

Cálculos eólicos

***Estudio de viabilidad técnica
para la autogestión energética sostenible
en una isla remota***

Trabajo de fin de máster

Anexo 3

**Ingolf Spreewitz
Gabriel Ignacio Rello Costa
José Rey Pozueco
Jordi Calpe i Planells
Joshua Ponce Delgado**

Universidad Europea
Máster en Energías Renovables
Curso 2022 – 2023

Índice global

1	Obtención de datos.....	5
2	Selección del aerogenerador	9
3	Selección del emplazamiento	11
4	Potencial del aerogenerador	12
4.1	Prestaciones y características	12
4.2	Estimación de energía por aerogenerador.....	12
5	Estimación de costes	14
6	Referencias bibliográficas	15

Índice de figuras

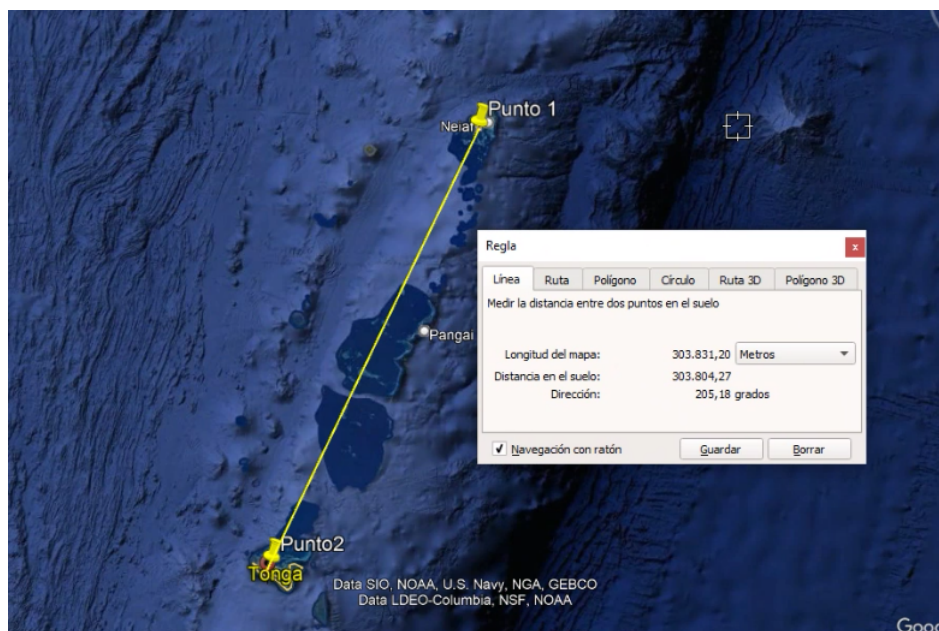
1.1.1.1	Distancia entre los Keitahi y Tongatapu (Earth Google)	5
1.1.1.2	Coordenadas de Keitahi y Tongatapu	5
1.1.1.3	Localización y rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu (Global Wind Atlas, n.d.)	6
1.1.1.4	Rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu (Global Wind Atlas, n.d.)	6
1.1.1.5	Rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu. (Windographer)	7
1.1.1.6	Distribución de Weibull para el emplazamiento seleccionado. (Windographer).	7
1.1.1.7	Distribución mensual de los vientos promedio del emplazamiento seleccionado en Tongatapu. (Windographer)	8
1.1.1.8	Índice de turbulencias frente a las clases de aerogenerador según la IEC 61400-1. (Windographer)	8
2.1.1.1	Interpolación entre el índice de turbulencias con las clases y la distribución de Weibull para seleccionar la clase de Aerogenerador.	9
2.1.1.2	Cálculo de probabilidad, selección de clase	10
3.1.1.1	Rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu (Earth Google)	11
4.2.1.1	Rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu (Windographer)	12
4.2.1.2	Producción mediante energía eólica. Comparativa entre 1 y 5 aerogeneradores .	13
4.2.1.3	Energía producida mensualmente	13
5.1.1.1	Coste de los aerogeneradores sin contar tasas ni emplazamiento	14
5.1.1.2	UA2_T5 (Módulo 8) estimación del coste de inversión de un proyecto eólico	14

1 Obtención de datos

En este apartado se muestra el análisis del recurso eólico, así como la elección del aerogenerador, la justificación clase de aerogenerador que se escogerá y la estimación de la energía que se conseguirá mediante el recurso eólico.

La primera consideración que se ha de tener en cuenta es que, ya que el Reino de Tonga carece de información sobre el viento para la isla de Tongatapu, la cual es nuestra diana para realizar el estudio de viabilidad, por lo tanto, hemos seleccionado los datos de viento de la estación de Keitahi (Tonga) isla situada al norte del Reino, la cual posee una rosa de los vientos semejante a nuestra diana al igual que un valor de viento promedio semejante. El archivo se ha obtenido de la web Energy Data info (*Tonga - Wind Measurement Data - ENERGYDATA.INFO, n.d.*), el cual posee datos de velocidad de viento, dirección, desviación estándar, densidad del aire y otros a diferentes alturas.

