

ESTUDIO DE LA HIBRIDACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y ENERGÍA EÓLICA

Autor: Miguel Fuentes Quiralte,
Director: Ángel F., Truchero Angulo,
Entidad Colaboradora: AGR-AM – Agreda Asset Manager S.L.

Resumen — En este Trabajo de Fin de Máster se analiza y se define la hibridación de un parque eólico existente junto con una planta solar fotovoltaica en el contexto de la hibridación en España.

Abstract — This Master's Thesis analyzes and defines the hybridization of an existing wind farm together with a solar photovoltaic plant in the context of hybridization in Spain.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este proyecto es estudiar la viabilidad de la hibridación de un parque eólico con una planta solar fotovoltaica. Para poder llevar a cabo un estudio detallado se ha decidido estudiar la viabilidad: técnica, legal y económica.

El procedimiento llevado a cabo empieza con el estudio de la energía eólica. Empezando por los conceptos básicos, pasando por un estudio de mercado y acabando con el estudio y la viabilidad del proyecto eólico. El proyecto eólico parte de un parque eólico compuesto por 17 aerogeneradores Gamesa G58 de 0.85 MW cada uno. Con estas condiciones, el proyecto tiene 14.45 MW y una producción horaria de alrededor de 1,807 horas anuales. Además del parque eólico original, se estudian otros dos casos de este mismo parque repotenciado.

Seguidamente, se procede a estudiar la energía solar fotovoltaica siguiendo una estrategia similar a la llevada a cabo en el caso de la energía eólica. Tras exponer las tecnologías principales de este tipo de energía, se realiza un estudio de mercado que permite definir los componentes más interesantes de cara a montar una planta solar fotovoltaica hoy en día.

Una vez ambas tecnologías quedan estudiadas, se procede a realizar un estudio de la hibridación. Por esta razón, se empieza por presentar los tres escenarios eólicos y los componentes seleccionados para montar la planta solar fotovoltaica. En este punto, se contrastan las producciones horarias de los tres escenarios eólicos enfrentados a la

producción de energía horaria de una planta solar fotovoltaica de tamaño variable desde 1MWp hasta los 20 MWp. Este estudio permite calcular el exceso de energía que existe en cada caso y de esta manera dimensionar el tamaño en MWp de la planta solar fotovoltaica hibridado a la configuración del parque eólico más adecuada.

Una vez definido el proyecto híbrido se procede a estudiar la monitorización del conjunto de ambas instalaciones, se realiza un estudio económico y se finaliza el estudio presentando las conclusiones a las que se ha llegado.

II. ENERGÍA EÓLICA

En cuanto al estudio de mercado de los aerogeneradores,

se ha decidido establecer los siguientes criterios:

- Aerogenerador de alrededor de 5 MW de potencia.
- Modelo de aerogenerador que exista en el mercado actual y no sea un prototipo.
- Fabricante activo actualmente presente en el mercado español.

Siguiendo los criterios establecidos se concluye que el fabricante más adecuado para nuestro proyecto es Nordex Acciona. En lo que se refiere a los modelos que son candidatos, los dos modelos representados en el estudio cumplen con todos los requisitos. De esta manera, tanto el N149 como el N163 se tienen en cuenta para una posible repotenciación del parque eólico.

Una vez conocidas las peculiaridades de los modelos del mercado actual y definidas las opciones de repotenciación, se dispone a presentar al parque eólico existente.

El proyecto se sitúa en la Provincia de Albacete. Se trata de un parque eólico compuesto por 17 aerogeneradores Gamesa G58 de 0.85 MW cada uno. Con estas condiciones, el proyecto tiene 14.45 MW y una producción horaria de alrededor de 1,807 horas anuales

En cuanto a la vida del parque, es importante resaltar que se trata de un parque construido en noviembre de 2008. Por esta razón, su vida útil estimada acabaría en 2028 a no ser que se realicen modificaciones para una extensión de vida o una sustitución de aerogeneradores (repotenciación).

