

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
INDUSTRIAL



Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA EÓLICA
DISTRIBUIDA APLICADA A PROSUMIDORES

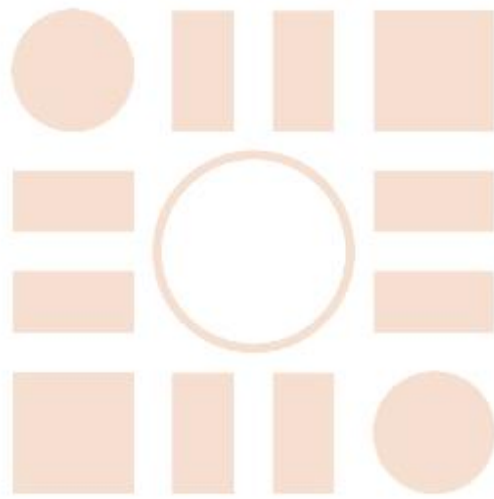
ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Lorena Fernández Robles

Tutor: Carlos Santos Pérez

Cotutor: Miguel Tradacete Ágreda

2023



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA EÓLICA DISTRIBUIDA APLICADA A PROSUMIDORES

Autor: Lorena Fernández Robles

Tutor: Carlos Santos Pérez

Cotutor: Miguel Tradacete Ágreda

TRIBUNAL:

Presidente: Pablo Díaz Villar

Vocal 1º: Nerea del Rey Maestre

Vocal 2º: Carlos Santos Pérez

FECHA: 19 de septiembre de 2023

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el enorme apoyo que he recibido por parte de mis familiares y amigos más cercanos, para el desarrollo, esfuerzo y dedicación empleados tanto en este proyecto como a lo largo de toda mi vida.

Ha sido un placer poder cerrar esta etapa, tan sufrida como enriquecedora, con este trabajo con la ayuda de Carlos, quien me ha ayudado y guiado para llevarlo a cabo.

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto "RuralVPP" ref. SBPLY/21/180501/000223 financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (JCCM) y la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional y al proyecto "iPVBEMS" ref. PIUAH22/IA-060 financiado por la Universidad de Alcalá.

RESUMEN

ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA EÓLICA DISTRIBUIDA APLICADA A PROSUMIDORES

Autor: Lorena Fernández Robles

Tutor: Carlos Santos Pérez

Departamento: Teoría de la Señal y la Comunicación

Grado: Ingeniería Electrónica y Automática Industrial

Palabras clave: Solar, fotovoltaica, eólica, energía, generación, prosumidor.

Este trabajo se centra en el análisis de viabilidad de la aplicación de la tecnología eólica distribuida en el contexto de los prosumidores energéticos. Se investiga cómo esta tecnología puede ser implementada a pequeña escala para la generación de energía eólica en instalaciones domésticas y comerciales, permitiendo al prosumidor generar y consumir su propia electricidad. Se examina el impacto en la red eléctrica, los beneficios económicos para los prosumidores y la contribución a la sostenibilidad ambiental. También se consideran los aspectos técnicos que pueden intervenir en la implementación de esta tecnología, y en su combinación con la tecnología solar fotovoltaica. El estudio resalta el potencial de la tecnología eólica distribuida en complementación a una instalación solar fotovoltaica, para fomentar la independencia energética y promover la transición hacia fuentes de energía más limpias y descentralizadas.

ABSTRACT

STUDY OF DISTRIBUTED WIND TECHNOLOGY APPLIED TO PROSUMERS

Author: Lorena Fernández Robles

Tutor: Carlos Santos Pérez

Department: Signal Theory and Communications

Degree: Industrial Electronics and Automation Engineering

Key words: solar, photovoltaic, wind, energy, generation, prosumer.

This project is focused on the feasibility analysis of the application of distributed wind technology in the context of energy prosumers. It's investigated how this technology can be implemented on a small scale for the generation of wind energy at domestic and commercial facilities, allowing the prosumer to generate and consume their own electricity. The impact on the electricity grid, the economic benefits for prosumers and the contribution to environmental sustainability are examined. The technical aspects that may intervene in the implementation of this technology, and in its combination with photovoltaic solar technology, are also considered. The study highlights the potential of distributed wind technology in complement to a photovoltaic solar installation, to foster the energy independence and promote the transition towards cleaner and decentralized energy sources.

RESUMEN EXTENDIDO

Los impactos ambientales han logrado en los últimos años que la sociedad se conciencie para frenar el cambio climático y los problemas que este desencadena, provocando un gran aumento en la demanda de recursos renovables y tecnologías sostenibles para la generación de energía, quitando protagonismo a los combustibles fósiles en gran parte del mundo debido tanto a su escasez como a las emisiones contaminantes que se expulsan en los procesos de combustión.

Las tecnologías renovables se han extendido notablemente en los últimos años, destacando la solar fotovoltaica y la eólica como método de generación de energía a gran escala empleada por la red de distribución junto al resto de tecnologías, como el ciclo combinado o la nuclear. Sin embargo, en un contexto doméstico aún hay pendientes muchos avances. La generación de energía mediante paneles fotovoltaicos por parte de particulares ha avanzado muy rápido en los últimos años en España, volviéndose muy común la instalación de estos en cualquier vivienda. Los beneficios son claros y el tiempo de amortización de la inversión inicial se ve reducido gracias a las ayudas del gobierno para incentivar estas instalaciones. A pesar de la rápida evolución de la tecnología solar fotovoltaica, la generación eólica a pequeña escala aún no se ha dado a conocer en la península, pero sus evidentes puntos a favor llevan a pensar que en pocos años resultará una instalación muy común como ha ocurrido con las placas solares. Concretamente, la tecnología eólica distribuida se centra en instalaciones de menor escala con el fin de generar energía localmente para una zona urbana o rural.

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal realizar un estudio de viabilidad de la implementación de aerogeneradores para entorno doméstico y su combinación con paneles solares fotovoltaicos, de cara a prosumidores, evaluando resultados y nivel de independencia de la red eléctrica convencional.

En primer lugar, se indaga en el estado del arte de los aerogeneradores de pequeña potencia, estudiando los avances y situación de la tecnología eólica en la actualidad en España y en el resto de los países, así como los diferentes tipos de turbinas y determinando en qué caso resulta mejor cada modelo según su forma de generación y estructura. Se analizan los numerosos beneficios que aporta esta instalación para el prosumidor, en busca de una menor dependencia de la red gracias al autoconsumo.

Se hace el estudio de viabilidad de la instalación eólica para un entorno doméstico con datos de viento de Alcalá de Henares, y se examinan los efectos a partir de las gráficas generadas. Se obtienen diferentes resultados, que varían según los precios introducidos y la inversión inicial disponible, entre otros factores, entre los que el software determina cual resulta mejor opción para el usuario según los datos introducidos. Se analizan los valores ambientales, económicos y temporales, obteniendo como resultado una rentabilidad positiva del sistema, con un ahorro durante los primeros 15 años que supone el reembolso total de la inversión inicial, teniendo los 10 años restantes beneficios netos para el usuario dado que el coste operacional anual obtenido es negativo.

A continuación, se realiza el mismo estudio de viabilidad para una instalación solar fotovoltaica, introduciendo los datos necesarios en el programa y concluyendo que esta implementación resulta eficiente y produce ganancias, pues se tarda 12 años en amortizar la inversión y se tienen los años siguientes como ganancias gracias a que el coste operacional anual vuelve a resultar negativo.

Este análisis únicamente de la tecnología solar es interesante para el siguiente paso, consistente en plantear un escenario híbrido, que combine las dos tecnologías estudiadas. Esta instalación, que cuenta tanto con aerogeneradores como con paneles solares fotovoltaicos, resulta muy favorecedora para el prosumidor, alcanzando una penetración renovable muy elevada y con un tiempo de recuperación de la inversión parecido a los casos anteriores, 14 años. De nuevo se tiene que es una instalación viable y eficiente ya que se recupera la inversión además de tener ganancias tras estos primeros años por el coste operacional de cada año negativo.

Habiendo simulado esta última instalación, se procede a comparar los resultados con los obtenidos en las anteriores, observando así los puntos a favor de cada tipo de tecnología y los beneficios de su combinación. Este mismo sistema se analiza tanto con los valores de precios de compra y venta de energía de 2021 como con los de 2022, haciendo así una comparativa y determinando las diferencias que suponen estas variaciones de precio. Con los datos de 2022 se tiene también una gran viabilidad de la instalación, con valores tanto de coste operacional como de coste actual neto muy grandes y negativos, además de un tiempo de amortización de 6 años, mucho menor que otros escenarios debido a los precios más regulados de este año 2022, pues en el anterior se producen subidas desorbitadas.

Además, se repite este estudio de 2022 sin posibilidad de vender excedentes, de forma que se analiza el impacto de esta venta de energía para el prosumidor y la viabilidad de la instalación en el caso expuesto. En este sistema se hace una instalación de potencia mucho menor, para que el total resulte eficiente y viable. A pesar de que se obtengan valores económicos con signo positivo, se tiene un ahorro frente al sistema base, con menos de 7 años como tiempo de amortización de las inversiones.

Tras esto, se añade al sistema simulado una batería de almacenamiento en modo isla, caso concreto en el que el prosumidor es totalmente independiente de la red y no está conectado a la misma. Esto se hace posible gracias a la incorporación a la instalación del sistema de almacenamiento, mediante el que se guardan los excedentes de energía generados en lugar de inyectarlos a la red como en los casos anteriores, de modo que pueden utilizarse en momentos futuros en los que la generación resulte insuficiente para cubrir el consumo. La gran aleatoriedad de generación mediante fuentes de energía renovables, no controlables por el usuario al depender de factores ambientales, hace de esta opción con almacenamiento aún más llamativa. Se tiene también que el resultado estudiado es viable para el prosumidor, ya que supone un ahorro, con valores económicos positivos como en el estudio anterior pero menores frente al sistema base.

Por último, se hace una emulación sobre el prototipo de planta real instalada en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá, añadiendo los datos de viento y la correspondiente producción de potencia para la instalación eólica, implementando además un sistema de almacenamiento. Al contar con dos fuentes de energía renovable diferentes, se alcanzan generaciones mayores y en diferentes momentos. La generación solar producirá

durante las horas de sol, pero durante la noche serán únicamente los aerogeneradores los que produzcan energía a partir del viento. La batería se cargará con los excesos producidos y se descargará cuando el sistema necesite la aportación, de manera que solo se recurra a la compra de energía a la red en caso de tener la batería descargada. Se repite este estudio para varios días con distinto perfil ambiental, de manera que se analiza la importancia de la generación solar fotovoltaica y de la eólica, en cada caso. Se concluye que el perfil de viento estudiado, al encontrarse a poca altura, percibe velocidades bajas que provocan una generación menor que la solar, teniendo un factor de carga mucho menor.

En vista a trabajos futuros, se analiza la posibilidad de realizar una instalación real en la azotea de la Escuela Politécnica Superior de uno o varios aerogeneradores. Con esto se lograría una instalación híbrida como la estudiada, ya que la Universidad cuenta con paneles fotovoltaicos, además de un sistema de almacenamiento de energía. A la vez que se trabaja en esta implementación, se pondría en funcionamiento la estación meteorológica ya colocada junto a la instalación, con el fin de adquirir medidas del anemómetro una vez se encuentre localizado en una posición adecuada para medir el viento que recibiría el aerogenerador.

ÍNDICE

Resumen	5
ABSTRACT.....	7
Resumen extendido	9
Índice de ilustraciones.....	15
CAPÍTULO 1. Introducción	19
1.1 Motivación del trabajo	19
1.2 Objetivos y campo de aplicación	20
1.3 Estructura.....	22
1.4 Herramientas.....	23
CAPÍTULO 2. Estado del arte de los aerogeneradores.....	25
2.1 Evolución de la energía eólica en España	25
2.2 Generación eólica en entorno doméstico	28
2.3 Tipos de aerogeneradores domésticos.....	30
CAPÍTULO 3. Estudio de viabilidad de aerogeneradores en entorno doméstico	35
3.1 Simulación en Homer Pro	35
3.2 Resultados	38
CAPÍTULO 4. Combinación de fuentes de generación eólica y solar	45
4.1 Instalación solar fotovoltaica.....	45
4.2 Instalación con combinación de tecnologías eólica y solar fotovoltaica.....	52
4.3 Estudio para precios de 2022	59
4.4 Estudio para precios de 2022 sin venta de excedentes	63
CAPÍTULO 5. Caso de estudio en modo isla con almacenamiento	66
CAPÍTULO 6. Emulación en prototipo de planta real fotovoltaica con almacenamiento	70
6.1 Simulación de aerogeneradores a instalar en planta real	70
6.2 Implementación de batería de almacenamiento.....	75
6.3 Estudio de varios días con distinto perfil solar	76
6.3.1 Día nublado cerrado con claros	76
6.3.2 Día parcialmente nublado	79
6.3.3 Día soleado	80
CAPÍTULO 7. Conclusiones	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXO.....	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Modelos de aerogeneradores de pequeña escala, fuente: [1]	21
Ilustración 2. Esquema de instalación solar fotovoltaica con cada elemento empleado, fuente: [2].....	22
Ilustración 3. Evolución acumulada y anual de la potencia eólica instalada en España hasta 2022, fuente: AEE.....	25
Ilustración 4. Porcentajes de generación de las diferentes energías en España en 2022, fuente: AEE	26
Ilustración 5. Evolución anual de la generación de energía separado por tecnologías, fuente: REE	27
Ilustración 6. Sistema aislado con generación eólica y solar fotovoltaica, con sistema inteligente de almacenamiento y posibilidad de venta de energía a red, fuente: [6]	29
Ilustración 7. Aerogenerador Darrieus, fuente: [8]	30
Ilustración 8. Aerogenerador Giromill, fuente: [9]	31
Ilustración 9. Aerogenerador Savonius, fuente: [10].....	32
Ilustración 10. Aerogenerador híbrido Savonius-Darrieus, fuente: [11].....	33
Ilustración 11. Clasificación de turbinas por tipo de funcionamiento y características, fuente: [12].....	33
Ilustración 12. Perfil de carga doméstico	35
Ilustración 13. Mapas de calor de los precios del mercado de compra y venta de energía	36
Ilustración 14. Precio medio anual en España de la electricidad de los primeros siete meses de cada año desde 1998 hasta 2021, fuente: [14]	37
Ilustración 15. Potencia de salida total proporcionada por los aerogeneradores seleccionados a lo largo del año 2021 (morado) y compra de energía a la red (azul)	38
Ilustración 16. Generación de energía eólica en kW (morado) y aportación de la red (azul) durante la tercera semana del mes de julio de 2021	39
Ilustración 17. velocidad media del viento en m/s y sus valores máximos por meses	40
Ilustración 18. Media de la velocidad del viento por meses en función de la hora del día	41
Ilustración 19. Mapa de calor en el que se refleja la penetración renovable en función de la hora del día y del día del año 2021	42
Ilustración 20. Histograma que expone la frecuencia de velocidades del viento captadas a lo largo del año 2021.....	43
Ilustración 21. Comparativa de los factores económicos de instalación eólica frente a la compra del total consumido a la red de distribución	44

Ilustración 22. Potencia generada a partir de paneles fotovoltaicos (amarillo) y potencia comprada a red eléctrica (azul) a lo largo del año 2021.....	46
Ilustración 23. Potencia generada por los paneles fotovoltaicos (amarillo) y compra de potencia a la red (azul) durante la semana en la que se alcanzan los picos máximos de producción durante el año 2021	47
Ilustración 24. Promedios mensuales de potencia solar captada por cada metro cuadrado instalado durante el año 2021 y los valores máximos alcanzados en cada mes.....	48
Ilustración 25. Generación de potencia por metro cuadrado instalado a partir de la incidencia solar en función del mes del año 2021	49
Ilustración 26. Excedentes de potencia generados de media en la instalación solar fotovoltaica en cada mes de 2021.....	50
Ilustración 27. Comparativa de los factores económicos de instalación solar fotovoltaica frente a la compra del total consumido a la red de distribución	52
Ilustración 28. Instalación con combinación de tecnologías solar fotovoltaica y eólica. Gráfico con la potencia generada por cada una además de la comprada a la red durante el año 2021.	53
Ilustración 29. Generación solar y eólica junto con línea de compra de potencia a la red, durante una semana concreta de julio de 2021	54
Ilustración 30. Compra media de potencia (kW) a red eléctrica y valores máximos correspondientes a cada mes a lo largo de 2021	55
Ilustración 31. Salida de potencia total a partir de las instalaciones renovables por horas distinguiendo entre cada mes del año 2021	56
Ilustración 32. Precio medio de la energía a la venta por la red eléctrica en €/kWh en función del mes de 2021	57
Ilustración 33. Factores económicos de la instalación híbrida con precios de 2021, incluyendo años de amortización	59
Ilustración 34. Esquema de instalación híbrida con conexiones a buses AC y DC	60
Ilustración 35. Gráfica de generación eólica, solar fotovoltaica y aportaciones por parte de la red de distribución para el año 2022	60
Ilustración 36. Comparación de compra y venta total de energía según el tipo de instalación .	61
Ilustración 37. Comparación de Instalación híbrida (9 kW solar + 9 kW eólica) como primer caso, eólica (9 kW) como segundo, solar (9 kW) como tercero y sin instalación renovable (solo red) como última opción	61
Ilustración 38. Factores económicos de la instalación híbrida con precios de 2022, incluyendo años de amortización	62

Ilustración 39. Representación de la generación de potencia mediante tecnologías eólica y solar, así como la compra a la red de distribución a lo largo del año 2022 sin posibilidad de venta de excedentes	64
Ilustración 40. Evolución de los gastos anuales de instalación híbrida aislada con almacenamiento	66
Ilustración 41. Potencia almacenada y aportada por la batería Li-Ion	67
Ilustración 42. Curva de generación de potencia en kW de cada aerogenerador en función de la velocidad del viento en m/s, fuente: [17]	70
Ilustración 43. Primer tramo. Función linealizada para velocidades desde 0 hasta 3 m/s	71
Ilustración 44. Segundo tramo. Función linealizada para velocidades desde 3 hasta 6 m/s	71
Ilustración 45. Tercer tramo. Función linealizada para velocidades desde 6 hasta 10 m/s	71
Ilustración 46. Cuarto tramo. Función linealizada para velocidades desde 10 hasta 14 m/s	72
Ilustración 47. Quinto tramo. Función linealizada para velocidades desde 14 hasta 17 m/s	72
Ilustración 48. Sexto tramo. Función linealizada para velocidades desde 17 hasta 18 m/s	72
Ilustración 49. Séptimo tramo. Función linealizada para velocidades desde 18 hasta 20 m/s	73
Ilustración 50. Gráficas que representan la generación de potencia mediante paneles fotovoltaicos (superior) y aerogeneradores (inferior) el día 2 de septiembre de 2023 en la Universidad de Alcalá.....	74
Ilustración 51. Variables empleadas para la configuración de la batería en MATLAB	75
Ilustración 52. Gráficas generadas a partir de los datos del día 2 de septiembre de 2023	77
Ilustración 53. Gráficas generadas a partir de los datos del día 12 de julio de 2023	79
Ilustración 54. Gráficas generadas a partir de los datos del día 12 de julio de 2023	79

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las razones que motivan al desarrollo del proyecto, así como la estructura de la memoria y las herramientas utilizadas.

1.1 Motivación del trabajo

El uso de fuentes de energía renovables se ha convertido en los últimos años en una prioridad a nivel mundial. Frente a la escasez de los recursos fósiles y la contaminación que provoca su empleo para la generación de energía, se ha recurrido urgentemente a las alternativas más sostenibles que hacen frente al cambio climático. Además, la economía de un país con gran explotación de energías renovables se ve muy favorecida, lo cual se irá haciendo aún más notable de cara al futuro. Dentro de la variedad de fuentes de energía renovables, la energía eólica y la energía fotovoltaica resultan las más eficientes.

A nivel doméstico, se vuelven aún más relevantes tanto la energía solar como la eólica, pues dan la posibilidad a un hogar de generar su propia electricidad, provocando autoconsumo y haciendo de este un entorno más independiente de la red eléctrica. Además de verse reflejado notablemente en el ahorro en las facturas de electricidad, supone un avance hacia un sistema de energías mucho más sostenible y descentralizado.

Ambas fuentes de energía son obtenidas directamente de recursos naturales, el viento y el sol, y resultan aún más eficientes al combinarlas, pues sus características hacen que se complementen y aporten beneficios de forma recíproca. En el caso concreto de un entorno doméstico, esta combinación de fuentes fotovoltaica-eólica optimiza notablemente la generación de energía, dado que se aprovechan más eficientemente ambos recursos que si se dispone únicamente de uno de ellos.

La energía eólica en el entorno doméstico es una alternativa con gran futuro en nuestro país, a pesar de que aún no se ha expandido su uso tanto como el de paneles fotovoltaicos. Resulta muy buena opción a la hora de implementarla en pequeña escala, gracias a la variedad de tamaño de turbinas y su gran eficiencia incluso en las más pequeñas, encontrando cantidad de aerogeneradores con diferentes características dando la posibilidad de elegir el que más se adapte a las necesidades concretas de cada caso. Estas turbinas de menor tamaño utilizan el viento para generar e inyectar la electricidad de manera directa y, también muy importante, silenciosa. Al igual que ocurre con los paneles fotovoltaicos, los excedentes generados se pueden inyectar directamente a la red, cuya retribución dependerá de la compañía comercializadora contratada, o bien pueden ser almacenados si se dispone de baterías para un uso posterior en el que se requiera más electricidad que la generada en ese instante, logrando así aún más independencia de la red.

En cuanto a la generación fotovoltaica, proporciona energía durante las horas de luz obtenida a través de la radiación de los rayos del sol captada por los paneles, de manera igual de eficiente que la turbina. De nuevo, los excedentes se pueden inyectar a la red obteniendo el beneficio pactado, o bien almacenarlos para uso futuro.

La combinación de estas dos tecnologías produce grandes ventajas. Primero, la generación eólica es muy variable, dado que depende en cada instante de la cantidad y velocidad del viento captado. Esto se puede compensar gracias a la generación solar fotovoltaica, la cual produce de manera más constante, a pesar de depender también de un recurso natural. Además, se obtiene mucha más energía al llevar a cabo el proceso de generación de manera simultánea, alcanzando valores más altos y haciendo de este un entorno muy próximo al autoconsumo.

1.2 Objetivos y campo de aplicación

En este Trabajo de Fin de Grado se estudia el diseño en un entorno doméstico de una instalación de generación eólica que complemente a la solar fotovoltaica, para consumo propio, evaluando y determinando la mejor opción para la instalación, que aporte mayores beneficios tanto económica como eficientemente. Además, se estudia una estrategia de almacenamiento inteligente que optimice el rendimiento del sistema.

El objetivo es realizar un estudio de las diferentes alternativas que presentan los sistemas de generación eólica distribuida, así como su aplicación a los distintos tipos de prosumidores. Tras un análisis detallado de la instalación eólica, se lleva a cabo un estudio concreto y específico de su complementariedad con la tecnología de generación fotovoltaica.

Para comenzar se debe saber como base la situación del mercado de estas pequeñas turbinas en España, así como las ayudas y subvenciones que otorga el gobierno actual, para tener la capacidad de comparar y elegir los modelos de aerogeneradores de pequeña potencia más apropiados para el caso concreto de estudio. Se debe tener en cuenta tanto la variación de los precios del mercado de energías, como la inversión inicial requerida para la instalación propuesta en el proyecto y sus correspondientes gastos anuales por daños o mantenimientos. Tras ello, se valora el ahorro anual proporcionado por el sistema en comparación al momento previo a la instalación.

Se encuentran a la venta gran variedad de modelos de aerogeneradores en pequeña escala con características apropiadas para un entorno doméstico. Como primer filtro de búsqueda, se encuentran modelos con eje horizontal y otros con eje vertical. Tras buscar información y compararlos, se tiene que las turbinas de eje vertical son las más indicadas para un entorno urbano, dado que, si el lugar de instalación se encuentra rodeado de edificios que puedan interferir en la forma en la que el viento alcance al generador, en una turbina de eje horizontal se podrían producir turbulencias además de pérdidas de estabilidad. Por todo esto, el estudio se centra en los aerogeneradores de eje vertical, denominados VAWT's.



ILUSTRACIÓN 1. MODELOS DE AEROGENERADORES DE PEQUEÑA ESCALA, FUENTE: [1]

En la ilustración 1 se muestran los distintos tipos de aerogeneradores de pequeña potencia que se pueden encontrar en el mercado para una instalación en entorno doméstico. Como se ha indicado, tanto el primero como el tercer generador, los que tienen eje vertical, podrían resultar más eficientes para el caso estudiado.

Después de haber realizado el estudio de mercado y valorado las diferentes alternativas que ofrecen los fabricantes de aerogeneradores de pequeña potencia, se estudia la instalación que complementa esta tecnología con la solar fotovoltaica. La combinación de ambas fuentes de energía renovable hace posible el autoconsumo del usuario independientemente de sistemas de almacenamiento de energía. Se producen patrones de producción que permiten generar durante las horas de oscuridad, de modo que el prosumidor pueda llegar a ser independiente de la red eléctrica convencional durante todas las horas del día, a diferencia de una instalación únicamente fotovoltaica donde solo se genera durante las horas de sol.

Como caso concreto de simulación, se estudia la instalación de un aerogenerador de pequeña potencia complementando a un sistema de generación solar fotovoltaica ya instalado en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá, con vistas a implementar en un futuro este proyecto en la propia Universidad de forma real y mejorar así el sistema de generación renovable del edificio.

Además, se finaliza el proyecto añadiendo al sistema anterior una batería inteligente programada, de modo que resulte aún más eficiente el total de la instalación y poder ser verdaderamente independiente energéticamente de la red eléctrica convencional, almacenando los excedentes de energía generados para un uso posterior en lugar de inyectarlos a la misma.

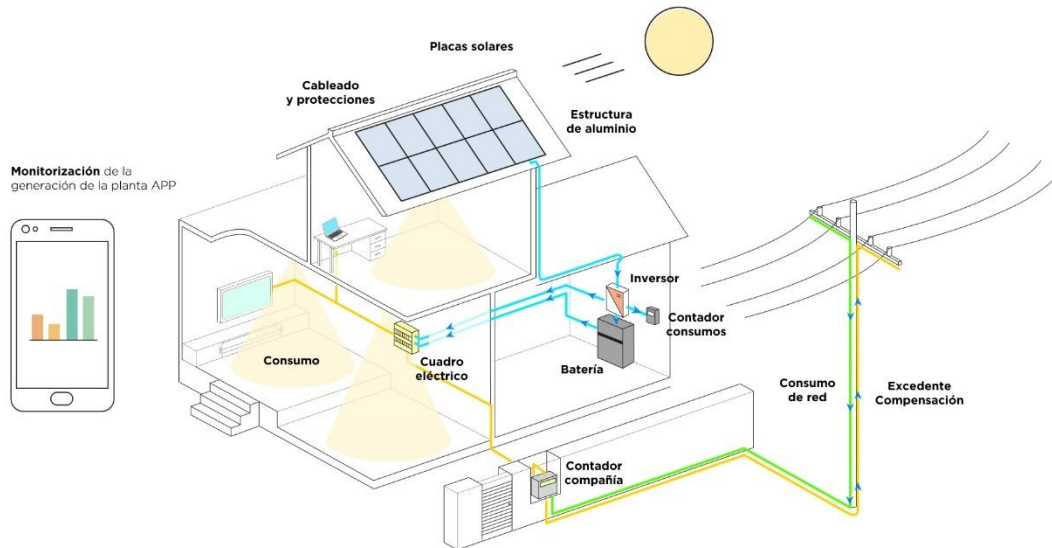


ILUSTRACIÓN 2. ESQUEMA DE INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON CADA ELEMENTO EMPLEADO, FUENTE: [2]

Como muestra la imagen de la Ilustración 2, el resultado final de una instalación de generación renovable, bien de paneles fotovoltaicos como en la ilustración o bien de aerogeneradores, cuenta con varios elementos a implementar en el edificio. Los rayos de sol absorbidos por los paneles fotovoltaicos en el caso expuesto, o el movimiento de las aspas del aerogenerador debido al viento en el modelo de instalación bajo estudio, envían la energía en forma de corriente continua hasta el inversor, aparato encargado de convertir esta en corriente alterna para aportar así electricidad a los electrodomésticos o la propia iluminación del hogar, entre otros. La generación de energía puede ser monitorizada en todo momento, así como el consumo producido.

Como elemento añadido aparece la batería, el cual no es necesario, pero sí resulta muy útil. Con esta se puede almacenar la energía producida que no se consume en el momento para tener la posibilidad de utilizarla más adelante en una situación de menor producción que consumo.

1.3 Estructura

Este proyecto se ha dividido en los siguientes capítulos.

Capítulo 1. Introducción:

Se plantea el proyecto y se hace una introducción, explicando detalladamente las motivaciones y aspectos generales que han llevado a la elección de este, además de los posibles campos de aplicación y los objetivos a alcanzar. Se incluye la estructura de la memoria y todas las herramientas empleadas para su realización.

Capítulo 2. Estado del arte de los aerogeneradores:

Se explican los avances y el desarrollo tecnológico de los aerogeneradores, haciendo un estudio general de la tecnología eólica seguido de un estudio concreto para la eólica a pequeña escala aplicable a un entorno doméstico, incluyendo los diferentes tipos de aerogeneradores apropiados para este tipo de instalaciones que se encuentran en el mercado.

Capítulo 3. Estudio de viabilidad de aerogeneradores en entorno doméstico:

Se hace un estudio de viabilidad mediante una instalación con generación eólica en un entorno doméstico conectado a red, sacando información y conclusiones de los resultados y gráficas proporcionados por el sistema a partir de los datos introducidos.

Capítulo 4. Combinación de fuentes de generación eólica y solar:

Al igual que en el capítulo anterior, se estudia la viabilidad de una instalación, en este caso se comienza por la simulación de generación solar fotovoltaica con conexión a la red de distribución. Tras esto, se repite el proceso combinando ambos tipos de generación, obteniendo una instalación híbrida solar y eólica. Con todas las simulaciones y resultados extraídos se lleva a cabo una comparación entre ellas y se determina la mejor opción para el prosumidor.

Capítulo 5. Implementación de batería inteligente en modo isla:

Se realiza un nuevo estudio de viabilidad, añadiendo un sistema de almacenamiento a la simulación anterior, en este caso sin conexión a red. Se tiene un escenario en el que el usuario es independiente de la red eléctrica convencional y se abastece mediante autoconsumo de su propia generación.