Los datos fueron tomados cada 10 minutos desde el 01-04-2021 hasta el 09-09-2022. Archivo de origen datos de viento de Keitahi, isla al Norte del reino de Tonga, a una distancia aproximada de 300 km en línea recta.



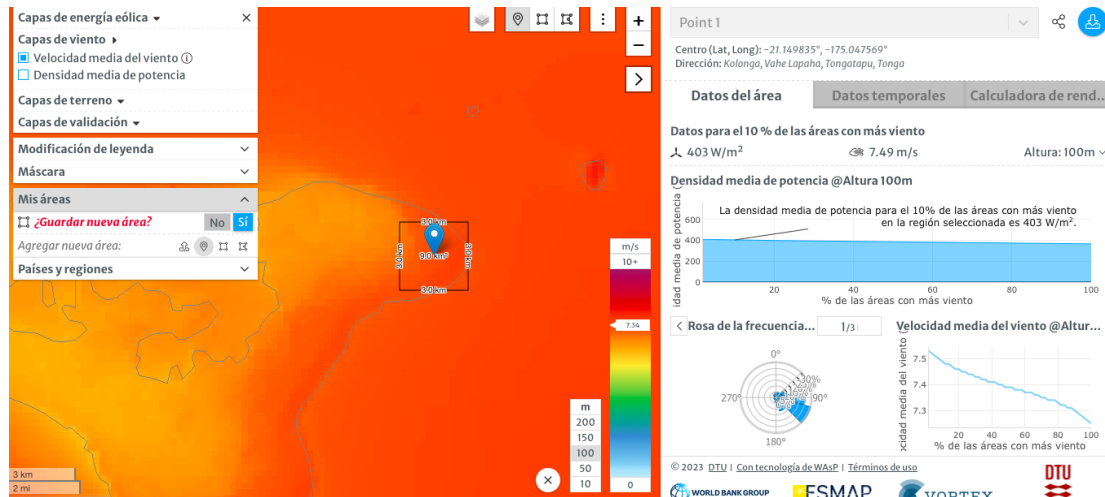
1.1.1.1 Distancia entre los Keitahi y Tongatapu (Earth Google)

La orografía de ambas islas es semejante además de que se encuentran a latitudes semejantes, como se muestra a continuación:

Keitahi	Tongatapu
18 ° 43 ' 02'' Sur, 174 ° 01 ' 55 '' Oeste	21 ° 08' 13 '' Sur 175 ° 02 ' 09 '' Oeste

1.1.1.2 Coordenadas de Keitahi y Tongatapu

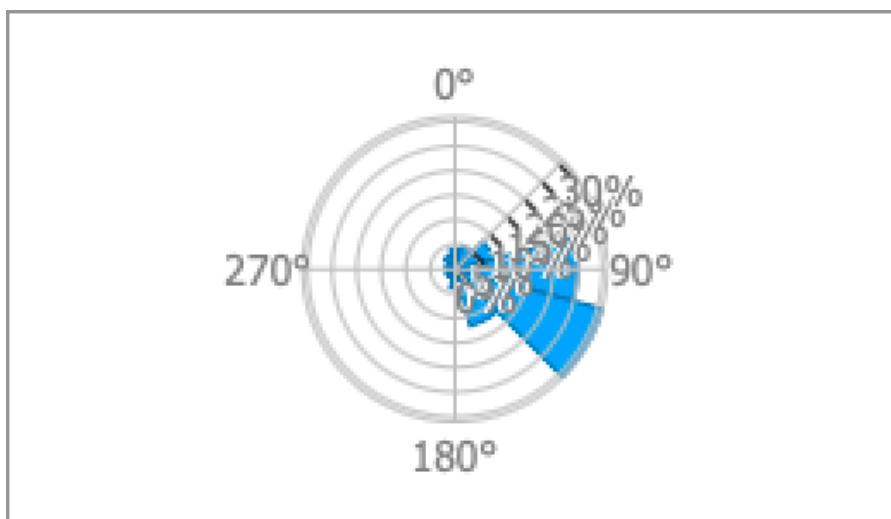
Para realizar la comparativa, se ha obtenido la rosa de los vientos de Tongatapu a partir de la web Global Wind Atlas (*Global Wind Atlas, n.d.*), la cual es una fuente fiable para realizar este tipo de estimaciones.