Las principales características se ven recogidas en la siguiente tabla:

Potencia Nominal	14,450 kW
Aerogeneradores	17 x G 58 850 kW (HH 55 m)
Horas netas equivalentes	1,807 horas
COD	2008

Tabla 1 Características del parque eólico

En cuanto a la localización y distribución de los 17 aerogeneradores, se presenta la siguiente imagen:



Ilustración 1 Mapa Parque Eólico

Conocidas las posiciones de los aerogeneradores se estudia la producción anual del parque y se realiza un estudio de viento de cara a una posible repotenciación.

La repotenciación, se basa en la sustitución de las máquinas antiguas por unas más modernas que dan lugar a una mejora tanto económica como medioambiental. Esto se debe principalmente a que los aerogeneradores actuales no son solamente más eficaces y por lo tanto se requieren menos, sino que, además, son más silenciosos y precisan de una velocidad de giro mucho menor. De esta forma, se logran tres objetivos importantes:

- Reducir la ocupación de terreno.
- Reducir el impacto medioambiental.
- Aumentar y optimizar el aprovechamiento del recurso eólico.

En el caso concreto de este estudio, se evalúa la repotenciación con los modelos N149 y N163 del fabricante Nordex Acciona. Siendo, la potencia actual del parque de 14.45MW la idea principal es repotenciar con 3 máquinas que proporcionen alrededor de 5 MW cada una.

De cara al estudio de repotenciación, se tienen en cuenta los posibles efectos de las estelas provocadas por parques cercanos y se genera un modelo eólico que permite simular el comportamiento de cada una de las variantes estudiadas.

En cuanto al plano del parque repotenciado, se han estudiado las producciones anuales por turbina. Siguiendo unos criterios puramente energéticos y geográficos, se ha decidido situar los 3 aerogeneradores de la repotenciación en

las posiciones que corresponden con las máquinas A1, A5 y A11.



Ilustración 2 Layout del parque eólico repotenciado

Una vez consideradas las localizaciones definitivas, se aplica el modelo eólico obteniendo los siguientes resultados:

Escenario	Rendimiento energético P50 (MWh/año)	Horas netas equivalentes
Parque actual	26,106	1,807
Parque actual + impacto "A"	25,726	1,780
Parque repotenciado con Nordex-N149	40,886	2,830
Parque repotenciado con Nordex-N163	44,473	3,078

Tabla 2 Comparativa de escenarios para la repotenciación

En lo que respecta esta tabla, el modelo más adecuado para realizar una repotenciación en este momento en el parque es el Nordex Acciona N163 [1] debido a que permite obtener un 8.7% más de horas equivalentes con respecto a la siguiente candidata que sería la N149 [2]: con 2,830 horas equivalentes. Estas 2,830 horas suponen a su vez un 56 % de aumento con respecto a los aerogeneradores G58 que están instalados en el parque.

III. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

El objetivo de este apartado consiste en conocer las principales tecnologías que existen en el mundo solar fotovoltaico. Para ello, se han ido estudiando una a una, permitiendo realizar un posterior riguroso estudio de mercado. Las tecnologías que se han estudiado son las siguientes:

- PERC
- Half-Cell
- HJT
- Multi Bus Bar
- Tiling Ribbon
- Double Glass

Con el conocimiento de las tecnologías existentes se realiza el estudio de mercado de los paneles solares. Gracias al estudio, se decide optar por los paneles del fabricante Risen modelo Titan 120 por tres razones:

- Son paneles que cronológicamente concuerdan con este proyecto.
- Se trata de paneles bifaciales.
- Son paneles de gran potencia y eficiencia.

A continuación, se presentan las principales características de estos paneles solares:

Risen – Titan 120 High Performance Bifacial Monocrystalline Pere Module	
Número de celdas	120
Potencia (Wp)	585 - 605
Máximo voltaje del Sistema (V _{DC})	1,500
Eficiencia máxima	21.40%
Dimensiones	2,172 x 1,303 x 35 mm

Tabla 3 Características módulo solar Titan 120

Una vez definidos los paneles a usar se estudian las diferentes estructuras sobre las que estos irán montados. Tras analizar las diferentes configuraciones se ha decidido escoger las estructuras seguidoras a un eje horizontal orientados N-S. Esta decisión se basa en que se aumenta el rendimiento de la planta considerablemente con respecto a la estructura fija, pero sin tener unos costes y una complejidad tan alta como los seguidores de doble eje.

Finalmente, en lo que refiere a los inversores, se estudian tanto los inversores centrales como lo de string y tras realizar un estudio de mercado se concluye que, para el proyecto estudiado, la mejor opción es el inversor en string Huawei SUN2000-175KTL-H0. [3]

IV. HIBRIDACIÓN

Un sistema de energía híbrido es aquel que es capaz de producir electricidad a partir de dos o más fuentes. Generalmente, se trata de fuentes de energía renovables que se diseñan y se sitúan de tal manera que puedan compartir el mismo punto de conexión.

Para estudiar la hibridación de una planta solar fotovoltaica y un parque eólico existente, se empieza por plantear la situación del parque actual y de sus posibles repotenciones. Una vez establecida la parte eólica, se presenta una planta solar formada por los equipos elegidos.

El objetivo principal del estudio de hibridación es determinar la capacidad a instalar de energía solar

fotovoltaica de tal forma que se alcance un equilibrio entre la optimización del punto de conexión y el potencial excedente de energía que no se llegaría a generar.

Por esta razón, se diseña una planta solar fotovoltaica de tamaño variable desde 1MWp de potencia instalada hasta una de 20 MWp, en escalones de 1 MWp.

Para analizar con detalle el comportamiento de la planta híbrida, se construyen series horarias para la producción eólica y solar. A continuación, se analiza la suma de ambas series teóricas (eólica y solar) en el contexto de la potencia autorizada, con el fin de analizar la energía total generada y los excedentes imposibles de verter a la red.

La siguiente figura ilustra la metodología del estudio:

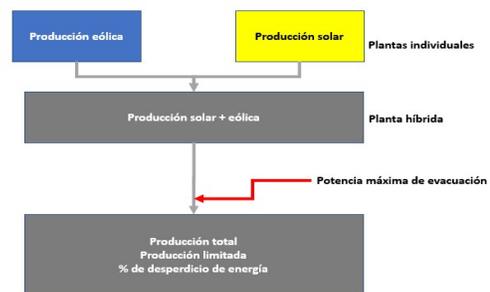


Ilustración 3 Metodología del estudio de hibridación.

Tras analizar las tres configuraciones eólicas contrastadas con los 20 tamaños de planta solar fotovoltaica se presentan los siguientes resultados del excedente:

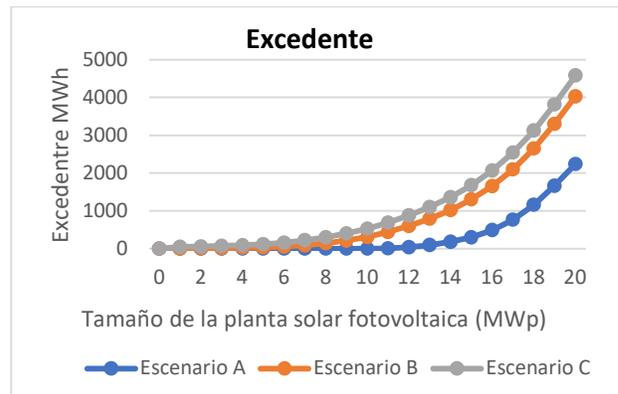


Ilustración 4 Excedente según escenario

Según los resultados obtenidos se ha decidido tener en cuenta un tamaño de 15 MWp para la instalación solar fotovoltaica que se hibridará al parque actual y que quedará hibridado al futuro parque repotenciado con Nordex Acciona N163 (Escenario C). Se ha tomado esta decisión basada en tres razones principalmente:

- Los excedentes registrados en el mejor de los escenarios de repotenciación (N163) con este tamaño no exceden el 5% referido a la propia planta.
- En caso de tener que parar la producción eólica durante la construcción de la repotenciación se seguirá aprovechando en gran medida la capacidad del punto de conexión con 15 MWp de solar.
- 15 MWp es un tamaño con el cual se pueden llegar a mejores acuerdos económicos con los proveedores.

V. PROYECTO SOLAR

Si siguiendo los criterios establecidos en el estudio de hibridación, se ha decidido estudiar la implantación de una planta solar fotovoltaica con una potencia de 15 MWp. Se trata de una planta solar de tamaño medio/pequeño en comparación con los proyectos que se llevan a cabo hoy en día.

Lo primero es empezar por la selección de los terrenos más adecuados para la instalación de la planta. Teniendo en cuenta todos los requisitos que debe cumplir el terreno, se considera que la opción más adecuada es el plan B. Esta decisión viene apoyada en tres razones de peso:

- Cumple con todos los requisitos, incluso el de superficie.
- Es la parcela que se encuentra más cerca de la subestación.
- Este plan solamente afecta a una sola parcela y a un solo recinto.

Las características del plan B y su localización con respecto al parque repotenciando y a la subestación se presentan a continuación.

Terreno seleccionado para albergar la instalación fotovoltaica			
Provincia	Albacete	Condición	TA – Tierra arable
Municipio	-	Superficie	29.29 Ha
Polígono	-	Inclinación media N-S	2.30%
Parcela	-	Inclinación máxima E-O	3.70%

Tabla 4 Terreno seleccionado para la planta solar



Ilustración 5 Mapa del parque eólico con el terreno seleccionado para la planta solar

Una vez decidido el terreno es importante evaluar el punto de acceso y conexión del parque actual para ver si es preciso realizar modificaciones. Al tratarse de una hibridación, solamente es preciso realizar las siguientes instalaciones:

- Armario de control para la energía producida por la hibridación.
- Dos contadores de energía activa y reactiva para ambas instalaciones.
- Actualización de los sistemas de protección y control.
- Celda de línea 630 A, 25kA.

En relación con los puntos de acceso y conexión, es preciso mencionar que en la actualidad existe una moratoria [4]. que deja congelado el proceso de concesión de puntos de acceso y conexión. Esta moratoria no afecta a los proyectos de hibridación por lo que la hibridación se presenta como el mecanismo idóneo para desarrollar proyectos renovables en España en este momento.

Una vez realizados estas pequeñas modificaciones, la hibridación permitirá verter energía proveniente de ambos parques, de tal forma que se optimizará la explotación del punto de acceso.

El permiso de acceso y conexión está regulado por:

- Real Decreto 1183/2020 (29 de diciembre) [5]
- Circular 1/2021 de la CNMC (20 de enero) [6]
- Real Decreto-Ley 23/2020 (23 de junio) [7]

VI. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La hibridación es la producción de energía a partir fuentes de energía distintas. En este caso, energía solar fotovoltaica y energía eólica. Este fenómeno tiene tanto puntos positivos como puntos negativos.

En lo que se refiere a las principales ventajas que aporta una hibridación como la que se presenta en este estudio son las siguientes:

- Permite aprovechar el punto de conexión otorgado a la instalación original de tal manera que se pueda verter más energía a la red con la misma infraestructura de conexión a la red eléctrica del país.
- Permite alcanzar sinergias principalmente a la hora de control, monitorización y negociación con los proveedores. Además, se reutiliza la parte de la conexión de la instalación original. Esto permite reducir los costes tanto de inversión como de mantenimiento del conjunto de ambas plantas.
- En caso de una repotenciación en una de las dos instalaciones, la hibridación permite que la otra componente genere y vierta energía a la red durante el periodo de construcción permitiendo tener ingresos a lo largo de toda la vida útil de la hibridación.
- De cara al futuro, este tipo de instalaciones permitirán el abastecimiento con energía renovable durante todas las horas del año siempre y cuando se cuente con un sistema de almacenamiento.

La desventaja principal que presenta la hibridación es el no generar energía por no disponer de más capacidad para verter a la red. Por esta razón, los sistemas de almacenamiento se presentan como el compañero idóneo de la hibridación. De esta manera, se almacenaría el exceso de energía y se vertería en momentos en los que la producción no fuese máxima.

VII. MONITORIZACIÓN

Un sistema de monitorización es una aplicación que permite verificar de manera remota el correcto funcionamiento de una instalación de cualquier índole en tiempo real, con el objetivo de actuar rápidamente en el caso de detectar daños y/o averías (ejemplo: fallos en los inversores, cables rotos, fallos en las células, etc.) y poder llevar a cabo una reparación y/o mantenimiento del sistema de placas solares.