Capítulo 6. Emulación en prototipo de planta real fotovoltaica con almacenamiento:

Se obtienen datos de la potencia producida en la instalación real de la Escuela Politécnica Superior a lo largo un día concreto, y se contrastan con la supuesta potencia que producirían los aerogeneradores con los datos de viento extraídos para ese mismo día en un punto cercano a la facultad, el Encín de Alcalá de Henares. Se generan gráficas de la generación para hacer una comparación y se emula una batería para almacenar excedentes, con la que también cuenta la planta real.

Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros.

Se determina el modelo de instalación que resulta más eficiente para el prosumidor en un entorno doméstico, concluyendo si este sistema es viable y eficiente. Se valora la posibilidad de realizar en el futuro una evolución al sistema de generación de la facultad, implementando una serie de aerogeneradores en añadido a la instalación fotovoltaica actual.

1.4 Herramientas

Para la realización de este trabajo, se han empleado los siguientes medios:

- Microsoft Word. Empleado para la redacción de la memoria.

- Microsoft Excel. Utilizado para la obtención de datos a introducir en MATLAB, además de obtener la curva del aerogenerador elegido y trabajar con ella.
- Homer PRO. Se han realizado con este software todas las simulaciones que han servido de base para realizar los estudios de viabilidad de cada tipo de instalación. Los resultados obtenidos, como gráficas y datos económicos o energéticos, han sido los fundamentos principales para elaborar las conclusiones.
- Software MATLAB. Plataforma seleccionada para programar, con la que se han generado las gráficas del sistema emulado con la planta real, a partir de los datos introducidos e interpolados con la ayuda de Excel.
- Unidad de generación distribuida (DER) desarrollada por el grupo de investigación GEISER en el proyecto Helios []. Planta real de la que se han extraído datos para la emulación del sistema híbrido.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE LOS AEROGENERADORES

En este capítulo se estudia el desarrollo de los aerogeneradores de pequeña potencia para entornos domésticos en la actualidad.

2.1 Evolución de la energía eólica en España

En los últimos años, el estado del arte de los aerogeneradores se ha impulsado y ha avanzado notablemente en cuanto a eficiencia, dimensiones y tecnología. Actualmente se pueden encontrar en el mercado gran variedad de estas turbinas, con diferentes características para seleccionar la que mejor se adapte a las necesidades de cada usuario.

Comúnmente los aerogeneradores son muy conocidos en España por los grandes molinos de viento de aspas oblicuas de unos 20 metros de largo, los cuales suelen alcanzar velocidades entre 12 y 20 revoluciones por minuto.

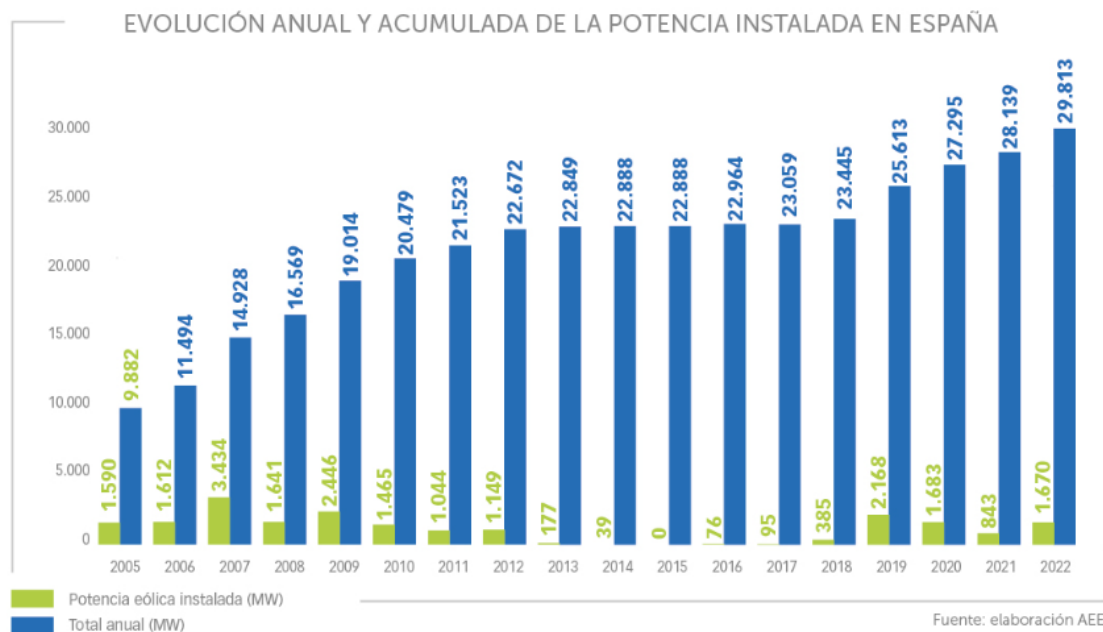


ILUSTRACIÓN 3. EVOLUCIÓN ACUMULADA Y ANUAL DE LA POTENCIA EÓLICA INSTALADA EN ESPAÑA HASTA 2022, FUENTE: AEE

Según la Ilustración 3 extraída de la página web de la Asociación Empresarial Eólica (AEE), en España hay 1.345 parques eólicos, los cuales suman en su conjunto un total de 22.042 aerogeneradores. En el año 2022, la potencia eólica instalada se quedó muy cerca de los 30 GW, con una instalación en ese último año de más de 1,6 GW, el doble de lo instalado en 2021. A pesar de esta evolución positiva, las cifras quedan lejos de lo requerido para cumplir los

objetivos marcados por el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), el cual marca como propósito una instalación eólica anual de 2.500 MW.

La Unión Europea propone alcanzar en el año 2050 una economía próspera y climáticamente neutra, de modo que solicita a cada estado miembro llevar a cabo un PNIEC. Se trata de un proyecto con fin a nivel europeo como respuesta a la crisis climática, pues otros países siguen planes similares, así como el ‘Acuerdo de París’.

El PNIEC tiene como finalidad reducir en un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a los datos de 1990 de cara a 2030, buscando alcanzar en este año un 32% de renovables sobre el total del consumo de energías, así como un 32,5% de mejora en la eficiencia energética y un 15% de interconexión eléctrica entre los estados miembros de la Unión Europea [3].

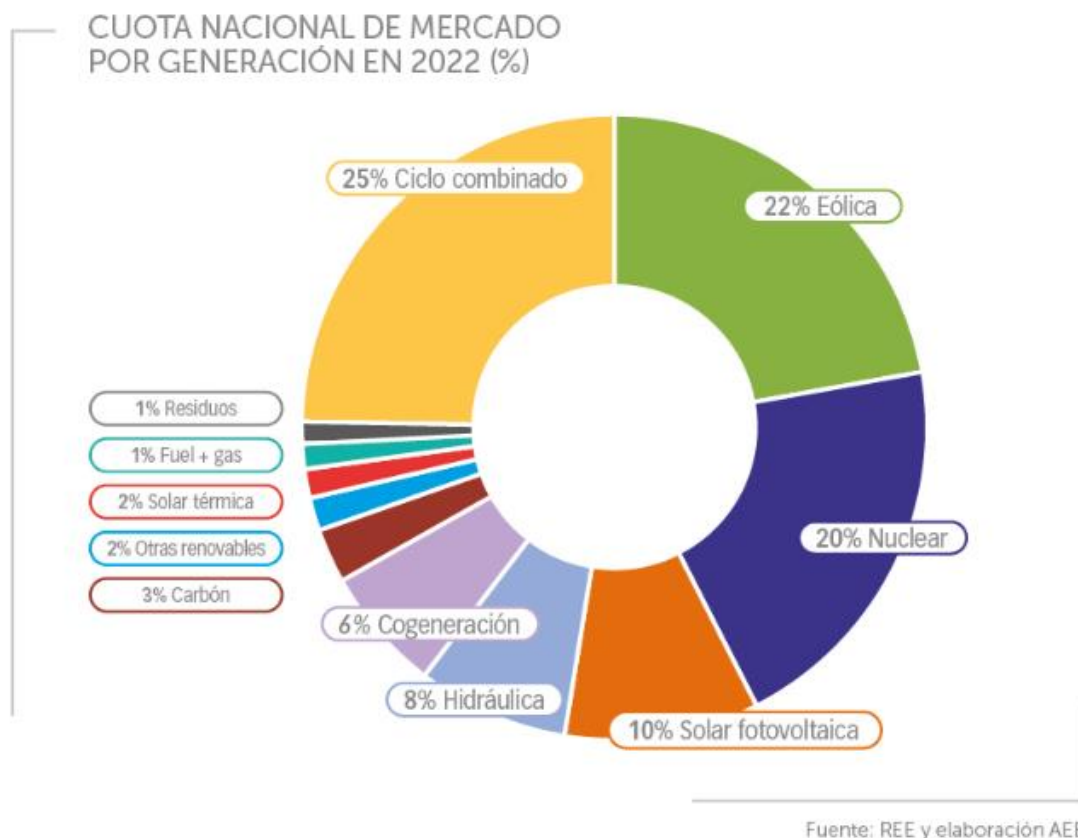


ILUSTRACIÓN 4. PORCENTAJES DE GENERACIÓN DE LAS DIFERENTES ENERGÍAS EN ESPAÑA EN 2022, FUENTE: AEE

Según los datos obtenidos de la AEE mostrados en la Ilustración 4, se concluye que la generación de energía eólica sigue al ciclo combinado muy de cerca, siendo las pioneras en el país. Estas dos junto a la energía nuclear y a la solar fotovoltaica, conforman más de tres cuartos del total de energía generada en España en 2022.

Según un estudio presentado en el informe ‘Remedable Energy Country Attractiveness Index’ (RECAI) [4], España se mantiene dentro del ‘top 10’ entre los países de todo el mundo como uno de los estados más apropiados para la inversión en energías renovables, manteniendo el octavo puesto en el año 2023.

España se posiciona como una de las mayores potencias de toda Europa en cuanto a instalación de energías renovables, habiendo añadido solo en 2022 un total de 5,9 GW de potencia con generación renovable, logrando que más de la mitad de la potencia total instalada en el país provenga de fuentes de energía renovables.

Con estos datos, el país se posiciona en segundo lugar de Europa en producción de energías renovables. En concreto, la energía eólica supone la mayor generación entre las renovables en España, produciendo casi el doble que la energía hidráulica y el triple que la solar fotovoltaica.

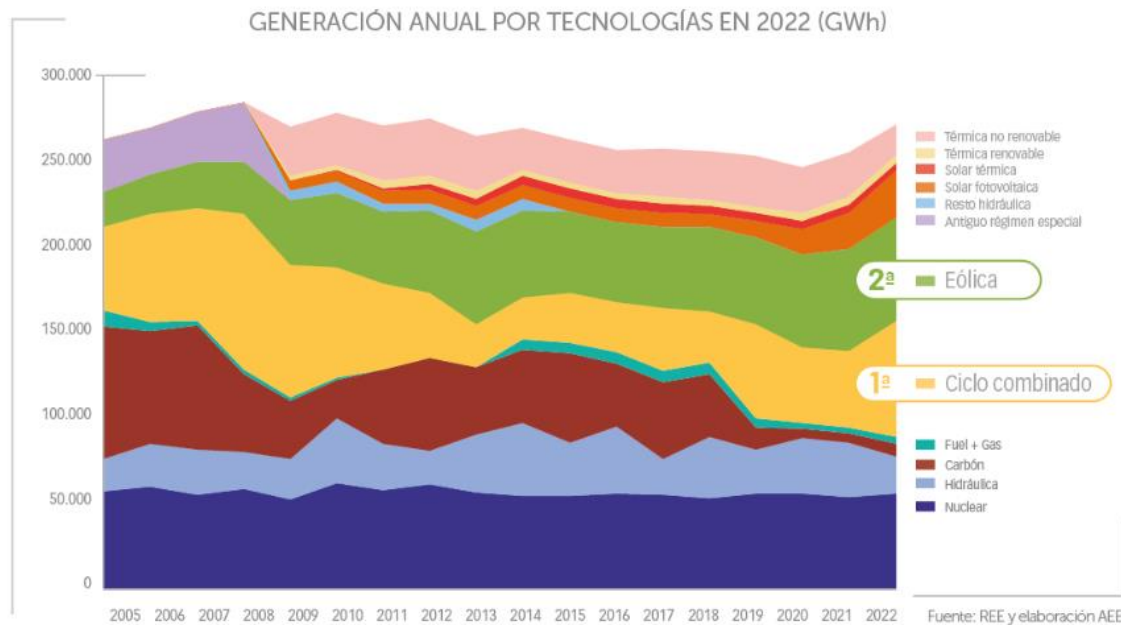


ILUSTRACIÓN 5. EVOLUCIÓN ANUAL DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA SEPARADO POR TECNOLOGÍAS, FUENTE: REE

En la Ilustración 5 se observa de nuevo como en 2022 la energía eólica alcanza la segunda posición después del ciclo combinado. Además, destaca la evolución a lo largo de los años de la generación a partir del carbón, con una caída en picado desde el año 2019, a partir del que se comienzan a implantar leyes para disminuir el uso de combustibles fósiles y reducir así la contaminación y emisiones que esto conlleva.

Las energías renovables forman uno de los papeles más importantes en la lucha contra el cambio climático, en busca de una red eléctrica basada en una generación de energía libre de emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes que destruyen directa e indirectamente el planeta. Aunque se debe tener en cuenta que no se puede depender únicamente de las energías renovables, sí resulta muy interesante el objetivo de que estas conformen una gran mayoría entre todas las tecnologías instaladas. Algunas de las no renovables muestran un patrón de generación ininterrumpida de energía, lo que las hace necesarias para su combinación con la posible producción intermitente de las tecnologías renovables, dependientes de factores no controlados como el sol, el viento o la lluvia.

2.2 Generación eólica en entorno doméstico

Como se ha visto, en España se aprovecha gran cantidad del viento para generar energía, empleando para ello parques eólicos con aerogeneradores de gran tamaño. Sin embargo, aún no está extendido en el país la generación de energía eólica para entornos urbanos, desaprovechando el potencial de la eólica como método para aportar a la red de distribución, de igual manera que sí se ha expandido de forma disparada la instalación de paneles fotovoltaicos en entornos domésticos en los últimos años.

Las instalaciones de energía eólica de menor capacidad muestran diversas ventajas adicionales en comparación con los sistemas eólicos a gran escala. Una de estas ventajas es lograr una eficiencia global superior, gracias a la minimización de las pérdidas en su paso por las redes de transporte y distribución de energía. Esto, a su vez, facilita la incorporación de fuentes renovables de generación sin requerir la implementación de nuevas infraestructuras eléctricas. Además de esto, estas instalaciones pueden fomentar la mentalización de la sociedad en el progreso de la eficiencia energética, la autogeneración de energía y la mitigación del cambio climático [5].

Muchos otros beneficios de la generación eólica a pequeña escala pueden ser:

- Generación y autoconsumo en zona remota a la red eléctrica.
- No requiere de una velocidad del viento elevada para la generación, con un funcionamiento viable en prácticamente cualquier entorno.
- Pequeño tamaño que no afecta en la estética de la zona, además de producir muy poco ruido para no resultar molesto en la vida cotidiana.
- Gran fiabilidad y eficiencia, con muy bajo coste de instalación y mantenimiento.
- Posibilidad de autoconsumo para el usuario e inyectar a red excedentes producidos, así como almacenar en baterías para un uso futuro.

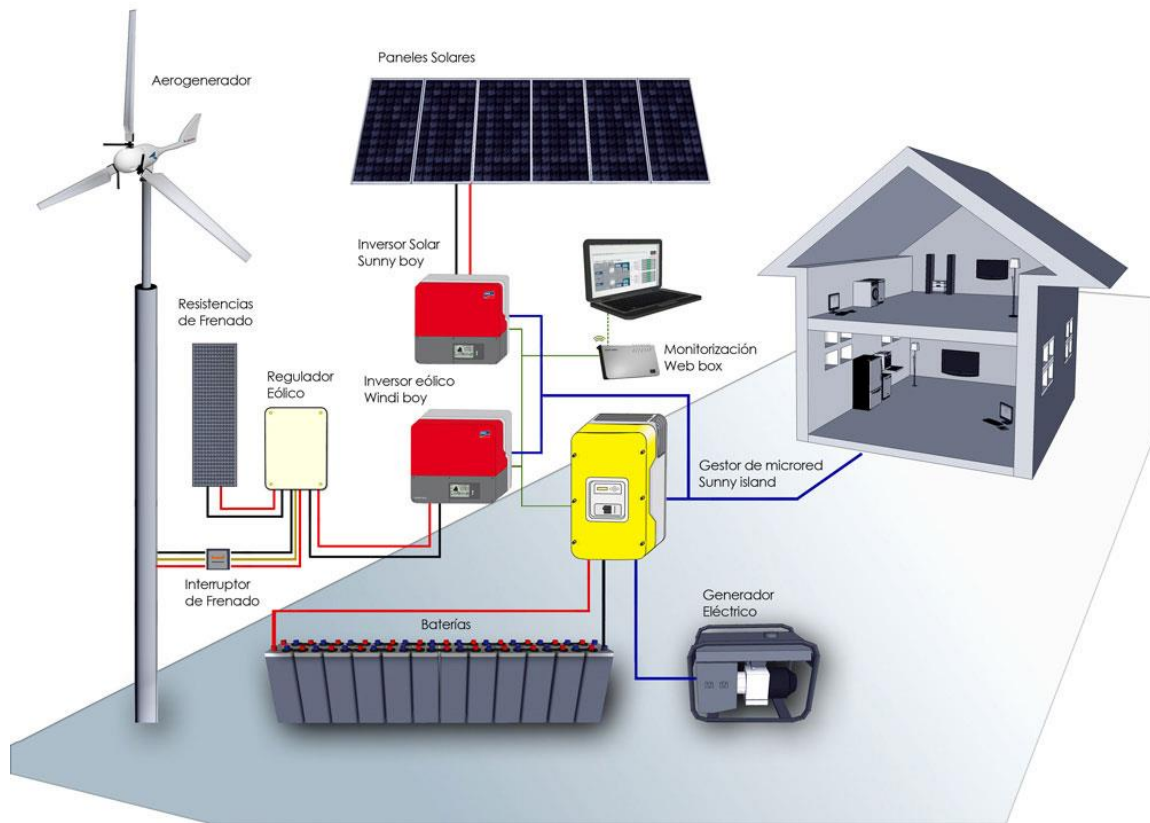


ILUSTRACIÓN 6. SISTEMA AISLADO CON GENERACIÓN EÓLICA Y SOLAR FOTOVOLTAICA, CON SISTEMA INTELIGENTE DE ALMACENAMIENTO Y POSIBILIDAD DE VENTA DE ENERGÍA A RED, FUENTE: [6]

En la ilustración 6 aparece un esquema ejemplo de un sistema aislado doméstico de generación solar fotovoltaica y eólica. Como se ha visto previamente, los paneles fotovoltaicos requieren la presencia de un inversor para convertir la corriente continua generada al absorber los rayos de sol que les inciden, aportando la corriente alterna que se necesita para aportar electricidad a un hogar. De igual manera, en esta instalación el aerogenerador cuenta con un inversor eólico, aunque no es necesario en todas las ocasiones, pues el aerogenerador puede inyectar directamente la corriente alterna al sistema de electricidad, por lo que dependerá del tipo de instalación y sus elementos. Además, cuenta con un regulador unido a las resistencias de frenado que conforman el sistema de frenado junto al interruptor, garantizando que el sistema se detendrá de manera automática e inmediata en caso de percibir que algún componente fundamental no trabaja adecuadamente.

Estas instalaciones disponen de un sistema multi-agente (SMA), pues aparece un gestor de microrred que hace de las baterías un elemento inteligente, de modo que se gestione el flujo energía y no llegue a almacenarse cuando no sea necesario, en el caso de ser consumida en el momento. Dependiendo del tamaño de la instalación, se pueden llegar a cubrir las necesidades energéticas de un gran espacio de viviendas y centros, o bien de una única residencia.

2.3 Tipos de aerogeneradores domésticos.

Al investigar el mercado de aerogeneradores actual, se encuentra gran variedad a pesar del poco conocimiento sobre este tipo de instalaciones en España. Como se ha dicho, en primer lugar, se diferencian según la orientación de su eje del motor, centrandó este estudio en aquellos de eje vertical (VAWT's). Estos, tanto con el eje como las palas perpendiculares al suelo, son más eficientes para un bajo rendimiento por lo que resultan ideales en instalaciones de baja potencia. Además, no necesitan un sistema de orientación por lo que no tienen por qué tener mucha altura y pueden instalarse en cualquier terreno.

Los distintos modelos de aerogeneradores de eje vertical se dividen en varios grupos [7]:

- Aerogeneradores basados en el principio de sustentación.

Tienen una alta frecuencia, pero requieren de un flujo de aire elevado para iniciar la rotación de sus palas, haciendo que el tiempo de arranque sea mayor de lo deseado.

✚ Darrieus:

Posee dos o tres palas curvas y opuestas entre sí colocadas verticalmente con movimiento giratorio sobre su eje siguiendo una trayectoria circular, siendo posible el cambio de dirección obteniendo la misma eficiencia en ambos sentidos. Su nombre se debe al ingeniero Darrieus, quien las diseñó.



ILUSTRACIÓN 7. AEROGENERADOR DARRIEUS, FUENTE: [8]

El aerogenerador Darrieus, mostrado en la Ilustración 7, necesita un rotor o impulso para arrancar comenzando por transformar una energía mecánica en eléctrica, además de sensores para garantizar la estabilidad del conjunto de su estructura. Son los más empleados del mercado por su buena calidad, sus resultados de generación y su pequeño tamaño. La velocidad que pueden alcanzar las aspas es mucho mayor que la que permiten los aerogeneradores de tipo arrastre, pero se quedan lejos de las velocidades típicas de una turbina de eje horizontal. Son interesantes a la hora de buscar un generador para alimentar incluso dispositivos de poco tamaño como televisiones u otros electrodomésticos. Una desventaja de este tipo de turbinas es que tienen un mantenimiento complicado y costoso ya que se debe desmontar prácticamente por completo para el cambio de alguna pieza principal.

✚ Giromill o H-Rotor:


Rotor de nuevo más eficiente que los que siguen el principio de arrastre estudiados a continuación. Este también fue patentado por Darrieus, y consta de palas rectas verticales unidas al eje mediante pequeños brazos perpendiculares al mismo, como se muestra en la Ilustración 8. Son capaces de suministrar entre 10 kW y 20 kW, y producir energía en muy poco tiempo por la gran velocidad mecánica que alcanzan las palas. Pueden cambiar el sentido de giro al igual que el modelo anterior, dependiendo de la orientación del viento. Son ideales para alimentar aparatos de potencias bajas debido a que alcanzan velocidades desde 3 m/s hasta 25 m/s. Como desventaja aparece el coste algo elevado y la necesidad de mantenimientos preventivos periódicos por el mayor desgaste al girar en doble sentido. Como el caso anterior, no alcanzan una producción elevada como los de eje horizontal por lo que resultan apropiados para espacios más pequeños.



ILUSTRACIÓN 8. AEROGENERADOR GIROMILL, FUENTE: [9]

- Aerogeneradores basados en el principio de arrastre.

Este tipo de turbinas absorbe la velocidad del viento por arrastre, pero no suelen ser muy eficientes. Este modelo aprovecha menos la fuerza del viento, no logrando extraer tanta energía como las que siguen el principio de sustentación.

 Savonius:

Son uno de los modelos más simples y económicos del mercado, mostrado en la Ilustración 9, inventadas por el ingeniero Savonius. Están formadas por un único cilindro hueco rotado en torno a un eje vertical con dos o tres palas. Desde una vista de planta, se observa que tienen forma de 'S' que hace posible el giro con bajas velocidades de viento. Su configuración provoca que tengan una única dirección de giro, perdiendo aquí gran eficiencia. Destaca que tienen un uso muy sencillo y soportan bien las turbulencias al ser más compacta que las anteriores, aptas para necesidades de carga muy reducidas. Los puntos en contra a destacar de este modelo son su bajo rendimiento ante grandes demandas de energía, siendo poco eficiente para alimentar electricidad, y su giro unidireccional.



ILUSTRACIÓN 9. AEROGENERADOR SAVONIUS, FUENTE: [10]

- Aerogeneradores mixtos.

Consiste en unos aerogeneradores que mezclan ambos principios expuestos.

✚ Savonius-Darrieus:

La turbina Savonius que aparece en la Ilustración 10 puede proporcionar el par de arranque necesario para iniciar el movimiento de del Darrieus, haciendo de ambos una combinación atractiva. Las principales ventajas de este aerogenerador son la mayor eficiencia para una velocidad de arranque muy pequeña.



ILUSTRACIÓN 10. AEROGENERADOR HÍBRIDO SAVONIUS-DARRIEUS, FUENTE: [11]

La siguiente tabla clasifica los diferentes modelos explicados en función de factores como el principio que siguen para la generación de energía o la velocidad de arranque requerida.

Aerogenerador	Principio	Velocidad <i>Cut-in</i>	Cp	Integración Arquitectónica
Darrieus	Sustentación	Mala	Bueno	Buena
Giromill		Buena	Muy Bueno	Mala
VGOT		Buena	Muy Bueno	Muy Mala
Crossflex		Buena	Bueno	Muy Buena
Savonius	Arrastre	Muy Buena	Malo	Buena
Sistan		Buena	Malo	Buena
Zephyr		Buena	Malo	Buena
Banki		Buena	Malo	Mala
Savonius-Darrieus		Mixto	Muy Buena	Bueno

ILUSTRACIÓN 11. CLASIFICACIÓN DE TURBINAS POR TIPO DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS, FUENTE: [12]

En segundo lugar, cabe distinguir los aerogeneradores por su tamaño, en función de la potencia que generan:

- Microturbinas: entre 50 W y 3 kW.

Pueden ser empleadas para este proyecto, ya que son ideales para emplearse en entornos domésticos por su reducido tamaño, con palas desde 1 hasta 5 metros de longitud de diámetro, y bajo nivel de ruido, necesario en zonas habitadas. A pesar de esto, son capaces de alcanzar velocidades de rotación de las palas elevadas y adaptarse a las necesidades con un sistema de frenado. Además, la producción de electricidad directamente en corriente alterna evita la necesidad de instalar un inversor de corriente.

- Turbinas de baja potencia: entre 3 kW y 50 kW.

Este tipo también pueden ser utilizadas para este estudio. Similares a las microturbinas, pero con potencia instalada más elevada. Suelen emplearse en los casos de generación combinada con otra tecnología, como la instalación híbrida estudiada en este proyecto solar y eólica. Soportan velocidades superiores que las anteriores.

- Grandes aerogeneradores: entre 200 kW y 850 kW.

Entre estos destacan los de eje horizontal comúnmente conocidos, de gran generación y tamaño, con diámetro de las palas de hasta 50 metros. Suelen contar con sistemas de control para regular la potencia del rotor dependiendo de la velocidad del viento. Inyectan la electricidad producida directamente a la red.

- Aerogeneradores multimegawat: entre 1 MW y 3 MW.

De nuevo, tienen eje horizontal al suelo y, en este caso, diámetros de 50 a 90 metros, además de su gran altura alcanzando hasta 100 metros. Como los anteriores, se utilizan para inyectar la generación a la red.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE VIABILIDAD DE AEROGENERADORES EN ENTORNO DOMÉSTICO

En este capítulo se estudia la simulación realizada mediante el software Homer Pro de una instalación eólica para un entorno doméstico, y posterior conclusión de beneficios que aporta al prosumidor una implementación de este tipo.

3.1 Simulación en Homer Pro

En primer lugar, en la pestaña Design se selecciona la ubicación bajo estudio, en este caso la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá. Se introducen otros factores como la carga eléctrica de la instalación y el perfil de demanda.

Se selecciona la pestaña de carga eléctrica y se importa un archivo de datos de un perfil doméstico obtenidos del año 2021, con datos muestreados cada hora, mediante los que se obtiene un análisis del perfil de carga.

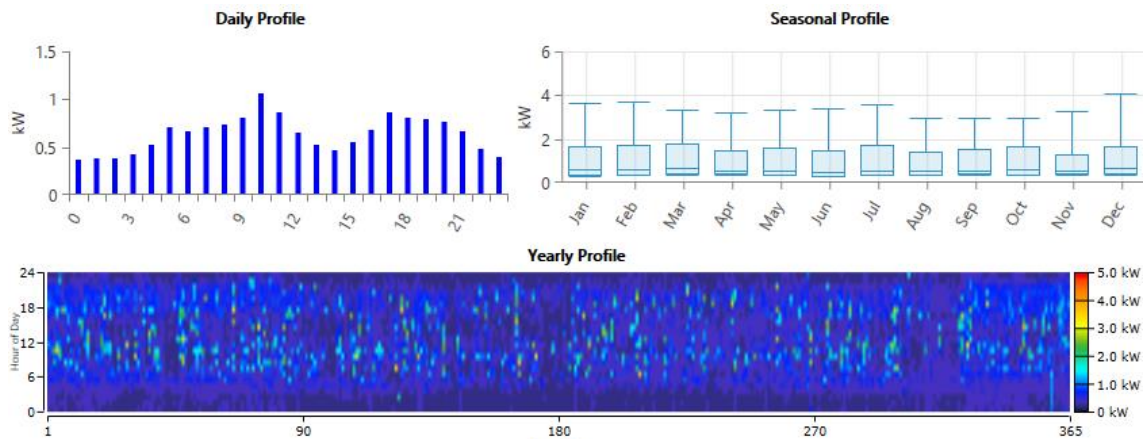


ILUSTRACIÓN 12. PERFIL DE CARGA DOMÉSTICO

En la Ilustración 12 se muestran los gráficos resultantes del perfil de carga del archivo importado al programa. En primer lugar, el gráfico de columnas para el perfil diario muestra dos picos de subida en la demanda, tanto a las 10 de la mañana como cerca de las 17 horas de la tarde, con un claro descenso tanto al mediodía por los descansos para comer y tras la comida, y durante toda la noche, pues a estas horas los hogares consumen y requieren menos energía. A continuación, se muestra un gráfico de cajas y bigotes mensual, con el cual se observan las diferencias de demanda media dependiendo de la temporada del año. Durante los meses de verano la media se mantiene próxima a los 0.55 kW/día, mientras que el resto del año ronda los 0.65 kW/día. Además, se observan de forma clara los valores máximos alcanzados cada mes, con el valor máximo de 4.07 kW ubicado en el mes de diciembre. Por último, en el mapa de calor se refleja en un total anual la frecuencia de cada valor alcanzado en función de la hora del día y el día del año, encontrando de nuevo que las horas de noche

son más oscuras, próximas a 0 kW, mientras que desde el amanecer hasta la puesta de sol se muestra variedad de colores por la distinta demanda en cada caso.