1.1.1.3 Localización y rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu (*Global Wind Atlas, n.d.*)

Para 100 metros de altura, en Tongatapu se obtiene una velocidad promedio del viento de 7,49 m/s, mientras la velocidad promedio para 100 metros de 7,77 m/s (mientras que el parámetro A de Weibull que representa la velocidad promedio es de 7,96 m/s) lo que se traduce en 26,97 Km/h en Keitahi y 28,66 Km/h (según la velocidad del parámetro de Weibull, límite superior) en Tongatapu, por lo que las velocidades son semejantes, además a continuación se muestra la rosa de los vientos:

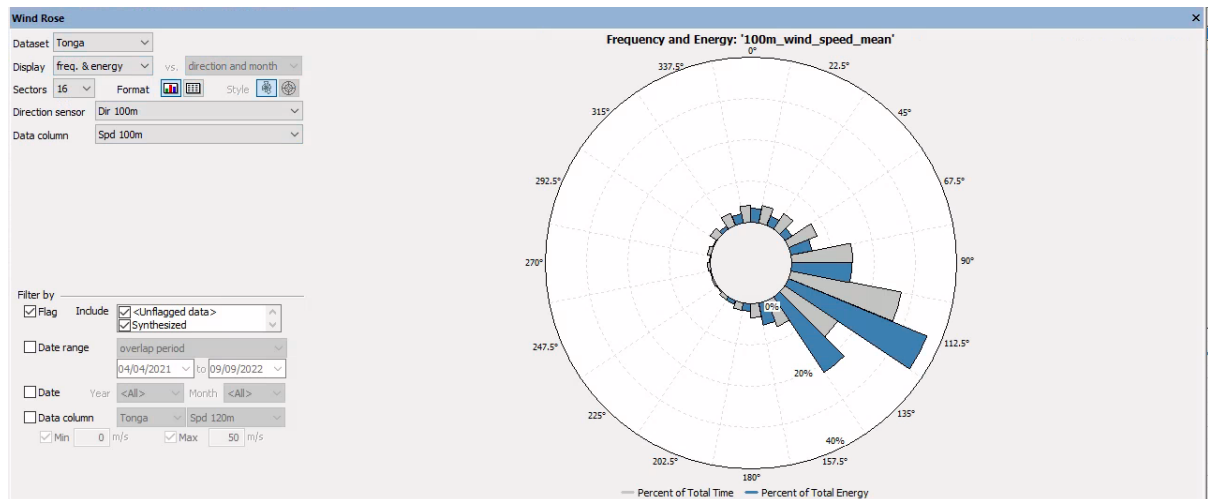
A continuación, se muestra la rosa de los vientos de Tongatatu (*Global Wind Atlas*):



1.1.1.4 Rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu (*Global Wind Atlas, n.d.*)

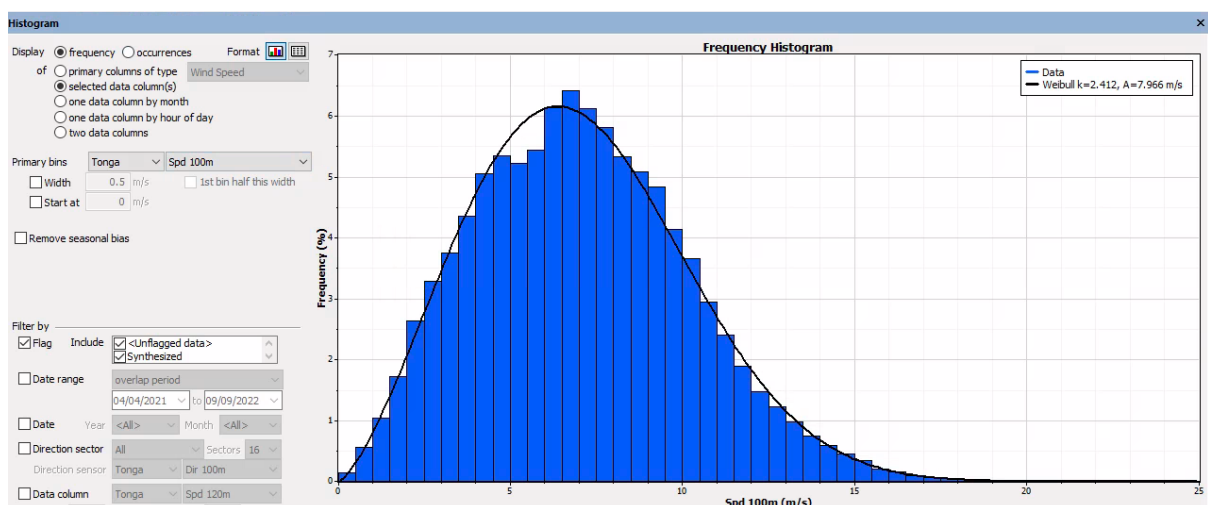
Las imágenes procedentes de Global Wind Atlas muestran el valor del viento promedio a cien metros de altura, la cual es la altura seleccionada para la altura de buje de los aerogeneradores que hemos seleccionado.

