

ANEXOS

IMPLANTACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO-GEOTÉRMICO ADAPTADO EN TERRITORIO INSULAR



**Universidad
Europea**

Grupo TFM 3:

Diana Carolina Avellaneda Díaz

Zulivan Pinzón Puerta

Daniel García Romero

Alejandro Dahaj Cruz

Álvaro López Blanco

Tutor/a: Maitane Urrutia Aparicio

Módulo 10: Proyectos de Energías Renovables y Proyecto Fin de Máster

Máster Universitario en Energías Renovables Value – 100% Online

Universidad Europea

Curso 2023 – 2024

Índice

1.	Anexo I. Marco teórico general.....	4
1.1.	Parque eólico	4
1.2.	Funcionamiento de un aerogenerador.....	4
1.3.	Componentes de un aerogenerador	5
1.4.	Aerogenerador de accionamiento directo	7
1.5.	Central eléctrica geotérmica	7
2.	Anexo II. Simulación por software WAsP	9
3.	Anexo III. Resultados simulación WAsP	13
4.	Anexo IV. Aerogenerador Enercon E-175 EP5	15
5.	Anexo V. Simulación Ciclo ORC Aspen HYSYS V.14	19
6.	Anexo VI. Cálculos y resultados de la viabilidad económica	22
7.	Bibliografía	31

Índice de figuras

Esquema general de un parque eólico	4
Componentes principales de un aerogenerador	6
Esquema de funcionamiento de una planta geotérmica de vapor seco	8
Visualización del levantamiento digital del territorio con un Orographic grid-map	10
Visualización del levantamiento digital del territorio con un Orographic grid-map	10
Visualización del recurso eólico en la simulación de WAsP	11
Visualización de la curva de potencia y C_T de la turbina en la simulación de WAsP	12
Disposición de aerogeneradores en WAsP	12
Determinación del valor de la presión del fluido de servicio en el intercambiador	19
Determinación de mínimo caudal de flujo de i-pentano	20
Determinación de máximo caudal de flujo de i-pentano	21

Índice de tablas

Inversión inicial del proyecto y costes de operación-mantenimiento (O&M)	22
Cálculo detallado de los flujos de caja, VAN, TIR y PRI de la propuesta estándar	23
Análisis de sensibilidad – 5,5 MWe de geotérmica por aerogenerador	25
Análisis de sensibilidad – 7 MWe de geotérmica por aerogenerador	27

1. Anexo I. Marco teórico general

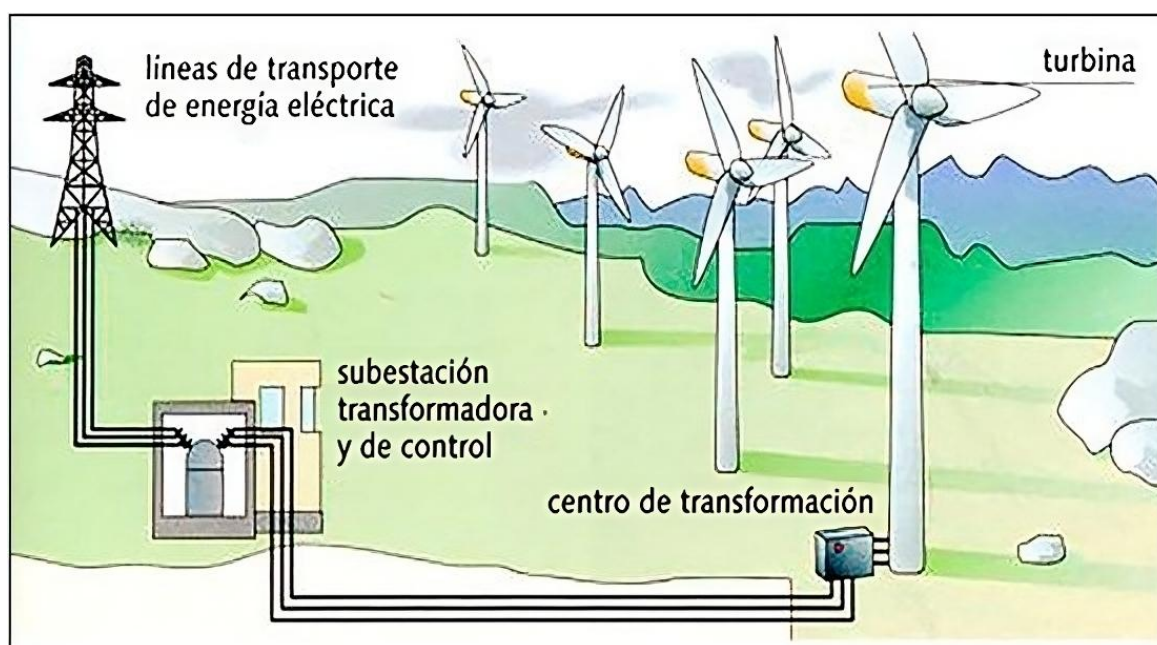
1.1. Parque eólico

Un parque eólico es una infraestructura diseñada con el objetivo de producir energía eléctrica a partir del viento que se produce en un determinado emplazamiento (Iberdrola, 2024).

Los parques eólicos, sin importar cuántos aerogeneradores los compongan, capturan la energía de las corrientes de aire y la convierten en movimiento mecánico rotatorio, que luego se transforma en electricidad (Blanco, 2024).

Figura 1.1

Esquema general de un parque eólico



Fuente: SGK-Planet (2021)

1.2. Funcionamiento de un aerogenerador

El aerogenerador es el sistema o componente principal de un parque eólico, cuya finalidad es la de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica.

Desde el proceso de captación de la energía eólica hasta la generación de la electricidad, el funcionamiento de un aerogenerador se puede dividir en varias etapas (Repsol, 2024):

- **Captación de energía eólica:** comienza cuando el viento contacta con las palas del rotor del aerogenerador. Dichas palas, con un diseño aerodinámico, tienen como principal objetivo capturar la máxima energía del viento posible.
- **Giro del rotor:** como consecuencia del giro de las palas se induce la rotación del rotor alrededor de su eje. Este giro, mediante un eje común conectado, se transmite al generador.
- **Generación de electricidad:** la transformación de la energía mecánica del movimiento de rotación en energía eléctrica se produce en el generador. Como norma general, se emplean generadores síncronos o asíncronos. La principal diferencia entre ambos se encuentra en la sincronización o no sincronización de la velocidad de rotación del rotor y la frecuencia de la corriente generada.
- **Transformación y distribución de la electricidad:** la electricidad generada por el aerogenerador debe someterse a un proceso de transformación, es decir, adaptar la tensión a los niveles que requiere la red eléctrica.

1.3. Componentes de un aerogenerador

Un aerogenerador está compuesto por varias partes clave que trabajan en conjunto, con el fin de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica.

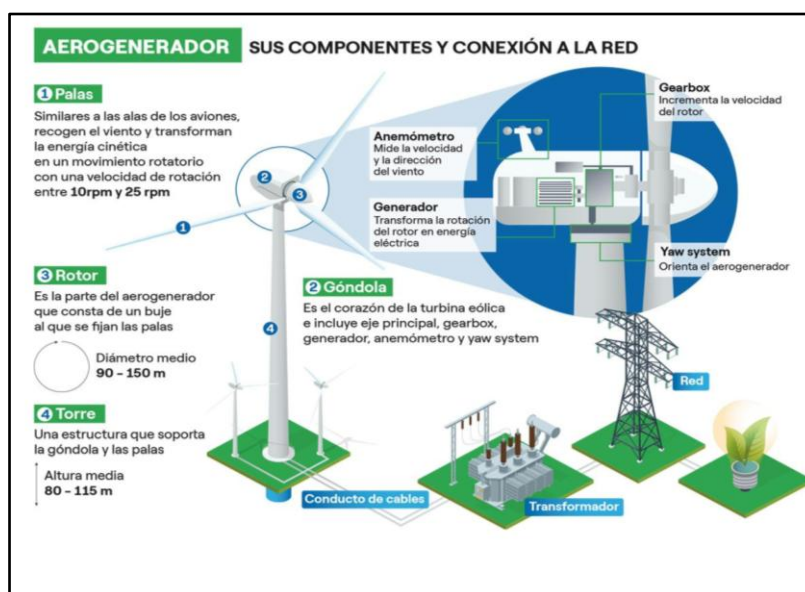
- **Rotor:** se trata del elemento cuya finalidad es sostener las palas mientras es accionado por el viento. Los diseños más comunes están formados habitualmente por tres palas (Enel Green Power, 2024).
- **Palas:** son las encargadas de capturar la energía del viento y transformarla en energía mecánica. Su diseño aerodinámico maximiza la eficiencia, generalmente están construidas de materiales ligeros y resistentes como fibra de vidrio o carbono (Enel Green Power, 2024).
- **Buje:** es la estructura encargada de conectar las palas al eje principal del aerogenerador (Enel Green Power, 2024).
- **Caja multiplicadora:** en los aerogeneradores convencionales, la caja multiplicadora, también conocida como caja de engranajes, aumenta la velocidad del rotor para accionar el generador, ajustando la velocidad de

rotación dentro del rango óptimo de trabajo. No es un elemento presente en aerogeneradores de accionamiento directo.