Se incluye también la conexión a red, denominado Grid en Homer, junto con la base de datos de precios de compra y venta de energía de 2021 extraídos de ESIOS [13]. El archivo debe ser en formato de texto, y estar formado por dos columnas, la primera para los precios PVPC (precio voluntario para el pequeño consumidor) y la segunda para el precio de los excedentes, con valores tomados cada hora del año 2021. Importando esta información, HOMER proporciona los siguientes mapas de los precios tanto de compra como de venta de energía a red eléctrica.

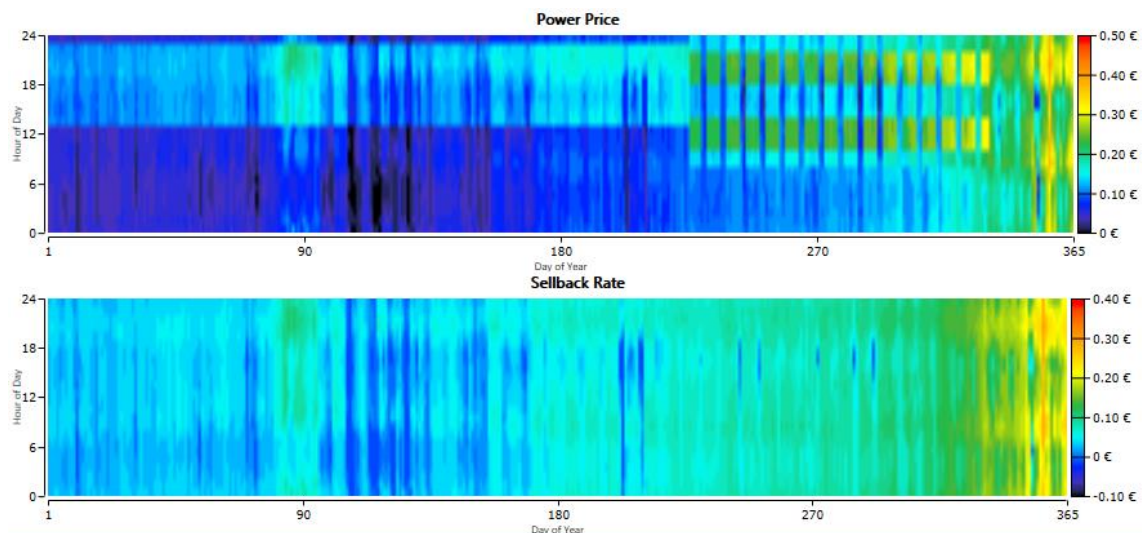


ILUSTRACIÓN 13. MAPAS DE CALOR DE LOS PRECIOS DEL MERCADO DE COMPRA Y VENTA DE ENERGÍA

En el primer mapa de calor que muestra la Ilustración 13 se representa el precio de la energía en función del día del año y la hora, mostrando franjas horarias distinguidas. El año 2021 comienza con los precios bastante elevados debido a la tormenta Filomena, aunque esto se regula hasta el mes de mayo, cuando se vuelven a disparar. Durante los dos primeros cuatrimestres, desde pasado el mediodía y hasta cerca de la medianoche, se encuentra un tramo concentrado de precios más elevados que en las horas restantes, pues durante la tarde debe ser el momento más caro del día. Desde el comienzo del último cuatrimestre del año, los precios continúan en aumento como secuela de la pandemia, siendo el año 2021 el más caro de la historia. El último mes del año concentra precios muy elevados, debido a la subida disparada de los precios de la electricidad en toda Europa por el encarecimiento del gas.

En el segundo se muestra el precio de venta de la electricidad, estudio en el que de nuevo se refleja una primera mitad de año con precios más bajos, destacando entre estos la subida de precios del mes de mayo, y una clara subida según avanzan los días, con un fin de año muy elevado, de nuevo por la subida de precio del gas. Además, cabe destacar que el precio de venta se encuentra en un abanico de precios algo menor, pues la energía se vende más barata que su precio de compra. A pesar de esto, no hay una clara distinción horaria a diferencia del mapa de precios de compra.

Promedio de las medias mensuales del precio de la electricidad

Hasta julio de cada año, en euros por MWh

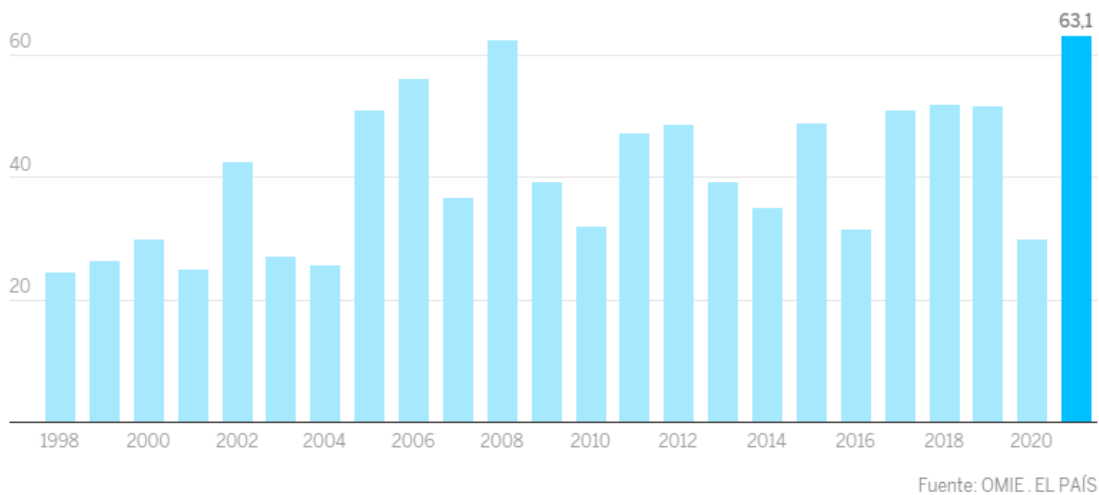


ILUSTRACIÓN 14. PRECIO MEDIO ANUAL EN ESPAÑA DE LA ELECTRICIDAD DE LOS PRIMEROS SIETE MESES DE CADA AÑO DESDE 1998 HASTA 2021, FUENTE: [14]

Como se explica en la noticia citada de El País de la que se ha extraído la Ilustración 14, en el año 2021 se bate el récord de precio por MWh de la historia con una media de 63,1 €/MWh, siendo el histograma mostrado con estudio únicamente hasta julio en cada año, superando incluso los precios durante la crisis financiera de 2008, año en el que se alcanzó la media de 62,4 €/MWh en España.

Para continuar configurando el programa, se accede a la siguiente pestaña donde se añade una fuente de energía renovable, en este caso una turbina de viento de 3 kW. Se ha seleccionado una genérica de dicha potencia, pues resulta muy similar a las turbinas reales encontradas en el mercado más eficientes y económicas, es decir, con mejor relación calidad-precio. Hay que tener en cuenta y añadir valores como la estimación de 20 años de vida por turbina, así como una inversión inicial de 3.000€ y un coste de mantenimiento de 180€/año.

Para obtener resultados útiles y realistas, se deben configurar también los factores económicos que influyen en el proceso. Se añade una tasa de descuento nominal del 6%, una tasa de inflación esperada del 3% y 25 años de vida del proyecto, además de añadir el euro como moneda empleada. Con estos valores, se obtiene una tasa de descuento real del 2.91%.

Tras estos pasos, falta aplicar una base de datos con parámetros de viento, la cual se obtiene con ayuda del programa mediante la opción 'Descargar de Internet', con datos separados en bloques por media mensual. Con todo esto, Homer Pro proporciona una serie de gráficos y tablas en el apartado de resultados concluyendo el número de turbinas ideal a instalar. Resulta muy interesante dado que el programa ordena las opciones de mejor a peor, y dentro de cada una se pueden sacar distintos tipos de gráficos que ayudan a obtener una visión clara de los beneficios y fechas concretas en las que se saca mayor partido a las instalaciones seleccionadas en cada caso.

3.2 Resultados

Como resultado de la simulación expuesta, se obtienen diversidad de tablas y gráficas que facilitan la interpretación del proyecto.

El programa resalta como mejor opción la instalación de tres aerogeneradores de potencia 3 kW cada uno, teniendo un total de instalación mediante la tecnología eólica de 9 kW. Esto sería el resultado óptimo para abastecer al usuario con el perfil de carga introducido, siendo necesaria la aportación de la red eléctrica para cubrir estas necesidades. Se presentan otros escenarios además del que determina ser el más eficiente, que se estudian para decidir si el seleccionado es realmente la mejor opción.

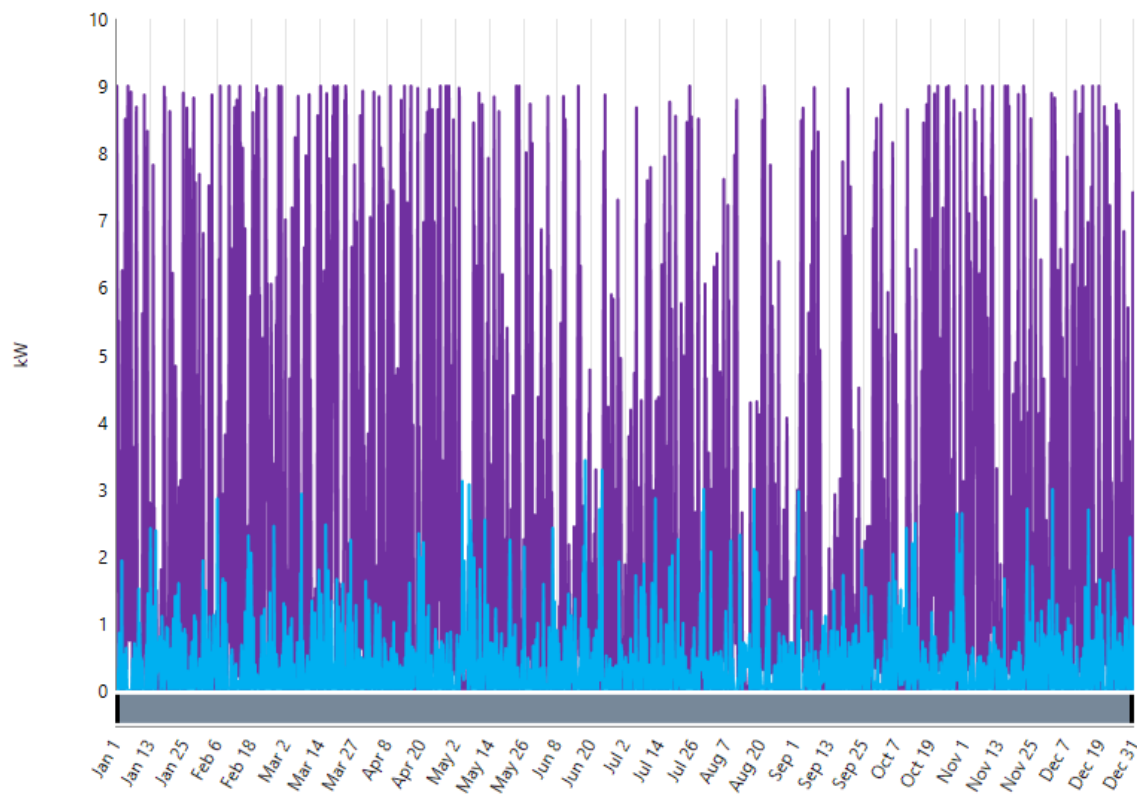


ILUSTRACIÓN 15. POTENCIA DE SALIDA TOTAL PROPORCIONADA POR LOS AEROGENERADORES SELECCIONADOS A LO LARGO DEL AÑO 2021 (MORADO) Y COMPRA DE ENERGÍA A LA RED (AZUL)

Se muestra en la Ilustración 15 el total aportado por los tres aerogeneradores durante el año 2021, pintada de morado esta tecnología. Se observa que se alcanza el máximo de 9 kW en numerosas ocasiones, aunque también se percibe que durante la temporada de verano disminuye notablemente la generación, provocando la aparición de grandes huecos en la parte central de la gráfica, pues muchos días de calor la velocidad del viento se reduce y, con ella, la generación. Destaca la gran aportación de energía al sistema por parte de la instalación eólica, aunque debe ser complementada prácticamente todos los días del año por la compra a red eléctrica, mostrada en azul. Esta segunda aportación de electricidad alcanza un valor máximo de 3.42 kW en el día 18 de junio, fecha en la que se muestra baja velocidad del viento.

Se observa que la generación de energía eólica es mayoritaria frente a la aportación de la red, y podría valorarse la opción de añadir un aerogenerador más, logrando la suma de 12 kW de potencia instalada. Sin embargo, esta opción no resulta económicamente eficiente y es preferible contar con la contribución de la red eléctrica, pues con este generador extra se producirían muchos más excedentes de energía. En el sistema de instalación planteado en este apartado, sin posibilidad de almacenamiento de energía, no es rentable inyectar a la red tantos excedentes pues el precio de venta es mucho menor, y resulta preferible comprar la electricidad cuando se produzca menos de lo consumido.

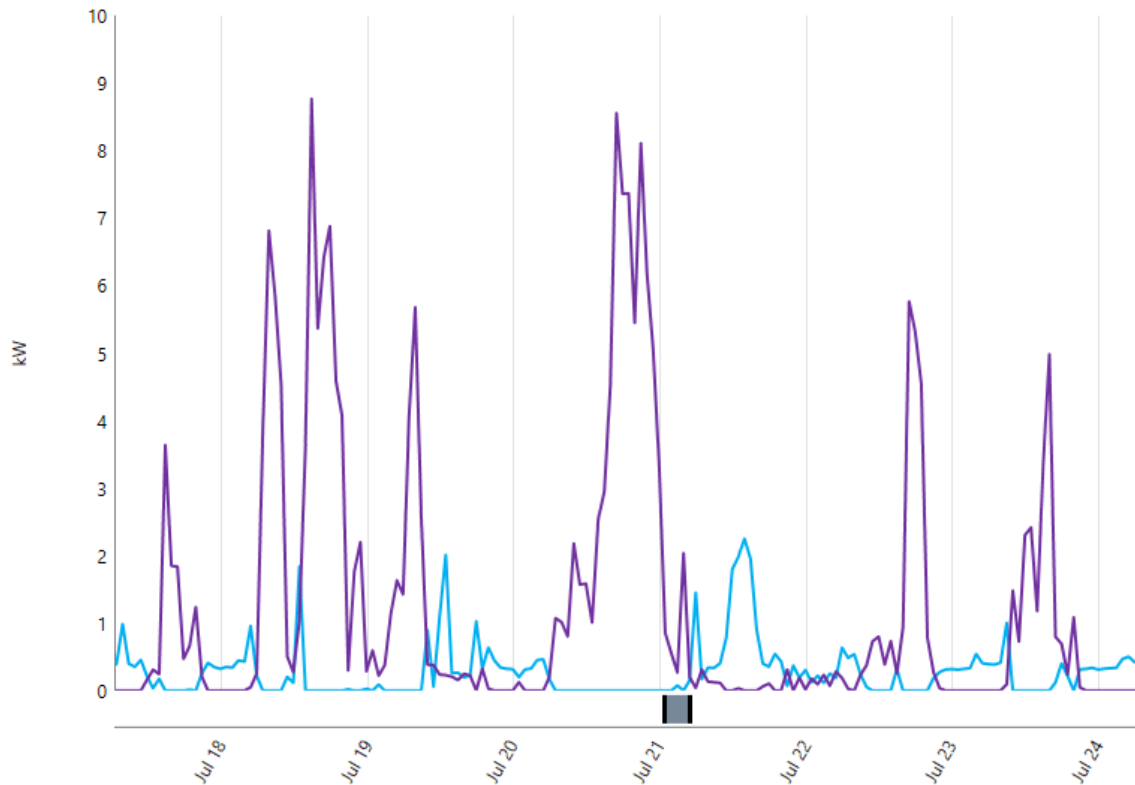


ILUSTRACIÓN 16. GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN kW (MORADO) Y APORTACIÓN DE LA RED (AZUL) DURANTE LA TERCERA SEMANA DEL MES DE JULIO DE 2021

En el caso concreto de una semana de verano, se observa en la Ilustración 16 que se alcanzan valores muy próximos a los 9 kW únicamente en dos ocasiones, teniendo el resto de los días una generación bastante pequeña. Esto se debe a la escasez de viento durante las temporadas más calurosas del año. Resulta muy llamativa la irregularidad de la gráfica, mostrando una gran variabilidad de generación y su evidente dependencia directa con la velocidad del viento, concluyendo que no resulta óptimo depender únicamente de esta fuente de energía renovable si se desea lograr autoconsumo e independencia total de la red, pues parcial y ocasionalmente se requeriría un aporte de energía alternativo, como ocurre en semanas como la expuesta. Como marca la línea azul, la compra de energía aumenta los días que se muestra menos generación eólica para cubrir los consumos de electricidad.

Al ver esto, otra opción interesante que se estudia más adelante sería contar con una o varias baterías inteligentes que almacenen los excedentes para poder emplearlos en días de poco viento en los que el consumo supere la potencia generada en el momento, como en los casos

observados en las gráficas anteriores. Este nuevo elemento podría hacer lograr al prosumidor ser totalmente independiente de la red si así lo deseara.

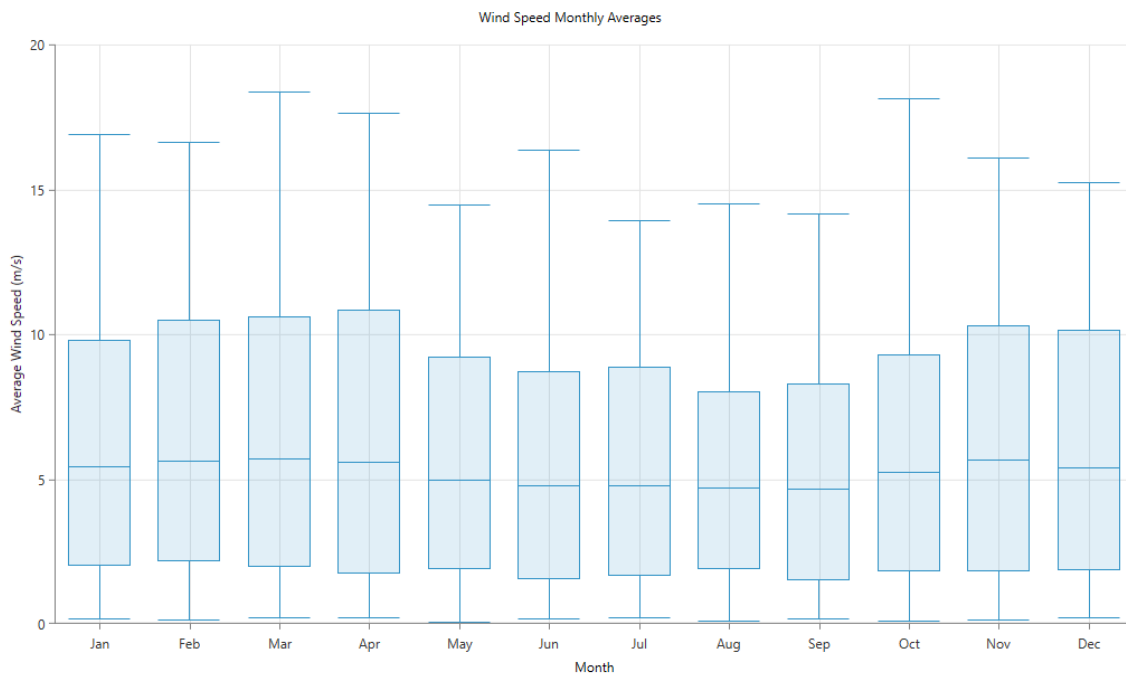


ILUSTRACIÓN 17. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN M/S Y SUS VALORES MÁXIMOS POR MESES

La gráfica mostrada en la Ilustración 17 presenta los datos mensuales de la velocidad del viento captada por la instalación. Es destacable la disminución durante los meses de verano de la velocidad media del flujo del aire, con valores superiores entre octubre y abril, alcanzando la media más alta en el mes de marzo con una velocidad de 5.73 m/s. Además, los días en los que se registró más viento se encuentran en marzo y octubre, cuyos valores máximos percibidos son 18.38 m/s y 18.16 m/s respectivamente. El valor mínimo de la velocidad del flujo de viento captado en 2021 se produce en el mes de mayo, con un valor de 0.05 m/s.

Se presencian patrones estacionales claros a lo largo del año al observar, como se ha dicho, cómo la velocidad del viento es más alta o baja dependiendo de la temporada. Esto se debe a los cambios climáticos propios de cada estación, con condiciones meteorológicas que benefician o no a la generación.

Según la fundación DKV [15], “Estudios recientes apuntan a que la circulación atmosférica, los gradientes de temperatura y la presión entre el océano y la atmósfera podrían ser el factor más determinante sobre la velocidad del viento”. No se tienen datos concluyentes pues el viento es muy variable y complejo, lo que dificulta sacar conclusiones claras, pero se ha deducido que a mayor variación de temperatura o presión en un punto determinado. Esto, quiere decir que, si la diferencia de temperatura entre el océano y la tierra es menor, lo cual ocurre en verano con una temperaturas más cálidas en el agua que varían menos que las de la costa, la velocidad del viento también sería menor. En cambio, en invierno con una baja temperatura en el océano, pero siendo bastante superior en la tierra, sí se produce una variación que incremente la velocidad.

Como punto añadido de problema debido al calentamiento global, la temperatura del agua del mar aumenta cada año y lo indicado en el estudio concluiría un descenso en la velocidad del viento. Sin embargo, en el informe se exponen datos que dicen todo lo contrario: la velocidad del viento ha aumentado en los últimos años. Una posible explicación a esta contradicción puede ser que el propio cambio climático, al derretir los polos, disminuya la temperatura de los océanos y se contrarreste así este aumento en los gradientes de temperatura.

Según los datos proporcionados por el programa en este resultado con 9 kW de potencia total instalada a partir de aerogeneradores, se observa que todos los meses se alcanza este valor máximo como salida de potencia. En cuanto a las medias mensuales, se vuelve a concluir una menor generación durante los meses de verano, por menores velocidades del viento, y un aumento en meses algo más fríos. La curva que forman los valores de generación de potencia mediante la tecnología eólica tiene una forma similar a la representada en la ilustración 12 con las medias de velocidad del viento en cada mes. De nuevo el mes con mayor media de potencia generada coincide en marzo, con 2.12 kW producidos.



ILUSTRACIÓN 18. MEDIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO POR MESES EN FUNCIÓN DE LA HORA DEL DÍA

En la Ilustración 18 se muestra la media de la velocidad del viento por hora cada día, separada mensualmente. Esta es de gran ayuda para apreciar las diferencias horarias de generación, dependiendo de la época del año en la que se centre el estudio. Durante los primeros cinco meses se produce un ligero aumento durante el mediodía, mientras que en el mes de junio no aparece prácticamente diferencia (ligera subida durante las horas de sol, pero sin picos notables) y en julio sí se encuentra un claro máximo más próximo a las 18 horas, debido a que los días son más largos y anochece más tarde. Sin embargo, desde agosto hasta septiembre se vuelve a tener la subida cerca de las 12 de la mañana. A pesar de todas estas variaciones por horas, se demuestra que la generación eólica resulta bastante constante a lo largo de todo el día en rasgos generales.

En el análisis de cada mes por horas, se observan variaciones en la velocidad del viento debidas al calentamiento de la atmosfera durante las horas de sol y su enfriamiento al caer la noche, produciendo variaciones en la presión que afectan directamente al viento percibido.

Según un mapa de calor generado en Homer PRO, se concluye que la velocidad del viento es algo más elevada durante el mediodía, entre las 12 y 18 horas. Además, se observan cambios estacionales pues durante los meses de verano, ubicados en el centro de la gráfica, disminuye la velocidad del viento apareciendo colores más oscuros. Se vuelve a concluir que es una fuente de energía muy variable, ya que varía mucho la velocidad cada día a todas las horas, mostrado como muchos colores diferentes en una misma franja horaria.

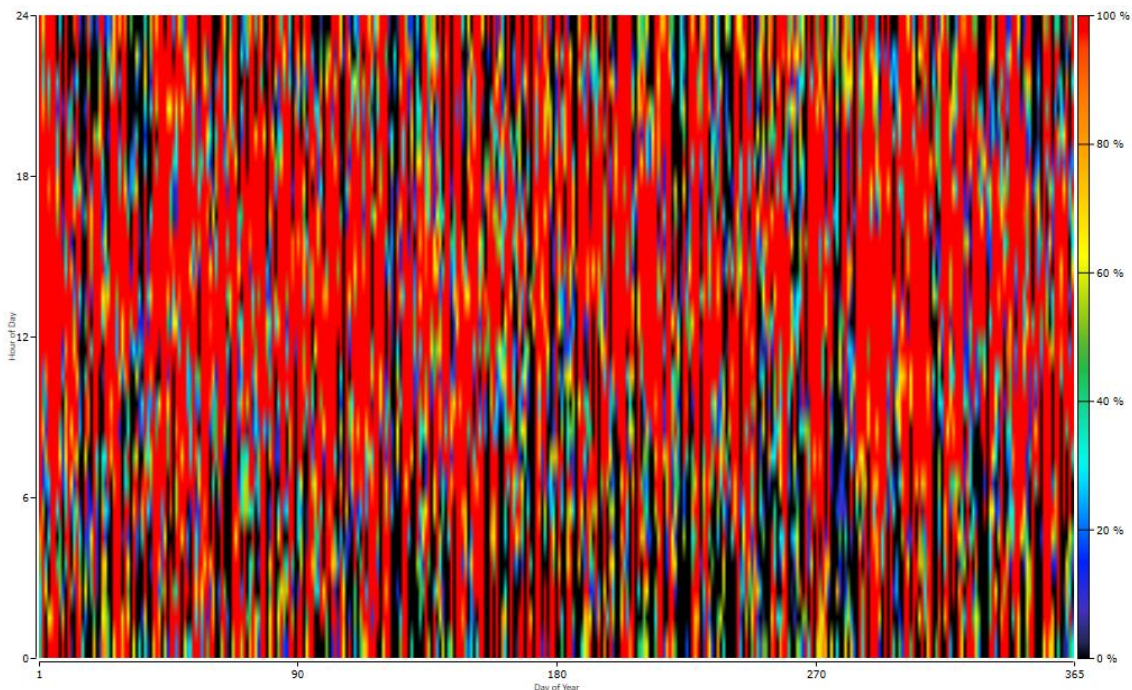


ILUSTRACIÓN 19. MAPA DE CALOR EN EL QUE SE REFLEJA LA PENETRACIÓN RENOVABLE EN FUNCIÓN DE LA HORA DEL DÍA Y DEL DÍA DEL AÑO 2021

El mapa de calor adjuntado en la Ilustración 19 es muy llamativo para este proyecto, pues muestra el porcentaje de penetración renovable a lo largo de la hora de cada día del año 2021. Se observan colores cálidos por lo general, lo que quiere decir que se produce una gran cantidad de energía renovable en relación con el total de energía consumida, entre la generada en la propia instalación y las aportaciones de la red eléctrica. Aparecen zonas oscuras provocadas por los momentos en los que el sistema instalado tiene una producción nula, haciendo uso de la red para compensar la escasez, generalmente ocasionados durante horas nocturnas entre las 18 y las 6 horas.

En esta representación no se aprecia a simple vista las diferencias estacionales de proporción de generación renovable o aportación de la red, pero se puede concluir que claramente la penetración renovable lograda toma valores muy elevados, logrando así grandes beneficios tanto económicos para el usuario como un cambio a favor del medio ambiente, optando por esta producción propia a través del recurso natural que es el viento.

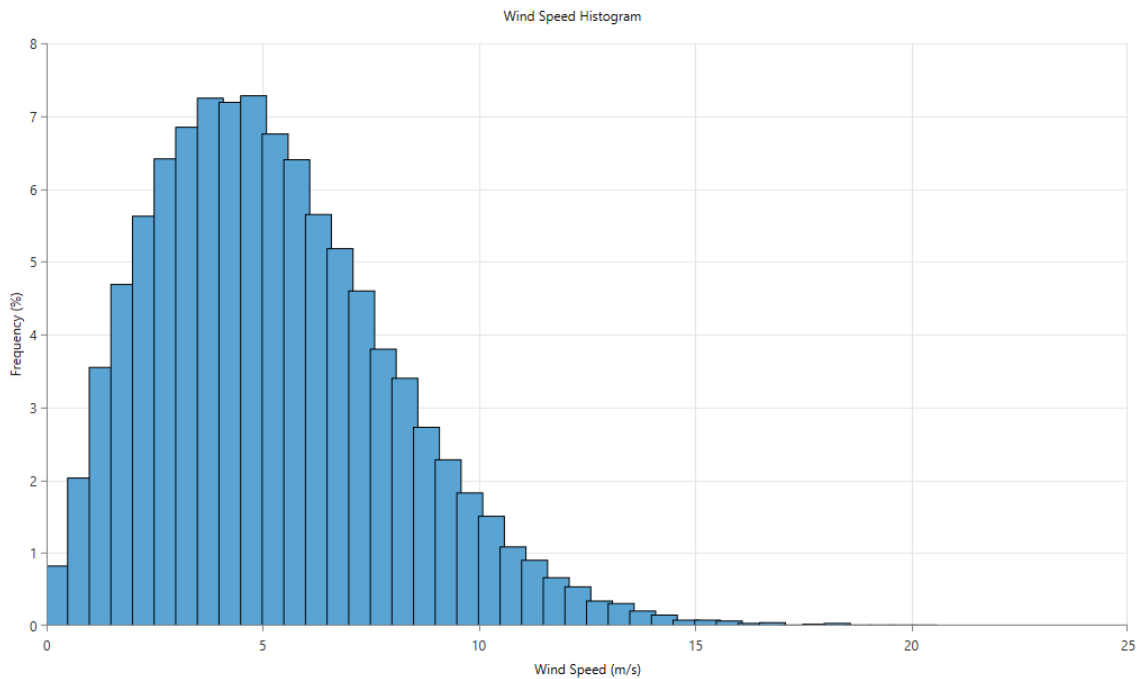


ILUSTRACIÓN 20. HISTOGRAMA QUE EXPONE LA FRECUENCIA DE VELOCIDADES DEL VIENTO CAPTADAS A LO LARGO DEL AÑO 2021

Este histograma añadido en la Ilustración 20 refleja la frecuencia de cada rango de velocidades del viento captados durante todo el año 2021. Los valores más repetidos se encuentran entre 4.5 y 5 m/s, con una frecuencia total del 7.27%, seguido de los comprendidos entre 3.5 y 4 m/s, con frecuencia de 7.24%, concluyendo que las velocidades más frecuentes son aquellas que se encuentran entre 3.5 y 5 m/s, sumando el total de este rango cerca de un 22% del total.