A partir de este punto el archivo trabajado procedente de Keitahi, del programa Windographer se ha simulado el archivo procedente de la web “Energy Data info”, obteniendo los siguientes datos:



1.1.1.5 Rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu. (Windographer)

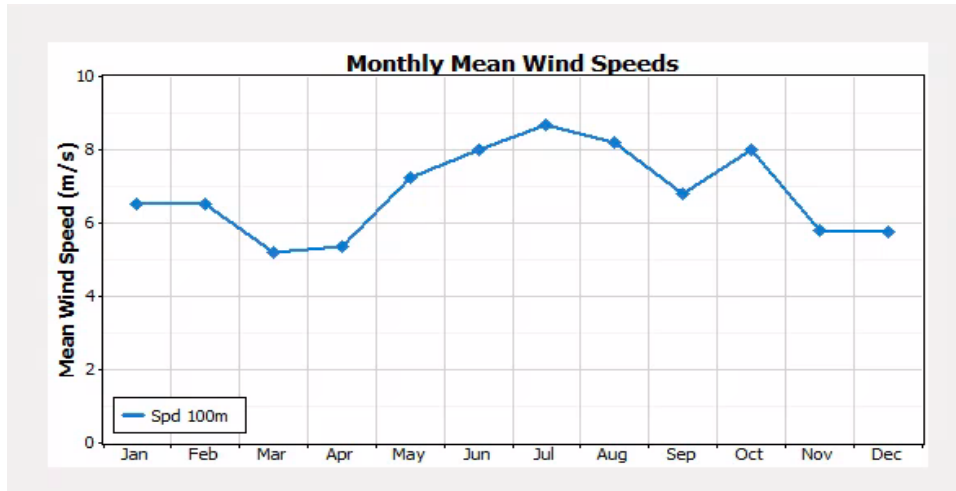
Como puede observarse, las rosas de los vientos son semejantes, Siendo la dirección predominante durante todo el año Sur-Este. Por lo que el archivo seleccionado será tomado como valido para realizar el estudio de viabilidad del proyecto eólico para una altura de 100 metros. A continuación, se muestra el histograma, para la misma altura, con la distribución de Weibull:



1.1.1.6 Distribución de Weibull para el emplazamiento seleccionado. (Windographer).

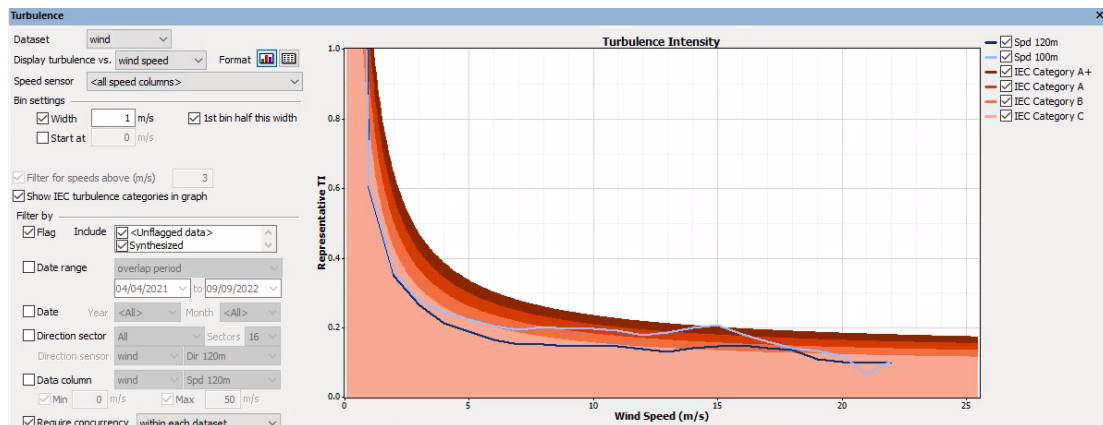
Se ha obtenido unos valores de $K = 2,412$ y $A = 7,966$ m/s. Como puede verse en la imagen de distribución las mayores frecuencias de viento se encuentran entre los 6 y 10 m/s, lo cual es un indicio de que el recurso eólico es bueno para implantar un campo de aerogeneradores.

A continuación, se muestra la distribución de los vientos en función de los meses del año, siendo en marzo y abril los meses de menor recurso eólico frente a junio, julio, agosto y octubre que son los más ventosos según los datos de viento obtenidos:



1.1.1.7 Distribución mensual de los vientos promedio del emplazamiento seleccionado en Tongatapu. (Windographer)

A continuación, se muestra el índice de turbulencias frente a las categorías donde, la línea más clara representa los vientos a cien metros de altura:



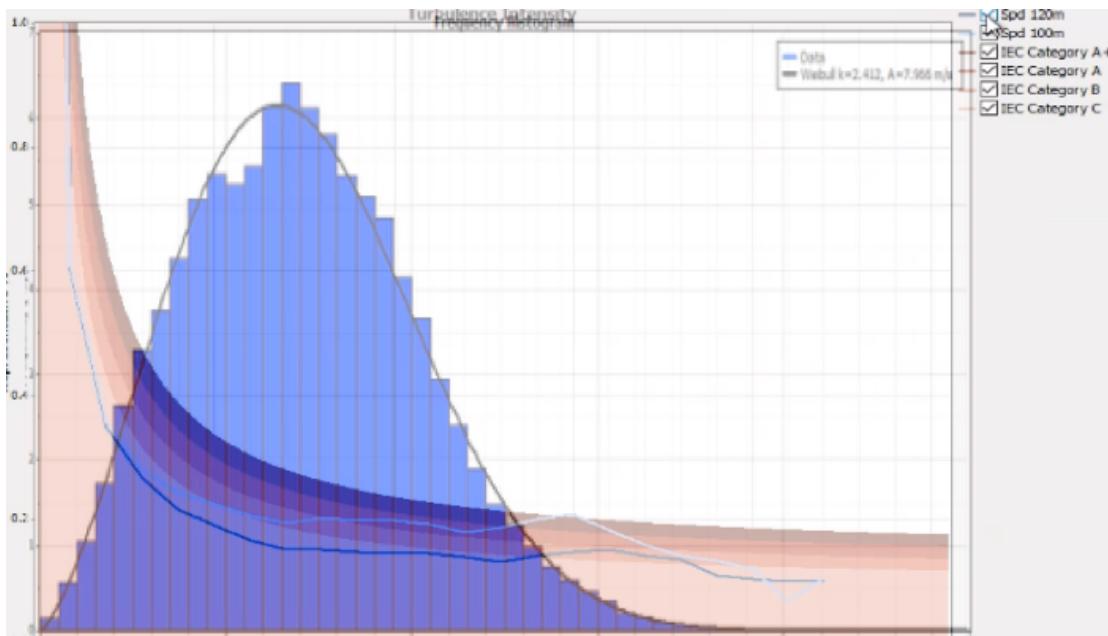
1.1.1.8 Índice de turbulencias frente a las clases de aerogenerador según la IEC 61400-1. (Windographer)

A priori, en función de las turbulencias se debería de escoger o un Clase A, o un Clase A+ (según la IEC-UNE 61400-1/2005 actualmente modificada por la IEC-UNE-61400-1/2020), por lo que se corresponde con un Clase IIIA-IIIB o un Clase S) en función de la distribución que se puede ver en la imagen para una altura de 100 metros.

2 Selección del aerogenerador

Para escoger el aerogenerador, debemos realizar la superposición entre la distribución de la probabilidad y la gráfica de turbulencias de modo que, como se puede ver a continuación, la categoría S no hace intersección con la distribución de probabilidad, por lo que se descarta.

Para asegurar que clase de aerogenerador necesitamos debemos de estimar la probabilidad del viento entre dos velocidades, por lo que si esa probabilidad es menor de 5% podremos escoger la clase más baja mientras que si es igual o superior cogeremos esa clase y miraremos la superior. entre las posibilidades (si es muy próximo al 5% escogería la clase superior para asegurar). Por último, si una clase se encuentra en el exterior de la intersección se descarta.



2.1.1.1 Interpolación entre el índice de turbulencias con las clases y la distribución de Weibull para seleccionar la clase de Aerogenerador.

Se realiza la interpolación para todas las clases salvo para la clase S, ya que la distribución de Weibull no coincide con ningún valor dentro de la clase S, por lo que se descarta automáticamente.

Realizando el cálculo de la probabilidad se ha obtenido un Clase A (equivalente a un clase III en la normativa actual). A continuación, se muestra la fórmula empleada y el cálculo (dónde $C = A \text{ Weibull}$), Si se supera un 5% se debe mirar la clase superior.

Se ha obtenido, un clase IIIA-IIIB:

$$P(V_x \leq V \leq V_y) = e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_y}{c}\right)^k}$$

Donde:

- V_x es el límite inferior de velocidad.
- V_y es el límite superior de velocidad.
- C y K son los parámetros de Wibull.
- P es la probabilidad en tanto por uno.

Los valores de estos parámetros se resumen en la siguiente tabla:

Parámetros para el cálculo de la clase de viento		
V_x	m/s	7,5
V_y	m/s	12,5
c	m/s	7,97
K	adm.	2,41
$\left(\frac{V_x}{c}\right)^k$	adm.	0,86
$\left(\frac{V_y}{c}\right)^k$	adm.	2,96
$e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k}$	adm.	0,42
$e^{-\left(\frac{V_y}{c}\right)^k}$	adm.	0,052
P	adm.	0,95
P		94,8%

2.1.1.2 Cálculo de probabilidad, selección de clase

Para realizar la selección del Aerogenerador, tras valorar diferentes opciones dentro del software de Windographer, se ha decidido escoger el modelo **Goldwing GW 140/3.4** (Bauer, n.d.) pues, si se estima el precio en función del MW instalado, obtenemos valores muy próximos a los clase III de 5 MW mientras que este es de 3,4 por lo que en un principio podemos estimar que la producción de energía será más barata frente a otras opciones de mayor potencia.

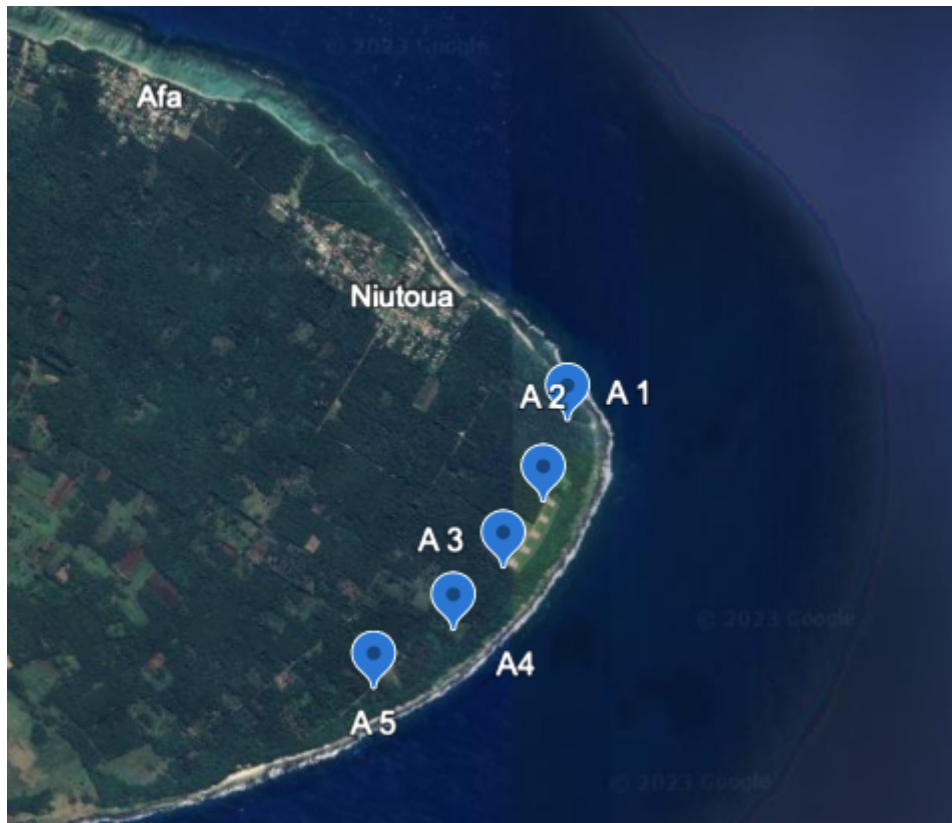
A continuación, se puede proceder a realizar la selección de los emplazamientos para cada aerogenerador, ya que no ha sido posible emplear un WASP por problemas de software y licencias, para calcular el efecto estela que se producirá por aerogenerador.

Aerogenerador **Goldwing GW 140/3.4**:

<https://es.wind-turbine-models.com/turbines/1739-goldwind-gw-140-3400>

3 Selección del emplazamiento

En función de la rosa de los vientos, se ha seleccionado la siguiente zona para colocar el parque eólico:



3.1.1.1 Rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu (Earth Google)

Donde los aerogeneradores se distribuyen perpendicularmente a la trayectoria del viento, con una separación comprendida entre los 450 y 520 metros, con el fin de reducir a 9 el efecto Stella entre ellos (diámetro de aspas 140 m tres diámetros implica 420 metros)

Las coordenadas de cada aerogenerador son las siguientes:

- A1: 21 ° 08' 52'' Sur. 175 ° 01' 59'' Oeste
- A2: 21 ° 09' 06'' Sur. 175 ° 02' 03'' Oeste
- A3: 21 ° 09' 18'' Sur. 175 ° 02' 11'' Oeste
- A4: 21 ° 09' 30'' Sur. 175 ° 02' 21'' Oeste
- A5: 21 ° 09' 40'' Sur. 175 ° 02' 37'' Oeste

Las distancias en línea recta perpendiculares a la dirección del viento:

- Distancia A1-A2 = 460 m
- Distancia A2-A3 = 457 m
- Distancia A3-A4 = 453 m
- Distancia A4-A5 = 520 m

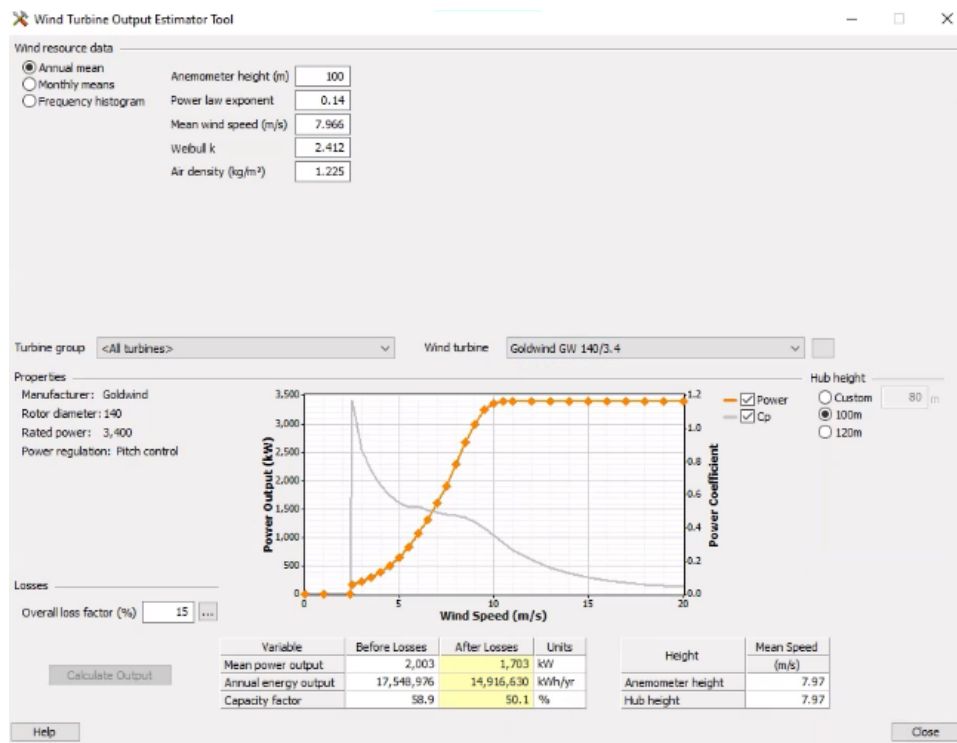
4 Potencial del aerogenerador

4.1 Prestaciones y características

Características del modelo Goldwind GW-140/3.4 Onshore:

- Altura de buje: 100m.
- Potencia nominal: 3400 kW.
- Velocidad nominal: 10,1 m/s.
- Velocidad de corte: 20 m/s.
- Clase: IIIA-IIIB.
- Sistema de control: pitch control.
- Torre: Tubular de acero.
- Diametro aspas: 140 m.
- Superficie: 15474,0 m².
- Velocidad punta: 88 m/s.
- Frecuencia: 50/60 Hz..ç
- Resina: GFRP with epoxy resin.
- Pintura anticorrosiva.
- Voltaje: 690 V.
- Fabricantes: LM/ sinoma.

4.2 Estimación de energía por aerogenerador



4.2.1.1 Rosa de los vientos del emplazamiento seleccionado en Tongatapu (Windographer)

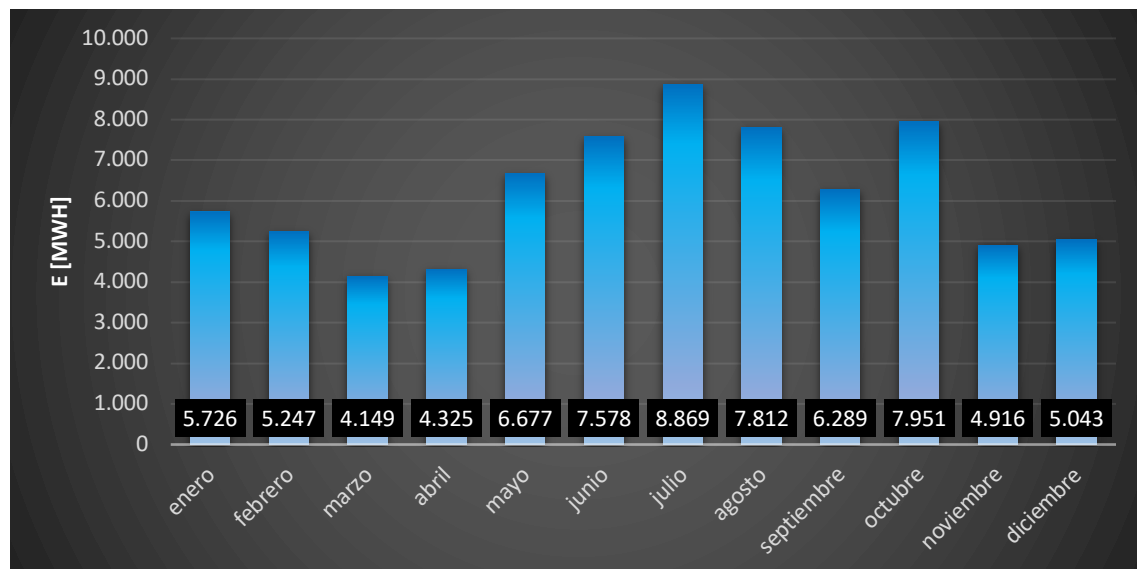
Se tomará este valor por aerogenerador considerando que la distancia entre máquinas será suficiente para reducir el efecto el efecto Stella a cero (se colocarán a una distancia superior de tres diámetros de las aspas en dirección perpendicular al viento).