- **Transformador de potencia:** se encarga de adaptar la energía eléctrica generada a una frecuencia y voltaje determinados para ser vertida a la red eléctrica. En sistemas de accionamiento directo, el convertidor debe estar completamente dimensionado debido a la variabilidad de la velocidad del rotor (Repsol, 2024).
- **Sistema de control y orientación:** su finalidad es la de monitorear y ajustar las condiciones del aerogenerador. Controla parámetros como el ángulo de las palas, la velocidad de rotación y acciona los sistemas de apagado/frenado en caso de cualquier emergencia (Repsol, 2024).
- **Torre:** su función es la de sostener la góndola y las palas. Las torres suelen estar hechas de acero y también contienen los cables de alimentación que conectan la góndola con el transformador, este puede estar ubicado en una plataforma interior o en tierra (Enel Green Power, 2024).
- **Góndola:** es la carcasa que protege todos los componentes clave del aerogenerador. Se encuentra en la parte más alta de la torre y puede girar en función de la dirección del viento (Enel Green Power, 2024).

Figura 1.2

Componentes principales de un aerogenerador



Fuente: Enel Green Power (2024)

1.4. Aerogenerador de accionamiento directo

La gran mayoría de los aerogeneradores que actualmente se encuentran en el mercado están diseñados en base al concepto convencional danés. Es otras palabras, el rotor de tres palas del aerogenerador se encuentra acoplado de manera indirecta a un generador eléctrico por medio de una caja de engranajes, conocida como caja multiplicadora (McMillan, & Ault., 2010)

Por otro lado, en los aerogeneradores de accionamiento directo, se prescinde de la caja multiplicadora. Como consecuencia directa, el rotor principal está acoplado directamente al eje de entrada del generador. Esta casuística implica mayores dimensiones y peso en comparación con un generador con caja multiplicadora, pero mejora la eficiencia y reduce notablemente la velocidad de arranque del sistema (Tian et al., 2019).

1.5. Central eléctrica geotérmica

La energía geotérmica es aquella que permite utilizar el calor del interior de la Tierra para obtener electricidad. Pese a que su origen y comienzo de desarrollo se remonta a muchos años atrás, sigue siendo una de las grandes desconocidas en el mundo de las energías renovables, en gran medida debido a la elevada inversión inicial que requiere o el riesgo de que la perforación no disponga del recurso geotérmico necesario (Iberdrola, 2023)

Para extraer el calor del interior de la Tierra, es de vital importancia disponer de un fluido que lo transporte hasta la superficie. El fluido de trabajo empleado en la mayorías de las explotaciones es el agua ya presente en el subsuelo (IDAE, 2012).

Con el fin de comprender el funcionamiento básico de la tecnología propia de una explotación geotérmica, a continuación, se va a presentar aquella cuya aplicación resulta más sencilla. Dicha tecnología es la empleada por las plantas geotérmicas de vapor seco, en las que se emplea directamente el fluido del subsuelo transportado hasta la superficie, en forma de vapor, para generar electricidad (Enel Green Power, s.f.).

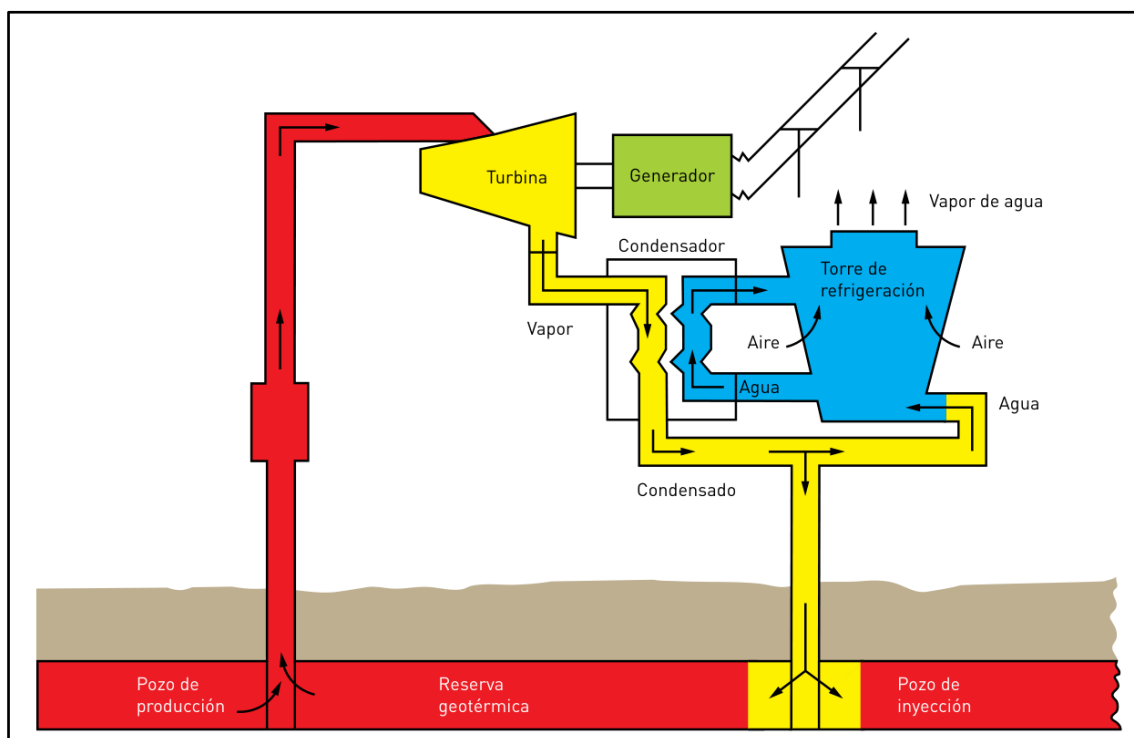
La **Figura 1.3** esquematiza el funcionamiento, a grandes rasgos, de una planta geotérmica con ciclo de vapor seco. Como punto de partida, por medio de una perforación mediante la cual se ejecuta el pozo de producción, se extrae el vapor o el fluido caliente desde las reservas geotérmicas del subsuelo.

Una vez se ha extraído, a medida que asciende disminuye su presión evaporándose, para después dirigirse a la turbina donde se impulsa el rotor y generar movimiento mecánico.

La turbina de vapor, a su vez, estará conectada al generador, convirtiendo el trabajo mecánico en energía eléctrica. Una vez el vapor ha pasado por la turbina, este se enfría en la torre de refrigeración y condensa, volviendo al estado líquido inicial y siendo devuelto al subsuelo para calentarse de nuevo por medio del pozo de inyección, cerrando el circuito.

Figura 1.3

Esquema de funcionamiento de una planta geotérmica de vapor seco



Fuente: IDAE (2012)

2. Anexo II. Simulación por software WAsP

WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) es una herramienta de software utilizada para la evaluación y estimación del recurso eólico en un sitio específico. WAsP ayuda a estimar el potencial energético de parques eólicos mediante la simulación del viento, así como su interacción con el medio y las turbinas eólicas. Es una plataforma utilizada y reconocida a nivel de simulación dentro del sector profesional y, debido a ello, ha sido utilizada durante la elaboración de esta propuesta (WAsP, 2024).

Tras verificar con anterioridad la viabilidad operativa del recurso eólico del emplazamiento escogido, el primer paso a realizar en la simulación con el software es realizar un levantamiento digital del territorio. Para ello, mediante la herramienta de “WAsP Map Editor”, se dispone de dos opciones:

- Disponer de un *Orographic grid-map* de la zona sujeta a estudio.
- Cargar un *Background Map* de la zona e ir trazando a mano y asignando manualmente dentro de la herramienta las diferentes líneas de nivel.