Con este resultado de instalación eólica de 9 kW, se tiene anualmente una producción anual total de energía de 14.713 kWh, con inversión de capital inicial de 18000€ además de los 30€ de coste por mantenimiento, habiendo incluido 10€ por aerogenerador. Todo esto supone un coste operacional de -582.92€ anuales, lo que significa que hay un beneficio para el usuario en el conjunto de gastos e ingresos anuales, dejando al margen la inversión inicial. Este resultado, frente a los 649.86€ anuales que se producen en el caso de disponer únicamente de la red eléctrica convencional sin instalación renovable, refleja la mejora y ahorro anual gracias a la instalación, pues este último valor supone un gasto al ser positivo.

Architecture				Cost	
✈️	🌳	G3	Grid (kW)	NPC (€)	CAPEX (€)
Base system			999,999	€11,427	€0.00
Proposed system		3	999,999	€7,750	€18,000

Metric	Value
Present worth (€)	€3,677
Annual worth (€/yr)	€209
Return on investment (%)	2.8
Internal rate of return (%)	4.7
Simple payback (yr)	14.60
Discounted payback (yr)	19.29

ILUSTRACIÓN 21. COMPARATIVA DE LOS FACTORES ECONÓMICOS DE INSTALACIÓN EÓLICA FRENTE A LA COMPRA DEL TOTAL CONSUMIDO A LA RED DE DISTRIBUCIÓN

A pesar del elevado coste inicial de instalación de los aerogeneradores, se trata una inversión que se amortiza en exactamente 14.6 años como se muestra en la Ilustración 21, ‘como Simple payback’, concluyendo que se logran grandes beneficios a partir de esta fecha dado que el proyecto tiene una duración de 25 años.

La energía comprada a la red con esta instalación suma un total de 2059 kWh, frente a los 5147 kWh que se habrían comprado disponiendo únicamente del abastecimiento por parte de la red, sin instalación para autoconsumo. Además, se vende una cantidad de 11625 kWh de energía a lo largo del año estudiado en forma de excedentes generados por la instalación renovable no utilizados.

En la Ilustración 21 también aparece el coste neto presente de producción (NPC). Se trata de un término económico que tiene relación con la inflación y el precio del dinero, y representa el coste del generador estudiado en el tiempo total de vida del proyecto bajo una tasa de descuento del 6% anual. A mayor valor del NPC obtenido para un resultado, menor es la rentabilidad de la instalación para el usuario. Por esto, el mejor resultado determinado por el programa coincide con aquel que posee un NPC menor positivo, o bien mayor en negativo. En este caso, se tiene un valor negativo por lo que sigue suponiendo un coste para el usuario, pero se encuentra muy por debajo de la cifra que se obtiene con el sistema base, 7750€ frente a 11427€.

CAPÍTULO 4. COMBINACIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN EÓLICA Y SOLAR

Para llevar a cabo el estudio de una instalación que combine la generación de energía mediante paneles fotovoltaicos con la obtenida por generadores eólicos en este capítulo se hace un estudio previo para el caso de un entorno doméstico con una instalación únicamente solar fotovoltaica para poder hacer una mejor comparación de resultados. Posteriormente se emula e investiga la estrategia de implementación de ambas tecnologías combinadas en una misma instalación doméstica.

4.1 Instalación solar fotovoltaica

La instalación de paneles fotovoltaicos como sistema de generación renovable en entornos domésticos es muy común y cada vez está más esparcida en muchos países del mundo. La lucha contra el cambio climático hace que desde hace varios años los ciudadanos quieran aportar su pequeña colaboración implementando en los hogares paneles fotovoltaicos, así como han hecho muchas empresas y centros que también han optado por esta opción, para reducir las emisiones y aprovechar esta fuente de energía renovable al alcance de todos.

En España en los últimos años, las ayudas del gobierno han incentivado a muchas personas a dar el paso, y en las facturas de luz se ve reflejado el ahorro que conlleva. Esta instalación supone una inversión inicial que puede parecer costosa, pero con estos subsidios en pocos años se amortiza todo lo pagado y a partir de ahí serán beneficios. En añadido, el paso de los años da lugar a grandes avances en la tecnología y, por lo tanto, disminuye el coste inicial de estos elementos.

Además de todos estos puntos a favor de la instalación de energías renovables en el entorno doméstico, como se ha indicado previamente, otro beneficio que no debe pasar desapercibido es la revalorización de la vivienda que los posee. Una propiedad con este tipo de instalación puede aumentar su valor notablemente y hacer de ella una opción más atractiva para futuros compradores.

Para realizar la simulación de la instalación, se sigue el mismo procedimiento que el explicado previamente para los aerogeneradores. En esta ocasión se añade como recurso la irradiación solar, importando un fichero de datos de internet que adjunta medias mensuales del índice de claridad y de la radiación. Además, se añaden los paneles fotovoltaicos genéricos de 1 kW y coste inicial 1000€. En esta ocasión, se tiene en cuenta que para colocar las placas es necesario instalar un inversor de corriente que transforme la corriente continua que inyectan los paneles en corriente alterna, necesaria para el funcionamiento de la electricidad del hogar.

Se han implementado paneles solares hasta alcanzar una potencia instalada de 12 kW, pues el software determina que esta resulta la capacidad a instalar más eficiente tras analizar todas las combinaciones posibles para el sistema introducido. De nuevo, se mantiene conectado todo el

sistema a la red para tener acceso a la misma y comprar energía en las ocasiones de producción insuficiente.

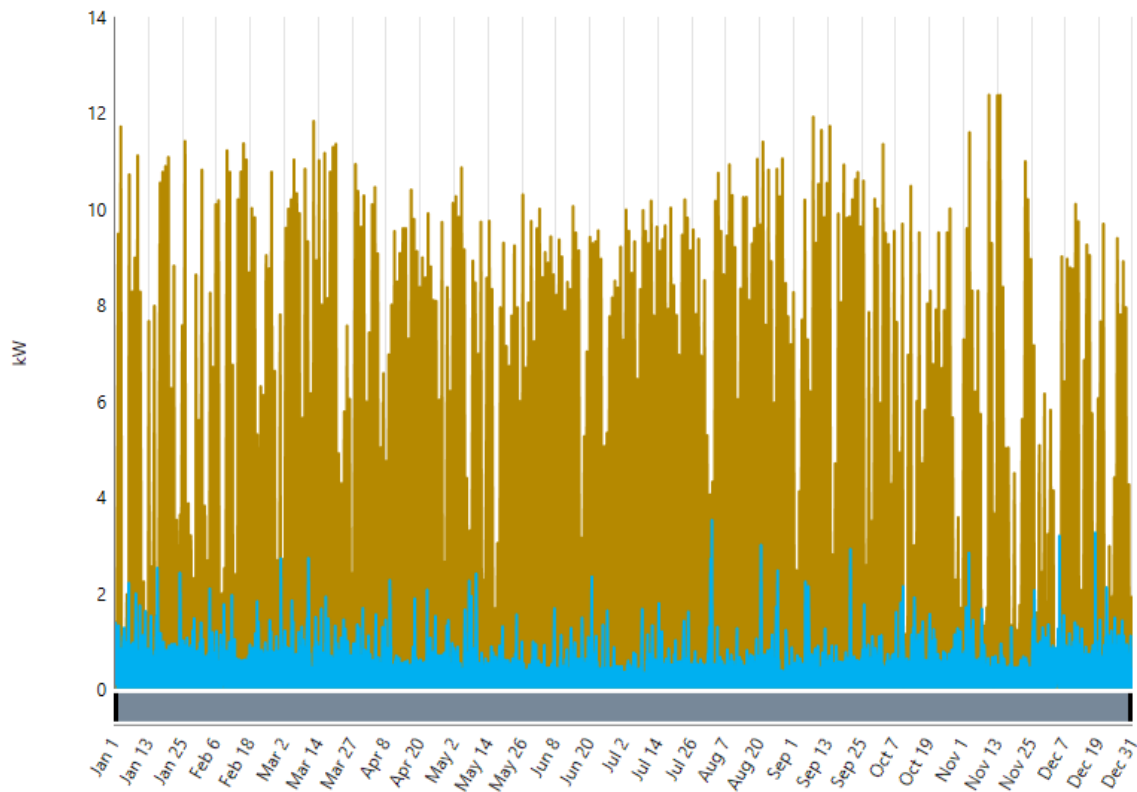


ILUSTRACIÓN 22. POTENCIA GENERADA A PARTIR DE PANELES FOTOVOLTAICOS (AMARILLO) Y POTENCIA COMPRADA A RED ELÉCTRICA (AZUL) A LO LARGO DEL AÑO 2021

La Ilustración 22 muestra una gráfica en la que se observa una variabilidad clara durante todo el año en la generación mediante esta tecnología, lo que resulta lógico al extraerse de una fuente de energía renovable.

Se detecta en los meses de verano una generación más constante, debido a que es una estación muy soleada por lo general, pero que no alcanza los valores más altos próximos a la potencia total instalada. Esto sí ocurre en invierno, con puntos máximos de generación solar fotovoltaica algo más cercanos a los 12 kW, aunque el clima frío, el menor número de horas de sol y los más frecuentes días nublados hacen que descienda frecuentemente mucho la generación, siendo muy variable.

A diferencia de lo observado en la eólica, la energía producida a partir de los paneles fotovoltaicos, por lo general, alcanza valores cercanos al 10kW durante las horas de sol. A su vez, por la noche desciende a 0.

La línea azul de la figura muestra el patrón de compra a la red, el cual supera en muy pocas ocasiones los 2 kW. Esto significa que la potencia instalada es casi suficiente para ser independiente de la red, pero las variaciones de las renovables no lo hacen posible y es preferible contar con la posibilidad de comprar energía y complementar así la escasez de generación en temporadas o días poco soleados o bien durante las horas de noche.

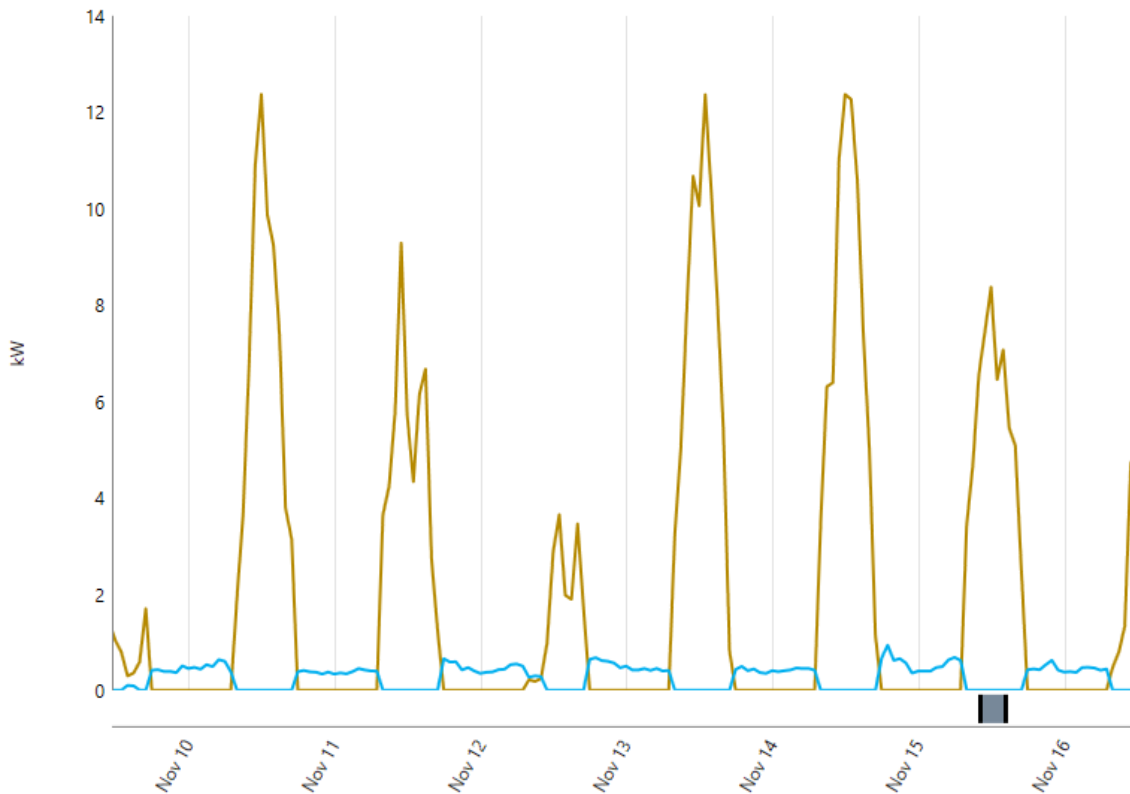


ILUSTRACIÓN 23. POTENCIA GENERADA POR LOS PANELES FOTOVOLTAICOS (AMARILLO) Y COMPRA DE POTENCIA A LA RED (AZUL) DURANTE LA SEMANA EN LA QUE SE ALCANZAN LOS PICOS MÁXIMOS DE PRODUCCIÓN DURANTE EL AÑO 2021

En la Ilustración 23 se ha ampliado una semana de noviembre en la que se encuentran los puntos de generación más elevados del año, alcanzando en tres ocasiones los 12.36 kW, un valor superior a los 12 kW de potencia instalada. Se muestran días bastante soleados excepto el 12 de noviembre, que posiblemente haya estado nublado dado que disminuye la generación respecto al resto de la semana, con un máximo en el día de 3.64 kW.

Sin embargo, al estudiar cualquier semana de primavera o verano se observa que no se alcanza el máximo de 12kW en prácticamente ninguna ocasión, generando más de 2kW menos de máxima cada día en estos meses cálidos comparado con los más fríos. A pesar de esto, como ya se ha dicho, el mayor número de horas de sol compensa este detalle y se acaba generando igual o más en la temporada de calor.

En cuanto a la compra de energía a la red eléctrica, en la semana seleccionada es muy baja dado que se genera mucha energía y únicamente se hace uso de esta durante la noche, momentos en los que la instalación deja de recibir la luz del sol. Se trata de valores inferiores a 1 kW, probando que la instalación de potencia es muy acertada.

El valor máximo alcanzado en todo el año de potencia comprada a la red es de 3.51 kW y se produce el 3 de agosto. Este día y el anterior se generan hasta un máximo de unos 4 kW, quedando esta cifra muy por debajo de lo habitual, por lo que se compensa con esta aportación algo más elevada que el resto de los días del año.

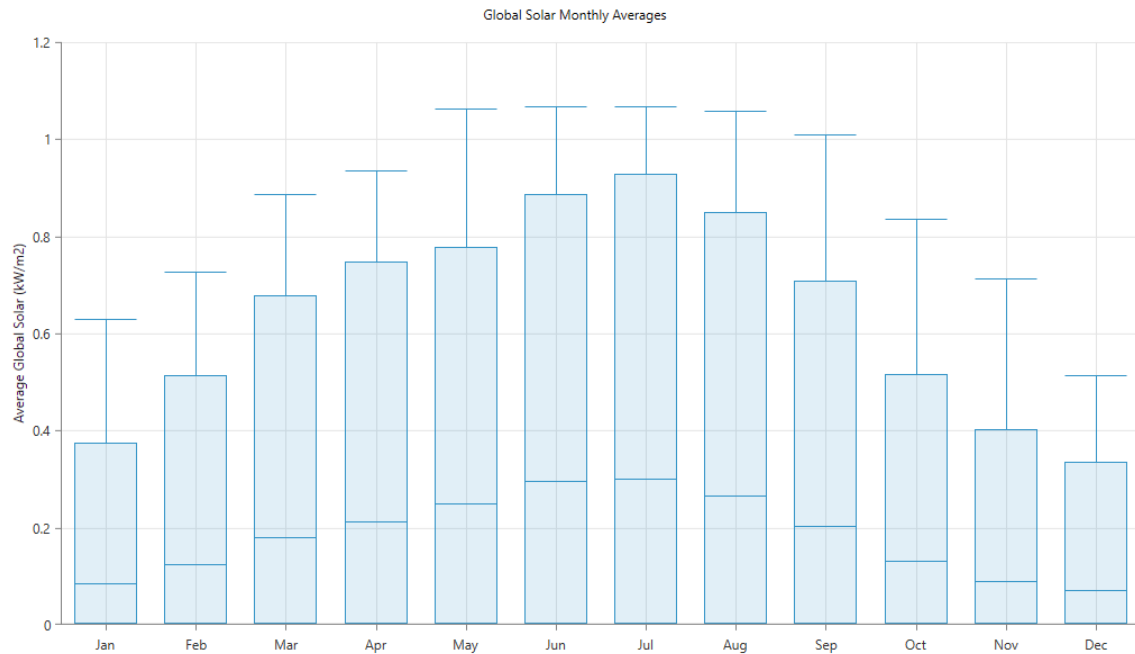


ILUSTRACIÓN 24. PROMEDIOS MENSUALES DE POTENCIA SOLAR CAPTADA POR CADA METRO CUADRADO INSTALADO DURANTE EL AÑO 2021 Y LOS VALORES MÁXIMOS ALCANZADOS EN CADA MES

La Ilustración 24 presenta una gráfica de cajas y bigotes donde se aprecia muy claramente la diferencia estacional de generación con la tecnología solar fotovoltaica. Podría decirse que sigue un patrón similar a una función gaussiana, tanto para los valores medios como para los máximos. Las medias de energía solar producida por los paneles aumentan desde los 0.08 kW/m² en enero hasta los 0.3 kW/m² en el mes de julio, a partir del cual decrecen estos valores medios hasta los 0.07 kW/m² en diciembre.

En cuanto a los máximos alcanzados aparecen los meses de junio y julio con 1.07 kW/m² en ambos, seguidos por los otros dos meses más cálidos mayo y agosto, con 1.06 kW/m². Todos presentan un mínimo nulo pues no hay generación durante las horas de noche. No aparecen valores atípicos en ningún momento, esto se mostraría como un punto no unido a la línea saliente de alguna de las cajas.

Para una mayor eficiencia energética y ahorro en el consumo, se podrían concluir varios factores determinantes:

- La energía se genera durante las horas de sol, por lo tanto, debe ser a lo largo del día cuando se consuma la mayor energía posible. Por ejemplo, se puede tener en cuenta a la hora de poner lavadoras u otras tareas necesarias en el día a día que requieran del uso de electricidad, para llevarlas a cabo a unas horas determinadas del día en lugar de al anochecer, creando un hábito más eficiente.
- Se puede valorar la posibilidad de implementar un sistema de almacenamiento para hacer al prosumidor más independiente de la red eléctrica convencional. Se estudia más adelante este caso concreto.
- A pesar de que la mayor parte de energía consumida la proporciona la instalación renovable, se sigue contando con el apoyo de la red, sobre todo durante las noches.

Aquí comienza a resultar muy interesante la posibilidad de instalar a la par de los paneles fotovoltaicos una serie de aerogeneradores que los complementen, de modo que se genere energía tanto durante el día como durante la noche, acercando al usuario más a la posibilidad de ser independiente y lograr el autoconsumo total. Este tipo de instalación combinada se estudia en el siguiente apartado.

- Como sistema ideal en cuanto a eficiencia, pero posiblemente no beneficioso económicamente, se encuentra la instalación combinada de paneles fotovoltaicos junto a los aerogeneradores, contando además con un sistema de baterías de almacenamiento de energía que permitan, ahora sí, muy probablemente la total independencia de la red. Más adelante se realiza un estudio de una instalación similar a la expuesta, en el que se concluirá si es o no rentable este tipo de sistemas.

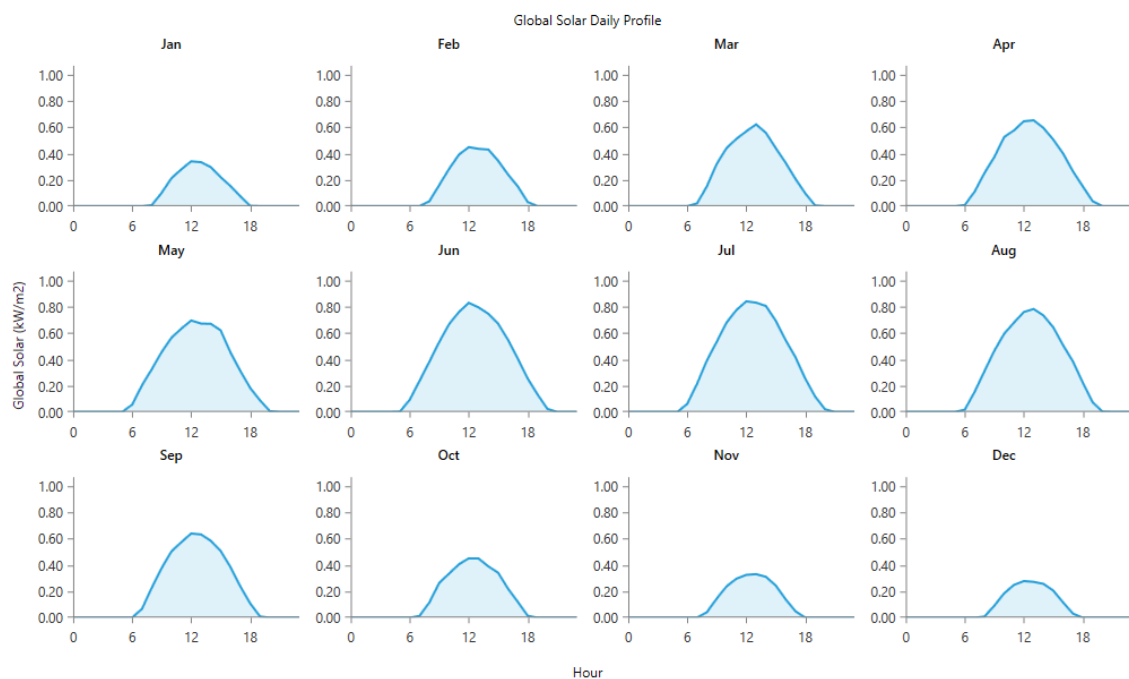


ILUSTRACIÓN 25. GENERACIÓN DE POTENCIA POR METRO CUADRADO INSTALADO A PARTIR DE LA INCIDENCIA SOLAR EN FUNCIÓN DEL MES DEL AÑO 2021

En este apartado es interesante comentar la Ilustración 25, en la que se presentan los valores de energía solar capturados en kW/m^2 en función de la hora del día para cada uno de los meses del año. Se perciben curvas de área mucho menor durante los meses fríos, encontrando a simple vista las más grandes entre los meses de mayo y agosto. Esto tiene sentido pues los meses de verano hay más horas de luz que durante el invierno, temporada en la que anochece mucho más temprano. Las curvas son mucho más anchas durante las temporadas más cálidas debido al mayor número de horas de generación, además de alcanzar valores superiores, siempre con máximos próximos al mediodía.

En cuanto a la penetración renovable, aparece todos los meses un valor máximo alcanzado superior al 117%, con el día más alto en el mes de noviembre, generando un 144.39% de energía renovables. Esto quiere decir que en toda estas ocasiones, superando el 100% de penetración, se cumple con las necesidades de consumo con lo generado en la instalación

solar y se producen excedentes que son inyectados a red, provocando esta elevada cifra de penetración renovable. En cuanto a valores medios mensuales, en julio se acumula una media de penetración renovable del 58.93%, siendo esto más de la mitad del total de potencia consumido proveniente de la instalación renovable. Aparece en este estudio sobre las medias mensuales una curva que alcanza valores más elevados en los meses de verano, a su vez que se aprecia un claro descenso durante el resto del año, con la media más baja calculada en el mes de diciembre, con un 35.67% del total empleado generado a partir de la tecnología solar fotovoltaica.

En función de las horas del día, como es evidente, se produce el total de penetración renovable cada día durante las horas de sol cuando la instalación de paneles fotovoltaicos genera energía. Por lo tanto, se tiene entre un 105% y un 110% de penetración renovable en un 39.39% de los casos, mientras que se produce este favor entre un 0% y un 5% en el 50.05% de los casos estudiados, englobando en porcentajes mucho menores el resto de las posibilidades de márgenes de porcentajes de penetración de las fuentes de energía renovables.

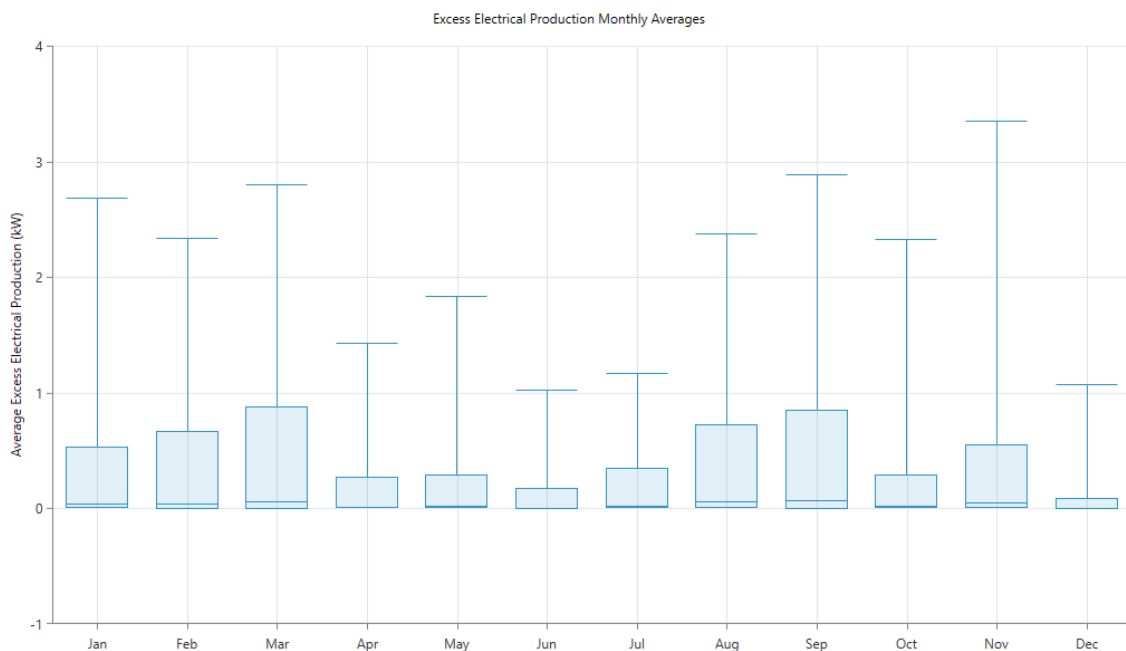


ILUSTRACIÓN 26. EXCEDENTES DE POTENCIA GENERADOS DE MEDIA EN LA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN CADA MES DE 2021





En la Ilustración 26 se muestran los valores medios de los excedentes de potencia producidos en cada mes, así como los máximos alcanzados. El valor más elevado del año se produce en el mes de noviembre con unos excesos de 3.35 kW. Como se ha visto con anterioridad al estudiar la generación solar durante todo el año 2021, los valores de mayor generación se alcanzan durante el mes de noviembre, lo cual resulta llamativo al ser un mes frío y con menos horas de sol tras el cambio horario. Aun así, se produce durante ciertos días una gran generación, debido a una semana muy soleada con gran incidencia de los rayos solares sobre los paneles, que provoca estos máximos tan elevados en comparación con el resto. En concreto, estos excedentes son mayores debido a producirse durante un mes frío, en los que una vivienda o

edificio generalmente consumen algo menos de energía que durante los meses de calor en los que se hace uso prácticamente durante todo del día el aire acondicionado o bien de ventiladores eléctricos. Durante el resto de los meses se observan excedentes máximos muy variados, pues depende tanto de la generación como del consumo requerido en cada momento. Las medias de excedentes de potencia producidos se encuentran entre los 0.01 kW y los 0.08 kW, concluyendo que por lo general los excesos generados no son desmesurados y, por lo tanto, la instalación de 12 kW de potencia de paneles solares es bastante acertada. En caso de obtener unos valores excesivos de potencia sobrante no consumida por el usuario, es posible que la potencia instalada no resulte la más adecuada para el caso estudiado pues los excedentes generados se suelen pagar por la compañía eléctrica a un precio mucho menor del precio establecido de compra de energía. A pesar de esto, en el año estudiado 2021 se muestran precios muy elevados tanto para la compra como para la venta de energía. Además, muchos contratos establecen un precio fijo a pagar a la comercializadora por la potencia instalada, sumando a este valor las compras de energía a la red por las insuficiencias de generación. Estas compras se pueden compensar con la retribución por inyección de excedentes, pero en algunos casos no hay reembolso del valor fijo establecido a pagar por la potencia instalada. Por tanto, en un caso de muchos excedentes podrían perderse parte de ellos sin que el prosumidor consiga cobrarlos.

Como se ha dicho, durante el verano, un hogar típico consumiría más energía debido al uso del aire acondicionado para contrarrestar las cada vez más elevadas temperaturas. El uso de este dispositivo durante el día resulta muy conveniente en el caso de implementar esta instalación fotovoltaica, pues durante la noche no suele emplearse tanto como a lo largo del día. En invierno hay mucha menos generación y una vivienda con calefacción de gas no tendría inconveniente, ya que no consume electricidad. Sin embargo, si se emplea una caldera eléctrica para la calefacción es posible que resulte algo escasa la generación durante los meses más fríos.

En el caso de este resultado dado como mejor opción de instalación por el programa, con 12 kW de potencia instalada mediante paneles fotovoltaicos, se compra a lo largo de todo el año un total de 2538 kWh de energía a la red, mientras que en el caso del mismo entorno sin instalaciones renovables se tenía, como se vio anteriormente en el estudio eólico, un total de compra de energía a la red de 5147 kWh. En añadido a favor de la instalación, se vende por inyección de excedentes la suma anual de 13846 kWh, con un precio de venta muy elevado debido a las grandes subidas percibidas durante este año 2021.

