 61–65. doi: 10.1109/ICSGSC52434.2021.9490509.
2. A. Botta, W. de Donato, V. Persico, and A. Pescapé, 'Integration of Cloud computing and Internet of Things: A survey', *Future Generation Computer Systems*, vol. 56, pp. 684–700, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.future.2015.09.021.
3. H. Arasteh *et al*., 'Iot-based smart cities: A survey', in *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Jun. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555867.
4. O. Ordoñez and A. R. Duke, 'Wind Resource Assessment: Analysis of the Vortex Bladeless Characteristics in Puerto Cortés, Honduras', *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*., vol. 801, no. 1, p. 012019, Jun. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/801/1/012019.
5. 'Vortex Bladeless - Energía eólica sin palas', *Vortex Bladeless Wind Power*. https://vortexbladeless.com/es/ (accessed Oct. 07, 2022).
6. 'Vortex Technical Paper - Bladeless Wind Turbines explained', *Vortex Bladeless Wind Power*, Jun. 07, 2018. https://vortexbladeless.com/download-green-paper/ (accessed Jun. 27, 2022).

ISBN 978-9942-44-109-6

7. 'Aerogeneradores sin palas, eólica 2.0. con Vortex Bladeless - Patentes y Marcas', Dec. 15, 2021. https://www.madrimasd.org/blogs/patentesymarcas/2021/aerogeneradores-sin-palas-eolica-2-0-con-vortex-bladeless/ (accessed Oct. 07, 2022).
8. T. T. Network, 'The Things Network', *The Things Network*. https://www.thethingsnetwork.org/ (accessed Sep. 27, 2022).
9. K. Tange, M. De Donno, X. Fafoutis, and N. Dragoni, 'Towards a systematic survey of industrial IoT security requirements: research method and quantitative analysis', in *Proceedings of the Workshop on Fog Computing and the IoT*, New York, NY, USA, Apr. 2019, pp. 56–63. doi: 10.1145/3313150.3313228.
10. B. Molina, C. E. Palau, G. Fortino, A. Guerrieri, and C. Savaglio, 'Empowering smart cities through interoperable Sensor Network Enablers', in *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Oct. 2014, pp. 7–12. doi: 10.1109/SMC.2014.6973876.
11. A. Hilmani, A. Maizate, and L. Hassouni, 'Automated Real-Time Intelligent Traffic Control System for Smart Cities Using Wireless Sensor Networks', *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, pp. 1–28, Sep. 2020, doi: 10.1155/2020/8841893.
12. M. Ilyas, 'Wireless Sensor Networks for Smart Healthcare', in *2018 1st International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, Apr. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/CAIS.2018.8442038.
13. Hu, X., Sun, L., Zhou, Y., & Ruan, J. (2020). Review of operational management in intelligent agriculture based on the Internet of Things. Frontiers of Engineering Management, 7(3), 309-322.
14. F. Mao, K. Khamis, S. Krause, J. Clark, and D. M. Hannah, 'Low-Cost Environmental Sensor Networks: Recent Advances and Future Directions', *Frontiers in Earth Science*, vol. 7, 2019, Accessed: Oct. 07, 2022. [Online]. Available: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00221
15. F. Tauro *et al*., 'Measurements and Observations in the XXI century (MOXXI): innovation and multi-disciplinarity to sense the hydrological cycle', *Hydrological Sciences Journal*, vol. 63, no. 2, pp. 169–196, Jan. 2018, doi: 10.1080/02626667.2017.1420191.
16. Chan, K., Schillereff, D. N., Baas, A. C., Chadwick, M. A., Main, B., Mulligan, M., ... & Thompson, J. (2021). Low-cost electronic sensors for environmental research: Pitfalls and opportunities. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 45(3), 305-338.
17. U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, 'Low Power Wide Area Networks: An Overview', *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
18. 'Technical Overview of LoRa and LoRaWAN', p. 20, 2015.
19. A. Industries, 'Adafruit Feather M0 with RFM95 LoRa Radio - 900MHz'. https://www.adafruit.com/product/3178 (accessed Sep. 28, 2022).
20. 'Adafruit Ultimate GPS featherwing', *Adafruit Learning System*. https://learn.adafruit.com/adafruit-ultimate-gps-featherwing/overview (accessed Oct. 07, 2022).
21. 'adxl335.pdf'. Accessed: Oct. 07, 2022. [Online]. Available: https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adxl335.pdf
22. 'Datasheet-105050-2P-lipo-battery.pdf'. Accessed: Oct. 07, 2022. [Online]. Available: https://tienda.bricogeek.com/download/BAT-0012/Datasheet-105050-2P-lipo-battery.pdf
23. 'Solar_Charger_SKU_DFR0264-DFRobot'. https://wiki.dfrobot.com/Solar_Charger_SKU_DFR0264 (accessed Oct. 07, 2022).
24. 'Solar Panel 2.5W 5V/500mAh Mini DIY Solar Panel Charger Kit (Solar Cell Only)', *ALLPOWERS*. https://iallpowers.com/products/diy-solar-panel-charger-kit (accessed Oct. 07, 2022).

ISBN 978-9942-44-109-6

25. U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, 'Low Power Wide Area Networks: An Overview', *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
26. J. Sanchez-Gomez, J. Gallego-Madrid, R. Sanchez-Iborra, J. Santa, and A. Skarmeta, 'Impact of SCHC Compression and Fragmentation in LPWAN: A Case Study with LoRaWAN', *Sensors*, vol. 20, p. 280, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20010280.
27. Yegin, A., Kramp, T., Dufour, P., Gupta, R., Soss, R., Hersent, O., ... & Sornin, N. (2020). LoRaWAN protocol: specifications, security, and capabilities. In LPWAN Technologies for iot and m2m applications (pp. 37-63). Academic Press.
28. 'TTN Coverage'. https://ttnmapper.org/heatmap/ (accessed Sep. 27, 2022).
29. H. Noura, T. Hatoum, O. Salman, J.-P. Yaacoub, and A. Chehab, 'LoRaWAN security survey: Issues, threats and possible mitigation techniques', *Internet of Things*, vol. 12, p. 100303, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.iot.2020.100303.
30. 'Duty Cycle', *The Things Network*. https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/ (accessed Oct. 04, 2022).
31. 'Node-RED'. https://nodered.org/ (accessed Oct. 04, 2022).
32. 'MQTT Version 3.1.1'. http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/errata01/os/mqtt-v3.1.1-errata01-os-complete.html (accessed Oct. 04, 2022).
33. 'InfluxDB: Open Source Time Series Database', *InfluxData*. https://www.influxdata.com/ (accessed Oct. 04, 2022).
34. 'Grafana: The open observability platform | Grafana Labs'. https://grafana.com/ (accessed Oct. 04, 2022).
35. 'Google Earth'. https://earth.google.com (accessed Nov. 03, 2022).

ISBN 978-9942-44-109-6

CAPÍTULO VI:

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6 CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

Tratando de dar respuesta a la pregunta de investigación planteada al inicio de la tesis (¿Cómo se pueden optimizar e integrar eficazmente las instalaciones de autoconsumo en viviendas en la Península Ibérica y Europa, considerando las barreras regulatorias, económicas y tecnológicas, para maximizar la eficiencia energética y contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero?), la presente tesis doctoral ha abordado de manera exhaustiva un análisis para la optimización e integración de sistemas de autoconsumo híbrido, combinando energía solar y eólica, en viviendas de la Península Ibérica y Europa.

Partiendo de la idea de **optimizar los sistemas de autoconsumo con el objetivo de maximizar su viabilidad económica y técnica**, se ha profundizado en el análisis de dos tecnologías de autoconsumo, la energía solar y la eólica para generación de energía eléctrica, y de esta forma impulsar el autoconsumo entre los usuarios de la red eléctrica. Estos sistemas aprovechan las características complementarias de ambas fuentes de energía, mejorando la estabilidad y la eficiencia del suministro energético.

Por lo tanto, se ha desarrollado una línea de investigación que aborda el **estudio de la tecnología fotovoltaica y eólica**, integrando el análisis del potencial y la optimización de instalaciones fotovoltaicas, la innovación en la tecnología de turbinas eólicas sin palas, y el desarrollo de alternadores más eficientes para mejorar la captura y utilización de energía renovable en la Península Ibérica y con ello el **impulso de sistemas de autoconsumo**, especialmente en viviendas.

Por una parte, uno de los objetivos principales de este trabajo ha sido investigar la **optimización de los sistemas fotovoltaicos** en base a su ubicación geográfica. Partiendo de la base de que uno de los parámetros más importantes que afectan al rendimiento de estas instalaciones es el **ángulo de inclinación**. Gracias a los resultados arrojados por las investigaciones realizadas se ha estandarizado el ángulo de inclinación óptimo para toda la Península Ibérica, aportando unos rangos de inclinación máximos y mínimos, para los cuales no se superan las pérdidas de producción máximas admisibles que establece la normativa.

Por otra parte, otro de los objetivos principales de este trabajo ha sido investigar la evolución de los **aerogeneradores** para desarrollar mejoras que aumenten su eficiencia y adaptabilidad en entornos urbanos, favoreciendo su integración en sistemas de autoconsumo residenciales. Planteando que, mediante la **optimización aerodinámica y estructural**, es posible mejorar el rendimiento y reducir el impacto ambiental de estas tecnologías.

Gracias a la colaboración con Vortex Bladeless, se ha podido acceder a diferentes modelos y prototipos para realizar estudios exhaustivos. El primero de ellos se ha centrado en la morfología y la rugosidad de las superficies de las **turbinas eólicas sin palas**, y cómo influyen en su rendimiento. Siendo este tipo de análisis crucial para desarrollar tecnologías capaces de operar eficientemente en condiciones de flujo de viento típicas de áreas urbanas. En paralelo, también se ha realizado el estudio del potencial de nuevos materiales para una posible mejora de alternadores. En particular, se han evaluado las posibilidades de **nuevos materiales empleados en fabricación aditiva** con partículas metálicas, para su uso en núcleos de

aerogeneradores, ya que este tipo de materiales pueden mejorar la eficiencia y durabilidad de este tipo de aerogeneradores sin palas. La evaluación de las características magnéticas y mecánicas de estos materiales promete resultados esperanzadores.

Como resultado de los diferentes estudios y trabajos de investigación realizados durante la presente tesis doctoral se han establecido las siguientes conclusiones:

- **Ángulo Óptimo de Inclinación para Paneles Fotovoltaicos**: Uno de los hallazgos más significativos se refiere a la optimización del ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos. Se ha determinado que, para maximizar la producción anual de energía en la Península Ibérica, el ángulo óptimo de inclinación es de 34°. Este ángulo, cuando se aplica a instalaciones fijas con orientación sur, resulta en pérdidas de producción anual inferiores al 0.1%, muy por debajo del umbral del 10% permitido por las regulaciones nacionales españolas para edificios (CTE). Esta optimización no solo maximiza la eficiencia energética, sino que también ofrece una considerable flexibilidad en la instalación de paneles solares, permitiendo un rango de ángulos de inclinación entre 10° y 60° sin exceder los límites regulatorios.

- **Optimización Estacional de la Inclinación:** Además, la investigación ha demostrado que, para maximizar la producción estacional de energía, los ángulos de inclinación deben ajustarse a 20° en verano y 55° en invierno. Esta variación estacional permite optimizar la captación de energía solar durante diferentes épocas del año, lo cual es particularmente beneficioso para aplicaciones específicas como segundas residencias de verano. La capacidad de ajustar los ángulos de inclinación a lo largo del año, mediante la implementación de soportes ajustables, puede incrementar la producción de energía entre un 2.8% y un 4.8%, mejorando aún más la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.

- **Investigación de Aerogeneradores Sin Palas (BWT):** Respecto de los resultados de los estudios en el campo de los aerogeneradores, se ha investigado la viabilidad y optimización de turbinas eólicas sin palas (BWT) para su integración en sistemas de autoconsumo híbrido. Las turbinas BWT, debido a su diseño innovador, presentan varias ventajas sobre las turbinas convencionales, especialmente en entornos urbanos. Se ha encontrado que la morfología y rugosidad superficial de estas turbinas son factores cruciales que afectan significativamente la eficiencia en la captura de energía. Un ángulo de divergencia de 3.2° en la geometría de la turbina, por ejemplo, puede aumentar el rendimiento en aproximadamente un 12%. Además, la capacidad de predecir con alta precisión el rango Lock-In mediante la ecuación Re (máx. Lock-In) = 0.30 α + 4.06, que posee una capacidad predictiva con un R^2 de 0.99, permite diseñar turbinas más eficientes. Este avance es fundamental para maximizar el potencial de generación de energía de las turbinas eólicas sin palas, especialmente en áreas urbanas donde la reducción de ruido y vibraciones es crucial.

- **Selección de Nuevos Materiales para Alternadores en Turbinas Eólicas**: En cuanto a la selección de materiales para alternadores en turbinas eólicas, la investigación ha demostrado que los núcleos fabricados con materiales SMC (Soft Magnetic Composites) ofrecen un equilibrio prometedor entre amortiguación, pérdidas por histéresis magnética y generación de energía. Aunque los alternadores con núcleo de hierro producen mayores voltajes, los núcleos de SMC presentan una alternativa prometedora. La utilización de materiales avanzados como los SMC, combinados con

tecnologías de manufactura aditiva (AM), permite desarrollar formas de núcleos de alternador complejas. Todo ello contribuye a la posibilidad de alcanzar una mejora general de los sistemas de generación de energía eólica.

6.2 Trabajos Futuros

Partiendo de los hallazgos y conclusiones obtenidos en la presente tesis doctoral, se identifican varias líneas de investigación futuras que pueden contribuir significativamente al avance y optimización de los sistemas de autoconsumo híbrido en viviendas, abarcando un enfoque más amplio e integrador de las tecnologías renovables y su gestión.

- **Optimización de Energía Solar**: Continuando con los estudios realizados de energía solar, los trabajos futuros pueden abordar la realización de un análisis del ángulo de azimut o estudios estacionales más precisos considerando cuatro ángulos de inclinación diferentes (Invierno, Primavera, Verano, Otoño).

- **Avances en Energía Eólica**: En este aspecto, las investigaciones futuras pueden ampliarse para examinar factores adicionales que influyen en las turbinas eólicas sin palas basadas en las vibraciones inducidas por vórtices (VIV). De esta forma, investigar variaciones en la geometría de la turbina, como perfiles de diámetro hiperbólicos o modificaciones en el diseño del borde de ataque, presentan una vía prometedora. Además, evaluar influencias externas, incluyendo la disposición espacial y orientaciones de conjuntos de varios aerogeneradores,

- **Investigación en Nuevos Materiales de Fabricación**: En este ámbito, se augura un futuro prometedor del potencial de los SMC y otros materiales avanzados en la fabricación de alternadores y componentes de aerogeneradores. La manufactura aditiva con partículas metálicas sigue siendo un campo por explorar, y futuras investigaciones deben centrarse en mejorar las propiedades magnéticas y mecánicas de estos materiales, mediante tratamientos térmicos, para aumentar la eficiencia y durabilidad de los sistemas de generación de energía eólica.

- **Incorporación de Inteligencia Artificial**: Una dirección prometedora es la incorporación de inteligencia artificial (IA) en la gestión de recursos renovables. Por una parte, la IA puede desempeñar un papel crucial en la optimización dinámica de los sistemas fotovoltaicos y eólicos, permitiendo ajustes en tiempo real, gracias a que los algoritmos de IA pueden analizar grandes volúmenes de datos de producción y consumo energético, facilitando la predicción y respuesta proactiva a las condiciones meteorológicas y cambios en la demanda. Y, por otra parte, el control de consumos energéticos basados en IA, que permitan a los usuarios gestionar eficientemente su consumo energético doméstico. Estos sistemas pueden utilizar datos históricos y en tiempo real para optimizar el uso de la energía renovable disponible, minimizando la dependencia de la red eléctrica y reduciendo los costos energéticos. Asimismo, las estrategias de consumo a corto plazo, basadas en la evolución de los precios de la energía, pueden ser implementadas mediante algoritmos avanzados de IA, permitiendo a los usuarios adaptar su consumo según las fluctuaciones del mercado energético.

- **Almacenamiento de Energía:** Asimismo, es esencial promover la integración de sistemas de almacenamiento de energía avanzados, como baterías de alta capacidad

y sistemas de almacenamiento térmico, para complementar los sistemas de autoconsumo híbrido. La investigación debe centrarse en la optimización de la capacidad de almacenamiento y la eficiencia de estos sistemas, asegurando un suministro energético constante y fiable incluso en condiciones de baja producción renovable.

- **Desarrollo de Redes Inteligentes**: Otro aspecto importante es el desarrollo y expansión de redes inteligentes (smart grids). Estas redes permiten una gestión más eficiente y flexible de la energía, integrando de manera óptima las fuentes de energía renovable y mejorando la estabilidad del sistema eléctrico. La investigación futura debe enfocarse en la implementación y mejora de tecnologías de smart grids, que faciliten la comunicación bidireccional entre productores y consumidores, y optimicen el flujo de energía a través de la red.

- **Movilidad Eléctrica**: Este aspecto, también representa una línea de investigación crucial. El avance en la infraestructura de carga para vehículos eléctricos y la integración de estos sistemas con fuentes de energía renovable pueden reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Investigaciones futuras deben centrarse en desarrollar estaciones de carga inteligentes que optimicen el uso de energía renovable y mejoren la eficiencia de carga de los vehículos eléctricos.

- **Hidrógeno Verde**: Por último, este aspecto se presenta como otra área prometedora para la investigación. Este tipo de hidrógeno, producido mediante electrólisis del agua utilizando energía renovable, puede ser una solución efectiva para almacenar energía a gran escala y descarbonizar sectores difíciles de electrificar. Las investigaciones futuras deben enfocarse en mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción de hidrógeno verde, así como en desarrollar tecnologías para su almacenamiento y transporte seguro.

REFERENCIAS

7 REFERENCIAS

[1] O. Candra, A. Chammam, J. R. N. Alvarez, I. Muda, and H. Ş. Aybar, 'The Impact of Renewable Energy Sources on the Sustainable Development of the Economy and Greenhouse Gas Emissions', *Sustainability*, vol. 15, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15032104.

[2] L. J. R. Nunes, 'The Rising Threat of Atmospheric CO2: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies', *Environments*, vol. 10, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2023, doi: 10.3390/environments10040066.

[3] M. Leon, G. Cornejo, M. Calderón, E. González-Carrión, and H. Florez, 'Effect of Deforestation on Climate Change: A Co-Integration and Causality Approach with Time Series', *Sustainability*, vol. 14, no. 18, Art. no. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/su141811303.

[4] A. De Vita *et al.*, 'The Impact of Climate Change and Extreme Weather Conditions on Cardiovascular Health and Acute Cardiovascular Diseases', *Journal of Clinical Medicine*, vol. 13, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2024, doi: 10.3390/jcm13030759.

[5] V. Masson-Delmotte *et al.*, Eds., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. doi: 10.1017/9781009157896.

[6] 'Vital Signs Dashboard – Climate Change: Vital Signs of the Planet'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://climate.nasa.gov/module/5/

[7] 'Monthly Report | National Centers for Environmental Information (NCEI)'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/

[8] 'Energy Technology Perspectives 2020 – Analysis', IEA. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020

[9] R. Avtar, S. Tripathi, A. K. Aggarwal, and P. Kumar, 'Population–Urbanization–Energy Nexus: A Review', *Resources*, vol. 8, no. 3, Art. no. 3, Jul. 2019, doi: 10.3390/resources8030136.

[10] 'Renewable energy technologies'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Technologies

[11] F. Li *et al.*, 'A Comprehensive Review on Energy Storage System Optimal Planning and Benefit Evaluation Methods in Smart Grids', *Sustainability*, vol. 15, no. 12, Art. no. 12, Jun. 2023, doi: 10.3390/su15129584.

[12] I. Alotaibi, M. A. Abido, M. Khalid, and A. V. Savkin, 'A Comprehensive Review of Recent Advances in Smart Grids: A Sustainable Future with Renewable Energy Resources', *Energies*, vol. 13, no. 23, Art. no. 23, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13236269.

[13] 'The Paris Agreement | UNFCCC'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement

[14] F. D. Santos, P. L. Ferreira, and J. S. T. Pedersen, 'The Climate Change Challenge: A Review of the Barriers and Solutions to Deliver a Paris Solution', *Climate*, vol. 10, no. 5, Art. no. 5, May 2022, doi: 10.3390/cli10050075.

[15] O. US EPA, 'Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2022'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2022

[16] A. Pathak, L. E. Hilberg, L. J. Hansen, and B. A. Stein, 'Key Considerations for the Use of Nature-Based Solutions in Climate Services and Adaptation', *Sustainability*, vol. 14, no. 24, Art. no. 24, Dec. 2022, doi: 10.3390/su142416817.

[17] A. Lichtenberger, J. P. Braga, and W. Semmler, 'Green Bonds for the Transition to a Low-Carbon Economy', *Econometrics*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2022, doi: 10.3390/econometrics10010011.

[18] ‘Executive summary – Electricity 2024 – Analysis’, IEA. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/electricity-2024/executive-summary
[19] W. Strielkowski, L. Civín, E. Tarkhanova, M. Tvaronavičienė, and Y. Petrenko, ‘Renewable Energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: A Review’, *Energies*, vol. 14, no. 24, Art. no. 24, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14248240.
[20] A. Ehsan and R. Preece, ‘Probabilistic assessment of overloaded lines in integrated gas and electricity networks with heat electrification’, *Electric Power Systems Research*, vol. 229, p. 110194, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110194.
[21] M. A. Raza *et al.*, ‘Energy demand and production forecasting in Pakistan’, *Energy Strategy Reviews*, vol. 39, p. 100788, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.esr.2021.100788.
[22] J. Zhao, K. Dong, X. Dong, and M. Shahbaz, ‘How renewable energy alleviate energy poverty? A global analysis’, *Renewable Energy*, vol. 186, pp. 299–311, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.01.005.
[23] K. Batool, Z.-Y. Zhao, M. Irfan, and J. Żywiołek, ‘Assessing the role of sustainable strategies in alleviating energy poverty: an environmental sustainability paradigm’, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 25, Art. no. 25, Apr. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-27076-0.
[24] M. Salimi and M. Amidpour, ‘The Impact of Energy Transition on the Geopolitical Importance of Oil-Exporting Countries’, *World*, vol. 3, no. 3, Art. no. 3, Aug. 2022, doi: 10.3390/world3030033.
[25] G. E. Halkos and E.-C. Gkampoura, ‘Coping with Energy Poverty: Measurements, Drivers, Impacts, and Solutions’, *Energies*, vol. 14, no. 10, Art. no. 10, May 2021, doi: 10.3390/en14102807.
[26] V. Kandpal, A. Jaswal, E. D. R. Santibanez Gonzalez, and N. Agarwal, ‘Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies’, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-52943-6_3.
[27] W. Liu, Y. Shen, and A. Razzaq, ‘How renewable energy investment, environmental regulations, and financial development derive renewable energy transition: Evidence from G7 countries’, *Renewable Energy*, vol. 206, pp. 1188–1197, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.02.017.
[28] K. Daszkiewicz, ‘Policy and Regulation of Energy Transition’, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-39066-2_9.
[29] L. De La Peña, R. Guo, X. Cao, X. Ni, and W. Zhang, ‘Accelerating the energy transition to achieve carbon neutrality’, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 177, p. 105957, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105957.
[30] H. Wehbi, ‘Powering the Future: An Integrated Framework for Clean Renewable Energy Transition’, *Sustainability*, vol. 16, no. 13, Art. no. 13, Jun. 2024, doi: 10.3390/su16135594.
[31] A. Elkhatat and S. Al-Muhtaseb, ‘Climate Change and Energy Security: A Comparative Analysis of the Role of Energy Policies in Advancing Environmental Sustainability’, *Energies*, vol. 17, no. 13, Art. no. 13, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17133179.
[32] T. S. Genc and S. Kosempel, ‘Energy Transition and the Economy: A Review Article’, *Energies*, vol. 16, no. 7, Art. no. 7, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16072965.
[33] P. M. Falcone, ‘Sustainable Energy Policies in Developing Countries: A Review of Challenges and Opportunities’, *Energies*, vol. 16, no. 18, Art. no. 18, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16186682.
[34] J. L. Holechek, H. M. E. Geli, M. N. Sawalhah, and R. Valdez, ‘A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?’, *Sustainability*, vol. 14, no. 8, Art. no. 8, Apr. 2022, doi: 10.3390/su14084792.
[35] M. F. Rabbi, J. Popp, D. Máté, and S. Kovács, ‘Energy Security and Energy Transition to Achieve Carbon Neutrality’, *Energies*, vol. 15, no. 21, Art. no. 21, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15218126.
[36] ‘Energies | Free Full-Text | Optimal Design on Fossil-to-Renewable Energy Transition of Regional Integrated Energy Systems under CO2 Emission Abatement Control: A Case Study

in Dalian, China'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/10/2879
[37] A. Dębicka, K. Olejniczak, B. Radomski, D. Kurz, and D. Poddubiecki, 'Renewable Energy Investments in Poland: Goals, Socio-Economic Benefits, and Development Directions', *Energies*, vol. 17, no. 10, Art. no. 10, May 2024, doi: 10.3390/en17102374.
[38] K. Maharjan, J. Zhang, H. Cho, and Y. Chen, 'Distributed Energy Systems: Multi-Objective Design Optimization Based on Life Cycle Environmental and Economic Impacts', *Energies*, vol. 16, no. 21, Art. no. 21, Oct. 2023, doi: 10.3390/en16217312.
[39] K. Gholami, B. Behi, A. Arefi, and P. Jennings, 'Grid-Forming Virtual Power Plants: Concepts, Technologies and Advantages', *Energies*, vol. 15, no. 23, Art. no. 23, Nov. 2022, doi: 10.3390/en15239049.
[40] Y. Pei, X. Han, P. Ye, Y. Zhang, M. Li, and H. Mao, 'Distributionally Robust Unit Commitment with N-k Security Criterion and Operational Flexibility of CSP', *Energies*, vol. 15, no. 23, Art. no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/en15239202.
[41] A. Katre and A. Tozzi, 'Assessing the Sustainability of Decentralized Renewable Energy Systems: A Comprehensive Framework with Analytical Methods', *Sustainability*, vol. 10, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/su10041058.
[42] 'Electronics | Free Full-Text | Decentralized Energy Management System in Microgrid Considering Uncertainty and Demand Response'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2079-9292/12/1/237
[43] J. Schnidrig, A. Chuat, C. Terrier, F. Maréchal, and M. Margni, 'Power to the People: On the Role of Districts in Decentralized Energy Systems', *Energies*, vol. 17, no. 7, Art. no. 7, Apr. 2024, doi: 10.3390/en17071718.
[44] M. Biegańska, 'IoT-Based Decentralized Energy Systems', *Energies*, vol. 15, no. 21, Art. no. 21, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15217830.
[45] D. Kazacos Winter, R. Khatri, and M. Schmidt, 'Decentralized Prosumer-Centric P2P Electricity Market Coordination with Grid Security', *Energies*, vol. 14, no. 15, Art. no. 15, Aug. 2021, doi: 10.3390/en14154665.
[46] A. Boumaiza, 'Carbon and Energy Trading Integration within a Blockchain-Powered Peer-to-Peer Framework', *Energies*, vol. 17, no. 11, Art. no. 11, May 2024, doi: 10.3390/en17112473.
[47] T. Kataray *et al.*, 'Integration of smart grid with renewable energy sources: Opportunities and challenges – A comprehensive review', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 58, p. 103363, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103363.
[48] P. Boopathy *et al.*, 'Deep learning for intelligent demand response and smart grids: A comprehensive survey', *Computer Science Review*, vol. 51, p. 100617, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.cosrev.2024.100617.
[49] S. Li, S. Patnaik, and J. Li, 'IoT-Based Technologies for Wind Energy Microgrids Management and Control', *Electronics*, vol. 12, no. 7, Art. no. 7, Mar. 2023, doi: 10.3390/electronics12071540.
[50] N. Hossein Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, and B. Zakeri, 'Internet of Things (IoT) and the Energy Sector', *Energies*, vol. 13, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13020494.
[51] I. N. Mihigo, M. Zennaro, A. Uwitonze, J. Rwigema, and M. Rovai, 'On-Device IoT-Based Predictive Maintenance Analytics Model: Comparing TinyLSTM and TinyModel from Edge Impulse', *Sensors*, vol. 22, no. 14, Art. no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/s22145174.
[52] O. A. Omitaomu and H. Niu, 'Artificial Intelligence Techniques in Smart Grid: A Survey', *Smart Cities*, vol. 4, no. 2, Art. no. 2, Apr. 2021, doi: 10.3390/smartcities4020029.
[53] P. Lahon, A. B. Kandali, U. Barman, R. J. Konwar, D. Saha, and M. J. Saikia, 'Deep Neural Network-Based Smart Grid Stability Analysis: Enhancing Grid Resilience and Performance', *Energies*, vol. 17, no. 11, Art. no. 11, May 2024, doi: 10.3390/en17112642.

[54] A. Ismail and M. Baysal, 'Dynamic Pricing Based on Demand Response Using Actor–Critic Agent Reinforcement Learning', *Energies*, vol. 16, no. 14, Art. no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/en16145469.
[55] J. A. Romero-Ramos, J. D. Gil, J. M. Cardemil, R. A. Escobar, I. Arias, and M. Pérez-García, 'A GIS-AHP approach for determining the potential of solar energy to meet the thermal demand in southeastern Spain productive enclaves', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 176, p. 113205, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113205.
[56] E. Hurtado-Pérez, P. Bastida-Molina, I. Aparisi-Cerdá, D. Alfonso-Solar, and A. R. Fernández, 'Multicriteria solar photovoltaic potential evaluation for high educational buildings. Case study of Polytechnic University of Valencia, Spain', *Renewable Energy*, vol. 227, p. 120560, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120560.
[57] 'International comparison (Wind) | System reports'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://www.sistemaelectrico-ree.es/en/renewable-energies-report/wind/international-comparison-wind
[58] N. Fueyo, Y. Sanz, M. Rodrigues, C. Montañés, and C. Dopazo, 'High resolution modelling of the on-shore technical wind energy potential in Spain', *Wind Energy*, vol. 13, no. 8, pp. 717–726, 2010, doi: 10.1002/we.392.
[59] E. García-Bustamante *et al.*, 'Relationship between wind power production and North Atlantic atmospheric circulation over the northeastern Iberian Peninsula', *Climate Dynamics*, vol. 40, no. 3, Art. no. 3, Jul. 2012, doi: 10.1007/s00382-012-1451-8.
[60] M. de Simón-Martín, Á. de la Puente-Gil, D. Borge-Diez, T. Ciria-Garcés, and A. González-Martínez, 'Wind energy planning for a sustainable transition to a decarbonized generation scenario based on the opportunity cost of the wind energy: Spanish Iberian Peninsula as case study', *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 1144–1163, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.282.
[61] Á. Rodríguez-Martinez and C. Rodríguez-Monroy, 'Economic Analysis and Modelling of Rooftop Photovoltaic Systems in Spain for Industrial Self-Consumption', *Energies*, vol. 14, no. 21, Art. no. 21, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14217307.
[62] F. M. Camilo and P. Santos, 'Technical-Economic Evaluation of Residential Wind and Photovoltaic Systems with Self-Consumption and Storage Systems in Portugal', *Energies*, vol. 16, no. 4, Art. no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16041805.
[63] X. Costoya, M. deCastro, D. Carvalho, B. Arguilé-Pérez, and M. Gómez-Gesteira, 'CO Meeting Organizer EGU22'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-10283.html
[64] 'Decreto-Lei n.º 153/2014 | DR'. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/153-2014-58406974
[65] Ministerio para la Transición Ecológica, *Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica*, vol. BOE-A-2019-5089. 2019, pp. 35674–35719. Accessed: Jul. 28, 2021. [Online]. Available: https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/04/05/244
[66] C.-N. Wang, N.-A.-T. Nguyen, T.-T. Dang, and J. Bayer, 'A Two-Stage Multiple Criteria Decision Making for Site Selection of Solar Photovoltaic (PV) Power Plant: A Case Study in Taiwan', *IEEE Access*, vol. 9, pp. 75509–75525, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3081995.
[67] M. Ansarin, Y. Ghiassi-Farrokhfal, W. Ketter, and J. Collins, 'A review of equity in electricity tariffs in the renewable energy era', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112333, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112333.
[68] M. Bhattacharya, S. R. Paramati, I. Ozturk, and S. Bhattacharya, 'The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries', *Applied Energy*, vol. 162, pp. 733–741, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.104.
[69] L. De Boeck, S. Van Asch, P. De Bruecker, and A. Audenaert, 'Comparison of support policies for residential photovoltaic systems in the major EU markets through investment

profitability', *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 42–53, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.09.063.
[70] T. Lang, D. Ammann, and B. Girod, 'Profitability in absence of subsidies: A techno-economic analysis of rooftop photovoltaic self-consumption in residential and commercial buildings', *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 77–87, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.09.059.
[71] R. Hosseinalizadeh, E. sadat Rafiei, A. S. Alavijeh, and S. F. Ghaderi, 'Economic analysis of small wind turbines in residential energy sector in Iran', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 20, pp. 58–71, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.seta.2017.02.018.
[72] F. A. Khan, N. Pal, Syed. H. Saeed, and A. Yadav, 'Techno-economic and feasibility assessment of standalone solar Photovoltaic/Wind hybrid energy system for various storage techniques and different rural locations in India', *Energy Conversion and Management*, vol. 270, p. 116217, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116217.
[73] P. V. Minh, S. Le Quang, and M.-H. Pham, 'Technical Economic Analysis of Photovoltaic-Powered Electric Vehicle Charging Stations under Different Solar Irradiation Conditions in Vietnam', *Sustainability*, vol. 13, no. 6, Art. no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/su13063528.
[74] P. Vilaça Gomes *et al.*, 'Technical-economic analysis for the integration of PV systems in Brazil considering policy and regulatory issues', *Energy Policy*, vol. 115, pp. 199–206, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.01.014.
[75] R. Aziz, N. Chakraborty, A. Gupta, and S. Ghosh, 'Comparison between net metering and battery storage in reference to rooftop solar', in *2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources(52042)*, Feb. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/IEMRE52042.2021.9386527.
[76] X. Jia, H. Du, H. Zou, and G. He, 'Assessing the effectiveness of China's net-metering subsidies for household distributed photovoltaic systems', *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, p. 121161, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121161.
[77] P. Kumar, N. Malik, and A. Garg, 'Comparative analysis of solar - battery storage sizing in net metering and zero export systems', *Energy for Sustainable Development*, vol. 69, pp. 41–50, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.05.008.
[78] Y. Karneyeva and R. Wüstenhagen, 'Solar feed-in tariffs in a post-grid parity world: The role of risk, investor diversity and business models', *Energy Policy*, vol. 106, pp. 445–456, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.04.005.
[79] J. Wu and B. Zhang, 'Is local grid parity affordable in China? Discussion on the regional wind power potential and investment returns under policy uncertainty', *Energy Policy*, vol. 170, p. 113254, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113254.
[80] P. Benalcázar, J. Lara, and M. Samper, 'Distributed Photovoltaic Generation in Ecuador: Economic Analysis and Incentives Mechanisms', *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 03, pp. 564–572, Mar. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082728.
[81] E. Loth, C. Qin, J. G. Simpson, and K. Dykes, 'Why we must move beyond LCOE for renewable energy design', *Advances in Applied Energy*, vol. 8, p. 100112, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.adapen.2022.100112.
[82] M. Said, M. EL-Shimy, and M. A. Abdelraheem, 'Photovoltaics energy: Improved modeling and analysis of the levelized cost of energy (LCOE) and grid parity – Egypt case study', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 9, pp. 37–48, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.seta.2014.11.003.
[83] 'Vortex Bladeless - Energía eólica sin palas', Vortex Bladeless Wind Power. Accessed: Jul. 20, 2023. [Online]. Available: https://vortexbladeless.com/es/
[84] D. A. Pérez Uc, S. E. de León Aldaco, and J. Aguayo Alquicira, 'Trends in Hybrid Renewable Energy System (HRES) Applications: A Review', *Energies*, vol. 17, no. 11, Art. no. 11, May 2024, doi: 10.3390/en17112578.
[85] '2020: Proceedings of the III Ibero-American Conference on Smart Cities | Memorias de eventos académicos TEC', Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/memorias/issue/view/575

[86] P. J. Escamilla-Ambrosio, L. Hernández-Callejo, S. Nesmachnow, P. Moreno-Bernal, and D. Rossit, *IV Ibero-American Conference on Smart Cities ICSC-CITIES 2021*. 2022.
[87] 'THE LINE: a revolution in urban living'. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.neom.com/en-us/regions/theline
[88] 'Neom', *Wikipedia*. Feb. 11, 2024. Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Neom&oldid=1206023943
[89] P. Moreno-Bernal, L. Hernández-Callejo, S. Nesmachnow, D. Rossit, and D. Ochoa-Correa, *Proceedings of the V Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2022)*. 2023.

ANEXOS

8 ANEXO A: INDEXACIÓN Y FACTOR DE IMPACTO DE LAS PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

En el presente Anexo A se muestra de forma detallada de la indexación y el factor de impacto de las revistas científicas en las que se han publicado los artículos desarrollados durante la presente Tesis Doctoral. El propósito de esta información es proporcionar una visión integral de la relevancia y la visibilidad académica de los trabajos realizados en el marco de esta investigación.

8.1 Sustainable Energy Technologies and Assessments

Sustainable Energy Technologies and Assessments es una revista internacional, revisada por pares y de acceso abierto de la editorial Elsevier. En esta revista se ha publicado el artículo: *"Evaluating the standards for solar PV installations in the Iberian Peninsula: Analysis of tilt angles and determination of solar climate zones."*

Tabla 1: Información de la revista

Revista	Sustainable Energy Technologies and Assessments
Editorial	Elsevier
ISSN	2213-1388
Factor de impacto (2023)	7.1
Ranking	40/170 (Energy & Fuels)
Cuartil	Q1

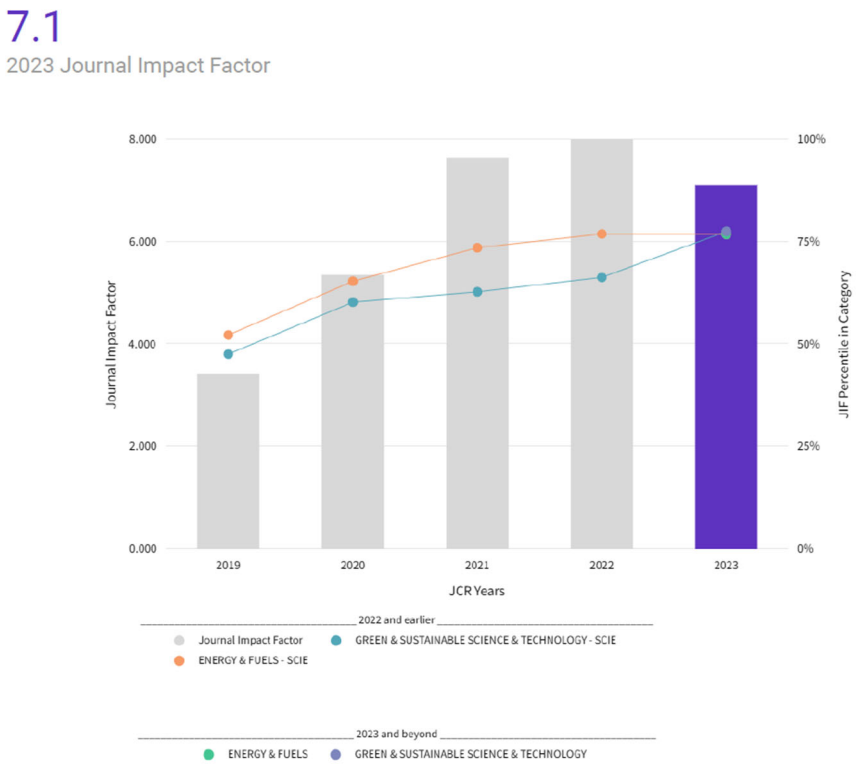


Figura 20: Tendencia Sustainable Energy Technologies and Assessments en el año 2023.

8.2 Applied Sciences

Applied Sciences es una revista internacional, revisada por pares y de acceso abierto publica en línea por la editorial MDPI.

En esta revista se han publicado los artículos:

- "*Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations*"
- *"3D-Printed SMC Core Alternators: Enhancing the Efficiency of Vortex-Induced Vibration (VIV) Bladeless Wind Turbines."*

Tabla 2: Información de la revista

Revista	Applied Sciences
Editorial	MPDI
ISSN	2076-3417
Factor de impacto (2023)	2.5
Ranking	44/179 (Engineering, Multidisciplinary)
Cuartil	Q1

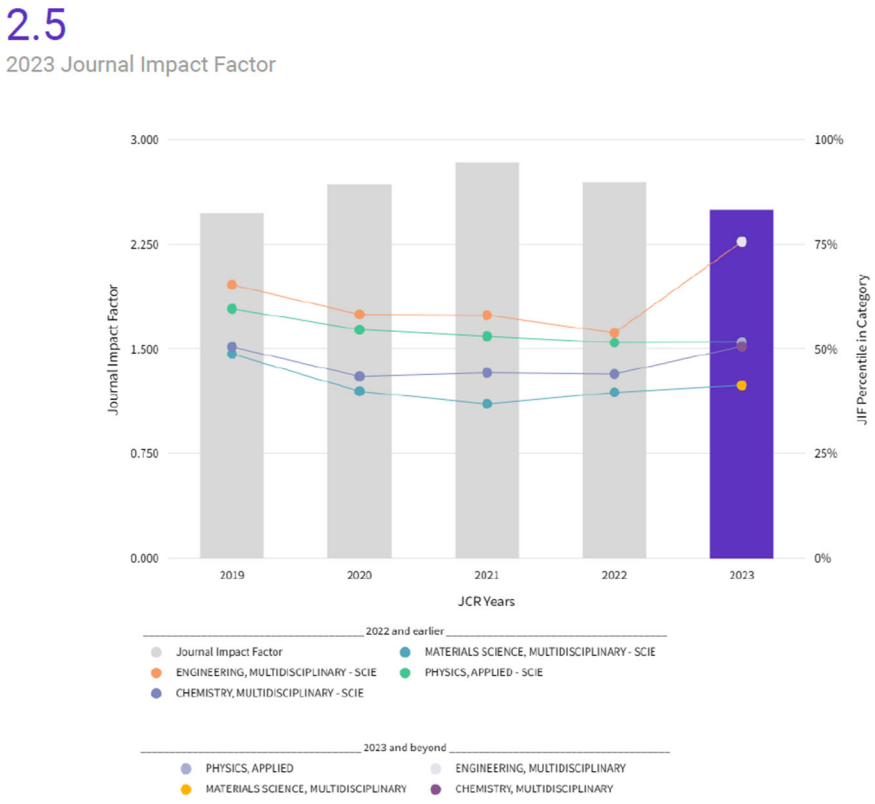
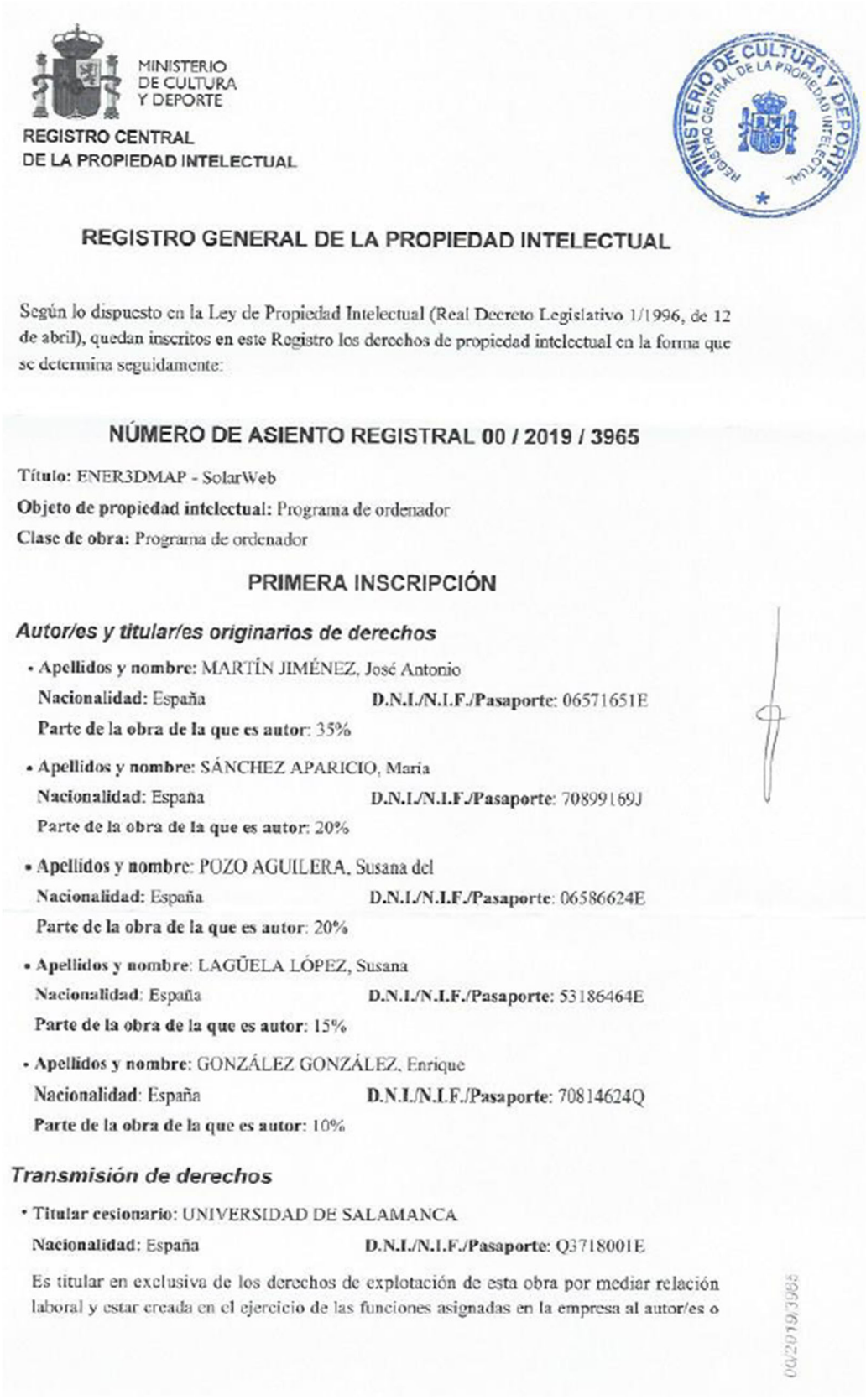


Figura 21: Tendencia Applied Sciences en el año 2023.

9 ANEXO B: OTROS DOCUMENTOS

9.1 Propiedad Intelectual – Ener3Dmap – SolarWeb



MINISTERIO
DE CULTURA
Y DEPORTE

REGISTRO CENTRAL
DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

MINISTERIO DE CULTURA Y DEPORTE
REGISTRO CENTRAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

REGISTRO GENERAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

Según lo dispuesto en la Ley de Propiedad Intelectual (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril), quedan inscritos en este Registro los derechos de propiedad intelectual en la forma que se determina seguidamente:

NÚMERO DE ASIENTO REGISTRAL 00 / 2019 / 3965

Título: ENER3DMAP - SolarWeb

Objeto de propiedad intelectual: Programa de ordenador

Clase de obra: Programa de ordenador

PRIMERA INSCRIPCIÓN

Autor/es y titular/es originarios de derechos

- **Apellidos y nombre:** MARTÍN JIMÉNEZ, José Antonio
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 06571651E
  Parte de la obra de la que es autor: 35%
- **Apellidos y nombre:** SÁNCHEZ APARICIO, María
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70899169J
  Parte de la obra de la que es autor: 20%
- **Apellidos y nombre:** POZO AGUILERA, Susana del
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 06586624E
  Parte de la obra de la que es autor: 20%
- **Apellidos y nombre:** LAGÜELA LÓPEZ, Susana
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 53186464E
  Parte de la obra de la que es autor: 15%
- **Apellidos y nombre:** GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Enrique
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** 70814624Q
  Parte de la obra de la que es autor: 10%

Transmisión de derechos

- **Titular cesionario:** UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte:** Q3718001E

Es titular en exclusiva de los derechos de explotación de esta obra por mediar relación laboral y estar creada en el ejercicio de las funciones asignadas en la empresa al autor/es o

00/2019/3965

MINISTERIO
DE CULTURA
Y DEPORTE

REGISTRO CENTRAL
DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

siguiendo las instrucciones de su empresario.

- **Cedente**: MARTÍN JIMÉNEZ, José Antonio
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 06571651E
- **Cedente**: SÁNCHEZ APARICIO, María
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 70899169J
- **Cedente**: POZO AGUILERA, Susana del
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 06586624E
- **Cedente**: LAGÜELA LÓPEZ, Susana
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 53186464E
- **Cedente**: GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Enrique
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 70814624Q

Datos de la solicitud

Núm. solicitud: SA-112-19

Fecha de presentación y efectos: 06/06/2019 Hora: 11:30

En Madrid, a catorce de agosto de dos mil diecinueve

LA REGISTRADORA CENTRAL

Lucía Gutiérrez García

9.2 Propiedad Intelectual – SolarWeb – Cities

MINISTERIO
DE CULTURA
Y DEPORTE

REGISTRO CENTRAL
DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

REGISTRO GENERAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

Según lo dispuesto en la Ley de Propiedad Intelectual (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril), quedan inscritos en este Registro los derechos de propiedad intelectual en la forma que se determina seguidamente:

NÚMERO DE ASIENTO REGISTRAL 00 / 2020 / 645

Título: ENER3DMAP - Solarweb Cities
Objeto de propiedad intelectual: Programa de ordenador
Clase de obra: Programa de ordenador

MINISTERIO DE CULTURA Y DEPORTE
REGISTRO CENTRAL DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

PRIMERA INSCRIPCIÓN

Autor/es y titular/es originarios de derechos

- **Apellidos y nombre**: MARTÍN JIMÉNEZ, José Antonio
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 06571651E
  Parte de la obra de la que es autor: 35%
- **Apellidos y nombre**: SÁNCHEZ APARICIO, María
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 70899169J
  Parte de la obra de la que es autor: 15%
- **Apellidos y nombre**: POZO AGUILERA, Susana del
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 06586624E
  Parte de la obra de la que es autor: 20%
- **Apellidos y nombre**: LAGÜELA LÓPEZ, Susana
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 53186464E
  Parte de la obra de la que es autor: 10%
- **Apellidos y nombre**: GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Enrique
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 70814624Q
  Parte de la obra de la que es autor: 20%

Transmisión de derechos

- **Titular cesionario**: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: Q3718001E

Es titular en exclusiva de los derechos de explotación de esta obra por mediar relación laboral y estar creada en el ejercicio de las funciones asignadas en la empresa al autor/es o

00/2020/645

MINISTERIO
DE CULTURA
Y DEPORTE

REGISTRO CENTRAL
DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

siguiendo las instrucciones de su empresario.

- **Cedente**: MARTÍN JIMÉNEZ, José Antonio
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 06571651E
- **Cedente**: SÁNCHEZ APARICIO, María
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 70899169J
- **Cedente**: POZO AGUILERA, Susana del
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 06586624E
- **Cedente**: LAGÜELA LÓPEZ, Susana
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 53186464E
- **Cedente**: GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Enrique
  Nacionalidad: España **D.N.I./N.I.F./Pasaporte**: 70814624Q

Datos de la solicitud

Núm. solicitud: SA-8-20
Fecha de presentación y efectos: 14/01/2020 Hora: 10:45

En Madrid, a trece de febrero de dos mil veinte

LA REGISTRADORA CENTRAL

Lucía Gutiérrez García

00/2020/645

9.3 Patente – DISPOSOL (Dispositivo Low-Cost de seguimiento solar)

(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 918 273**

(21) Número de solicitud: 202130017

(51) Int. Cl.:

H02S 20/32 (2014.01)
F24S 50/20 (2018.01)
G01S 3/786 (2006.01)

(12) PATENTE DE INVENCIÓN CON EXAMEN B2

(22) Fecha de presentación:
13.01.2021

(43) Fecha de publicación de la solicitud:
14.07.2022

Fecha de modificación de las reivindicaciones:
07.03.2023

Fecha de concesión:
04.04.2023

(45) Fecha de publicación de la concesión:
13.04.2023

(73) Titular/es:
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA (100.0%)
Patio de Escuelas, nº 1
37008 Salamanca (Salamanca) ES

(72) Inventor/es:
LAGÜELA LÓPEZ, Susana;
GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Enrique;
DEL POZO AGUILERA, Susana;
MARTÍN JIMÉNEZ, José Antonio;
SÁNCHEZ APARICIO, María y
DE ANDRÉS ANAYA, Paula

(74) Agente/Representante:
PONS ARIÑO, Ángel

(54) Título: **DISPOSITIVO VERIFICADOR DE POSICIÓN SOLAR Y DE SOMBRAS DESTINADO A SER ACOPLADO A UN PERFIL DE UN PANEL SOLAR**

(57) Resumen:
Dispositivo verificador de posición solar y de sombras destinado a ser acoplado a un perfil de un panel solar. Dispositivo (1) verificador de la posición solar y de sombras destinado a ser acoplado en un perfil de un panel solar fotovoltaico, que comprende una cruceta (2) unida a una porción superior de la carcasa (6), dicha cruceta (2) provista de al menos una fotorresistencia (8) dispuesta en una porción inferior de la cruceta (2) y perpendicular a la misma, la fotorresistencia (8) operativamente conectada a un elemento de control dispuesto dentro de la carcasa (6), donde los elementos de unión (12) están configurados para unir el perfil (4) con la carcasa (6) de tal manera que la fotorresistencia (8) es coplanaria al panel solar y como consecuencia la cruceta (2) proyecta sombras sobre las fotorresistencias (8) cuando la luz incidente no es perpendicular al panel solar.

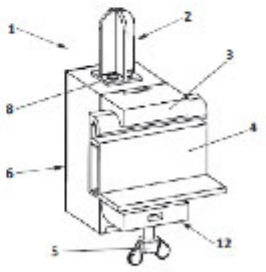


FIG. 1

ES 2 918 273 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 918 273 B2

DESCRIPCIÓN

DISPOSITIVO VERIFICADOR DE POSICIÓN SOLAR Y DE SOMBRAS DESTINADO A SER ACOPLADO A UN PERFIL DE UN PANEL SOLAR

OBJETO DE LA INVENCIÓN

La presente invención se puede incluir dentro del campo técnico de la energía solar, en particular en el campo dispositivos de medición y verificación de la posición solar y de la medición de sombras en paneles solares fotovoltaicos. De manera más concreta, el objeto de la invención se refiere a un dispositivo portátil y autónomo, engancharle a distintos tipos de perfiles de paneles solares, que por medio de una cruceta provista de fotorresistencias dispuestas de manera coplanaria con respecto al panel solar, permiten que la cruceta proyecte sombras sobre las fotorresistencias cuando la luz incidente no es perpendicular al panel solar, pudiendo entonces mediar o evaluar si el panel se encuentra en la posición optima en el seguimiento solar, así como evaluar sombras por elementos del entorno y horas sin radiación incidente.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

En la actualidad, y como referencia al estado de la técnica, debe señalarse se conocen diferentes tipos de sensores o instrumentos de posicionamiento óptimo para paneles solares que se conectan directamente sobre el sistema de control del mecanismo de seguimiento. Sin embargo, se desconoce un instrumento o sensor integrado que permita comprobar de forma remota el posicionamiento óptimo, y por consecuente el correcto funcionamiento del sistema de seguimiento.

Por otro lado, la monitorización de los parámetros de producción de los paneles solares se realiza de forma centralizada, por series normalmente, pero la presencia de sombras o la detección de fallo en el sistema de seguimiento se obtiene de forma indirecta a través del cálculo de la reducción de energía producida, pero no es posible discernir la causa del decremento de producción, para por ejemplo, ubicar exactamente sobre que panel se localizan las sombras que invalidan la producción de una fila de paneles.

ES 2 918 273 B2

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

La presente invención pretende solucionar alguno de los problemas mencionados en el estado de la técnica. Más en particular, el objeto de la presente invención es un dispositivo verificador de la posición solar y de sombras destinado a ser acoplado en un perfil de un panel solar fotovoltaico, donde dicho dispositivo comprende:

- una carcasa que comprende a su vez medios de unión destinados a unir un perfil de un panel solar con dicha carcasa,
- una cruceta unida a una porción superior de la carcasa, dicha cruceta provista de al menos una fotorresistencia dispuesta en una porción inferior de la cruceta y perpendicular a la misma, dicha fotorresistencia operativamente conectada a un elemento de control dispuesto dentro de la carcasa, donde los elementos de unión están configurados para unir el perfil con la carcasa de tal manera que la fotorresistencia es coplanaria al panel solar y como consecuencia la cruceta proyecta sombras sobre las fotorresistencias cuando la luz incidente no es perpendicular al panel solar.

El dispositivo con los elementos técnicos arriba expuestos y con la configuración mencionada, permiten, por medio de la al menos una fotorresistencia de la cruceta colocadas de forma coplanaria al panel fotovoltaico, medir el nivel de luminosidad recibida y por medio de comparar valores de luminosidad, se detecta la posible proyección de sombras (cuando la orientación del panel no es perpendicular a los rayos de luz incidentes) y por lo tanto se verifica la correcta posición del panel.

Por ejemplo, cuando la radiación solar incide sobre una fotorresistencia, el valor de resistencia en la misma es del orden de 100 ohmios, mientras que el valor de resistencia es del orden de mega ohmios en ausencia de radiación solar incidente. Este valor responde a la ecuación:

$$R = A * E^{\alpha}$$

donde R es el valor de resistencia eléctrica de la fotorresistencia, A y α son constantes que dependen del semiconductor utilizado, y E es la densidad superficial de la energía recibida.

Preferentemente, la cruceta comprende cuatro aletas que definen cuatro cuadrantes dotados de dos fotorresistencias coplanares al panel solar.

De esta manera, por medio de la fotorresistencia coplanar al panel solar, y preferiblemente mediante al menos una resistencia en dos cuadrantes, el dispositivo puede mediar la orientación e inclinación solar con respecto al panel, así como la proyección de sombras por elementos del entorno, actuando como un medidor de las horas con y sin radiación solar incidente sobre el panel sobre el cual está montado, por ejemplo, en instalaciones solares fijas.

Para la instalación en paneles solares con seguimiento solar, preferentemente el dispositivo está dotado de una cruceta con cuatro aletas que definen cuatro cuadrantes dotados de dos fotorresistencias coplanares al panel solar.

Mediante las mediciones tomadas con las fotorresistencias, así como con el elemento de control que puede post procesar los datos y realizar comparaciones en tiempo real, el dispositivo puede ser utilizado para el control del movimiento de los seguidores solares con respecto a la posición del sol, sirviendo además, como aviso en las ocasiones en las que el movimiento del seguidor no coloque al panel perfectamente perpendicular al sol.

La cruceta está dotada de al menos una ranura en una porción inferior de las ranuras para facilitar el drenaje y evitar acumulación de agua en las fotorresistencias en episodios de lluvia.

Los elementos de unión, deben preferiblemente incorporar enganches ajustables para conectar con diferentes perfiles normalizados, de manera que el dispositivo pueda ser utilizado con todo tipo de paneles solares comerciales.