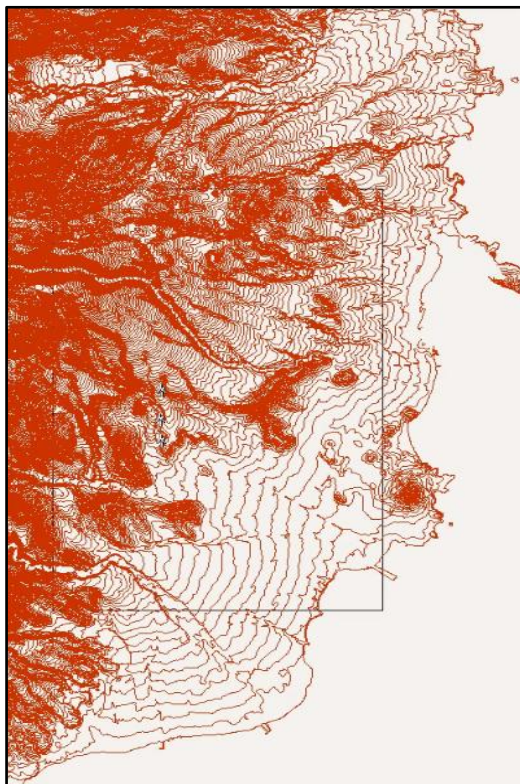
Con un levantamiento digital del territorio muy detallado, se puede modelar cómo interactúa la topografía con las corrientes de aire, permitiendo una estimación más precisa del recurso eólico. Además, es fundamental para ubicar adecuadamente las estaciones meteorológicas y realizar simulaciones que optimicen el diseño y la ubicación de los aerogeneradores en un parque eólico, respetando siempre las restricciones de la zona.

Por ello, de las dos opciones mostradas anteriormente, se escogió la de emplear un *Orographic grid-map* de la zona, ya que se había empleado uno a lo largo del curso académico y comprendía la zona donde se encontraba el parque.

A modo de comparación, se muestran dos imágenes ejemplo de los dos tipos de levantamientos digitalizados, en el que el más complejo y empleado en la simulación del parque (**Figura 2.1**) muestra muchas más líneas de nivel y detalle que el mapa que, a modo de ejemplo, se cargó desde un *Background map* (**Figura 2.2**).

Figura 2.1

Visualización del levantamiento digital del territorio con un Orographic grid-map



Fuente: Software WAsP (2024)

Figura 2.2

Visualización del levantamiento digital del territorio con un Orographic grid-map



Fuente: WAsP (2024)

Una vez que se dispone del levantamiento digital del territorio dentro del simulador WAsP, hay que obtener los datos que permitan modelizar el recurso eólico. En particular, información sobre el recurso eólico a la altura de buje del aerogenerador escogido, es decir, 112 metros.

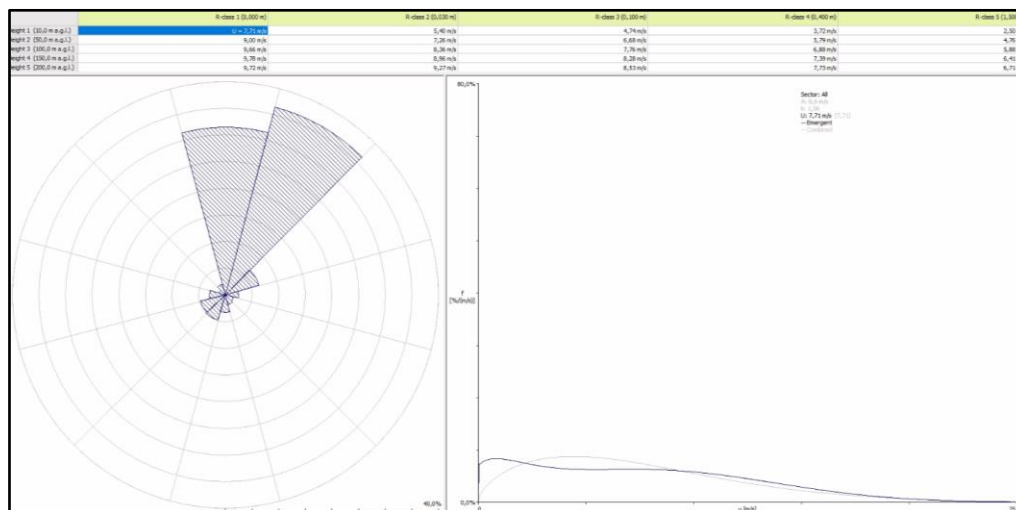
En primera instancia, se adquirió digitalmente el recurso eólico de la zona desde la web de AEMET (AEMET, s.f.). En cambio, tras analizar este recurso, se desestimó, ya que eran datos de velocidad de viento a 0 metros de altura y se consideró negligente realizar una extrapolación lineal a 100 metros sin velocidades disponibles a alturas intermedias.

Una vez desechada la posibilidad de usar la base de datos eólica adquirida, se optó por consultar Global Wind Atlas, ya que dispone de información sobre el recurso eólico a diferentes alturas, incluidas algunas dentro de nuestro rango de operación (Global Wind Atlas, s.f.). A partir de Global Wind Atlas, se pudo generar un archivo con extensión .wtg, legible de manera automática por WAsP y que genera dentro de la aplicación el recurso eólico de la zona escogida.

Tal y como se puede visualizar en la **Figura 2.3**, la predominancia direccional de las corrientes de aire en la zona es la propia de los vientos alisios, los cuales habitualmente circulan a través del territorio insular canario.

Figura 2.3

Visualización del recurso eólico en la simulación de WAsP



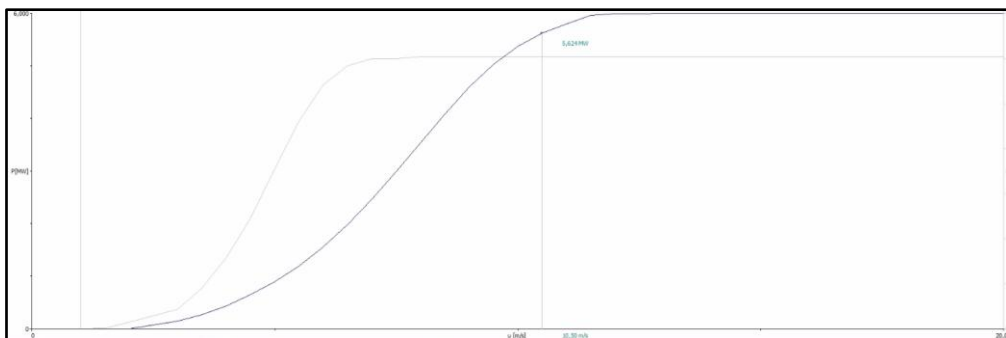
Fuente: WAsP (2024)

Por tanto, una vez se dispone del levantamiento digital del territorio y el recurso eólico optimizado del mismo, el último paso para poder realizar la simulación en WAsP es plantear el parque con las turbinas eólicas elegidas. Para ello, dentro del modelo de simulación se implementó la curva de potencia y la curva del coeficiente de empuje (C_T , por sus siglas en inglés a partir de Thrust Coefficient)

(Rodríguez et al., 2015). Dichas curvas fueron introducidas manualmente desde la herramienta de “WAsP Turbine Editor” (**Figura 2.4**).

Figura 2.4:

Visualización de la curva de potencia y C_T de la turbina en la simulación de WAsP

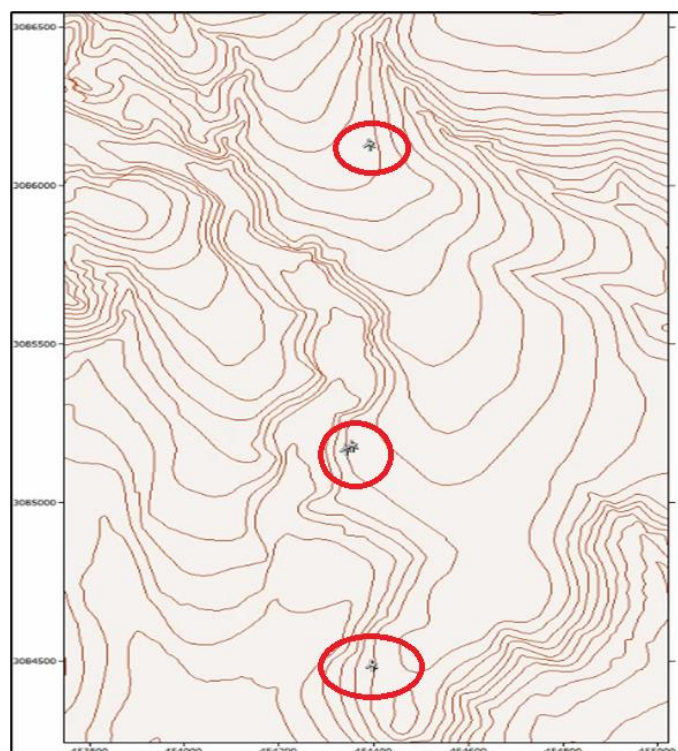


Fuente: Software WAsP (2024)

Y, por último, obteniendo las coordenadas UTM de las localizaciones a partir del GRAFCAN, se sitúan los aerogeneradores dentro de WAsP, procediendo a obtener la simulación del recurso eólico mostrada en el **Anexo III**.