En cuanto a factores económicos, la inversión inicial del total de la instalación supone 14570€ en gastos de capital (CAPEX), siendo superior a los 12000€ pagados por los 12 kW de paneles fotovoltaicos adquiridos dado que los costes que supone el convertidor de corriente y sus limitaciones elevan este valor. Como resultado de coste operacional se obtienen para este sistema -454.12€ anuales frente a los también citados en el capítulo anterior 649.86€ gastados anualmente en el caso de no contar con ninguna instalación. De nuevo se tiene un valor negativo para este factor por lo que supone un beneficio anual y se concluye que la instalación sí es rentable para el prosumidor.

		Architecture			Cost	
		PV (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)	NPC (€)	CAPEX (€)
Base system			999,999		€11,427	€0.00
Proposed system	  	12.0	999,999	8.57	€6,585	€14,570

Metric	Value
Present worth (€)	€4,842
Annual worth (€/yr)	€275
Return on investment (%)	3.6
Internal rate of return (%)	5.7
Simple payback (yr)	12.40
Discounted payback (yr)	17.94

ILUSTRACIÓN 27. COMPARATIVA DE LOS FACTORES ECONÓMICOS DE INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA FRENTE A LA COMPRA DEL TOTAL CONSUMIDO A LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Como se muestra en la Ilustración 27, esta instalación amortiza las inversiones a los 12.4 años, teniendo muchos años a partir de este de ahorro y beneficio gracias a la generación solar. Además, el NPC con los paneles fotovoltaicos desciende a 6585€ frente a los 11427€ que supone el sistema base de conexión a red como coste neto de producción, tal y como se comparó en el capítulo anterior. Se tiene de nuevo un valor positivo para este factor económico, pero a pesar de ello supone un ahorro notable.

De nuevo, se concluye que puede resultar altamente beneficiosa la implementación de una tecnología renovable adicional, en especial la eólica para el caso concreto de un entorno doméstico a pequeña escala. Además, es recomendable económicamente a largo plazo la incorporación al sistema de un sistema de almacenamiento mediante baterías, haciendo posible gestionar eficientemente los excedentes de energía generados y no consumidos en el momento. Esta opción contribuye al uso de energías renovables y reduce la dependencia de las fuentes no renovables además de resultar una estrategia sostenible que garantiza un suministro más estable para el usuario. Por lo tanto, se propone el estudio de dicha posibilidad como plan de mitigación de los grandes problemas tanto económicos como ambientales a los que se enfrenta el mercado energético.

4.2 Instalación con combinación de tecnologías eólica y solar fotovoltaica

Tras haber estudiado por separado instalaciones que utilizan la tecnología eólica y la solar fotovoltaica, se realiza el mismo estudio para la complementación de una con la otra, idea que resulta a simple vista muy interesante. Los principales beneficios conocidos previos al estudio son la complementación horaria, generación por parte de ambas durante las horas de sol y generación eólica durante la noche para cubrir la falta de producción de los paneles solares, y el incremento de penetración renovable, directamente relacionado con una disminución de la

aportación de energía por parte de red eléctrica, no renovable y con aumento de coste en las facturas debido a la compra.

Se emula en un nuevo archivo una instalación combinada de energía eólica, con aerogeneradores de 3 kW cada uno, y de energía solar, con paneles solares fotovoltaicos de 1 kW cada uno. Todos los elementos son los mismos que se han implementado en los apartados anteriores, así como los factores establecidos de precio, mantenimientos y valores económicos de descuento e inflación. Se limita el espacio de búsqueda para 9 kW de potencia instalada de cada una de las tecnologías citadas, ya que con una búsqueda libre la inversión resultaría demasiado elevada a pesar de recuperarse y tener grandes ganancias después del periodo de 25 años que dura el proyecto.

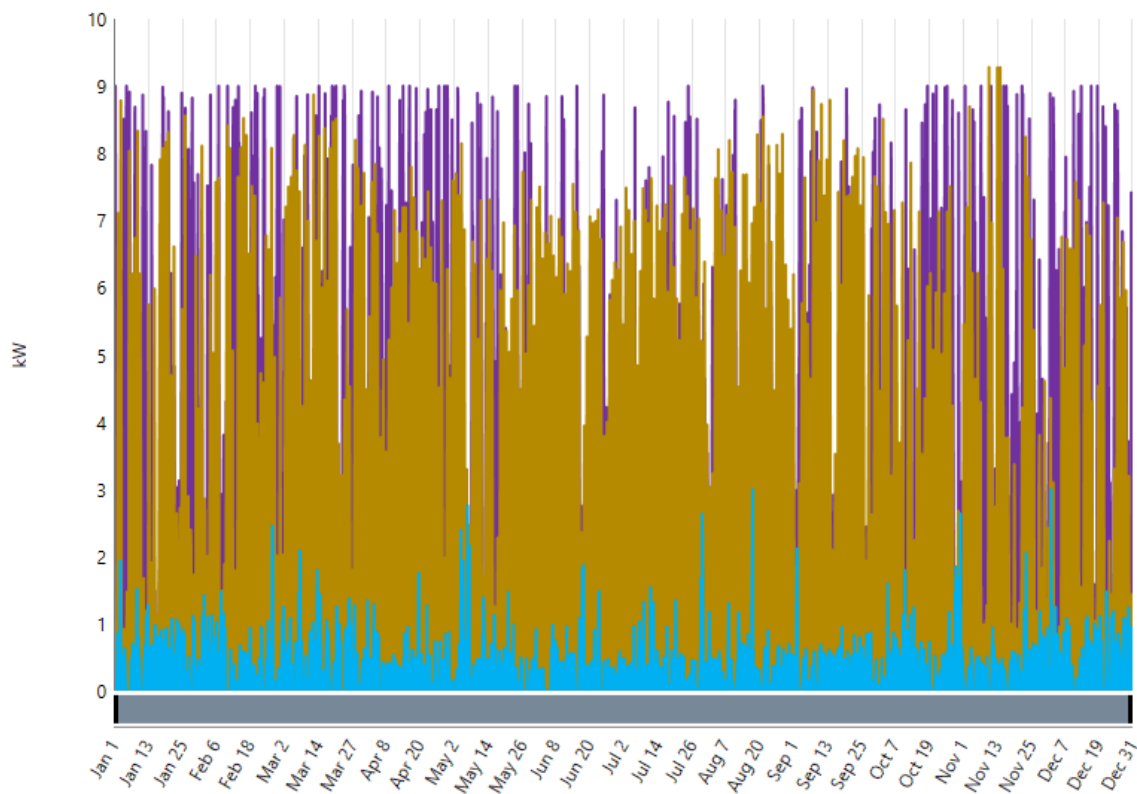


ILUSTRACIÓN 28. INSTALACIÓN CON COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS SOLAR FOTOVOLTAICA Y EÓLICA. GRÁFICO CON LA POTENCIA GENERADA POR CADA UNA ADEMÁS DE LA COMPRADA A LA RED DURANTE EL AÑO 2021

Según la Ilustración 28 dada como mejor opción por el software Homer PRO que se representa en la ilustración, teniendo en cuenta el espacio de búsqueda limitado previamente, se instalan 9 kW de potencia en forma de paneles fotovoltaicos en añadido a otros tres aerogeneradores de 3 kW como complementación, formando también 9 kW de potencia eólica. En amarillo se dibuja la potencia producida mediante la tecnología solar fotovoltaica a lo largo de todo el año bajo estudio, siendo de ayuda para ver su gran variabilidad y cómo alcanza picos muy diferentes. Logra generar el máximo de 9 kW, como se ha visto en el anterior apartado, en muy pocas ocasiones.

Mientras, la energía eólica, representada en morado, alcanza muy frecuentemente su valor máximo de generación, a pesar de tener muchas subidas y bajadas, además de temporadas

con menos viento. En esta solución se instalan 9 kW de generación eólica, ya que es la combinación más económica para satisfacer las necesidades que refleja el perfil de carga importado en pasos previos al programa en función del listado de precios también añadido, contando de nuevo con la conexión a red para la compra de energía, la cual se refleja en azul. Al igual que en los casos investigados anteriormente, la red aporta una cantidad muy pequeña de potencia, pero totalmente necesaria porque, a pesar de contar en esta ocasión con dos fuentes de energía diferentes, ambas son renovables. Esto sigue manteniendo su gran variabilidad y el hecho de que no son controlables, pues tanto el sol como el viento dependen únicamente de la naturaleza y muchos otros factores ambientales.

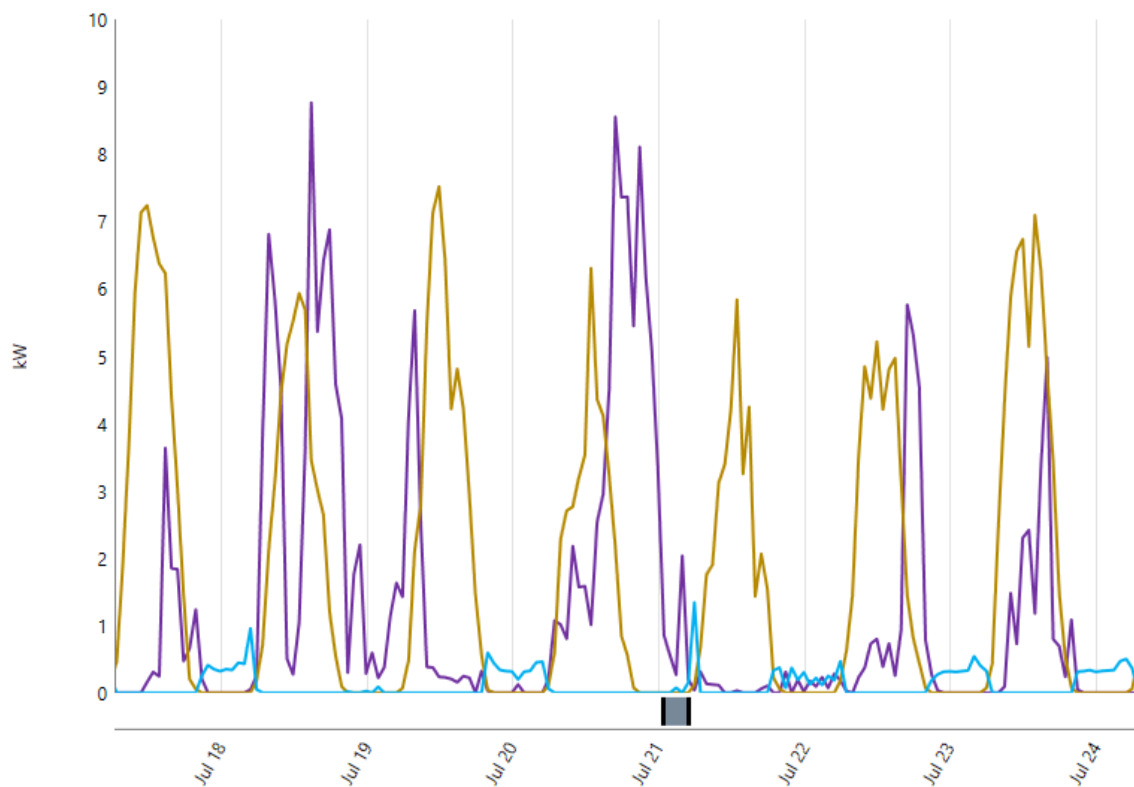


ILUSTRACIÓN 29. GENERACIÓN SOLAR Y EÓLICA JUNTO CON LÍNEA DE COMPRA DE POTENCIA A LA RED, DURANTE UNA SEMANA CONCRETA DE JULIO DE 2021

Al combinar las dos tecnologías, se observan en la Ilustración 29 claras diferencias entre ambos tipos de generación. A lo largo de la semana seleccionada en la gráfica superior, se tienen dos ráfagas de viento prolongadas, mientras que el resto de los días están bastante calmados. Tanto el 18 como el 20 de julio se alcanzan valores de generación muy cercanos a la potencia instalada de 9 kW, días en los que junto a la generación solar producida no se requiere de ninguna aportación de la red. Sin embargo, analizando días como el 21 de julio, en el que la velocidad del viento es muy pequeña y por tanto prácticamente no se genera energía eólica, sí se necesita comprar energía para complementar las primeras horas del día en las que los paneles fotovoltaicos aún no están en funcionamiento. La semana ampliada presenta días muy soleados que cubren con gran parte de la generación necesaria.

Si se analiza una semana de invierno, se encuentran variedad de situaciones diferentes. Los días de menos generación solar suelen estar acompañados de una mayor generación eólica

por lo que se ha observado, pero la instalación seleccionada provoca que la eólica no cubra en muchos casos suficientemente todo el consumo, por lo que la red eléctrica aporta la potencia restante requerida por el usuario.

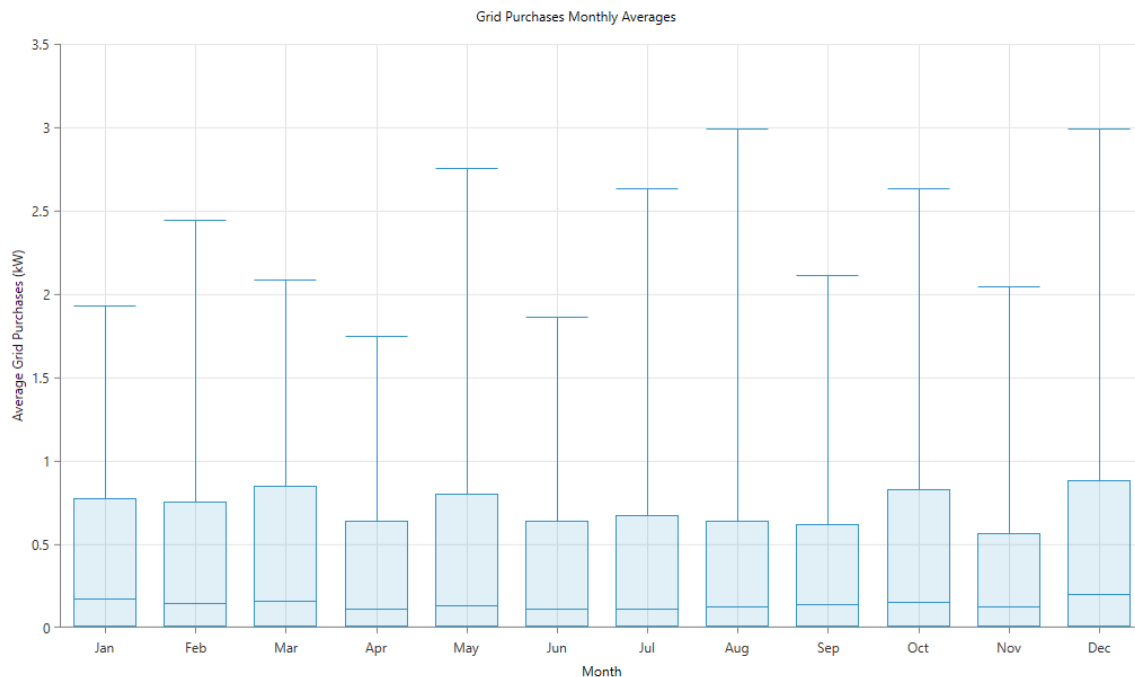


ILUSTRACIÓN 30. COMPRA MEDIA DE POTENCIA (kW) A RED ELÉCTRICA Y VALORES MÁXIMOS CORRESPONDIENTES A CADA MES A LO LARGO DE 2021

La necesidad de comprar energía a la red eléctrica convencional es evidente. En la Ilustración 30 se muestra un gráfico mensual de cajas y bigotes que representa los datos de compra de potencia a la red. Los valores medios se mantienen durante todo el año muy bajos, alcanzando en diciembre el valor medio mensual más elevado de todo el año con 0.2 kW, teniendo en el resto de los meses cifras más bajas hasta un mínimo de 0.11 kW de potencia media comprada que se repite en abril, junio y julio.

Los valores máximos alcanzados cada mes son muy variados, tocando el máximo de 2.99 kW tanto en el mes de agosto como en el mes de diciembre. Se observa que no se sigue ningún patrón estacional en este caso, debido a que la combinación de dos tecnologías renovables diferentes como la eólica y la solar fotovoltaica provocan fluctuaciones durante todo el año, al ser una más propensa a una mayor generación durante una temporada y la otra tecnología en las estaciones opuestas. Los valores más altos de compra observados en todos los meses varían por esto y por la gran aleatoriedad de generación que conlleva el uso de las fuentes de energía renovables, las cuales varían cada día dependiendo de la velocidad del viento o la incidencia del sol en la instalación.

En cambio, las ventas de los excesos de energía generada en la instalación e inyectada a la red suponen un beneficio notable para el usuario. El mes donde se calcula la media más baja de todo el año es diciembre, con 2.28 kW de venta media, mientras que el mes con más excedentes de energía es marzo, en el cual se inyecta de media una potencia de 3.17 kW. Los valores máximos alcanzados en todos los meses se encuentran entre los 12 y 15 kW de

potencia inyectada aproximadamente. A pesar de estas elevadas cifras que aparecen a lo largo de todo el año, estos excedentes se venden a un precio bastante inferior al de compra, que dependerá de lo contratado y las condiciones acordadas con la comercializadora. Estudios dicen que la cifra media a la que se compensan los excedentes de energía son 0.05€/kWh, precio que se resta en la factura al total resultante de energía comprada ese mes.

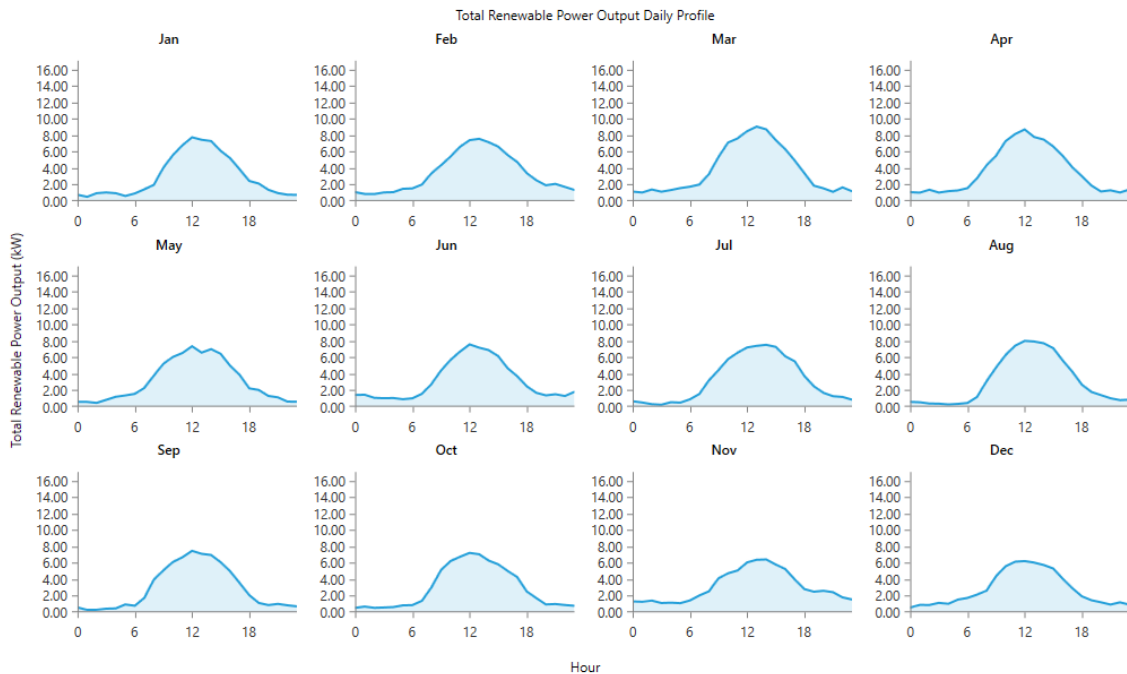


ILUSTRACIÓN 31. SALIDA DE POTENCIA TOTAL A PARTIR DE LAS INSTALACIONES RENOVABLES POR HORAS DISTINGUIENDO ENTRE CADA MES DEL AÑO 2021

Como muestra la Ilustración 31, el total de salida de potencia generada a través de fuentes de energía renovables presenta curvas ligeramente menos amplias en cuanto a superficie en los meses de invierno frente al resto del año. Son muy parecidas a las curvas resultantes por meses de la incidencia solar en los paneles fotovoltaicos, añadiendo una pequeña generación durante las horas de noche gracias a los aerogeneradores, aunque destacan las horas del día cuando ambas tecnologías están en funcionamiento. El máximo de potencia generada a partir de energías renovables en esta configuración se logra en el mes de enero, alcanzando los 17.06 kW de producción total con el conjunto de instalaciones. La media total de todos los meses de 2021 se encuentra entre 2.8 y 3.8 kW de generación total renovable.

Las horas del día de mayor generación renovable se mantienen durante todo el año, con los picos de máxima producción siempre muy cercanos al mediodía o ligeramente más tarde.

Gracias a un histograma de frecuencias proporcionado por el sistema, se sabe que el conjunto instalado de producción renovable supera los 10 kW de potencia generada en un 5.45% de los momentos registrados. Esta misma variable se mantiene produciendo entre 5 kW y 10 kW en un 22.02% de ocasiones, quedando entre 0.5 kW y 5 kW un porcentaje del 39.15%. Por tanto, una gran parte del tiempo se generan entre 0 y 0.5 kW, rango de generación prácticamente nula que acumula el restante 33.38%.

De nuevo, se ha observado como una en numerosas ecuaciones la instalación no genera energía. Este elevado valor de frecuencia se debe a lo explicado previamente, a pesar de que en este caso la instalación cuenta con 12 kW de instalación solar fotovoltaica junto a otros 12 kW instalados a partir de tres aerogeneradores. Aun disponiendo de la tecnología eólica durante las horas de oscuridad, se sigue produciendo mucha más potencia en conjunto durante las horas de sol, ya que la velocidad del viento es bastante leve y variable durante la noche. A pesar de esto, es el mejor escenario y el elegido como óptimo ya que durante la noche se consume, por lo general, y así ocurre en el perfil de consumo introducido, mucha menos energía y, como consecuente, se requiere de menos generación que durante el transcurso de la jornada.

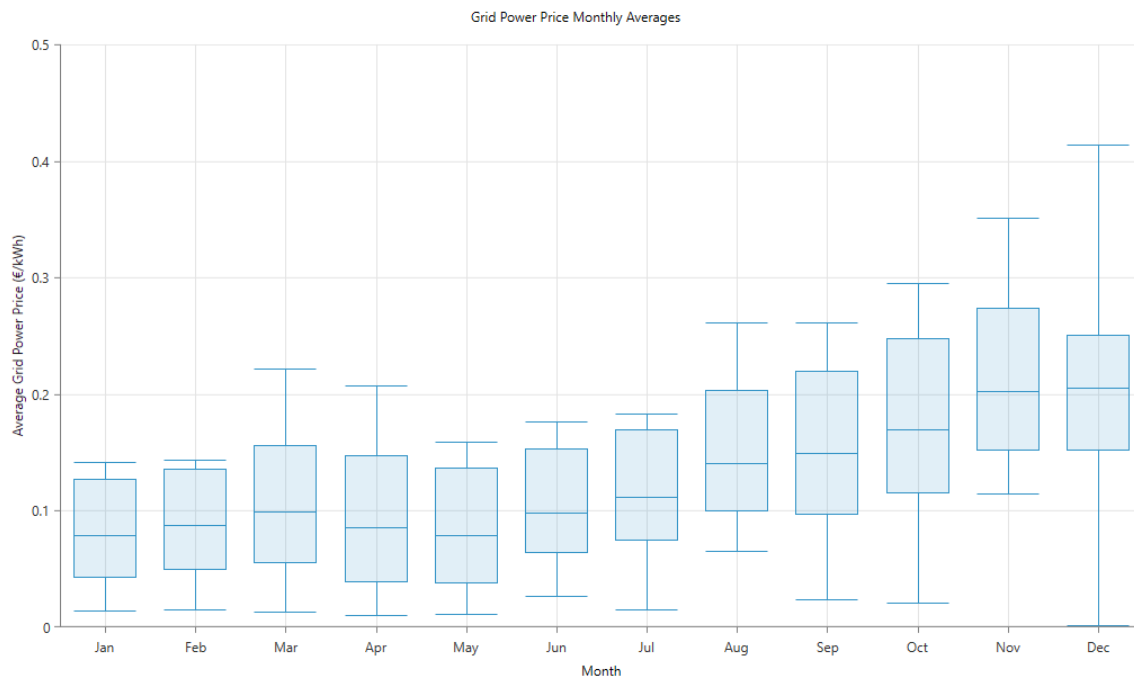


ILUSTRACIÓN 32. PRECIO MEDIO DE LA ENERGÍA A LA VENTA POR LA RED ELÉCTRICA EN €/KWH EN FUNCIÓN DEL MES DE 2021

Es muy interesante añadir la gráfica de la Ilustración 32 que refleja el precio de la energía por parte de la red eléctrica en España por meses a lo largo del año 2021. En esta se puede observar una clara subida del precio de la energía según avanza el año. Este incremento constante se debe al encarecimiento del precio del gas natural, la cual es una materia prima encargada de marcar el precio del mercado de electricidad al ser la última en entrar en la puja, habiendo elevado su valor y precio desorbitadamente al ser sustituyente del carbón.

La normativa contra el cambio climático también encarecería su precio al incluir un impuesto por toneladas emitidas de dióxido de carbono. Además, la subida repentina del precio del gas se debe al desabastecimiento por parte de Rusia al comienzo de sus problemas con Ucrania, hacia toda la Unión Europea. En concreto España se vio afectada por el cierre de conexión entre Marruecos y Argelia, ya que este último se encargaba del suministro a la Península Ibérica, empeorando aún más la crisis del sector energético [16].

En conclusión, en un contexto que hace que la Unión Europea sea muy dependiente, importando el 90% del total de su suministro de gas natural, se presenta un diagnóstico claro de la situación. El aumento de la demanda, el incremento disparatado en los precios del gas y el aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), son las razones que causaron este descontrol. Es importante destacar que Rusia abastece aproximadamente el 40% de este suministro total que necesita la Unión Europea.

Para abordar esta problemática, se propone un consenso entre los países miembros de la UE. La Comisión Europea sugiere la implementación de distintas medidas, como la adquisición conjunta de gas para los países miembros, la creación de reservas obligatorias de materia prima y una mayor cooperación entre los Estados de la Unión Europea, fomentando las ayudas entre países vecinos cuando las requieran.

Adicionalmente, se da importancia a la necesidad de impulsar el uso de fuentes de energía renovable, lo que coincide con los objetivos ya establecidos previamente de la Unión Europea para la transición hacia una generación energética más sostenible y la reducción de emisiones de carbono o gases de efecto invernadero. A medida que se reduzca la dependencia hacia los combustibles fósiles y se aumente la proporción de energía renovable en el mercado energético, la Unión Europea logrará alcanzar una mayor estabilidad en los precios de la energía. En resumen, hacer un mayor énfasis en las energías renovables conducirá a una menor dependencia y, como consecuencia, a unos precios del mercado eléctrico mucho más asequibles y razonables.

En los resultados de esta última simulación de instalación, la cual cuenta con paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y una conexión a red eléctrica, se pueden analizar distintos valores energéticos y económicos dados por Homer Pro para lograr extraer de ellos conclusiones de cuál sería el mejor escenario de instalación para el caso concreto bajo estudio y determinar el nivel de viabilidad.

En conjunto, se tiene que en esta instalación se compra un total de energía durante el año a la red de 1198 kWh, cifra que se encuentra muy por debajo de todos los ejemplos estudiados anteriormente, así como del caso de entorno sin ningún tipo de instalación renovable con conexión a la red. Lo mismo ocurre con la energía vendida a la red, superando notablemente los casos previos alcanzando los 23198 kWh, siendo esta cifra más del doble que en cualquiera de los anteriores casos de instalación renovable con una única tecnología, con 9 kW de potencia instalada.

Abordando los factores económicos resultantes, en cuanto a la inversión inicial se necesitan 9000€ para los paneles fotovoltaicos, 18000€ para los tres aerogeneradores y 300€ adicionales para el convertidor de corriente requerido, sumando el total de elementos un CAPEX de 29023€ de desembolso. El coste operacional del sistema supone -1416€ al año, resultando de nuevo un beneficio para el usuario.

		Architecture						Cost			
						PV (kW)	G3	Grid (kW)	Converter (kW)	NPC (€)	CAPEX (€)
Base system								999,999		€11,427	€0.00
Proposed system						9.00	3	999,999	6.74	€4,130	€29,023

Metric	Value
Present worth (€)	€7,297
Annual worth (€/yr)	€415
Return on investment (%)	3.1
Internal rate of return (%)	5.0
Simple payback (yr)	14.05
Discounted payback (yr)	18.34

ILUSTRACIÓN 33. FACTORES ECONÓMICOS DE LA INSTALACIÓN HÍBRIDA CON PRECIOS DE 2021, INCLUYENDO AÑOS DE AMORTIZACIÓN

Como se muestra en la Ilustración 33, este sistema bajo estudio supone un periodo de amortización de la inversión de 14.05 años, disponiendo de los casi 19 años restantes hasta el fin del proyecto de beneficios íntegros para el prosumidor. El coste operacional indicado por estos 14.05 años, sumado a la cantidad ahorrada por lo que se habría desembolsado disponiendo únicamente de conexión a red (649.86€) multiplicada también por estos 14.05 años, resulta el valor del CAPEX estudiado, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$CAPEX = 1416 * 14.05 + 649.86 * 14.05 = 29025€$$

Además, este sistema ofrece un NPC total más pequeño que los casos estudiados previamente, con 4130€. La diferencia mayor frente al caso base supone más ahorro en comparación con los otros tipos de instalación comentados.

4.3 Estudio para precios de 2022

En este apartado se repite el estudio de instalación combinada para los datos de precios registrados durante el año 2022. De nuevo, se extraen dos columnas de datos de ESIOs con los valores de PVPC y precio de venta de excedentes para el pequeño consumidor, tomados por horas.

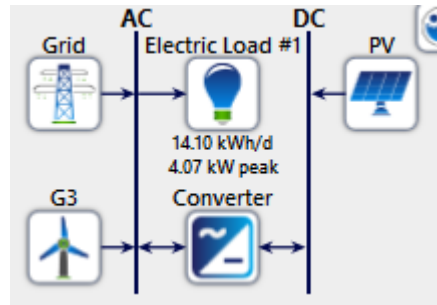


ILUSTRACIÓN 34. ESQUEMA DE INSTALACIÓN HÍBRIDA CON CONEXIONES A BUSES AC Y DC

Como indica la Ilustración 34, en este caso se limita la instalación a 3 aerogeneradores de 3 kW de potencia instalada cada uno, lo que en conjunto hace 9 kW de generación eólica, y otros 9 paneles fotovoltaicos de 1 kW cada uno, sumando también 9 kW de potencia instalada solar.