De manera preferente, los elementos de unión comprenden una pinza de sujeción unida a la carcasa, y un tornillo de ajuste, de manera que la geometría de la pinza de sujeción está configurada para acoplar el perfil del panel solar a la carcasa de tal manera que la fotorresistencia queda dispuesta de manera coplanaria al panel solar y el tornillo de ajuste permite ajustar a todos los perfiles normalizados en el mercado. Preferiblemente, el tornillo de ajuste es un tornillo de métrica M5.

En una realización preferente, la pinza de sujeción está unida a la carcasa a través de una junta deslizante para facilitar el desmontaje de la pinza sobre la carcasa permitiendo

acceder al elemento de control y a la electrónica que pueda estar alojada en el interior de la carcasa.

El dispositivo por medio del elemento de control y la electrónica operativamente conectada a las fotorresistencias, puede estar conectado con un usuario o a una centralita por medio de de redes de comunicación de área amplia y baja potencia (LPWAN), idóneas para este tipo de aplicaciones, como por ejemplo LoRa o SigFox.

El dispositivo puede ser considerado una solución sencilla y de bajo coste que presenta una gran utilidad para paneles solares con sistema de seguimiento incorporado (tanto a uno como a dos ejes), pero también para instalaciones de paneles solares fijas, como elemento de evaluación del diseño de la instalación (orientación e inclinación de los paneles, posible presencia de sombras sobre los paneles). Como consecuencia, la invención puede resolver los siguientes problemas:

(i) Es instalable en todos los paneles solares gracias a su adaptabilidad a todos los tamaños de perfiles disponibles en el mercado;

(ii) Funciona durante todo el año y en la mayoría de condiciones climáticas, gracias a la incorporación de las ranuras de drenaje que evitan la acumulación de agua sobre las fotorresistencias en episodios de lluvia.

(iii) Permite el control del movimiento de los seguidores solares con respecto a la posición del sol, sirviendo como aviso en las ocasiones en las que el movimiento del seguidor no coloque al panel perfectamente perpendicular al sol.

(iii) Facilita la evaluación del diseño de instalaciones de paneles solares fijas (orientación e inclinación, proyección de sombras por elementos del entorno), actuando como un medidor de las horas con y sin radiación solar incidente.

En base a estas ventajas de la invención, las principales áreas de aplicación del dispositivo propuesto pueden ser:

- Granjas de seguidores solares.
- Granjas de paneles solares fijos.
- Instalaciones solares de autoconsumo individual y/o compartido, a nivel doméstico e industrial.
- Instalaciones solares en elementos de mobiliario urbano (señales de tráfico, elementos de iluminación urbana, marquesinas, señalización informativa).

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Muestra una vista en perspectiva de una realización preferente del dispositivo donde se muestra la cruceta, las fotorresistencias, así como la pinza de sujeción y el tornillo de ajuste para ajustar perfiles de panales solares de distintos tamaños.

Figura 2.- Muestra una vista en detalle de la realización preferente de la figura 1, donde se ilustra que la cruceta está provista de ranuras para evitar la inundación de las fotorresistencias, así como también se observa la junta deslizable para unir la pinza de sujeción con la carcasa.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCIÓN

Seguidamente se ofrece, con ayuda de las figuras adjuntas 1-2 antes descritas, una descripción en detalle de un ejemplo de realización preferente del objeto de la invención.

El objeto de la invención se refiere a un dispositivo (1) verificador de la posición solar y de sombras destinado a ser acoplado en un perfil (4) de un panel solar fotovoltaico.

Más en particular, tal y como se muestra en la figura 1, el dispositivo (1) comprende una cruceta (2) unida a una porción superior de una carcasa (6), donde dicha cruceta (2) comprende cuatro aletas (10) que definen cuatro cuadrantes (11) dotados de cuatro fotorresistencias (8), donde los elementos de unión (12) están configurados para unir el perfil (4) del panel solar con la carcasa (6) de tal manera que las fotorresistencias (8) quedan dispuesta de manera coplanaria al panel solar y como consecuencia la cruceta (2) proyecta sombras sobre las fotorresistencias (8) cuando la luz incidente no es perpendicular al panel solar.

En la realización preferente descrita por la figura 1, los elementos de unión (12) comprenden una pinza de sujeción (3) unida a la carcasa (6) y un tornillo de ajuste (5), donde la geometría de la pinza de sujeción (3) está configurada para acoplar el perfil (4) del panel solar a la

carcasa (6) de tal manera que la fotorresistencia (8) queda coplanar al panel solar y las aletas (10) de la cruceta (2) perpendiculares a las fotorresistencias (8).

La figura 2 muestra una vista en detalle donde se ilustra que la crucetas (2) está provista de dos ranuras (7) en una porción inferior de la misma para facilitar el drenaje y evitar acumulación de agua en las fotorresistencias (8) durante episodios de lluvia.
Asimismo, la figura 2 muestra también que la pinza de sujeción (3) está unida a la carcasa (6) a través de una junta deslizante (9) para facilitar el desmontaje de la misma y garantiza el acceso al interior de la carcasa donde se localiza un elemento de control operativamente conectado a las fotorresistencias (8) así como la electrónica necesaria para procesar los datos y enviar al usuario, a una base de datos y/o a una central de control.

REIVINDICACIONES

1.- Dispositivo (1) verificador de la posición solar y de sombras destinado a ser acoplado en un perfil de un panel solar fotovoltaico, que comprende una carcasa (6) que a su vez comprende elementos de unión (12) destinados a unir un perfil (4) de un panel solar con dicha carcasa (6), donde dicho dispositivo comprende, además una cruceta (2) unida a una porción superior de la carcasa (6), dicha cruceta (2) comprende una porción inferior y cuatro aletas (10) que definen cuatro cuadrantes (11) dotados de cuatro fotorresistencias (8) situadas en dicha porción inferior quedando las fotorresistencias (8) perpendiculares a las aletas (10), dichas fotorresistencias (8) operativamente conectadas a un elemento de control dispuesto dentro de la carcasa (6), donde los elementos de unión (12) están configurados para unir el perfil (4) con la carcasa (6) de tal manera que las fotorresistencias (8) son coplanarias al panel solar y como consecuencia la cruceta (2) proyecta sombras sobre las fotorresistencias (8) cuando la luz incidente no es perpendicular al panel solar, estando dicho dispositivo **caracterizado por que** la cruceta (2) está dotada de al menos una ranura (7) en una porción inferior de las aletas (10) para facilitar el drenaje y evitar acumulación de agua en las fotorresistencias (8).

2.- El dispositivo (1) de la reivindicación 1, el que los elementos de unión (12) comprenden una pinza de sujeción (3) unida a la carcasa (6) y un tornillo de ajuste (5), donde la geometría de la pinza de sujeción (3) está configurada para acoplar el perfil (4) del panel solar a la carcasa (6) de tal manera que las cuatro fotorresistencias (8) son coplanares al panel solar.

3.- El dispositivo (1) de la reivindicación 2, en el que la pinza de sujeción (3) está unida a la carcasa (6) a través de una junta deslizante (9) para facilitar el desmontaje.

ES 2 918 273 B2

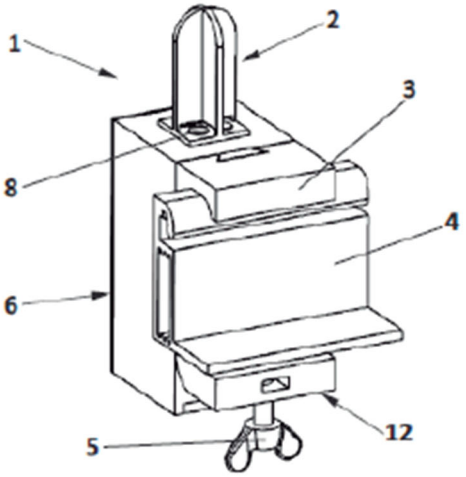


FIG. 1

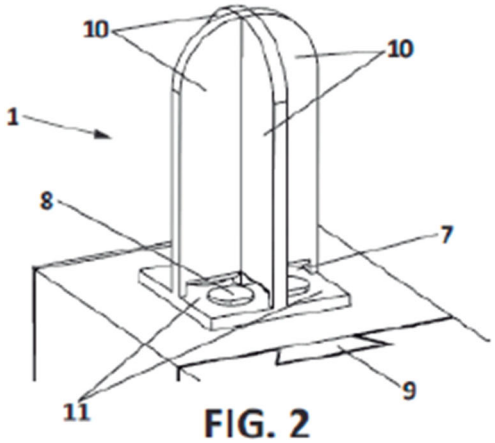


FIG. 2

9.4 Premio Proyecto Eficampus