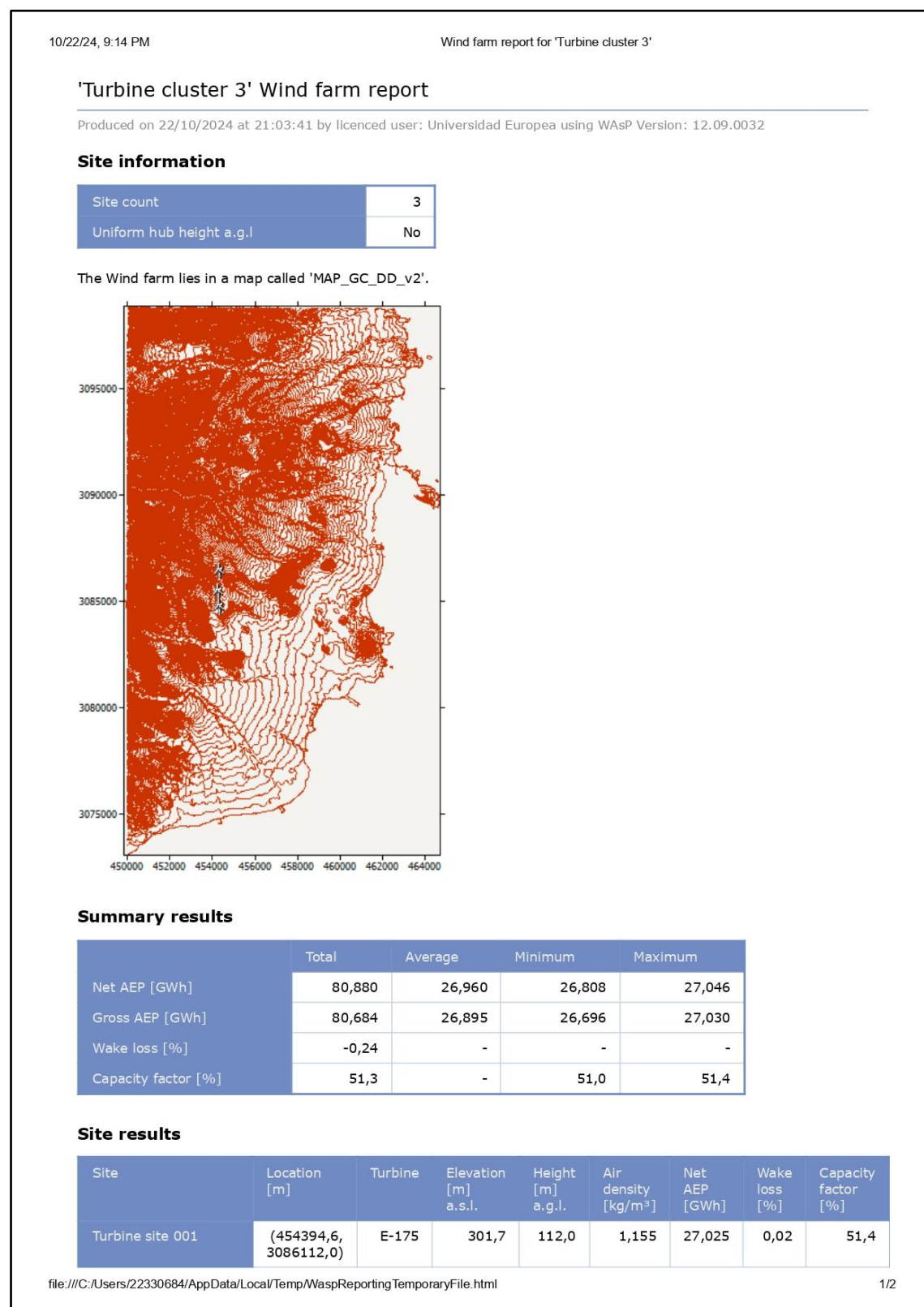
Figura 2.5

Disposición de aerogeneradores en WAsP



Fuente: Software WAsP (2024)

3. Anexo III. Resultados simulación WAsP



10/22/24, 9:14 PM

Wind farm report for 'Turbine cluster 3'

Turbine site 002	(454400,5, 3084468,0)	E-175	219,9	112,0	1,165	27,046	-0,33	51,4
Turbine site 003	(454358,7, 3085161,0)	E-175	231,7	112,0	1,163	26,808	-0,42	51,0

Site wind climates

Site	Location [m]	H [m]	A [m/s]	k	U [m/s]	E [W/m ²]	RIX [%]	dRIX [%]
Turbine site 001	(454394,6, 3086112,0)	112,0	9,2	1,72	8,22	728	13,8	N/A
Turbine site 002	(454400,5, 3084468,0)	112,0	9,4	1,68	8,41	808	15,2	N/A
Turbine site 003	(454358,7, 3085161,0)	112,0	9,2	1,69	8,19	740	15,0	N/A

Wake effects modelling

Wake losses are modelled using PARK2, using default coefficient (0,09) for onshore.

Generalised wind climate

A generalised wind climate called 'gwa3_gwc_customarea' was used to calculate the predicted wind climates

Data origins information

The Vector map "MAP_GC_DD_v2" associated with this Wind farm contains the following vector data layers:

- Elevation layer named 'MAP_GC_DD_v2' was imported by '22330684' from a file called 'C:\Users\22330684\Downloads\Emplazamiento.map', on a computer called 'Simulacion-86'. The MAP_GC_DD_v2 file data were last modified on the 22/10/2024 at 20:06:33

The atlas associated with this Wind farm was imported by '22330684' from a file called 'C:\Users\22330684\Downloads\gwa3_gwc_customarea.lib', on a computer called 'Simulacion-86'. The atlas file was last modified on the 22/10/2024 at 20:19:49

The wind turbine generator associated with this Wind farm was imported by '22330684' from a file called 'C:\Users\22330684\Downloads\TURBINA VA.wtg', on a computer called 'Simulacion-82'. The wind turbine generator file was last modified on the 21/10/2024 at 21:37:42

WASP project parameters


All of the WASP project parameters have default values.

The Wind farm is in a project called 'Project 1'.

Terrain analysis (IBZ) parameters

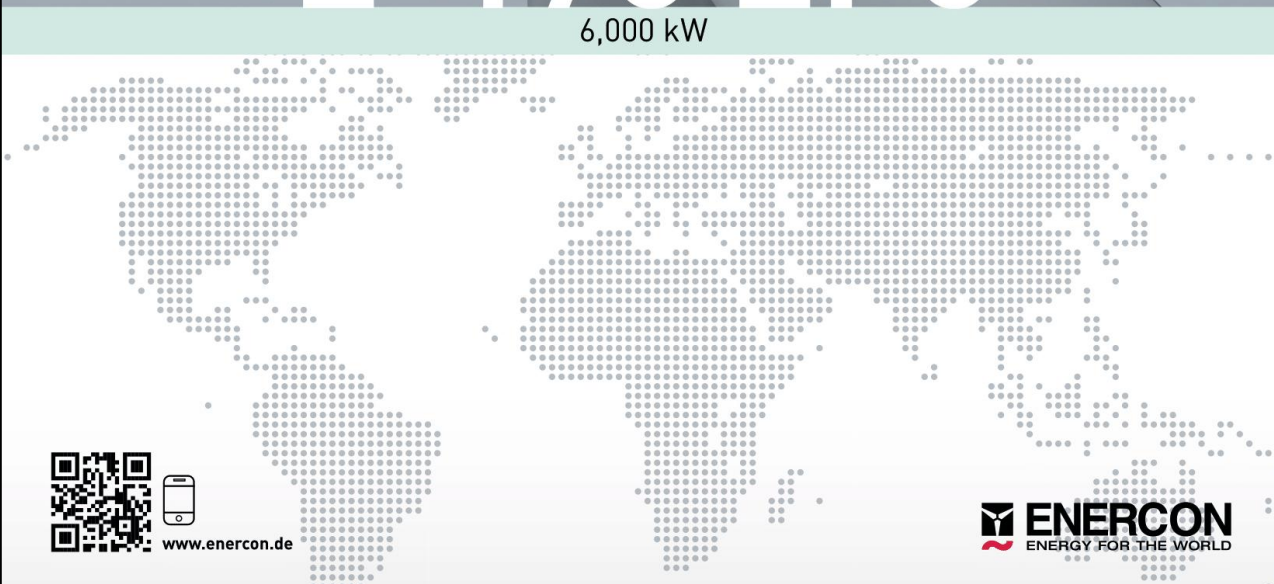
All of the Terrain analysis (IBZ) parameters have default values.



4. Anexo IV. Aerogenerador Enercon E-175 EP5




E-175 EP5

6,000 kW



  www.enercon.de

 **ENERCON**
ENERGY FOR THE WORLD

TECHNICAL DATA

E-175 EP5

Last updated: 12/2023. Technical information subject to change.

GENERAL

Nominal power	6,000 kW
Yield Optimized Mode	6,300 kW
Wind class (IEC)	IEC S / IEC IIA*
Wind zone (DIBt)	WZ 2 GK II / WZ 3*
Turbine concept	gearless, variable speed, full power converter
Design service life	25 years (IEC S)
Cut in wind speed	2.0 m/s
Cut out wind speed	25 m/s
Extreme wind speed at hub height (3-second gust)	59.5 m/s
Ambient temperature for normal operation	-10 °C to +40 °C
Extreme temperature range	-20 °C to +50 °C
Grid feed / control system	ENERCON inverter
Grid frequency	50 Hz / 60 Hz
Sound power level	106.5 dB(A)* Yield and noise-optimised operation. Further modes on request.

ROTOR

Rotor diameter	175 m
Type	upwind rotor with active pitch control

TOWER

Hub height	IEC S	IEC IIA
	112 m	112 m
	132 m	
	162 m	

* dependent on hub height

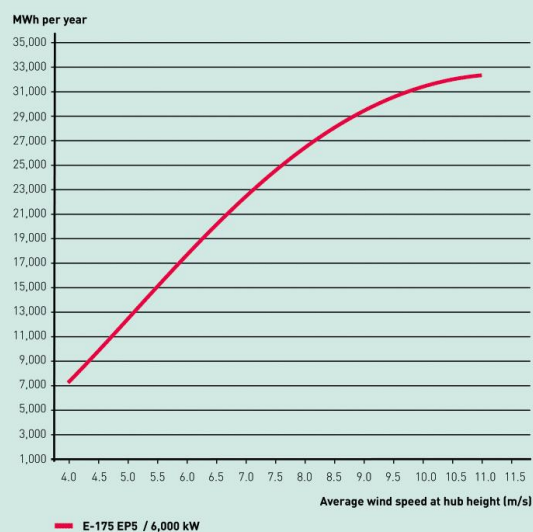
GENERATOR

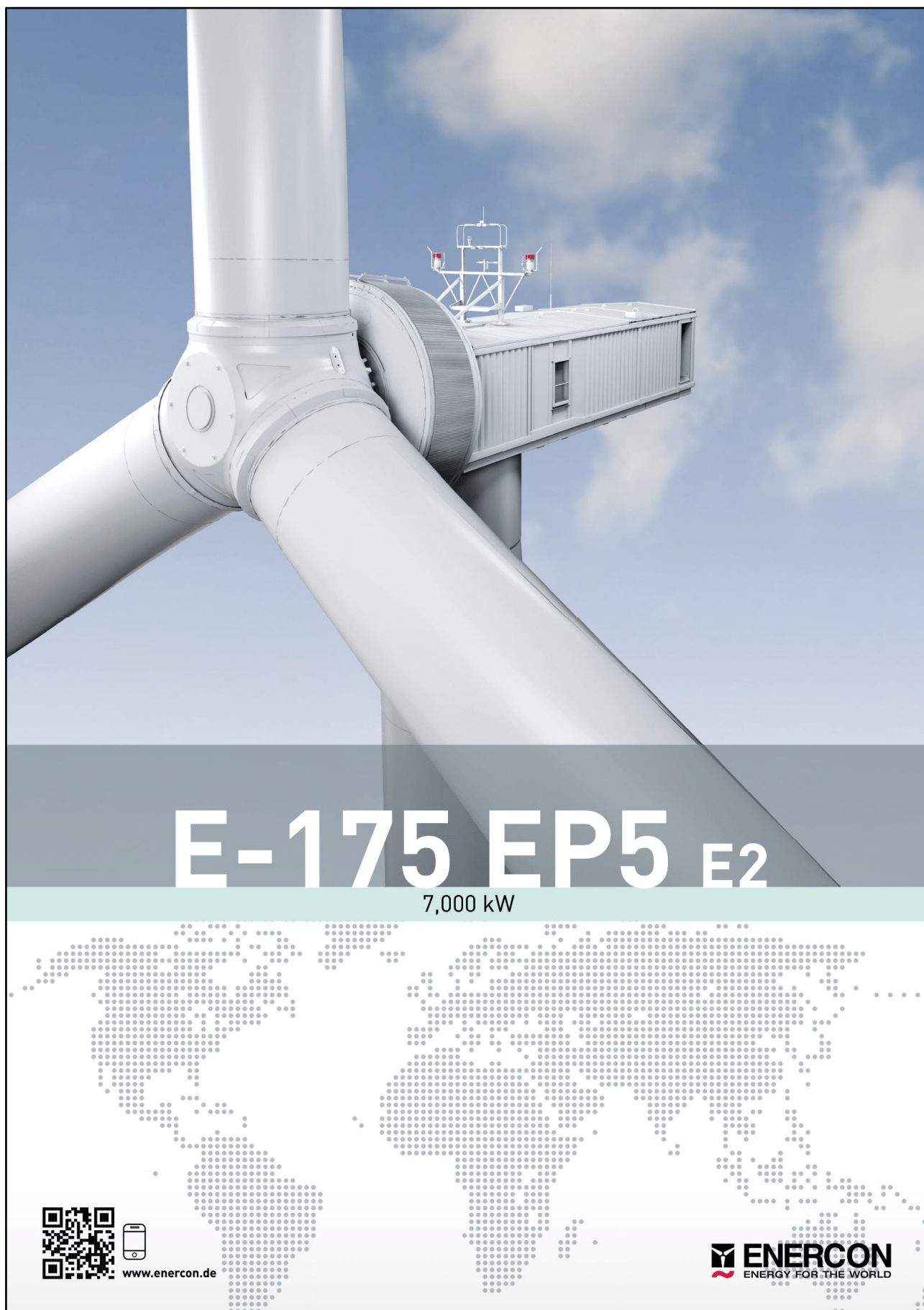
Type	multi-pole synchronous generator (PMG)
Cooling system	air cooling system

FEATURES

	STANDARD	OPTIONAL
FACTS and transmission	X	
ENERCON SCADA	X	
ENERCON storm control	X	
ENERCON Shadow shutdown		X
ENERCON SCADA bat protection		X
Ice detection system		X
Sector management for wind farms		X
Beacon management for wind farms		X
De-icing System		X
Yield Optimized Modes		X

ANNUAL ENERGY YIELD





E-175 EP5 E2

7,000 kW

www.enercon.de

TECHNICAL DATA

E-175 EP5 E2

Last updated: 05/2024. Technical information subject to change.

GENERAL

Nominal power	7,000 kW
Wind class (IEC)	IEC S / IEC IIA*
Wind zone (DIBt)	WZ S / WZ 2*
Turbine concept	gearless, variable speed, full power converter
Design service life	25 years
Cut in wind speed	2.5 m/s
Cut out wind speed	25 m/s
Extreme wind speed at hub height (3-second gust)	up to 59.50 m/s*
Ambient temperature for normal operation	-10 °C to +40 °C
Extreme temperature range	-20 °C to +50 °C
Grid feed / control system	ENERCON inverter
Grid frequency	50 Hz / 60 Hz
Sound power level	106.9 dB(A)* Noise-optimised peration. Further modes on request.

ROTOR

Rotor diameter	175 m
Type	upwind rotor with active pitch control

TOWER

Hub height	IEC S	IEC IIA
	132 m	112 m
	162 m	
	175 m	

* dependent on hub height

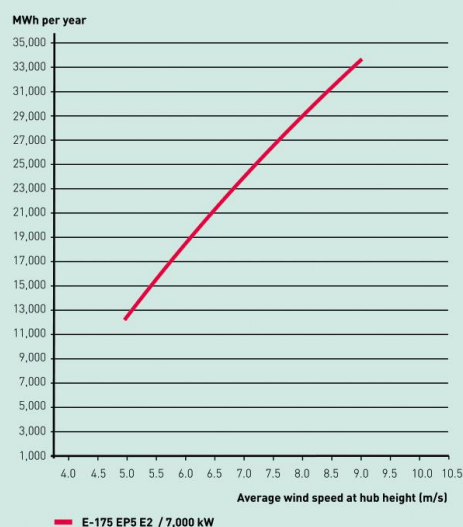
GENERATOR

Type	directly driven ,multi-pole syn- chronous generator (PMG)
Cooling system	air cooling system

FEATURES

	STANDARD	OPTIONAL
FACTS and transmission	X	
ENERCON SCADA	X	
ENERCON storm control	X	
ENERCON Shadow shutdown		X
ENERCON SCADA bat protection		X
Ice detection system		X
Sector management for wind farms		X
Beacon management for wind farms		X
De-Icing System		X

ANNUAL ENERGY YIELD



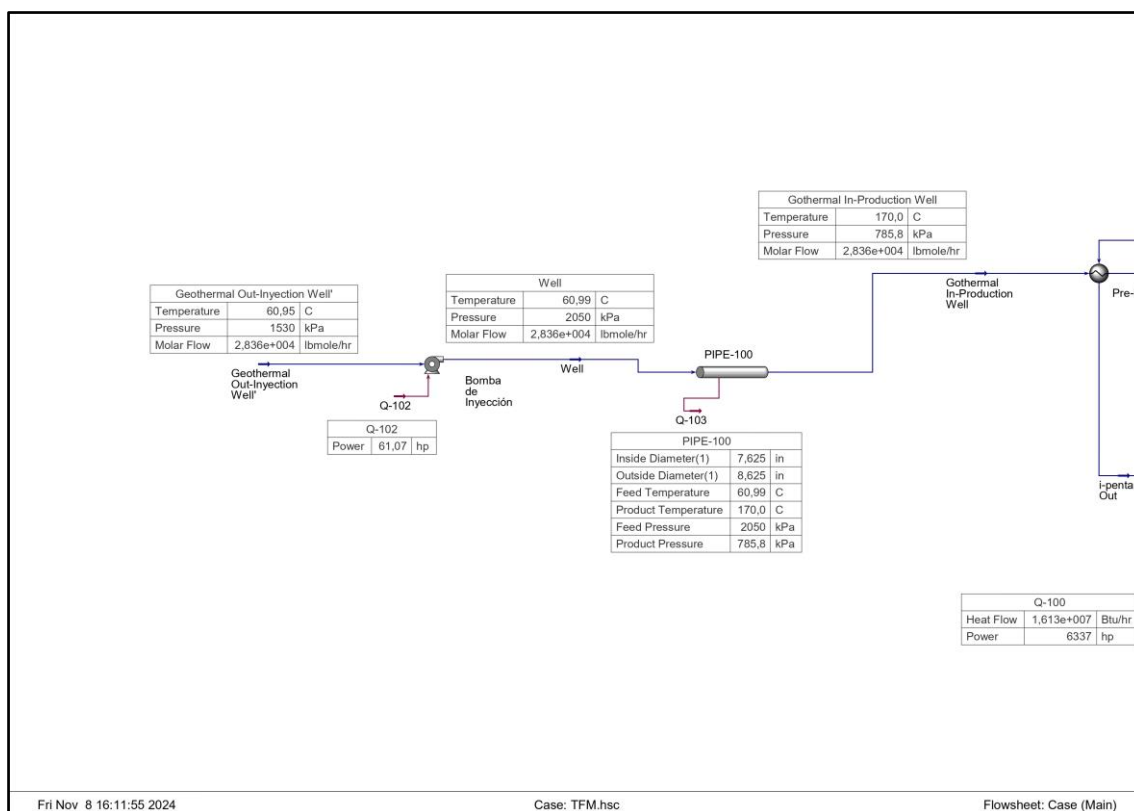
5. Anexo V. Simulación Ciclo ORC Aspen HYSYS V.14

Aspen HYSYS es un software de simulación de procesos diseñado para modelar, simular y optimizar sistemas industriales en los campos de la ingeniería química y de procesos. Es ampliamente utilizado en la industria para el diseño y análisis de procesos, en sectores como la petroquímica, la energía y el tratamiento de aguas. Para simular las condiciones del intercambiador de calor y el aerorefrigerador modificados en la turbina ORC, se realizó el esquema general de simulación y se indicaron las condiciones de proceso con el fin de encontrar los puntos operativos óptimos del sistema.

En la **Figura 5.1** pueden visualizarse las propiedades de las corrientes del fluido geotérmico después del proceso de bombeo y en la llegada al punto del intercambiador, quedando plasmado el valor de presión de $2,05 \cdot 10^6$ Pa, permitiendo al usuario calcular la presión con la que el fluido de servicio llega al intercambiador de calor en la superficie.

Figura 5.1

Determinación del valor de la presión del fluido de servicio en el intercambiador

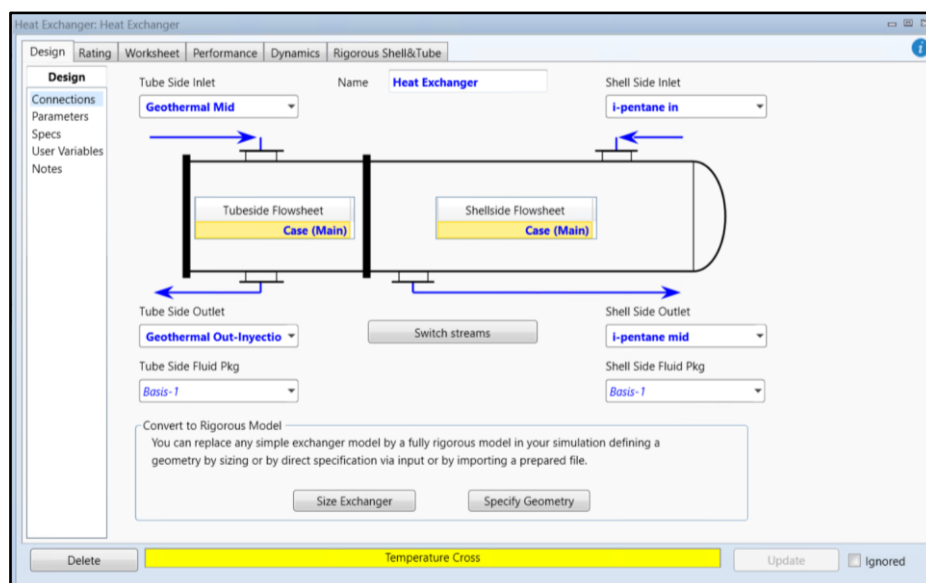
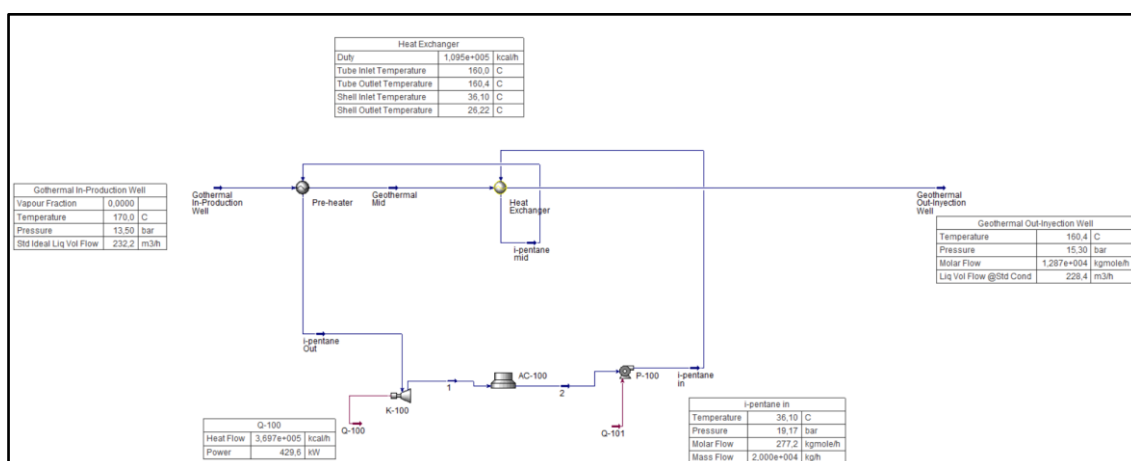


Fuente: Software Aspen HYSYS V.14 (2024)

En la **Figura 5.2** se observa que, con un caudal por debajo de las 21 ton/h, el sistema modificado comienza a tener pérdidas de eficiencia en el intercambiador de calor. La tabla de propiedades indica que la temperatura de entrada del fluido de trabajo es mayor que la temperatura de salida, lo que indica un sistema completamente ineficiente.

Figura 5.2

Determinación de mínimo caudal de flujo de i-pentano

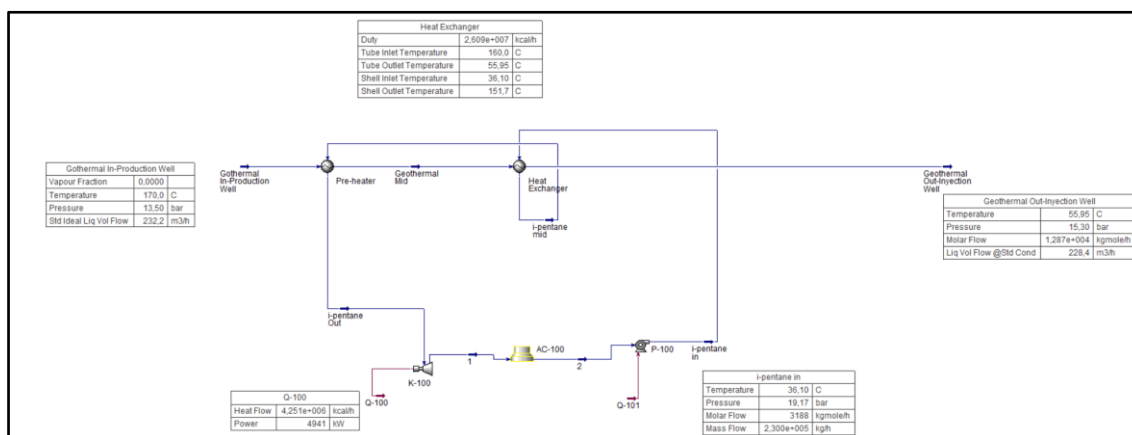


Fuente: Software Aspen HYSYS V.14 (2024)

En la **Figura 5.3**, se observa que con un caudal por encima de las 230 ton/h, el sistema modificado comienza a tener pérdidas de eficiencia en el aerofriador, requiriendo más unidades para lograr retirar el calor requerido, haciendo el proyecto más costoso.

Figura 5.3

Determinación de máximo caudal de flujo de i-pentano



Design	Rating	Worksheet	Performance	Dynamics	Rigorous Air Cooler
Rating					
Sizing					
Nozzles					
Number of Fans <input type="text" value="4"/>					
Fan	Fan 0	Fan 1	Fan 2	Fan 3	
Speed [rpm]	60,00	60,00	60,00	60,00	
Demanded speed [rpm]	60,00	60,00	60,00	60,00	
Max Acceleration per sec [rpm]	<no limit>	<no limit>	<no limit>	<no limit>	
Design speed [rpm]	60,00	60,00	60,00	60,00	
Design air flow [ACT_m3/h]	3,600e+005	3,600e+005	3,600e+005	3,600e+005	
Current air flow [ACT_m3/h]	3,600e+005	3,600e+005	3,600e+005	3,600e+005	
Fan Is On	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Fuente: Software Aspen HYSYS V.14 (2024)

6. Anexo VI. Cálculos y resultados de la viabilidad económica

A lo largo de este anexo, se recopilan los cálculos y tablas realizadas para la obtención de los resultados, indicadores y conclusiones asociadas a la viabilidad económica del desarrollo del parque híbrido propuesto.

En la **Tabla 6.1**, se muestran los importes detallados asociados a las inversiones iniciales necesarias, así como unos costes de **Operación y Mantenimiento (O&M)** orientativos.

Estos últimos fueron extraídos de un estudio comparativo en el que se recopilan cifras orientativas para plantas de generación geotérmica, y otro en el que se muestran una serie de rangos económicos para la gestión y funcionamiento de parques eólicos en tierra firme (Fernández Díez, s. f.).

Tabla 6.1

Inversión inicial del proyecto y costes de operación-mantenimiento (O&M)

Inversión inicial y costes de O&M	
Cálculo de la inversión inicial	
Categoría	Importe
Aerogenerador Enercon E175 EP5	14.400.000 €/unidad (Valor promedio) Total (18 MW): 43.200.000 €
Circuito geotérmico ORC	1,664,767 £/MW 1.997.720,40 €/MW Total (14,178 MW): 28.323.679,83 €
Pozos/Perforaciones geotérmicas	13.889.250 €
Total:	85.412.930 €

O&M	
Categoría	Importe (Valores medios)
Parque eólico convencional	0,013 – 0.025 USD/kWh Valor medio: 0,019 USD/kWh Total: 1.229.490,00 €
Planta de generación geotérmica	57.200 €/MW Total: 810.981,60 €
Total	2.040.471,60 €

Fuente: ResearchGate (2016), Pedro Fernández Díez (s.f.)

Como se menciona en el **Apartado 7 de la memoria**, se va a hacer uso de los indicadores del **Valor Actual Neto (VAN)**, la **Tasa Interna de Retorno (TIR)** y el **Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)**, junto con sus hipótesis asociadas, para analizar la viabilidad económica detallada de la propuesta (Tabla 6.2).

Tabla 6.2

Cálculo detallado de los flujos de caja, VAN, TIR y PRI de la propuesta estándar

Año	Inversión inicial	Ingresos producción	Gastos O&M	Flujo de caja
0	-85.412.930 €	10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-77.011.017,78 €
1		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-68.609.105,74 €
2		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-60.207.193,69 €
3		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-51.805.281,64 €
4		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-43.403.369,59 €
5		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-35.001.457,55 €
6		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-26.599.545,50 €
7		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-18.197.633,45 €
8		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-9.795.721,40 €

9		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	-1.393.809,36 €
10		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	7.008.102,69 €
11		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	15.410.014,74 €
12		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	23.811.926,79 €
13		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	32.213.838,83 €
14		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	40.615.750,88 €
15		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	49.017.662,93 €
16		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	57.419.574,97 €
17		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	65.821.487,02 €
18		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	74.223.399,07 €
19		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	82.625.311,12 €
20		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	91.027.223,16 €
21		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	99.429.135,21 €
22		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	107.831.047,26 €
23		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	116.232.959,31 €
24		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	124.634.871,35 €
25		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	133.036.783,40 €
26		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	141.438.695,45 €
27		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	149.840.607,50 €
28		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	158.242.519,54 €
29		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	166.644.431,59 €
30		10.442.383,65 €	-2.040.471,60 €	175.046.343,64 €

VAN	-69.265.958,40 €
TIR	8,34%
PR	10 años

Fuente: Elaboración propia

Tras el análisis pormenorizado sobre los resultados económicos de los indicadores realizado en la memoria, a continuación, se recopila el análisis de sensibilidad enfocado en la ampliación de la potencia nominal de las turbinas geotérmicas de los aerogeneradores: 5,5 MWe y 7 MWe por aerogenerador, recogidos en la **Tabla 6.3** y **Tabla 6.4**, respectivamente.