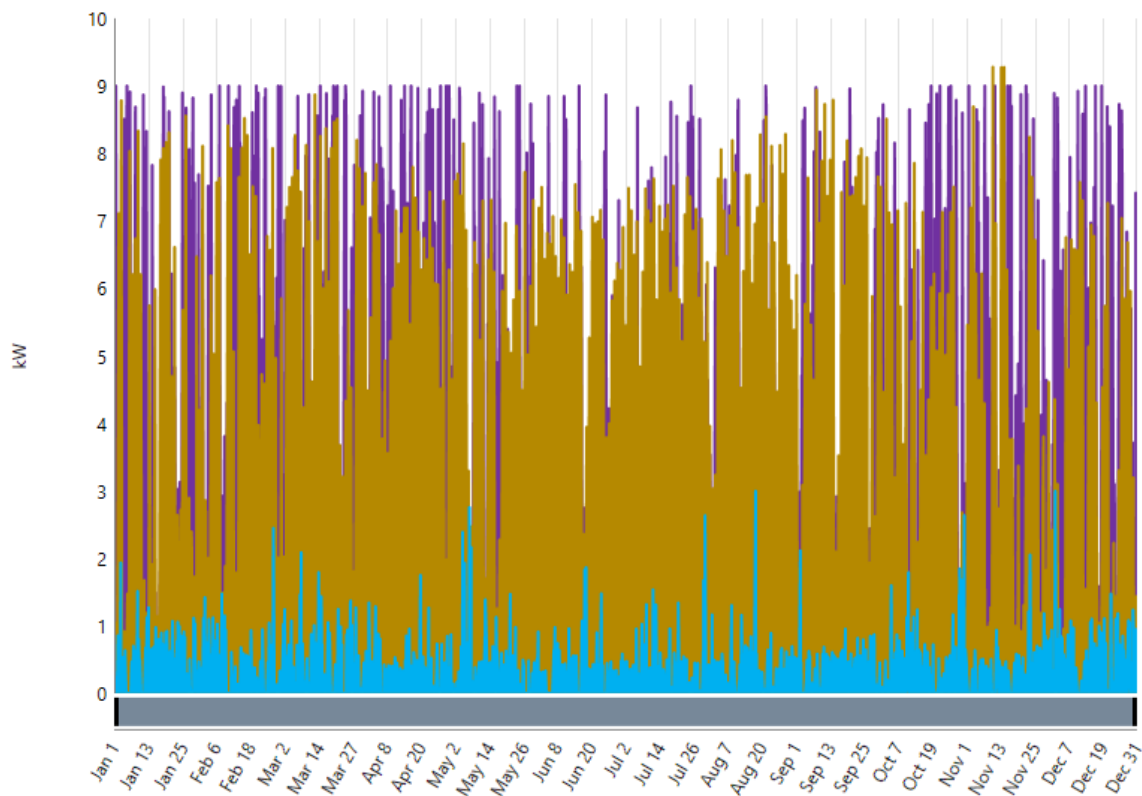


ILUSTRACIÓN 35. GRÁFICA DE GENERACIÓN EÓLICA, SOLAR FOTOVOLTAICA Y APORTACIONES POR PARTE DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN PARA EL AÑO 2022

En la gráfica de la Ilustración 35 se muestran las generaciones a partir de cada tipo de tecnología. La potencia producida por los aerogeneradores aparece en morado, la correspondiente a los paneles fotovoltaicos en amarillo y las aportaciones de la red en azul. Estos valores, aunque en diferente escala debido a la variación de potencia instalada, coinciden con los analizados previamente ya que el perfil de carga doméstico introducido es el mismo. Con la misma potencia instalada para ambas tecnologías, se observa mejor a simple vista cómo se complementan entre sí. La suma de potencia instalada logra que la potencia

comprada a la red sea mínima, consiguiendo una gran penetración renovable, así como un gran ahorro con el paso de los años.





















	Architecture				Grid	
					Energy Purchased (kWh) 	Energy Sold (kWh) 
					1,198	23,282
					2,059	11,625
					2,629	9,999
					5,147	0

ILUSTRACIÓN 36. COMPARACIÓN DE COMPRA Y VENTA TOTAL DE ENERGÍA SEGÚN EL TIPO DE INSTALACIÓN

En este primer escenario de generación combinada mostrado en la Ilustración 36 comparado con el resto, la suma de energía comprada a la red disminuye a 1198 kWh, y el total de excedentes vendidos alcanzan los 23282 kWh, logrando grandes beneficios con esta inyección. Comparados con el resto de los casos mostrados, se percibe una mejora tanto al disminuir las compras de energía a la red como en el disparado aumento de excedentes vendidos, valor debido a la disposición del doble de potencia instalada de energías renovables en el primer caso que en los dos que le siguen.

También se observa que la instalación únicamente de aerogeneradores alcanza un valor menor de energía aportada por la red de distribución, resultando un aspecto positivo para el usuario, a la vez que logra vender más excedentes de energía, comparada con la instalación de paneles solares fotovoltaicos.























	Architecture				Cost			
					NPC (€) 	Operating cost (€/yr) 	CAPEX (€) 	OPEX (€/yr) 
					-€28,053	-€3,255	€29,185	-€3,255
					-€4,756	-€1,294	€18,000	-€1,294
					-€563.46	-€667.81	€11,179	-€667.81
					€26,167	€1,488	€0.00	€1,488

ILUSTRACIÓN 37. COMPARACIÓN DE INSTALACIÓN HÍBRIDA (9 kW SOLAR + 9 kW EÓLICA) COMO PRIMER CASO, EÓLICA (9 kW) COMO SEGUNDO, SOLAR (9 kW) COMO TERCERO Y SIN INSTALACIÓN RENOVABLE (SOLO RED) COMO ÚLTIMA OPCIÓN

En la Ilustración 37 se muestra el coste de operación que se produce anualmente con la instalación combinada eólica y solar. Se alcanza un valor de -3255€, sabiendo que el signo negativo declara una ganancia para el prosumidor, superando por gran diferencia al resto de posibilidades de instalación mostradas.

Lo mismo ocurre con el valor del NPC, que en este escenario combinado alcanza los -28053€, muy alejado de las cifras obtenidas en el resto de las opciones. Esta instalación presenta este término negativo, a diferencia de todos los sistemas anteriores, por lo que supone un beneficio para el prosumidor además del ahorro logrado.

La inversión inicial del total instalado supone un coste de 29185€, de nuevo mucho mayor que en el resto de los casos debido a la implementación de dispositivos que alcanzan en conjunto el doble de potencia.

		Architecture				Cost	
		PV (kW)	G3	Grid (kW)	Converter (kW)	NPC (€)	CAPEX (€)
Base system				999,999		€26,167	€0.00
Proposed system		9.00	3	999,999	7.28	-€28,053	€29,185

Metric	Value
Present worth (€)	€54,220
Annual worth (€/yr)	€3,083
Return on investment (%)	12.3
Internal rate of return (%)	15.8
Simple payback (yr)	6.15
Discounted payback (yr)	6.88

ILUSTRACIÓN 38. FACTORES ECONÓMICOS DE LA INSTALACIÓN HÍBRIDA CON PRECIOS DE 2022, INCLUYENDO AÑOS DE AMORTIZACIÓN

Este sistema, como se indica en la Ilustración 38, se amortiza en 6.15 años. Esto supone que se tarda muy poco tiempo en recuperar la inversión realizada, además de disponer de casi 19 años próximos de ahorro y beneficio. Por lo tanto, el modelo de instalación combinada se concluye que resulta muy eficiente para el prosumidor.

Tras haber llevado a cabo el estudio de todas estas simulaciones, resulta interesante calcular el factor de carga obtenido en cada caso. En las siguientes ecuaciones se muestra el cálculo de cada uno de ellos.

$$f_{C_{solar}} = 13225 \left(\frac{kWh}{año} \right) \div 9 (kW) \div 8760 (h) \times 100 = 16.77\%$$

$$f_{C_{eólica}} = 14713 \left(\frac{kWh}{año} \right) \div 9 (kW) \div 8760 (h) \times 100 = 18.66\%$$

Todos los resultados obtenidos se calculan en base a una altura de 17 metros para el aerogenerador, ya que es la predeterminada por el programa. Sin embargo, al reducirla a 5 metros se observa que disminuye notablemente la producción hasta 8591 kWh/año, ya que se supone que la turbina recibe menos viento. Al bajar la producción anual de los

aerogeneradores, lo hará con ella el factor de carga de esta tecnología, por lo que se observa una gran diferencia entre este y el obtenido en la solar, que no varía significativamente al fijar la altura a 5 metros.

$$f c'_{solar} = f c_{solar}$$

$$f c'_{eólica} = 8591 \left(\frac{kWh}{año} \right) \div 9 (kW) \div 8760 (h) \times 100 = 10.9\% < f c_{eólica}$$

Para completar el estudio, es interesante obtener el valor diario, multiplicando lo obtenido por 24 horas. Se tiene que la tecnología solar está en funcionamiento produciendo energía en este sistema durante 4 horas al día. En el caso de una altura de 17 metros, la eólica trabaja durante 4.48 horas, es decir, unas 4 horas y 29 minutos. Sin embargo, para una altura del aerogenerador de 5 metros se tiene que produce durante 2.6 horas, es decir, aproximadamente 2 horas y 37 minutos, destacando la gran diferencia obtenida.

4.4 Estudio para precios de 2022 sin venta de excedentes

Se estudia un escenario en el que los precios de compra de energía se mantienen como los extraídos del año 2022, pero con el cambio de que los precios de compra de excedentes por parte de la red se reducen a cero, anulando la posibilidad de inyectar energía sobrante generada. Con este sistema, se analiza la viabilidad de la instalación simplemente por el ahorro de no comprar energía al consumir lo generado, sin los grandes beneficios de venta añadidos vistos en los casos anteriores.

Por lo tanto, se importa al programa en el apartado de 'Grid' una base de datos con la primera columna, correspondiente al PVPC, similar a los de 2022, y la segunda una columna de ceros. El resto de configuración del sistema coincide con el apartado anterior, manteniendo la instalación tanto de paneles solares como de aerogeneradores. Sin embargo, en este caso se va a modificar el modelo seleccionado de aerogenerador añadiendo uno de 1 kW de potencia instalada para que el programa pueda hacer una búsqueda libre y similar para ambas tecnologías. Al no poder recurrir a la venta de excedentes, la instalación resultante va a contar con mucha menos potencia por lo que es interesante hacer este cambio y poder comparar correctamente y determinar la mejor opción, dado que en caso de turbinas de 3 kW se limita la búsqueda a múltiplos de tres.

Al realizar el estudio, el programa determina como mejor opción la instalación de 1 kW correspondiente a un aerogenerador y 1.92 kW mediante paneles solares fotovoltaicos. Como se ha dicho, la situación de precios planteada para este sistema supone una mayor dependencia de la red ya que se anula la ganancia por excedentes de la que sí se dispone en las instalaciones anteriores. Instalar una potencia mayor de cualquiera de las dos tecnologías supondría una pérdida frente a esta opción.

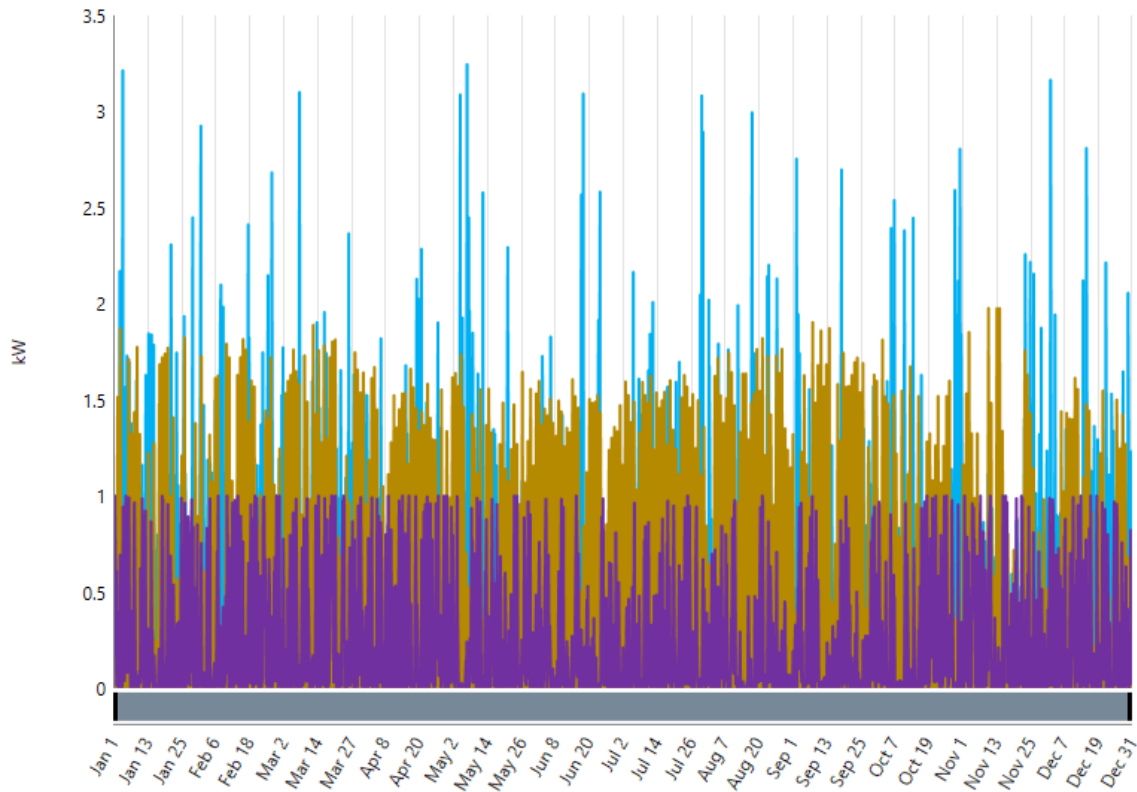


ILUSTRACIÓN 39. REPRESENTACIÓN DE LA GENERACIÓN DE POTENCIA MEDIANTE TECNOLOGÍAS EÓLICA Y SOLAR, ASÍ COMO LA COMPRA A LA RED DE DISTRIBUCIÓN A LO LARGO DEL AÑO 2022 SIN POSIBILIDAD DE VENTA DE EXCEDENTES

La Ilustración 39 muestra en morado la potencia producida a partir de la tecnología eólica, instalando un aerogenerador de 1 kW y en amarillo la solar con instalación de 1.92 kW con paneles fotovoltaicos. En azul se representa la aportación de la red, que supone en este caso mayor impacto en el sistema, con numerosos picos de hasta 3.3 kW ocasionalmente, pero con gran variabilidad a lo largo del año.

Las medias calculadas para todos los meses se encuentran entre 0.24 y 0.41 kW de potencia comprada a la red, lo cual es un valor bastante reducido. Sin embargo, hay muchos picos que representan situaciones en las que se recurre a la red para grandes aportaciones, teniendo un el máximo registrado en el año 2022 en el mes de mayo alcanzando los 3.24 kW de potencia comprada.

Teniendo un total de potencia instalada renovable de 2.92 kW, la penetración de las fuentes de energía renovables se ve reducida frente a las instalaciones estudiadas previamente, las cuales disponían de mucha más potencia instalada en conjunto con ambas tecnologías.

Se obtiene un NPC de 19042€, frente a los 26167€ que supone el caso base. Esta opción dada como la más rentable coincide con el NPC más pequeño frente al resto de posibilidades dadas como viables por el programa, pues es la que supone un mayor ahorro total.

Según este resultado dado como mejor opción bajo los requisitos impuestos al programa, se compra un total de energía de 2712 kWh a la red. Además, destaca que el coste operacional obtenido en este caso es de 837.09€ positivos, suponiendo pérdidas anuales para el usuario. Sin instalación este coste supondría 1488€ anuales por lo que sí hay un ahorro en este sentido, pero no supone una ganancia. A pesar de esto, el tiempo de amortización de la inversión es de

6.64 años dado que el CAPEX total del sistema es bastante pequeño comparado con instalaciones anteriores, dado como 4323€, por lo que a partir de esta fecha el prosumidor habría recuperado el desembolso inicial y comenzaría a ahorrar la diferencia entre el coste anual que supone el caso base sin instalación y el coste calculado para esta instalación bajo estudio.

CAPÍTULO 5. CASO DE ESTUDIO EN MODO ISLA CON ALMACENAMIENTO

En este capítulo, se estudia la viabilidad de añadir a la instalación combinada de Homer Pro una batería inteligente en modo isla, es decir, sin conexión del sistema a red. Este sistema se basa en el total autoconsumo del prosumidor, almacenando los excedentes y utilizándolos posteriormente cuando en un momento concreto el consumo es mayor que la generación.

Este caso puede resultar interesante ya que el usuario se vuelve autosuficiente e independiente de la red de distribución, de modo que el único coste sería la inversión inicial realizada para instalar todos los dispositivos que conforman la instalación. Para una búsqueda de resultados más exacta, se selecciona en este caso el aerogenerador genérico proporcionado por el software de 1 kW de potencia instalada.

En el apartado de componentes, se añade la batería de almacenamiento denominada 'Storage', del tipo Li-Ion [ASM] de 1 kWh. Se incluye tanto este como el resto de los componentes necesarios para la instalación híbrida con espacio de búsqueda libre (Homer Optimizer) de modo que se encuentre el resultado más apropiado. Como no se dispone de la conexión a red, se va a recurrir a una gran capacidad de almacenamiento para poder cubrir las faltas de suministro.

Analizando los resultados, la mejor combinación para esta instalación consta de 10.7 kW de paneles fotovoltaicos, 4 kW de aerogeneradores y un sistema de almacenamiento de energía con capacidad total 23 kWh.

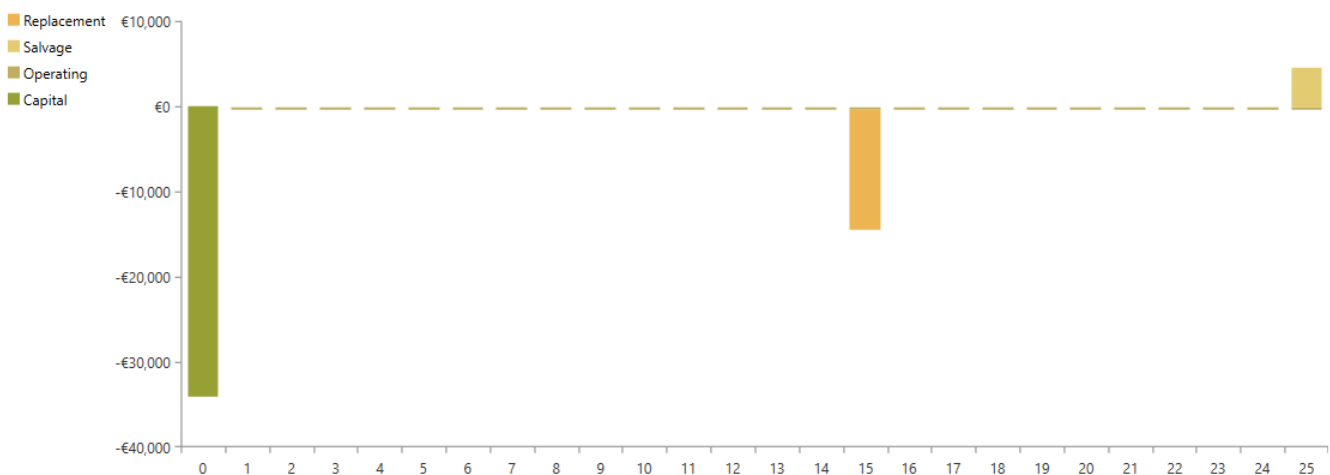


ILUSTRACIÓN 40. EVOLUCIÓN DE LOS GASTOS ANUALES DE INSTALACIÓN HÍBRIDA AISLADA CON ALMACENAMIENTO

Se muestra en la Ilustración 40 la evolución económica del sistema instalado a lo largo de los 25 años que dura el estudio. Al inicio se desembolsa un CAPEX total de 34104€, contando con 10747€ de la instalación de los paneles fotovoltaicos, 8000€ correspondientes a los cuatro aerogeneradores, 14047€ por las baterías de almacenamiento, además de 1309€ del convertidor. En este caso aumenta el coste del convertidor de corriente debido a que los dispositivos instalados vienen predeterminados como generación en continua, tanto las placas solares como los aerogeneradores, así como la batería. Por ello, el funcionamiento del convertidor de corriente es mayor y con este, su precio.

Como se observa en la ilustración 40, en el año 15 desde la instalación se vuelve a tener un gasto de 14047€ correspondiente al reemplazamiento de las baterías de Li-Ion, las cuales tienen 15 años de vida fijados por el programa. Al final del proyecto, se tiene que tras los 25 años se ha producido una ganancia total de 4682€.

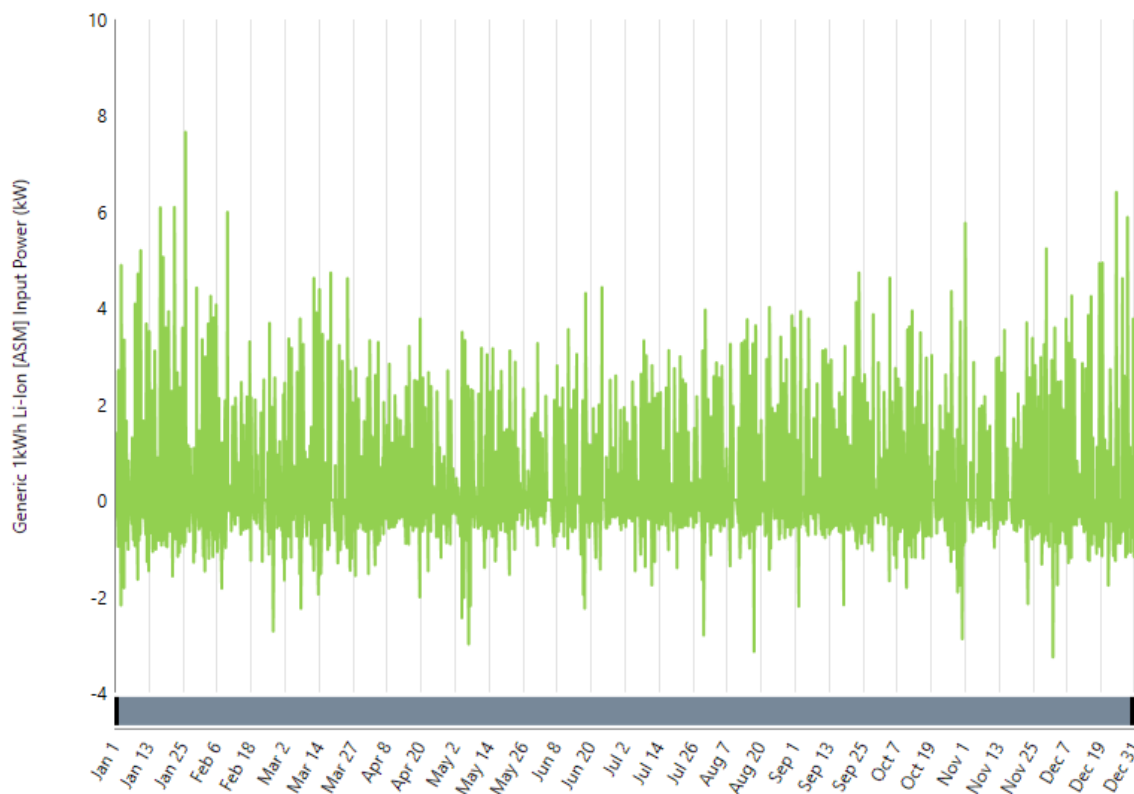


ILUSTRACIÓN 41. POTENCIA ALMACENADA Y APORTADA POR LA BATERÍA LI-ION

En cuanto al impacto del sistema de almacenamiento en esta instalación aislada, como se observa en la Ilustración 41, tiene un papel muy importante. Alcanza el valor máximo de 7.66kW de potencia almacenada el 26 de enero, y 3.27 kW de potencia aportada al sistema el 2 de diciembre. Durante todo el año se observa una gran cantidad de potencia guardada en la batería, que sirve de conserva para un posible momento futuro de insuficiente o total desabastecimiento de los dispositivos instalados.

Para este caso concreto, con un consumo total proveniente de los sistemas de generación renovable, se estudia la penetración renovable mensual, teniendo valores muy elevados. El valor medio mensual más pequeño de todo el año estudiado aparece en diciembre con un

334.12%, siendo el porcentaje de penetración renovable medio mensual más elevado de 652.66% en el mes de julio. Estos resultados tan altos determinan de nuevo que este sistema supone un gran impacto a favor del medio ambiente, pues al estar aislado de la red de distribución no se emplean energía producidas a partir de fuentes no renovables.

Al igual que en el último apartado del capítulo anterior, no se produce venta de excedentes ya que no hay conexión, al igual que no se puede comprar energía. Al contar con la batería de almacenamiento esta opción es posible, ahorrando el precio de toda la energía que se aportaría por la red al sistema, aunque con este método no se tiene ninguna ganancia por los excedentes. Sigue siendo una gran opción a pesar de no inyectar energía, ya que esta se aprovecha en otro momento, de modo que el usuario termina ahorrando la diferencia que habría entre el precio de venta de excedentes con el precio de compra que corresponda, siempre teniendo bastante más caro el segundo.

Se registra el valor máximo de producción eléctrica en exceso, es decir, no consumida y en consiguiente almacenada, en el mes de marzo alcanzando los 13.44 kW de potencia. Los valores medios mensuales de este factor muestran un patrón estacional, ya que durante el invierno se mantienen entre 1.2 kW y 2 kW mientras que según se acercan los meses más cálidos este rango aumenta, teniendo medias entre 2 kW y 2.3 kW.

De nuevo en este capítulo se puede analizar el factor de carga obtenido para cada tecnología. Primero, manteniendo el valor predeterminado de altura de los aerogeneradores en 17 metros, se tienen:

$$f_{C_{solar}} = 15793 \left(\frac{kWh}{año} \right) \div 10.7 (kW) \div 8760 (h) \times 100 = 16.85\%$$

$$f_{C_{eólica}} = 6533 \left(\frac{kWh}{año} \right) \div 4 (kW) \div 8760 (h) \times 100 = 18.64\%$$

En el caso de reducir la altura de las turbinas a 5 metros, el programa determina que el mejor resultado es una instalación fotovoltaica de 13.5 kW, 2.8 kW más de potencia que en el caso anterior, y de nuevo 4 kW mediante 4 aerogeneradores de 1 kW. Al generar menos energía por el alcance de menos flujo de viento por parte de la eólica, el software incrementa la potencia instalada de paneles fotovoltaicos como forma de compensación. Además, este escenario dispone de un total de 26 kWh de almacenamiento de energía, 3 kWh más que antes.

Con esta variación, el coste de operación aumenta a 761.09€/año, con un ahorro total a los 25 años gracias a la instalación de 5225€. El CAPEX es aumenta también hasta 38449€. Este valor sirve para estimar el total de años de amortización, los cuales no se dan por el programa ya que no tiene opción de red. Suponiendo un gasto de la instalación con conexión a red similar a los casos previos sin instalaciones renovables, tomando el valor de 1488€/año con los precios de 2022, se obtiene:

$$Años_{amortización} = \frac{CAPEX}{Coste_{op} + Coste_{Red}} = \frac{38449}{761.09 + 1488} = 17.1 \text{ años}$$

Por lo tanto, con esta opción se tarda más tiempo en recuperar la inversión, pero sigue siendo viable al contar con varios años de beneficios para el usuario una vez amortizado el gasto.

En comparación, el factor de carga solar es muy similar pero el eólico, como ocurría en el capítulo anterior al hacer esta misma comparación, se reduce notablemente.

$$f c'_{solar} = 19838 \left(\frac{kWh}{año} \right) \div 13.5 (kW) \div 8760 (h) \times 100 = 16.77\%$$

$$f c'_{eólica} = 3820 \left(\frac{kWh}{año} \right) \div 4 (kW) \div 8760 (h) \times 100 = 10.9\%$$

De esta forma, se tiene funcionando la parte solar de la instalación durante 4 horas al día, mientras que la parte que emplea tecnología eólica produce únicamente durante 2.62 horas, unas 2 horas y 37 minutos.

El valor del NPC obtenido es de 51832€, cifra muy elevada debido a la cantidad de dispositivos empleados, destacando los 26 kWh de capacidad de la batería. Aun así, supone un gran ahorro en comparación con el resto de las posibilidades, comparando por ejemplo con el caso de instalación únicamente eólica de 15 kW y 79 kWh de almacenamiento de energía, con un coste operacional para esta instalación de 2035€ y un NPC de 111863€, cifras mucho más elevadas que las del sistema obtenido como opción más viable.

CAPÍTULO 6. EMULACIÓN EN PROTOTIPO DE PLANTA REAL FOTOVOLTAICA CON ALMACENAMIENTO

En este capítulo se va a emular la implementación a la planta real de generación solar fotovoltaica, situada en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá, de una serie de aerogeneradores además de un sistema de almacenamiento de energía.

6.1 Simulación de aerogeneradores a instalar en planta real

El aerogenerador seleccionado para el estudio de viabilidad de su instalación en el centro sigue una línea de generación en función de la velocidad del viento percibida. Se representa con la ayuda de Excel la curva de producción de potencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento, correspondiente a la siguiente ilustración.