Mediante la herramienta *Windographer Output Energy Estimator* se ha estimado la energía total producida, con los datos de viento producidos mensualmente, obteniendo:

Parque eólico				
Mes	Histograma (m/s)	Frecuencia de viento (Weibull) (k)	Producción Energía (MWh)	
			Cantidad: 1	Cantidad: 5
enero	7,317	2,014	1.145	5.726
febrero	7,192	2,407	1.049	5.247
marzo	5,668	2,564	830	4.149
abril	6,094	2,076	865	4.325
mayo	8,181	2,268	1.335	6.677
junio	8,995	2,907	1.516	7.578
julio	9,572	3,978	1.774	8.869
agosto	9,235	2,652	1.562	7.812
septiembre	7,609	3,042	1.258	6.289
octubre	8,938	3,189	1.590	7.951
noviembre	6,568	2,432	983	4.916
diciembre	6,532	2,528	1.009	5.043
TOTAL:			14.917	74.583

4.2.1.2 Producción mediante energía eólica. Comparativa entre 1 y 5 aerogeneradores

Por cada aerogenerador 14,917 GWh/ año y para cinco aerogeneradores 74,583 GWh/año:



4.2.1.3 Energía producida mensualmente

5 Estimación de costes

Para cinco aerogeneradores de 3.4 MW de potencia, se estima que cada aerogenerador instalado, a un factor de 133.000 dólares por MW instalado, obtendremos que cada uno de ellos será 4.522.000 dólares, por tanto, para los cinco aerogeneradores se estima aproximadamente un valor de inversión, considerando la obra civil sin tener en cuenta el valor del terreno ni tasas aplicadas es de 22,6 M\$.

Parámetros generales de la valoración económica y financiera	
Características principales	
Potencia instalada (kW)	17.000,00
Energía producida (MWh/año)	14.916,63
Horas equivalentes (h)	4.387,24
Vida útil (años)	20
Ingresos	
1) Venta de la energía, media años 2023-2043 (\$/MWh)	279,45
Costes	
1) Ratio medio inversión (\$/kW)	1.330,00
Coste de inversión año 0 (\$)	22.610.000,00

5.1.1.1 Coste de los aerogeneradores sin contar tasas ni emplazamiento

Ya que no tenemos datos exactos de precios por turbina, nos hemos basado en la estimación realizada durante el curso en el módulo 8, donde el precio estimado por megawatio instalado sale a 1,2-1,6 millones de euros.

La siguiente tabla ha sido un elemento orientativo de cara a la distribución y totalidad de costes de la infraestructura del parque eólico:

Tabla 3. Coste de inversión de un proyecto eólico.

Parque eólico	Aerogenerador	BOP	Desarrollo	Total
(mill. euros/MW)	0,9-1,1	0,3-0,5	0,015-0,02	1,2-1,6

5.1.1.2 UA2_T5 (Módulo 8) estimación del coste de inversión de un proyecto eólico

6 Referencias bibliográficas

Tonga - Wind measurement Data -ENERGYDATA.INFO. (n.d.).
<https://energydata.info/dataset/tonga-wind-measurement-data>

Global Wind Atlas. (n.d.).
<https://globalwindatlas.info/es>

Bauer, L. (n.d.). *Goldwind GW 140/3400 - 3,40 MW - Aerogenerador.*
<https://es.wind-turbine-models.com/turbines/1739-goldwind-gw-140-3400>

Earth Google
<https://earth.google.com/web/search/tongatapu/@-21.14563938,-175.04116187,26.26070896a,15222.98050801d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCZuc2aCjETDAEeK8tGNkNTXAGTATQMGo12TAIRuCzxyCNmbAOgMKATA>

Estimación de Precio por MW instalado:
UD2 Tema 5 Modulo de gestión de proyectos (M8)