En primer lugar, se presenta el esquema de monitorización de la planta solar fotovoltaica:

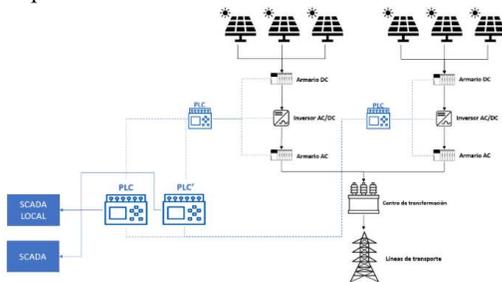


Ilustración 6 Esquema de la monitorización de una planta solar

En segundo lugar, se presenta el esquema de monitorización del parque eólico:

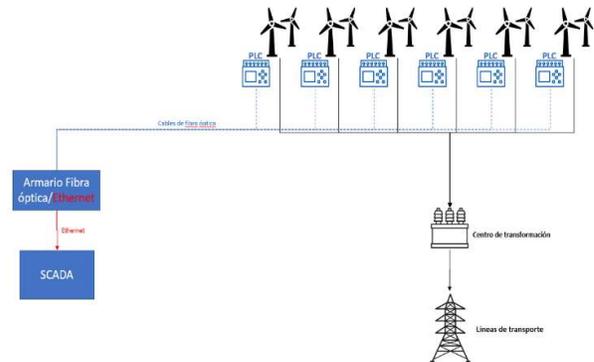


Ilustración 7 Esquema de monitorización de un parque eólico.

La estructura principal de monitorización se basa en tres niveles: el nivel de sensores, el de PLCs y el de SCADAs. Estos tres niveles se pueden ver representados en las ilustraciones anteriores. En resumen, los sensores que se encuentran en los equipos físicos toman medidas que mandan a los PLCs inferiores. A su vez, estos PLCs reportan a un PLC de mayor rango que dispone de otro PLC similar que lo suplementa en caso de error. Estos PLCs de mayor rango, reportan tanto al SCADA local como al SCADA principal que permitirá a su vez monitorizar tanto al parque eólico como a la planta solar fotovoltaica que conforman la hibridación.

VIII. ESTUDIO ECONÓMICO

Los dos objetivos principales de este estudio son dos:

- Calcular la TIR del proyecto.
- Calcular el valor actual neto del proyecto.

Los principales detalles a tener en cuenta en este estudio son los siguientes:

- La tasa de descuento es del 6%.
- Los Capex se amortizan a 25 años.

Para poder evaluar la viabilidad económica de la hibridación, se ha decidido evaluar un periodo de 30 años (2021-2050) ya que se corresponde con el fin de vida la planta solar fotovoltaica y de la repotenciación (30 y 20 años respectivamente).

En primer lugar, se evalúan los ingresos de la planta híbrida. Para calcular la cuantía de estos ingresos se ha contado con la previsión de producción de energía y la previsión del precio de la energía facilitado por Pöyry. Con estas series de datos se alcanza el siguiente resultado:

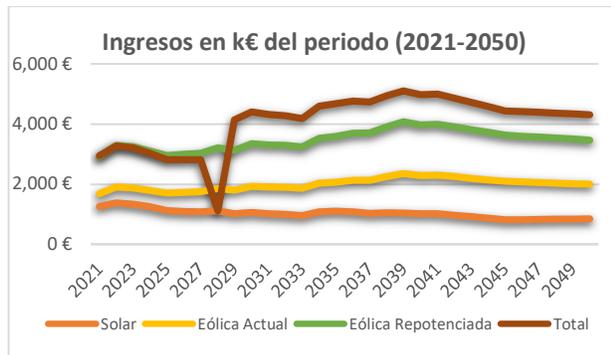


Ilustración 8 Ingresos de la planta híbrida

En el año 2028 se aprecia una caída importante en los ingresos debido a que durante ese año se considera nula la producción eólica ya que es el año de la construcción de la repotenciación.