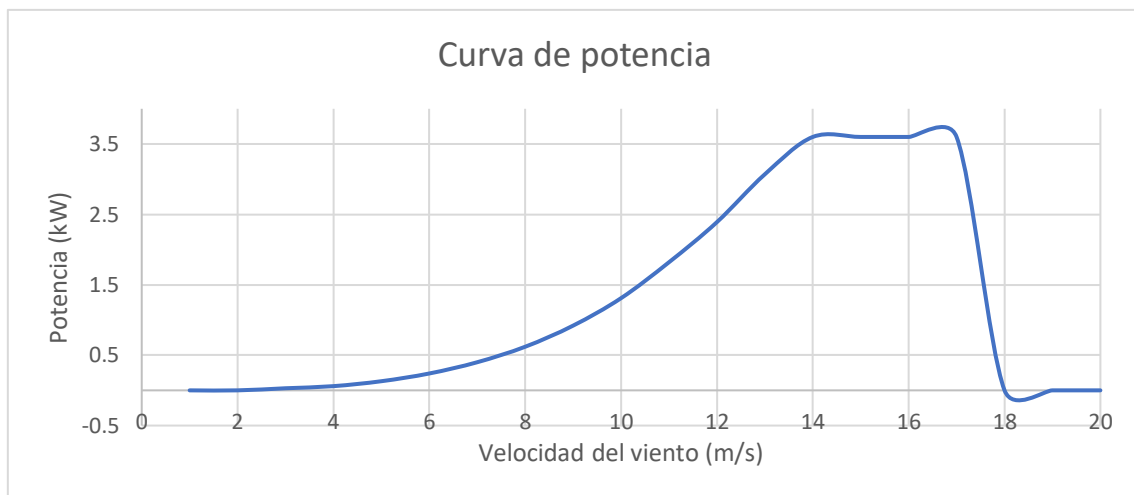


ILUSTRACIÓN 42. CURVA DE GENERACIÓN DE POTENCIA EN kW DE CADA AEROGENERADOR EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN M/S, FUENTE: [17]

Para analizar la gráfica representada en la Ilustración 17 de la manera más precisa posible, se ha dividido en siete tramos con el fin de linealizarla y obtener la función de cada uno de ellos, añadiendo como elemento del gráfico la línea de tendencia y mostrando en cada figura la ecuación que corresponde, con la opción 'Presentar ecuación en el gráfico'.

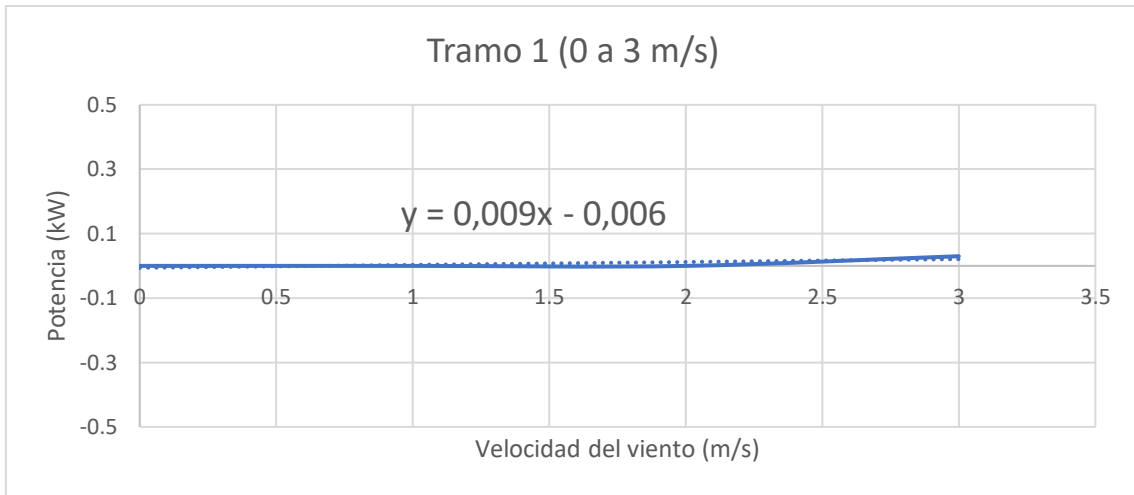


ILUSTRACIÓN 43. PRIMER TRAMO. FUNCIÓN LINEALIZADA PARA VELOCIDADES DESDE 0 HASTA 3 M/S

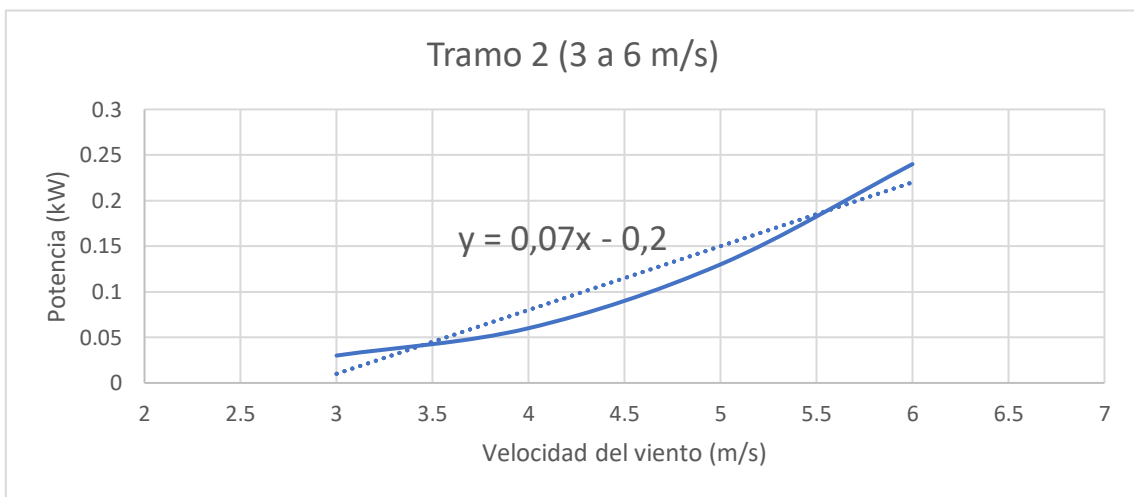


ILUSTRACIÓN 44. SEGUNDO TRAMO. FUNCIÓN LINEALIZADA PARA VELOCIDADES DESDE 3 HASTA 6 M/S

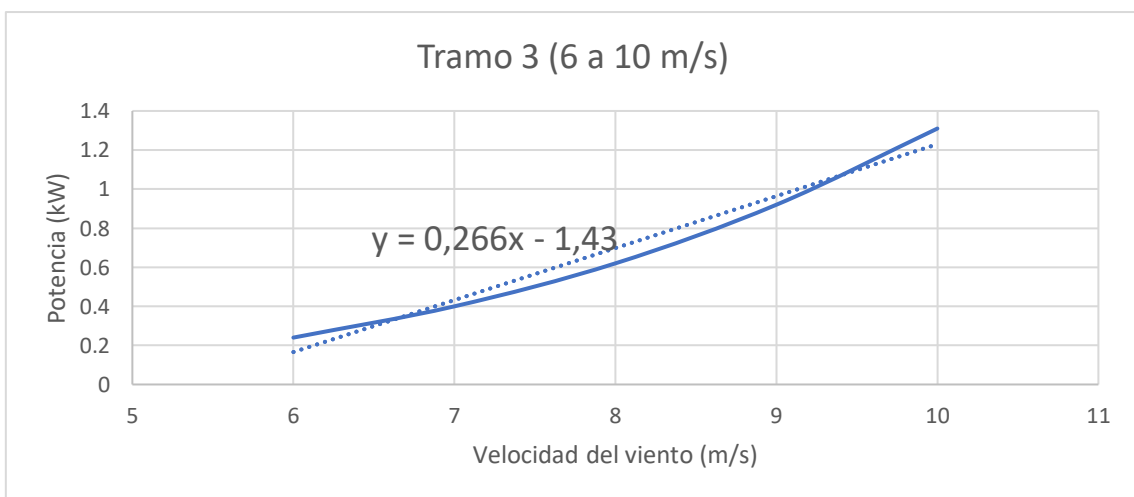


ILUSTRACIÓN 45. TERCER TRAMO. FUNCIÓN LINEALIZADA PARA VELOCIDADES DESDE 6 HASTA 10 M/S

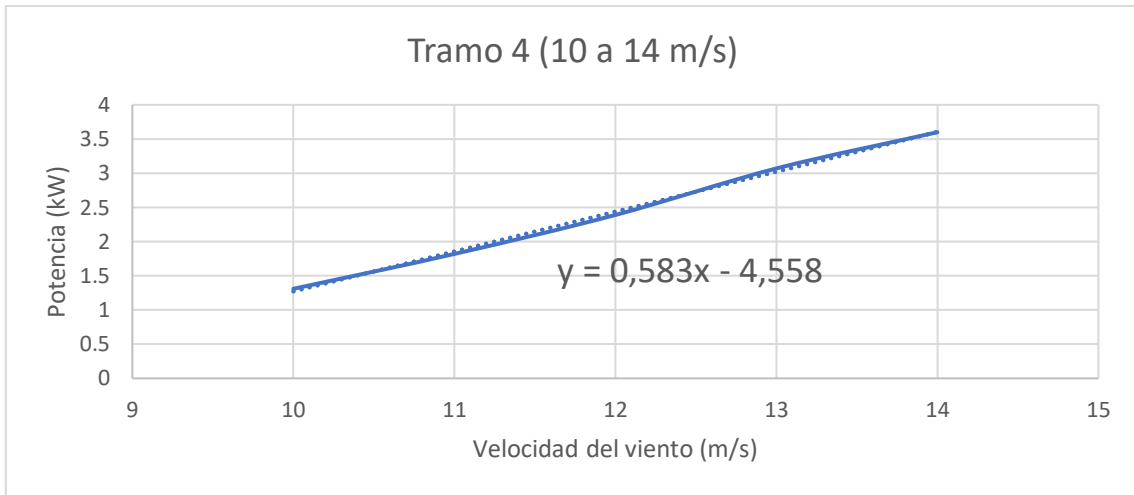


ILUSTRACIÓN 46. CUARTO TRAMO. FUNCIÓN LINEALIZADA PARA VELOCIDADES DESDE 10 HASTA 14 M/S

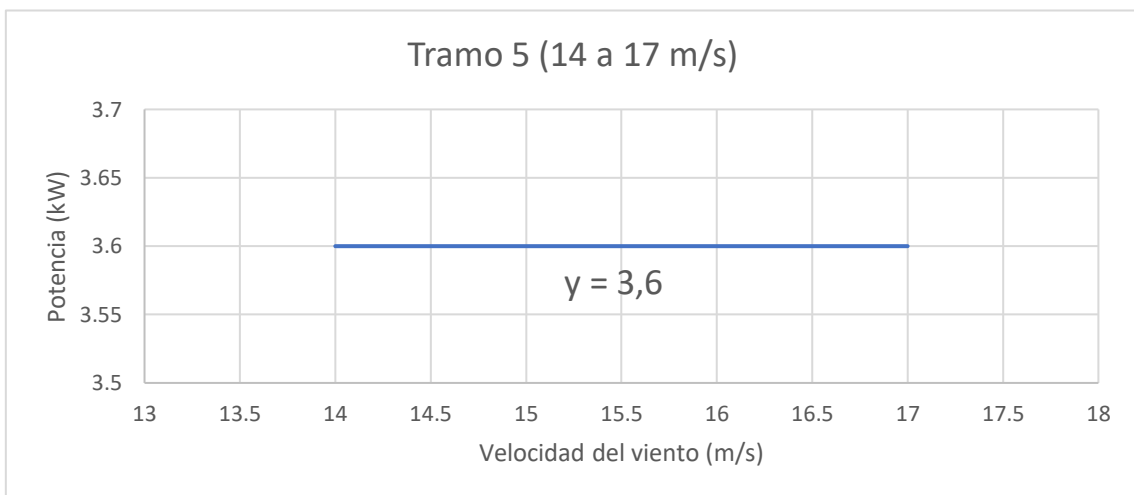


ILUSTRACIÓN 47. QUINTO TRAMO. FUNCIÓN LINEALIZADA PARA VELOCIDADES DESDE 14 HASTA 17 M/S

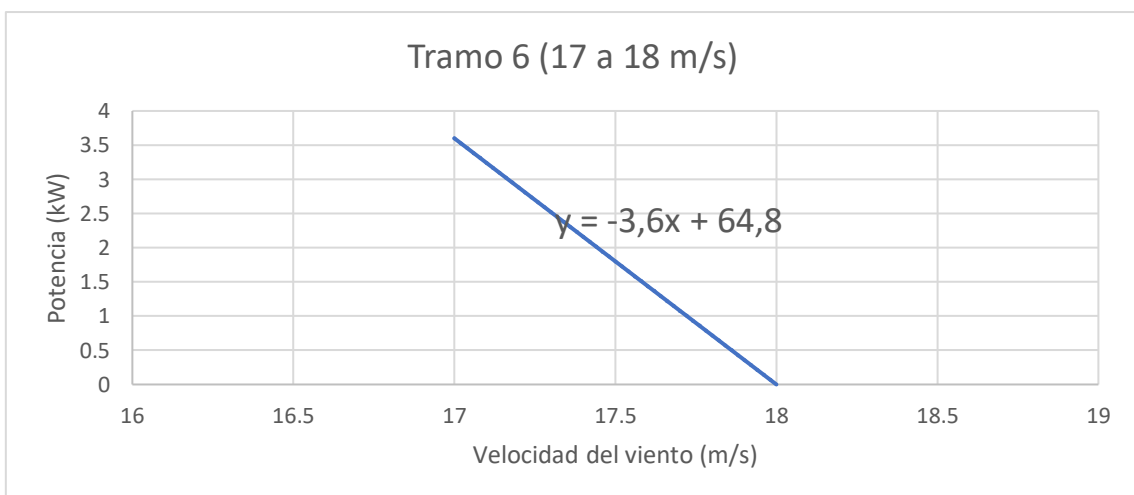


ILUSTRACIÓN 48. SEXTO TRAMO. FUNCIÓN LINEALIZADA PARA VELOCIDADES DESDE 17 HASTA 18 M/S

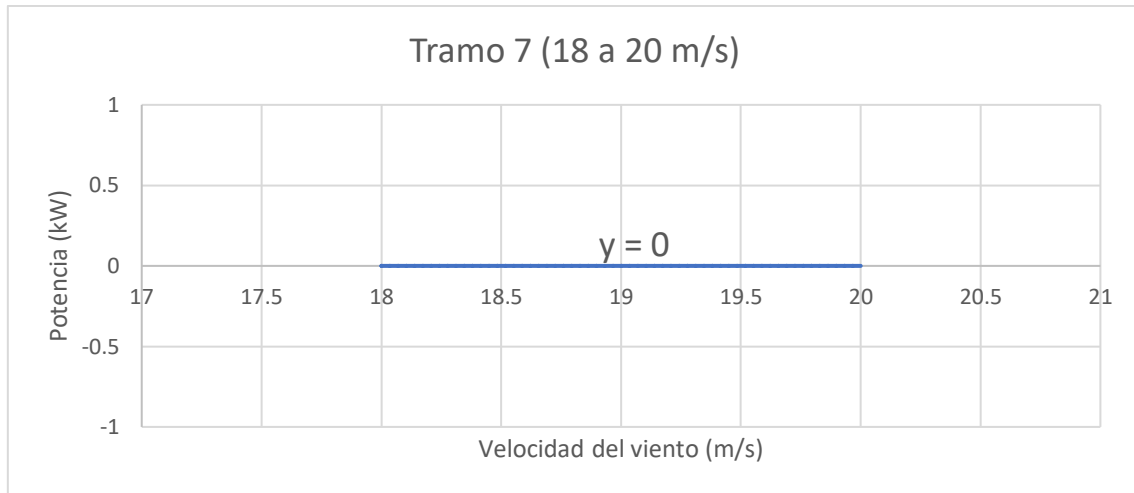


ILUSTRACIÓN 49. SÉPTIMO TRAMO. FUNCIÓN LINEALIZADA PARA VELOCIDADES DESDE 18 HASTA 20 M/S

De esta manera, una vez se tienen todas las ecuaciones mostradas en las Ilustraciones 43 a 49, se utiliza la función de cada tramo en función de la velocidad del viento detectada a cada hora, aplicando la fórmula correspondiente en cada caso para obtener los valores de potencia producidos por los aerogeneradores. Se supone una instalación de dos turbinas de potencia 3 kW cada una, alcanzando un total de potencia instalada de 6 kW a partir de la tecnología eólica.

En la universidad, se dispone de 3 kW de potencia instalada mediante paneles fotovoltaicos. Sin embargo, cuando se simula la generación eólica, se ha comprobado anteriormente que el factor de carga siempre se encuentra próximo a la mitad que el obtenido mediante la solar, motivo por el que se ha decidido hacer este estudio con el doble de instalación eólica. Por lo tanto, el resultado de potencia buscado es el doble que el resultante en las fórmulas de los tramos linealizados.

Dados estos valores de potencia que se obtendrían a partir de los aerogeneradores, se hace un estudio concreto del día 2 de septiembre de 2023, en el que se comparan la gráfica de generación solar fotovoltaica generada por la instalación real de la Universidad, con la gráfica simulada de generación eólica a partir de los valores de potencia anteriores. Los datos de la velocidad del viento de este día se extraen de AEMET, histórico registrado por el anemómetro de la estación de Alcalá de Henares – Encín [18].

Haciendo uso de MATLAB, se incluyen los datos extraídos de la instalación real en forma de variables, del tipo matriz 'double' para el tiempo la cual contiene la fecha exacta a estudiar extraído en un formato UNIX, dado en milisegundos desde el inicio de la base de datos, e igual para la potencia con los valores generados en dicho tiempo. Se genera una variable tipo 'datetime' que convierte el tiempo a un formato convencional que muestre la fecha como día y hora, ya que el formato UNIX no es comprensible a simple vista.

De la misma manera, se repite el proceso para los datos de generación eólica obtenidos a partir de los tramos linealizados anteriores, con nuevas variables de tiempo y potencia generada. Una vez introducidos todos los datos, se procede a representar mediante código las dos gráficas.

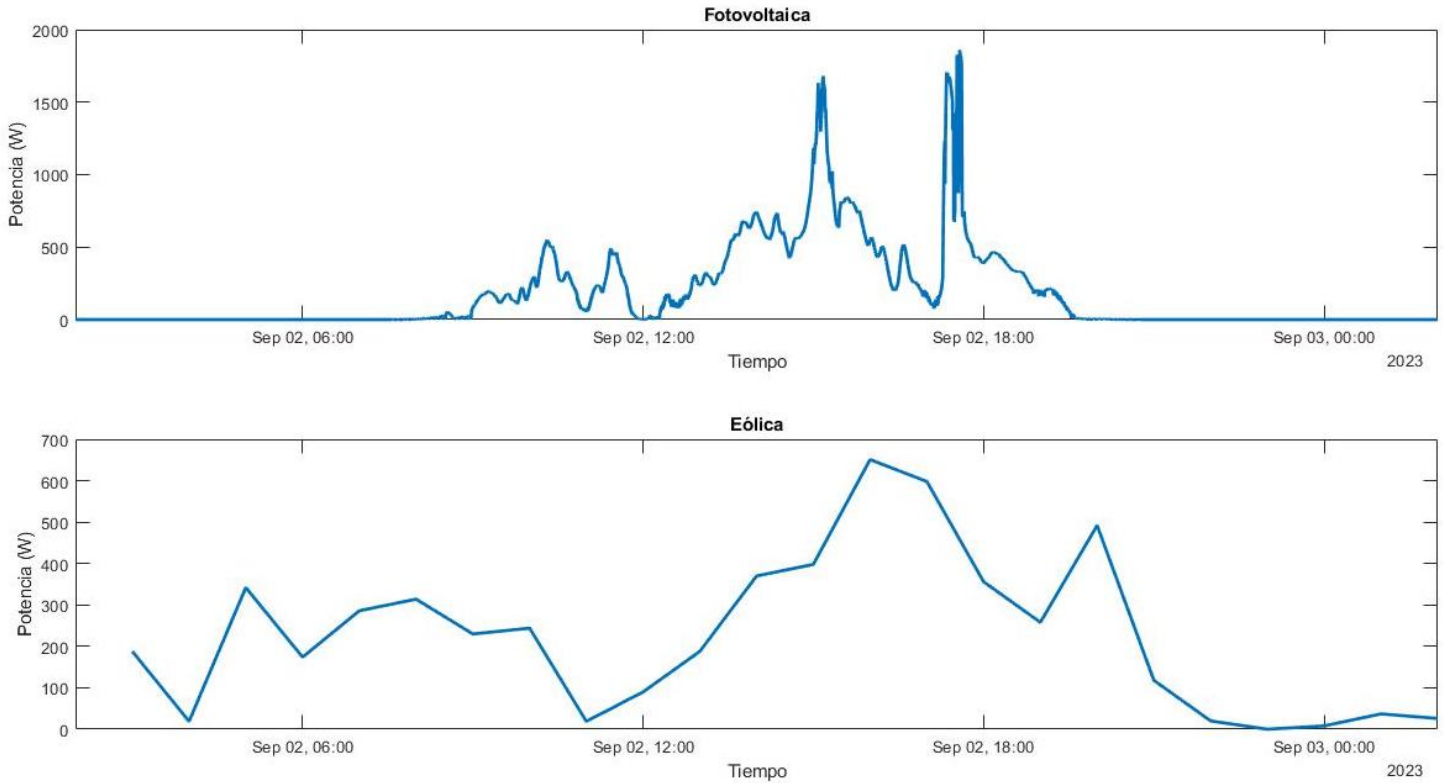


ILUSTRACIÓN 50. GRÁFICAS QUE REPRESENTAN LA GENERACIÓN DE POTENCIA MEDIANTE PANELES FOTOVOLTAICOS (SUPERIOR) Y AEROGENERADORES (INFERIOR) EL DÍA 2 DE SEPTIEMBRE DE 2023 EN LA UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Se obtienen las gráficas mostradas en la Ilustración 50. En planta real de paneles fotovoltaicos se toman datos cada tres o cuatro segundos, obteniendo una resolución muy alta y precisa. Sin embargo, para los datos de viento la mayor resolución posible en la que se han podido extraer es en horas, de modo que la gráfica inferior resulta mucho menos exacta que la primera al contar con muchos menos datos. A pesar de esto, se puede llevar a cabo una comparación de resultados.

Se analiza al detalle la curva de generación de tecnología solar fotovoltaica, distinguiendo dos picos cerca de las 15:00 y de las 18:00. Esta gran diferencia a lo largo del día se debe a que se trata de un día nublado con el cielo cerrado, pero con claros ocasionales correspondientes a estos puntos de máxima generación del día, alcanzando hasta 1.7 y 1.8 kW en cada uno. Al tratarse del mes de septiembre, las horas de generación se encuentran entre las 9:00 y las 20:00 aproximadamente, con menos horas de sol que un día de principio de verano como podría ocurrir en el mes de julio. Exactamente a las 12 de la mañana no se tienen valores de generación, concluyendo que se produjo un periodo de cielo totalmente nublado y posiblemente lluvioso.

En cuanto al gráfico obtenido mediante los datos de viento, aparecen similitudes con respecto al anterior. Los puntos máximos alcanzados en el día se producen ligeramente más tarde que los producidos por generación solar, coincidiendo la forma de las gráficas a pesar de un desplazamiento debido a haber unas dos horas de diferencia. Estos se obtienen a las 16:00 y 20:00 aproximadamente, superando los 650 W de potencia en el punto más alto del día. De nuevo se encuentra muy parecido el punto mínimo con el analizado en la gráfica superior,

ubicado cerca de las 12 de la mañana con una generación prácticamente nula, al igual que ocurre a las 4:00 y 23:00. Se concluye que se perciben varias rachas de viento, pero por lo general se trata de un flujo de aire muy pequeño a lo largo de todo el día.

6.2 Implementación de batería de almacenamiento

Para añadir la batería, se comienza estableciendo sus valores deseados constantes para el estado de carga inicial y la capacidad de la batería, además de otras variables necesarias para su configuración.

```
%% Batería
%% constantes

SOC_inicial=0.5;    %estado de carga inicial
Capacidad_bateria=7100; %Wh
soc_max = 0.8*Capacidad_bateria; %estado de carga máximo
soc_min = 0.2*Capacidad_bateria; %estado de carga mínimo

%se establece la longitud de las variables
SOC=zeros (length(x));
bateria=zeros (length(x));
red=zeros (length(x));

rend_carga=0.98;
rend_descarga=0.95;

PVPC=PVPC/1000; %se añade en €/MWh y se necesita €/kWh
PVPC_excedentes=PVPC_excedentes/1000;
```

ILUSTRACIÓN 51. VARIABLES EMPLEADAS PARA LA CONFIGURACIÓN DE LA BATERÍA EN MATLAB

La Ilustración 51 muestra los valores dados a ciertas variables. El estado de carga inicial es de 0.5, de modo que se encuentre al 50%. La capacidad de la batería se fija a 7.1 kWh. A continuación, se determinan los valores de estado de carga máximo y mínimo dependientes de la capacidad de la batería, de modo que el máximo corresponda a un 80% de la misma y el mínimo a un 20%, no pudiendo sobrepasar estos límites. Además, se establece la longitud de las variables correspondientes al estado de carga, batería y red (variable que representa el balance energético) para que tengan la misma medida. El rendimiento de la batería cuando esté cargando es del 98%, mientras que descargándose será del 95%.

Tras añadir las variables y dar los valores necesarios para cada una, se procede a crear un bucle que determine el funcionamiento de la batería. Se debe dar como primer valor de la variable estado de carga tal que:

$$SOC(1) = SOC_inicial * Capacidad_batería$$

De este modo el estado de carga comienza al 50% de la capacidad total de energía de la batería, es decir, 3.55 kWh.

Se utiliza un bucle for para avanzar desde la primera hasta la penúltima posición de cada variable (cabe recordar que deben tener la misma longitud para que esto sea viable). Dentro de este bucle, se comienza para una misma posición de todas las variables con la opción de si el balance es negativo (suma de generaciones menos consumo), en caso de estado de carga superior al estado de carga mínimo, el valor de la batería es el contrario al del balance y el estado de carga en la siguiente posición será el de esta posición menos la batería entre el rendimiento en descarga. En cambio, si el balance es negativo pero el estado de carga es menor que el mínimo, se establece el siguiente estado de carga igual al anterior para que no supere el límite inferior establecido.

En el caso de tener un dato de balance positivo, siempre que el estado de carga sea menor que el máximo fijado, la batería vuelve a ser igual al contrario del valor del balance (en este caso se tiene batería negativa, ya que se está cargando y almacena energía) y el estado de carga en la siguiente posición será el anterior menos la batería multiplicada por el rendimiento en carga. En el caso de estado de carga superior al máximo, se fija el siguiente valor igual que el anterior de manera que no se rebase este límite.

Después de analizar las posibilidades del valor de la variable balance, se añade la variable red, la cual en todas sus posiciones va a corresponder a la suma de las variables batería y balance en su misma posición.

Ahora, se hace una nueva condición para que cuando este valor de red sea negativo, una nueva variable coste, que va a reflejar el coste en cada posición que supone el total del sistema para el usuario, va a calcularse como el valor de red por el precio de la energía PVPC. En caso de que la red sea positiva, esta variable coste será el valor de la red en esta posición, pero en este caso multiplicado por el precio asignado a la venta de excedentes.

Ahora, se procede a representar todas las gráficas deseadas para diferentes días, de manera que se puedan comparar los resultados obtenidos en función de las generaciones correspondientes a un día soleado, un día nublado parcialmente y un día totalmente nublado, pero con claros ocasionales. Para esto, se hace uso del comando 'plot' que ofrece Matlab para generar figuras, además de otros para adecuar las características como añadir leyenda o el tamaño de la fuente y de las propias gráficas.

6.3 Estudio de varios días con distinto perfil solar

6.3.1 Día nublado cerrado con claros

Este primer día coincide con el empleado en el apartado 6.1, en el cual ya se han representado las gráficas de generación eólica y solar fotovoltaica.

En este subapartado se muestra el conjunto de todas las gráficas obtenidas para el día 2 de septiembre de 2023, siguiendo el proceso expuesto en el apartado anterior.

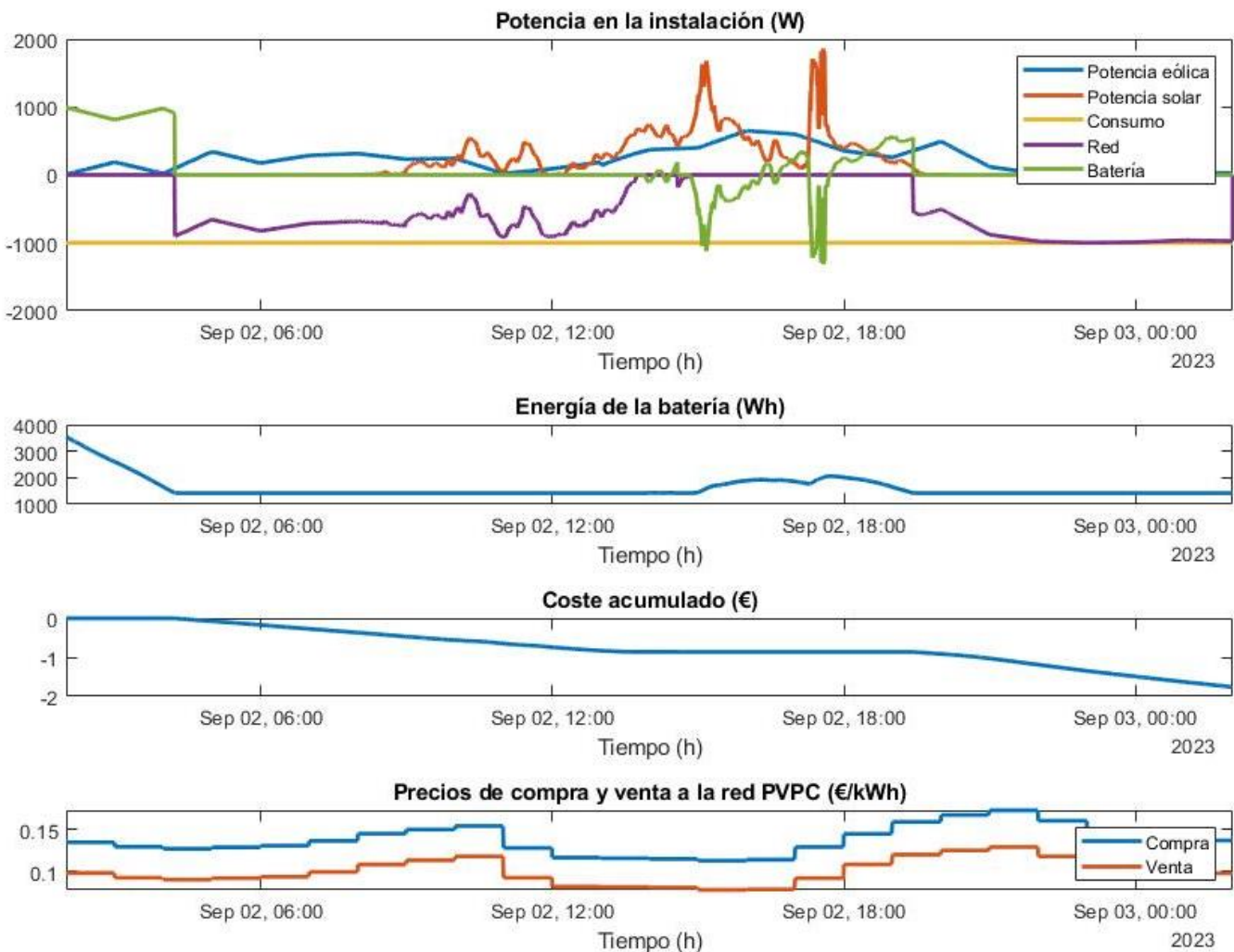


ILUSTRACIÓN 52. GRÁFICAS GENERADAS A PARTIR DE LOS DATOS DEL DÍA 2 DE SEPTIEMBRE DE 2023

En la Ilustración 52, se muestra en primer lugar una gráfica conjunta para la potencia generada por los aerogeneradores, mostrada en azul, la potencia generada por los paneles fotovoltaicos, en rojo, en negativo el consumo fijado a un valor constante de 1000W, en amarillo, el balance de energías denominado ‘red’ ya que su valor supone las aportaciones que debe hacer la red, en morado, y por último la potencia que carga y descarga la batería en cada momento, en verde.