Tabla 6.3

Análisis de sensibilidad – 5,5 MWe de geotérmica por aerogenerador

Energía producida (MWeh/año)	198.558,00
Ingresos anuales de producción (Eur/año)	11.536.815,47
Eólica producida (MWeh/año)	64.710,00
Geotérmica producida (MWeh/año)	133.848,00
Eólica producida (kWeh/año)	64.710.000,00
Geotérmica producida (kWeh/año)	133.848.000,00

Inversión inicial y costes de O&M	
Cálculo de la inversión inicial	
Categoría	Importe
Aerogenerador Enercon E175 EP5	14.400.000 €/unidad Total (18 MW): 43.200.000 €
Circuito geotérmico ORC	1,664,767 £/MW
	1.997.720,40 €/MW
	Total (16,5 MW): 32.962.386,60 €
Pozos/Perforaciones geotérmicas	13.889.250 €
Total:	90.051.637 €
O&M	
Categoría	Importe (Valores medios)
Parque eólico convencional	0,013 – 0.025 USD/kWh

	Valor medio: 0,019 USD/kWh
	1.229.490,00 €
Planta de generación geotérmica	57.200 €/MW
	943.800,00 €
Total	2.173.290,00 €

Año	Inversión inicial	Ingresos producción	Gastos O&M	Flujo de caja
0	-90.051.637 €	11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	-80.688.111,13 €
1		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	-71.324.585,65 €
2		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	-61.961.060,18 €
3		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	-52.597.534,70 €
4		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	-43.234.009,23 €
5		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	-33.870.483,76 €
6		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	-24.506.958,28 €
7		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	-15.143.432,81 €
8		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	-5.779.907,33 €
9		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	3.583.618,14 €
10		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	12.947.143,61 €
11		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	22.310.669,09 €
12		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	31.674.194,56 €
13		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	41.037.720,04 €
14		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	50.401.245,51 €
15		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	59.764.770,98 €
16		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	69.128.296,46 €
17		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	78.491.821,93 €
18		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	87.855.347,41 €
19		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	97.218.872,88 €

20		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	106.582.398,35 €
21		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	115.945.923,83 €
22		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	125.309.449,30 €
23		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	134.672.974,78 €
24		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	144.036.500,25 €
25		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	153.400.025,72 €
26		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	162.763.551,20 €
27		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	172.127.076,67 €
28		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	181.490.602,15 €
29		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	190.854.127,62 €
30		11.536.815,47 €	-2.173.290,00 €	200.217.653,09 €

VAN	-28.500.337,77 €
TIR	9,36%
PR	9 años

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.4

Análisis de sensibilidad – 7 MWe de geotérmica por aerogenerador

Energía producida (MWeh/año)	235.062,00
Ingresos anuales de producción (Eur/año)	13.657.807,39 €
Eólica producida (MWeh/año)	64.710,00
Geotérmica producida (MWeh/año)	170.352,00
Eólica producida (kWeh/año)	64.710.000,00
Geotérmica producida (kWeh/año)	170.352.000,00

Inversión inicial y costes de O&M	
Cálculo de la inversión inicial	
Categoría	Importe
Aerogenerador Enercon E175 EP5	14.400.000 €/unidad Total (18 MW): 43.200.000 €
Circuito geotérmico ORC	1,664,767 £/MW 1.997.720,40 €/MW 41.952.128,40 €
Pozos/Perforaciones geotérmicas	13.889.250 €
Total:	99.041.378 €
O&M	
Categoría	Importe (Valores medios)
Parque eólico convencional	0,013 – 0.025 USD/kWh Valor medio: 0,019 USD/kWh 1.229.490,00 €
Planta de generación geotérmica	57.200 €/MW 1.201.200,00 €
Total	2.430.690,00 €

Año	Inversión inicial	Ingresos producción	Gastos O&M	Flujo de caja
0	-99.041.378 €	13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	-87.814.261,01 €
1		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	-76.587.143,63 €
2		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	-65.360.026,24 €
3		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	-54.132.908,86 €
4		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	-42.905.791,47 €
5		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	-31.678.674,08 €
6		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	-20.451.556,70 €

7		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	-9.224.439,31 €
8		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	2.002.678,07 €
9		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	13.229.795,46 €
10		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	24.456.912,85 €
11		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	35.684.030,23 €
12		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	46.911.147,62 €
13		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	58.138.265,00 €
14		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	69.365.382,39 €
15		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	80.592.499,78 €
16		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	91.819.617,16 €
17		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	103.046.734,55 €
18		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	114.273.851,93 €
19		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	125.500.969,32 €
20		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	136.728.086,71 €
21		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	147.955.204,09 €
22		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	159.182.321,48 €
23		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	170.409.438,86 €
24		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	181.636.556,25 €
25		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	192.863.673,64 €
26		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	204.090.791,02 €
27		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	215.317.908,41 €
28		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	226.545.025,79 €
29		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	237.772.143,18 €
30		13.657.807,39 €	-2.430.690,00 €	248.999.260,57 €

VAN	50.502.802,98 €
TIR	11,00%
PR	8 años

Fuente: Elaboración propia

7. Bibliografía

Agencia Estatal de Meteorología, AEMET (s.f.)

<https://www.aemet.es>

Aspen Technology, Inc. (2024). Aspen HYSYS V14 [Software]. *AspenTech*.

<https://www.aspentech.com>

Blanco, T. A. (2024, August 2). Parques eólicos: ¿Qué son y cuál es su funcionamiento?

https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-un-parque-eolico-asi-funciona-para-generar-energia-electrica/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsJO4BhDoARIsADDv4vBVpTJ1Rj4DoEUWekjSAmUDyKoXMXMHwLKYZUegsXBBObFIYnbuXSgaAhVHEALw_wcB

Cerrada Galán, A. (2020). Análisis de Ciclos de Rankine Orgánicos. *Repositorio de tesis de la Universidad de Sevilla*.

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/92892/fichero/TFG-2892+CERRADA+GAL%C3%81N%2C+ALBERTO.pdf>

Cruz, A. (2023, 17 abril). Nuevo concurso para investigar la geotermia en Gran Canaria y La Palma. *Atlántico Hoy*.

https://www.atlanticohoy.com/economia/nuevo-concurso-investigar-geotermia-gran-canaria-palma_1515942_102.html

Duato, A., & Duato, A. (2019, 23 enero). Qué es el engranaje epicicloidial | *Blog SEAS. Blog de SEAS*.

<https://www.seas.es/blog/disenio-mecanico/el-engranaje-epicicloidial-y-aplicaciones/>

Enel Green Power (s.f.). Central geotérmica.

<https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-geotermica/central-geotermica>

Enel Green Power. (2024). Aerogenerador: qué es y cómo funciona.

<https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-eolica/aerogenerador>

Global Wind Atlas (s.f.). *Technical University of Denmark*.

<https://globalwindatlas.info>

Iberdrola. (2023). Geotermia: qué es, cómo funciona y cuáles son sus ventajas.

<https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-empresa/energias-renovables/energia-geotermica>

Iberdrola. (2024). Energía eólica: qué es, cómo funciona y sus ventajas.

<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2012). Geotermia: Energía del calor de la tierra. *IDAE*.

https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e9_geotermia_A_db72b0ac.pdf

Mardones, I. G. (2021, 3 febrero). Un estudio 3D detecta yacimientos geotérmicos en el sur de La Palma. *Geotermiaonline*.

<https://geotermiaonline.com/10105/un-estudio-3d-detecta-yacimientos-geotermicos-en-el-sur-de-la-palma/>

McMillan, D., & Ault, G. W. (2010). Techno-Economic comparison of operational aspects for direct drive and Gearbox-Driven wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(1), 191–198.

<https://doi.org/10.1109/tec.2009.2032596>

Repsol (2024, September 23). Aerogenerador: Cómo funciona, partes y tipos que existen.

<https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/aerogenerador/index.cshtml>

ResearchGate (s.f.). Schematic diagram depicting an enhanced geothermal system (EGS).

https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-depicting-an-enhanced-geothermal-system-EGS-setup-Fluids-are-pumped_fig1_320133376

SGK-Planet. (2021, February 23). ¿Qué es un parque eólico?

<https://sgkplanet.com/que-es-un-parque-eolico/>

Taller Actual. Mecanismo diferencial. (2022, 27 enero).

<https://talleractual.com/tecnica/transmision/2936-el-conjunto-diferencial-y-el-auto-parte-1>

Tian, H., Xu, X., & Lin, H. (2019). Simulation study on direct-drive wind power system. *The Journal of Engineering*, 2019(23), 9183–9189.

<https://doi.org/10.1049/joe.2018.9214>

WAsP. (2024). : Danish Technical University. WAsP: Wind Atlas Analysis and Application Program (Versión 12.6). *DTU Wind Energy*.

<https://www.wasp.dk>

Yekoladio, P. J., Bello-Ochende, T., & Meyer, J. P. (2015). Thermodynamic analysis and performance optimization of organic rankine cycles for the conversion of low-to-moderate grade geothermal heat. *International Journal of Energy Research*, 39(9), 1256–1271.

<https://doi.org/10.1002/er.3326>