En segundo lugar, se estudian las inversiones económicas y los costes operativos tanto de la parte correspondiente a la hibridación, como aquellos costes causados por la repotenciación. Es importante tener en cuenta que es preciso realizar dos inversiones fuertes, una en el año 2021 (solar fotovoltaica) y otra en el año 2028 (repotenciación del parque eólico). Los costes de operación para el periodo estudiado son los siguientes:

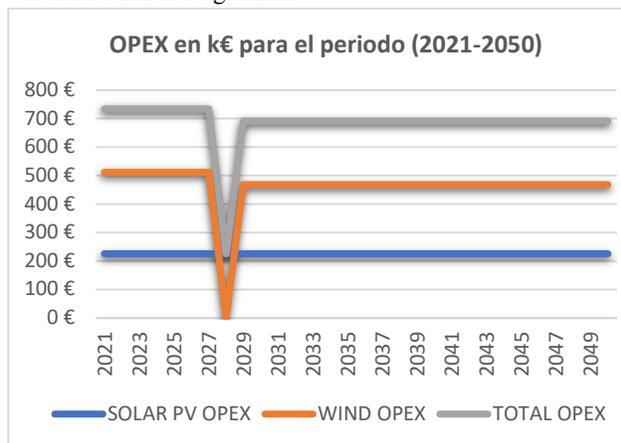


Ilustración 9 OPEX en k€ del periodo (2021-2050)

En lo que se refiere al OPEX, es importante destacar que este valor sufre una reducción considerable tras la repotenciación del parque eólico. La caída pronunciada presente en el año 2028 se debe a que durante ese periodo no será preciso mantener los costes de operación ya que es el año en el que se prevé desmantelar las 17 turbinas G58 e instalar los 3 aerogeneradores Nordex Acciona N163.

En tercer lugar, se presentan los beneficios anuales del proyecto.

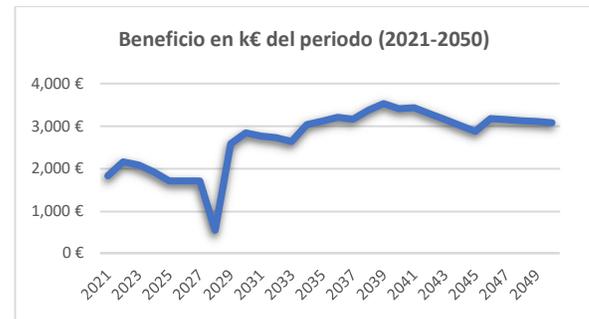


Ilustración 10 Beneficio en k€ del periodo (2021-2050)

El efecto de la repotenciación del parque supone un impacto muy significativo en los beneficios del proyecto tal y como se puede apreciar en la imagen anterior.

A pesar de todos los condicionantes que se prevén para el año 2028, es sorprendente como el conjunto de ambas plantas sigue produciendo un beneficio positivo, aunque mucho menor que el correspondiente a los periodos en los que están activas ambas instalaciones. Esta información refuerza la viabilidad económica del proyecto que no precisará inyecciones de capital más allá de aquellas que precisen las inversiones.

Finalmente, como resultado de estos ingresos, gastos e inversiones, se obtienen los siguientes flujos de caja:

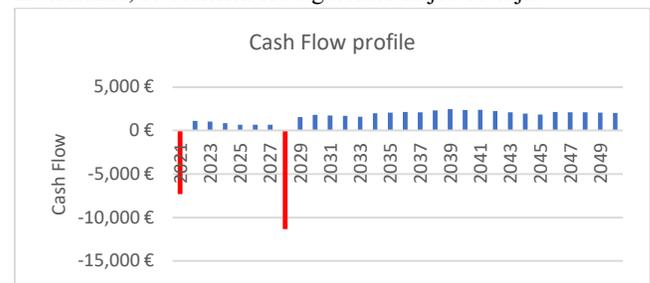


Ilustración 11 Flujos de caja en kEUR (2021-2050)

Es importante destacar que los dos flujos de caja negativos que aparecen en los años 2021 y 2028 corresponden con la instalación de la planta solar y de la repotenciación respectivamente.

Gracias a estos flujos se calculan tanto la TIR del proyecto como el valor actual. De esta forma, se obtiene la siguiente valoración:

- Valor actual Neto: 4.8 M € descontando a una tasa del 6.0%
- TIR de proyecto: 9.3%

IX. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este proyecto son las siguientes:

La hibridación se presenta como una herramienta de optimización de puntos de acceso y conexión que goza de una ventaja competitiva a la hora de desarrollar proyectos solares o eólicos en España ya que no está sujeta a la moratoria existente.

En lo que respecta a la energía eólica, se parte de una situación en la que el parque dispone de 17 aerogeneradores Gamesa G58 de 0.85 MW cada uno, alcanzando una producción horaria de alrededor de 1807 horas anuales y con una vida útil restante de apenas 7 años. Gracias a la repotenciación llevada a cabo en el año 2028 con 3 máquinas Nordex-Acciona N163 con 5.04 MW, se consiguen las siguientes mejoras:

- Prolonga la vida útil del parque en 20 años, llegando hasta el 2048.
- Se reduce el número de aerogeneradores de 17 a 3.
- Se aumenta el número de horas equivalentes en un 73% con respecto a las 1780h actuales, alcanzando 3078 horas equivalentes de producción.

El proyecto solar fotovoltaico que se hibridará con el parque eólico se montará con paneles solares bifaciales del fabricante Risen modelo Titan 120 sobre estructuras de seguidor a un eje con orientación N-S por tres razones:

- Son paneles bifaciales que cronológicamente concuerdan con este proyecto.
- Las estructuras de seguidor a un eje proporcionan buenos resultados con alta fiabilidad.
- Son paneles de gran potencia lo que brindará diversas ventajas.

En lo que se refiere a los inversores, se usarán los inversores en string de Huawei modelo SUN2000-175KTL-H0 (1) ya que proporcionan las siguientes ventajas:

- Modularidad
- Mejor redundancia
- Reducción de los requerimientos de espacio
- Reducción de las pérdidas de cableado de CC

Una vez seleccionados los equipos se realiza el estudio de viabilidad técnica de la hibridación. Este estudio de excedente se evalúa entre el parque actual y el repotenciado frente a una planta solar fotovoltaica que se escala de MWp en MWp. De esta manera se ha decidido que el tamaño más adecuado para esta planta es de 15 MWp. Esta decisión se fundamenta en las siguientes afirmaciones:

- Las pérdidas registradas en el mejor de los escenarios de repotenciación (N163) con este tamaño no exceden el 4% referido a la propia planta.
- En caso de tener que parar la producción eólica durante la construcción de la repotenciación se seguirá aprovechando en gran medida la capacidad del punto de conexión con 15 MWp de solar.
- 15 MWp es un tamaño con el cual se pueden llegar a mejores acuerdos económicos con los proveedores.

En lo que se refiere a los terrenos para albergar esta instalación solar se ha decidido escoger el mencionado "Plan B". Las razones que soportan esta decisión son las siguientes:

- Cumple con todos los requisitos, incluso el de superficie.
- Es la parcela que se encuentra más cerca de la subestación.
- Este plan solamente afecta a una sola parcela y a un solo recinto.



Ilustración 12 Parque eólico repotenciado junto a parcela para la planta solar de 15 MWp

Por último, los resultados del estudio económico muestran como el proyecto genera beneficios a lo largo de toda la vida útil de las plantas incluso en el año en el que se prevé desmantelar los aerogeneradores G58 para la instalación de los tres aerogeneradores N163 de Nordex Acciona.

Finalmente, la proyección de los flujos de caja hasta el año 2050 permiten concluir que proyecto es viable con una TIR de 9.3% y un VAN de 4.8 M € descontando a una tasa del 6.0%.

X. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. A. N163, 2021. [Online]. Available: <https://www.nordex-online.com/en/product/n163-5-x/>.
- [2] N. A. N149, 2021. [Online]. Available: <https://www.nordex-online.com/en/product/n149-5-x/>.
- [3] ENF, "ENF," 2021. [Online]. Available: <https://es.enfsolar.com/pv/inverter-datasheet/12255>.
- [4] E. economista, "Moratoria puntos de acceso y conexión," [Online]. Available: <https://www.economista.es/empresas-finanzas/noticias/10974085/01/21/El-Gobierno-prolonga-al-menos-tres-meses-la-moratoria-de-renovables.html>.
- [5] BOE, "Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre, de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica,," [Online]. Available: <https://boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-17278>.

- [6] BOE, "Circular 1/2021, de 20 de enero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia," [Online]. Available:
https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-904.
- [7] BOE, "Real Decreto-ley 23/2020, de 23 de junio," [Online]. Available:
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-6621>.