Esta primera gráfica permite tener una visión general del día estudiado, con cantidades de potencia producidas en la instalación y las aportaciones tanto de la batería como de la red, para el consumo establecido.

Por lo tanto, se tiene que el 2 de septiembre es un día nublado por la escasa generación solar, aunque aparecen claros breves que aumentan esta producción momentáneamente, tal y como se ha explicado en el primer apartado de este capítulo. Los aerogeneradores llegan a producir hasta un máximo de 651 W en total, pues la velocidad del viento no es muy elevada, aunque se mantiene en funcionamiento durante todo el día salvo unas pocas horas en las que se reduce a una generación prácticamente nula. Esto podría explicarse con la altura del

anemómetro del que se han extraído los datos de viento, el cual si se encuentra muy poco elevado del suelo percibiría un flujo de aire a menor velocidad.

Aproximadamente desde el comienzo del estudio a las 2 am hasta las 4 am, la batería se descarga aportando energía al sistema, dado que los aerogeneradores no producen suficiente para cubrir el consumo sin la aportación solar. Desde esta hora la batería permanece a cero, ya que se ha descargado por completo y no puede aportar más energía, ni cargarse ya que no hay exceso de producción, hasta las 14 pm, hora a la que aparece un primer claro que permite una mayor producción de los paneles fotovoltaicos. Esto permite que la batería se cargue, y acto seguido se descargue cuando se vuelve a nublar el cielo. Lo mismo ocurre cuando aparece el segundo claro del día, cargándose y descargándose completamente hasta terminar de nuevo en cero.

Todo el tiempo que la batería no cubre con la escasez de producción, entra en juego la red para aportar la potencia restante necesaria. La curva de red expone que de 4 am a 14 pm, periodo en el que la batería se encuentra descargada por completo, se compra bastante energía a la red. A partir de las 14 pm, gracias a la incidencia solar y una mayor velocidad del viento, la red se mantiene a cero, siendo este el caso ideal para el usuario, ya que como se ha visto, en este tipo de sistema no se inyectan excedentes, sino que se almacenan en la batería evitando en otro momento la compra de energía, a no ser que se supere el límite de capacidad de la batería. A partir de las 20 pm, aproximadamente al anochecer, la cantidad de potencia comprada a la red de distribución aumenta debido a generación prácticamente nula por parte de ambas instalaciones renovables.

El estado de carga, también representado en la segunda gráfica de la ilustración 52, muestra un descenso en las primeras horas del día cuando la batería se encontraba cargada, tras las que se va reduciendo según se descarga hasta alcanzar el mínimo establecido en 1420 Wh, correspondiente al 20% de la capacidad de la batería, 7100 Wh. A mitad del día, se observa un aumento del estado de carga provocado por la subida de potencia generada por la instalación, gracias a la que se ha cargado la batería. Como el resto del día la batería se encuentra totalmente descargada, el estado de carga permanece en su valor mínimo.

La tercera gráfica representa el coste acumulado a lo largo del día. Comienza siendo nulo y va aumentando en función de las compras de energía que se han realizado a la red en cada momento. Se observa que al final del día estudiado el coste que supone la instalación para el usuario se queda ligeramente por debajo de los 2 euros.

Por último, la cuarta gráfica representa las curvas de precios tanto de venta como de compra de energía a la red. Estos valores se toman por horas, de modo que se obtiene una gráfica escalonada. A pesar de tener estos 24 datos por día, en este caso no se interpolan ya que se deben mantener a lo largo de toda la hora el mismo precio fijado por el mercado diario.

Aunque las variables de precio no se interpolen, pero sí se extiende el mismo valor para todos los saltos de tiempo dentro de cada hora, el resto sí se debe interpolar para tener el mismo salto de tiempo entre cada dato para todas las variables. Se parte del número de datos tomados en la planta real de tiempo y potencia solar del día bajo estudio, y se generan el mismo número de datos para el resto de las variables empleadas.

En total, se tiene un coste acumulado a lo largo del día de 1.76 euros, el cual sin instalación ascendería a 3.86 euros. Además, se calcula la energía producida a partir de cada tecnología, teniendo un total de 5.4 kWh de generación eólica y 4.3 kWh de generación solar fotovoltaica. Esta generación y el uso de la batería, la cual se considera cargada al 50% al comienzo del día estudiado, suponen un ahorro frente a un sistema base sin instalación de 2.1 euros en este día.

6.3.2 Día parcialmente nublado

Se repite el estudio para el día 12 de julio que tiene condiciones de nublado disperso, en el que el cielo deja pasar suficientes rayos de sol para producir energía mediante los paneles, pero no hay una incidencia completa como en un día soleado.

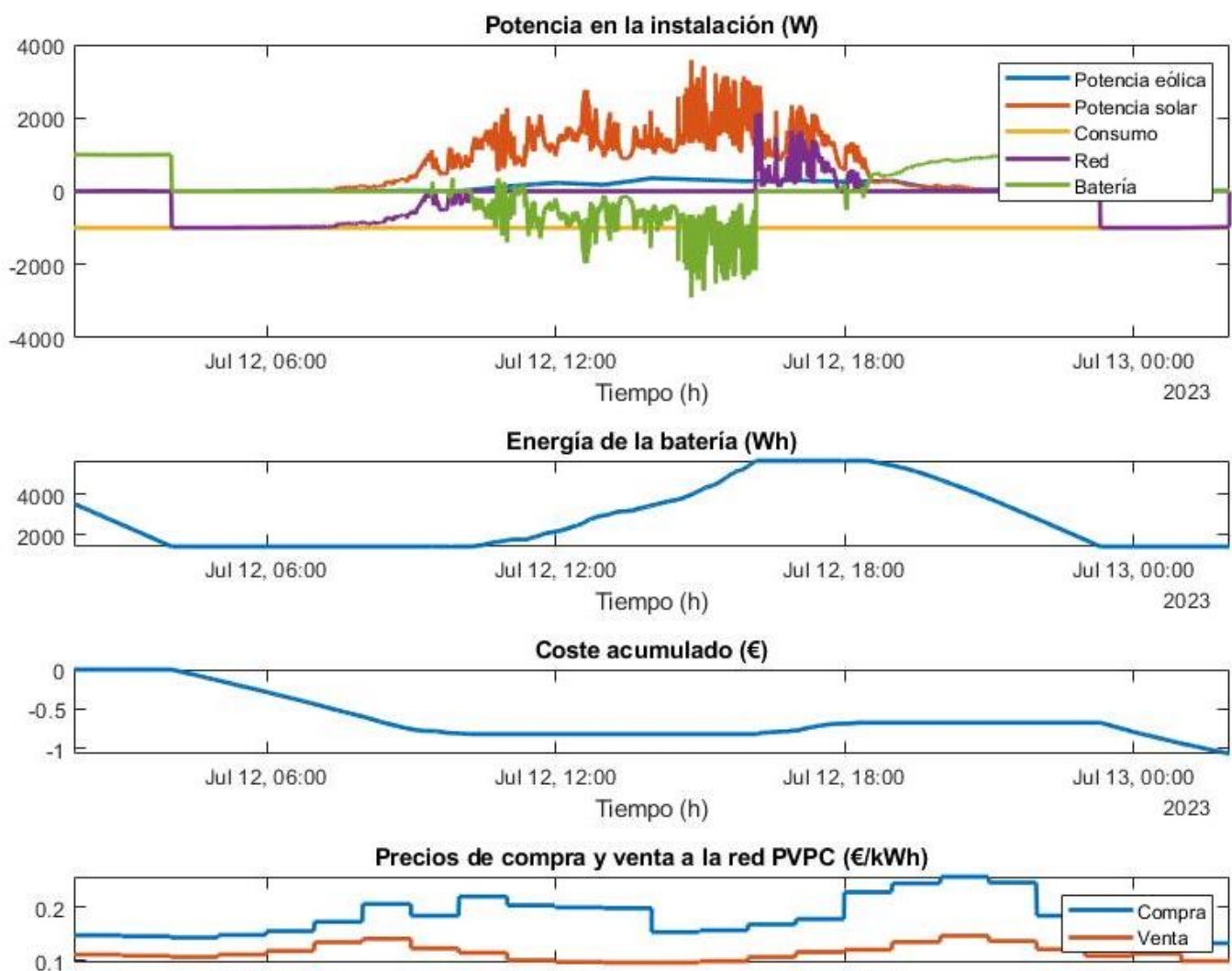


ILUSTRACIÓN 54. GRÁFICAS GENERADAS A PARTIR DE LOS DATOS DEL DÍA 12 DE JULIO DE 2023

ILUSTRACIÓN 53. GRÁFICAS GENERADAS A PARTIR DE LOS DATOS DEL DÍA 12 DE JULIO DE 2023

Se observa en la primera gráfica de la Ilustración 53 que los paneles solares producen energía a lo largo de toda la jornada, durante las horas de sol, con constantes picos de subida y bajada en la generación debidos a las nubes que hacen sombra sobre las placas al pasar entre ellas y la luz directa del sol, volviendo a subir a su paso. En este caso la generación eólica es muy escasa, debido a que es un día tranquilo con una velocidad del viento muy leve.

Contando de nuevo con el consumo fijo, la red aporta energía durante las primeras horas del día previas al amanecer. A la salida del sol, comienza el funcionamiento de la instalación solar y se tiene a su vez una subida de la curva de red, la cual deja de aportar energía al sistema, manteniéndose a cero durante varias horas en las que entra en juego la batería para aprovechar el exceso de producción para cargarse y almacenar. En este ejemplo se tiene una generación con muchos excedentes, por lo que cerca de las 16:30 la batería ya se encuentra completamente cargada hasta el total de su capacidad, y comienzan a inyectarse los excedentes restantes a la red, tiempo durante el cual la batería se mantiene a cero ya que no se está cargando ni descargando. A partir del anochecer, la producción se reduce al poco viento que alcanza las turbinas, y al ser insuficiente la batería se descarga aportando lo almacenado, hasta encontrarse completamente descargada, cerca de las 23:00, momento en el que vuelve a comprarse energía a la red.

Tanto el estado de carga como el coste reflejan lo ocurrido, con el estado mínimo las primeras horas cuando la batería está descargada y un aumento del coste constante por la compra, hasta que llega la salida del sol y comienza la producción. El coste se mantiene, hasta que se comienza a vender energía excedentaria, lo que provoca una reducción en este coste acumulado diario. El estado de carga llega a su valor máximo, delimitado en el 80% de la capacidad de la batería, hasta la caída del sol, cuando se empieza a descargar la batería y por lo tanto se reduce el estado de carga. El coste se mantiene hasta que la batería se encuentra descargada y entran las aportaciones de la red, incrementando su valor de nuevo.

El coste acumulado total obtenido del día 12 de julio es de 1.07 euros, mucho menor que el obtenido en caso de no haber instalación que sería 5.17 euros. Además, se calcula el total de energía generado a partir de cada tecnología obteniendo 2.5 kWh durante el día producidos por los aerogeneradores, y 13.42 kWh producidos por los paneles solares. Esta generación supone un ahorro para el usuario de 4.1 euros solamente en el día estudiado.

6.3.3 Día soleado

Se estudia también el día 10 de julio, ya que es un día totalmente despejado y por lo tanto con gran generación solar.

Los datos extraídos de la planta real para este día presentan valores de generación muy elevados y favorables a la instalación, pero los datos de viento extraídos de la estación más próxima a la Universidad muestran una velocidad del viento muy pequeña. Por lo tanto, el impacto eólico durante este día va a ser muy escaso, aunque se va a compensar con la gran producción solar.

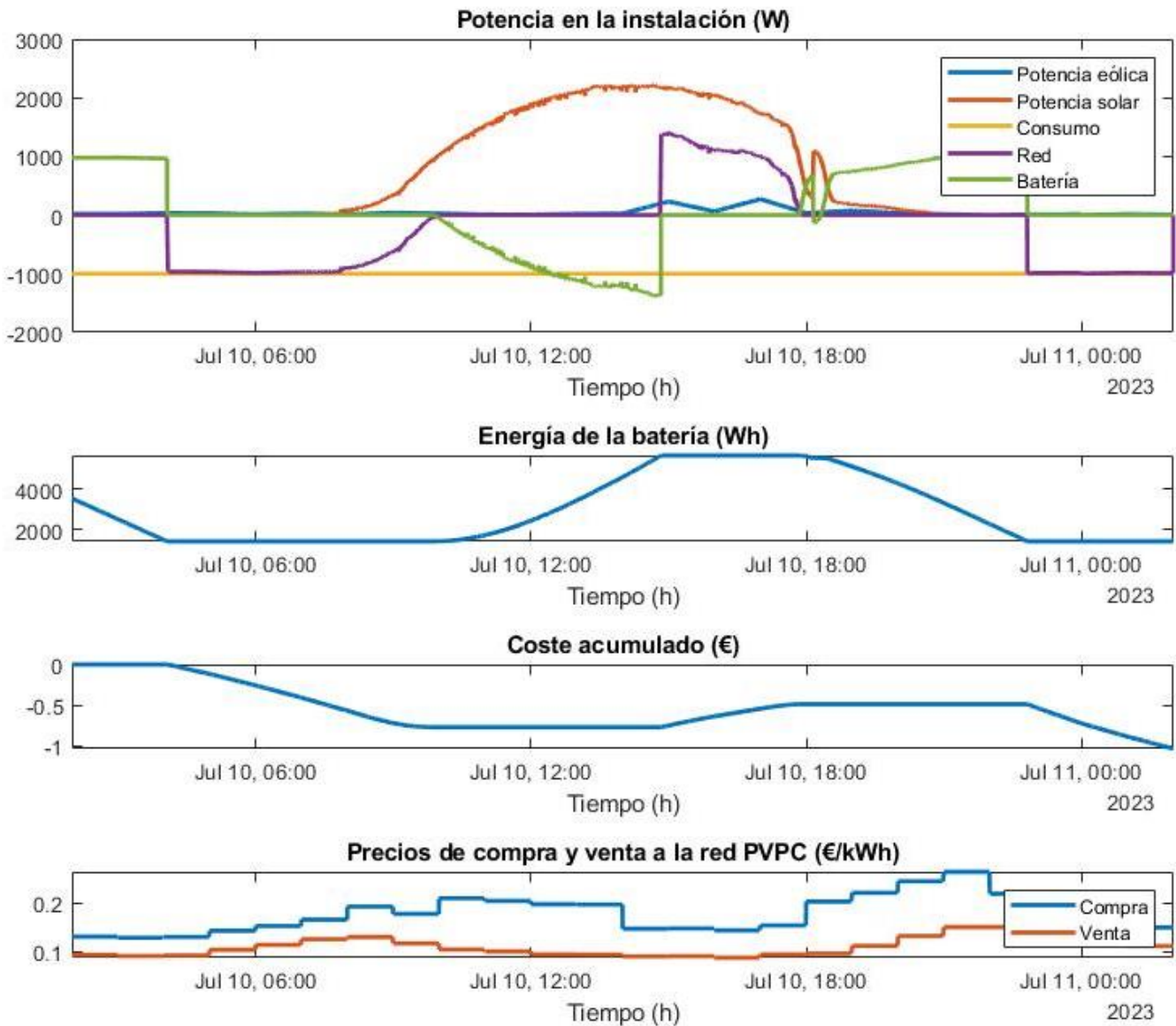


ILUSTRACIÓN 54. GRÁFICAS GENERADAS A PARTIR DE LOS DATOS DEL DÍA 10 DE JULIO DE 2023

Como se ha dicho, se trata de un día completamente soleado y sin nubes que interfieran en la generación solar, tal y como muestra la primera gráfica de la Ilustración 54. Las primeras horas del día la batería está descargada y la red aporta el total que requiere el consumo, es decir, 1 kW. A partir del amanecer comienza la generación, lo que provoca que la red se mantenga a cero, y la batería comience a cargarse. Esto mismo se tiene en la gráfica del estado de carga, valor que se mantiene en el mínimo hasta que comienza a cargarse la batería hasta llegar a su valor máximo cerca de las 15:00, y en la gráfica acumulada del coste, donde se va incrementando negativamente al tratarse de un gasto hasta que deja de comprarse energía a la red, manteniéndose constante sin pérdidas ni ganancias. La batería se carga durante varias horas hasta alcanzar el máximo de su capacidad, y comienza a inyectarse energía a la red cobrando los excedentes, lo cual influye de nuevo en la gráfica del coste reduciéndose durante este tiempo de venta.

Sobre las 18:00 se tiene una caída en la generación posiblemente por alguna nube, haciendo que se descargue la batería. Tras esto vuelve a generar, pero como el tiempo restante de horas de sol es muy pequeño, dura poco y la producción vuelve a bajar en el atardecer. Este pico permite que la batería se cargue ligeramente, y después se termina de descargar totalmente. Aproximadamente a las 23:00 se encuentra sin carga, como refleja el estado de carga que disminuye hasta su mínimo, y comienza a comprarse energía a la red de nuevo. Este gasto vuelve a influir en el coste, el cual sigue incrementándose hasta un total al final del día de 1.03 euros. Sin la instalación renovable el coste de este día hubiese ascendido a 4.89 euros.

La energía total generada por la instalación a partir de los aerogeneradores es de 1.04 kWh, mientras que los paneles fotovoltaicos producen un total de 16.35 kWh. Gracias a esta instalación y su generación se produce un ahorro de 3.86 euros en el total del día estudiado.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Recientemente, los efectos nocivos de la generación energética sobre medio ambiente han concienciado a la sociedad sobre la urgencia de enfrentar y frenar el cambio climático. Los recursos renovables son cada vez más demandados como método de colaboración en esta lucha, y las tecnologías sostenibles resultan una opción muy beneficiosa en todos los aspectos, dejando a un lado los combustibles fósiles ya sea por su escasez o por los gases contaminantes liberados en los procesos de combustión.

Tanto la solar fotovoltaica como la eólica han crecido en los últimos años exponencialmente, tanto a gran escala como en el caso planteado en este trabajo, la generación doméstica de pequeña potencia. Las conclusiones generales del proyecto presentan una clara viabilidad de los diferentes sistemas de instalación estudiados.

Los estudios realizados mediante el software Homer Pro, facilitan factores económicos que ayudan a determinar la viabilidad de la instalación. Para la instalación eólica se obtienen valores tanto energéticos como económicos para todos los casos posibles y se determina la opción más viable, seleccionando una potencia a instalar accesible por su inversión inicial y que se recupere por completo, de manera que el prosumidor obtenga beneficios reales anuales una vez superados los años de amortización.

Se repite el estudio para la simulación de instalación solar fotovoltaica, obteniendo de nuevo gran eficiencia de los dispositivos, aunque aparece una gran influencia horaria, pues el sistema funciona únicamente durante las horas de sol, lo que lleva a realizar un tercer escenario que cuenta con una instalación híbrida. Los resultados son muy favorables e interesantes, ya que, aunque sigue apareciendo un patrón estacional y horario, no es tan llamativo como en el caso de la instalación solar. Se tienen beneficios anuales para el usuario de nuevo una vez pasados los primeros años correspondientes al reembolso de la inversión.

Se realiza una cuarta simulación, añadiendo un sistema de almacenamiento a partir de baterías y aislando la instalación de la red de distribución, haciendo que se abastezca únicamente de autoconsumo. Esto supone que el resultado más viable cuente con una gran capacidad de almacenamiento de energía de las baterías, así como una generación suficiente para cubrir el consumo y poder almacenar energía ocasionalmente. El resultado supone un desembolso mayor que en casos anteriores, pero se amortiza dentro del tiempo de vida del proyecto ya que no hay gastos debidos a compras de energía a la red.

Por último, se emula sobre el prototipo de planta real instalado en la Escuela Politécnica Superior, que cuenta con instalación fotovoltaica y sistema de almacenamiento, al que se añaden datos simulados de generación a partir de aerogeneradores, tomando un perfil de viento cercano a la Universidad. Con estos datos y la ayuda de Excel y Matlab, se generan diferentes gráficas mediante las que se concluye que el sistema es viable y que en los tres días bajo estudio se produce un ahorro frente a lo que supondría el coste sin instalación.

De cara a trabajos futuros, se considera la implementación en la azotea de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá, de uno o varios aerogeneradores, de manera

que se lograría un sistema híbrido de generación renovable en añadido a los paneles fotovoltaicos y el sistema de almacenamiento ya instalados, además de poner en funcionamiento una estación meteorológica para obtener las medidas reales de velocidades de viento que alcanzarían al sistema, y poder estudiar de forma más exacta la viabilidad de los aerogeneradores y la potencia más favorable a instalar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tecpa. (9 de Agosto de 2022). *Turbinas eólicas pequeñas*. Obtenido de Tecpa: <https://www.tecpa.es/turbinas-eolicas-pequenas/>
- [2] SolarProfit. (2023). Obtenido de: <https://solarprofit.es/es/blog/esquema-funcionamiento-energia-solar>
- [3] PNIEC. (20 de Enero de 2020). Obtenido de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/pnieccompleto_tcm30-508410.pdf
- [4] Gaya, M. H. (16 de Junio de 2023). *EY*. Obtenido de https://www.ey.com/es_es/news/2023/06/espana-mantiene-octava-posicion-paises-mas-atractivos-mundo-para-invertir-energia-renovable#:~:text=Espa%C3%B1a%20consolida%20su%20posici%C3%B3n%20en,clasificaci%C3%B3n%20mundial%20de%20este%20a%C3%B1o.
- [5] IDAE. (2023). *Eólica de pequeña potencia*. Obtenido de <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/eolica/eolica-de-pequena-potencia>
- [6] *Mi energía solar*. (s.f.). Obtenido de https://mienergiasolar.es/energy_technologies/micro_wind.htm
- [7] Mint. (2023). *Energía eólica: tipos de aerogeneradores*. Obtenido de <https://mintforpeople.com/noticias/energia-eolica-tipos-aerogeneradores/>
- [8] Wikipedia. *Aerogenerador Darrieus*. Obtenido de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darrieus_rotor001.jpg
- [9] LBA Industrial. *Tipos de aerogeneradores verticales*. Obtenido de https://www.lbaindustrial.com.mx/aerogeneradores-verticales/#Aerogeneradores_Darrieus
- [10] pxfuel. *Rotor Savonius*. Obtenido de <https://www.pxfuel.com/es/free-photo-ovxij>
- [11] ResearchGate. *Darrieus-Savonius*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Turbina-hibrida-que-combina-el-concepto-Savonius-con-el-concepto-Darrieus_fig27_327871326
- [12] Scielo. (30 de Julio de 2022). *Estado del arte sobre aerogeneradores de eje vertical*. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2518-44312022000100161&script=sci_arttext&lng=es
- [13] ESIOS. *Precios compra y venta de energía*. Obtenido de https://www.esios.ree.es/es/analisis/1739?compare_indicators=1001&vis=1&start_date=11-09-2023T00%3A00&end_date=11-09-2023T23%3A55&compare_start_date=10-09-2023T00%3A00&groupby=hour
- [14] El País. (2021). *Escalada del precio de la luz en agosto de 2021*. Obtenido de <https://elpais.com/economia/2021-08-06/la-escalada-del-precio-de-la-luz-continua->

en-agosto-y-2021-ya-es-el-ano-mas-carro-de-la-historia.html?event=regonetap&event_log=regonetap&prod=REGONETAP&o=regonetap

- [15] DKV. (10 de Octubre de 2022). *Velocidad del viento y cambio climático*. Obtenido de <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/cambio-climatico/velocidad-del-viento#:~:text=Cuanto%20mayor%20es%20esa%20diferencia,diferencia%2C%20menor%20velocidad%20del%20viento>.
- [16] El País. (14 de Enero de 2022). *El año de las luces*. Obtenido de <https://elpais.com/economia/2022-01-14/el-ano-de-las-luces-como-se-disparo-el-precio-de-la-luz-en-2021.html>
- [17] Wind Turbine Models. *Ropatec 3 kW*. Obtenido de <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/2422-ropatec-3kw#powercurve>
- [18] AEMET. *Estación Alcalá de Henares - Encín*. Obtenido de <https://x-y.es/aemet/est-3170Y-alcala-de-henares-encin?fecha=2023-09-02>

ANEXO

Se adjunta el Script de Matlab utilizado para la realización del estudio expuesto y analizado en el capítulo 6.

```

clear all;
close all;
%% Se crea workspace
load('lorena.mat'); %Se cargan los datos necesarios para graficar

GTM=+2;
tiempo=tiempo+(GTM*3600000); %Para tener datos de tiempo de 2 am a 2
am

%% Se pasa el tiempo de UNIX al formato HH:MM:SS
x =
datetime(tiempo, 'ConvertFrom', 'epochtime', 'TicksPerSecond', 1e3, 'Format
', 'dd-MMM-yyyy HH:mm:ss');

%% Batería
%constantes

SOC_inicial=0.5; %estado de carga inicial
Capacidad_bateria=7100; %Wh
soc_max = 0.8*Capacidad_bateria; %estado de carga máximo
soc_min = 0.2*Capacidad_bateria; %estado de carga mínimo

%se establece la longitud de las variables como columnas
SOC=zeros(length(x),1);
bateria=zeros(length(x),1);
red=zeros(length(x),1);
coste=zeros(length(x),1);
coste_acum=zeros(length(x),1);

energia_solar=0;
energia_eolica=0;

rend_carga=0.98;
rend_descarga=0.95;

PVPC=PVPC/1000; %se añaden los datos como €/MWh y se necesita €/kWh
PVPC_excedentes=PVPC_excedentes/1000;

SOC(1)=SOC_inicial*Capacidad_bateria;

for i = 1:(length(x)-1)
    step(i) = tiempo(i+1)-tiempo(i);

    if balance(i)<0
        if SOC(i)>soc_min

            bateria(i)=-balance(i);

```

```

        SOC(i+1)=SOC(i)-bateria(i)/rend_descarga*step(i)/3600000;
    else
        SOC(i+1)=SOC(i);
    end
else
    if SOC(i)<soc_max

        bateria(i)=-balance(i);
        SOC(i+1)=SOC(i)-bateria(i)*rend_carga*step(i)/3600000;
    else
        SOC(i+1)=SOC(i);
    end

end

red(i)=balance(i)+bateria(i);

    if red(i)<0

        coste(i)=red(i)*PVPC(i)/1000*step(i)/3600000;

    else

        coste(i)=red(i)*PVPC_excedentes(i)/1000*step(i)/3600000;

    end

energia_solar=energia_solar+potencia_solar(i)*step(i)/3600000;
energia_eolica=energia_eolica+potencia_eolica(i)*step(i)/3600000;

end

coste_acum(1)=coste(1);

for i = 2:(length(x))
    coste_acum(i)=coste(i)+coste_acum(i-1);
end

%% Se grafican las generaciones, el consumo, el balance y la batería
tiledlayout(5,1)
set(gcf, 'Position', get(0, 'Screensize'));

nexttile([2 1])
plot(x,potencia_eolica,'LineWidth',2)%generacion eólica

title('Potencia en la instalación (W)');
xlabel('Tiempo (h)');

ax=gca;
ax.FontSize=10;

hold on

plot(x,potencia_solar,'LineWidth',2)%generacion solar

plot(x,consumo,'LineWidth',2) %consumo

```

```

plot(x,red,'LineWidth',2) %red, balance energético

plot(x,bateria,'LineWidth',2) %batería

hold off

legend('Potencia eólica','Potencia solar','Consumo','Red','Batería')

%% Se grafica el estado de carga de la batería

set(gcf, 'Position', get(0, 'Screensize'));
nexttile
plot(x,SOC,'LineWidth', 2)%Wh

title('Energía de la batería (Wh)');
xlabel('Tiempo (h)');

ax=gca;
ax.FontSize=10;
%% Se grafica el coste acumulado

set(gcf, 'Position', get(0, 'Screensize'));
nexttile
plot(x,coste_acum,'LineWidth', 2) %coste acumulado

title('Coste acumulado (€)');
xlabel('Tiempo (h)');

ax=gca;
ax.FontSize=10;
%% Se grafican los precios

set(gcf, 'Position', get(0, 'Screensize'));
nexttile
plot(x,PVPC,'LineWidth', 2) %PVPC

hold on

plot(x,PVPC_excedentes,'LineWidth', 2) %excedentes

hold off

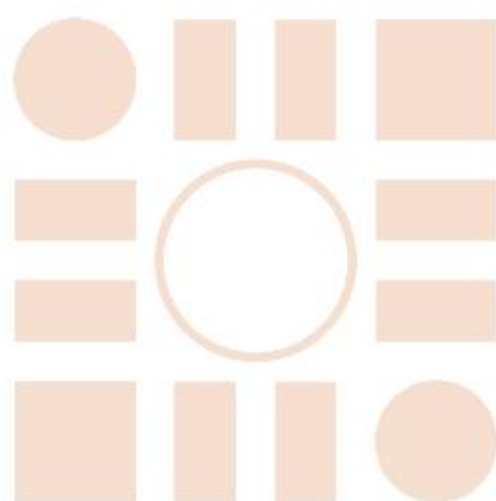
title('Precios de compra y venta a la red PVPC (€/kWh)');
xlabel('Tiempo (h)');

ax=gca;
ax.FontSize=10;

legend('Compra','Venta')

```

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá