



TRABAJO DE FIN DE GRADO, 2019-2020

---

## **Diseño y estudio ante carga del sistema de guiñada de una turbina eólica para la producción de energía en áreas marinas**

---

**Autor:**

Álvaro Normand Falagán

**Email:**

201406492@alu.comillas.edu

**Director:**

Juan Antonio Talavera Martín

**Email:**

jat@esdras.org

Madrid

Julio de 2020



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título “Diseño y estudio ante carga del sistema de guiñada de una turbina eólica para la producción de energía en áreas marinas” en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2019/2020 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Álvaro Normand Falagán

Fecha: 22/07/2020

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Juan Antonio Talavera Martín

Fecha: 22./ 07./ 2020



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### ***1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.***

El autor D. \_\_\_\_\_

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

\_\_\_\_\_ ,  
que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### ***2º. Objeto y fines de la cesión.***

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### ***3º. Condiciones de la cesión y acceso***

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### ***4º. Derechos del autor.***

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### ***5º. Deberes del autor.***

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la

intimidad y a la imagen de terceros.

- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 21 de julio de 2020

**ACEPTA**

Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



TRABAJO DE FIN DE GRADO, 2019-2020

---

# **Diseño y estudio ante carga del sistema de guiñada de una turbina eólica para la producción de energía en áreas marinas**

---

**Autor:**

Álvaro Normand Falagán

**Email:**

201406492@alu.comillas.edu

**Director:**

Juan Antonio Talavera Martín

**Email:**

jat@esdras.org

Madrid

Julio de 2020

---

# Diseño y estudio ante carga del sistema de guiñada de una turbina eólica para la producción de energía en áreas marinas

**Autor:** Normand Falagán Álvaro

**Director:** Talavera Martín Juan Antonio

## RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto tiene como principal objetivo el diseño y dimensionamiento del sistema de guiñada de un aerogenerador marino de 5Mw de potencia. Para realizar el modelo y las distintas simulaciones del aerogenerador se utilizó uso del programa Bladed 4.6., con licencia educativa. Todos los cálculos y simulaciones siguen la norma GL y la IEC.

### 1. Introducción

En la actualidad, el suministro eléctrico es un bien indispensable para el hombre, tanto en la vida cotidiana como en la industria. Con el desarrollo de la sociedad, el crecimiento de la demanda de energía es exponencial. Esto unido a las consecuencias del cambio climático y al futuro agotamiento de los combustibles fósiles ha propiciado el crecimiento de fuentes de energía alternativas y renovables.

Siendo la segunda fuente de energía limpia más popular en el mundo, la energía eólica se encuentra en constante evolución, para conseguir mejorar la eficiencia y la producción de energía renovable. Dentro de los aerogeneradores, uno de los sistemas esenciales para conseguir la mayor energía posible del viento, es el sistema de guiñada u orientación.

Este sistema se encarga de orientar la góndola a la dirección del viento. Teniendo como principales objetivos la maximización de la energía producida y la reducción de los esfuerzos recibidos en el cojinete de guiñada.

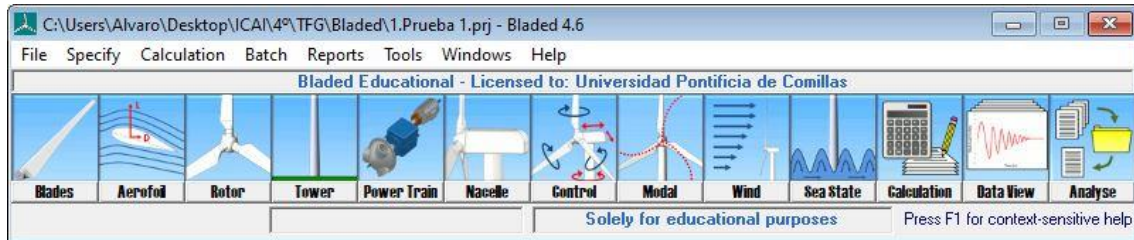
### 2. Definición del Proyecto

Este proyecto simula y compara diferentes estrategias de guiñada. Una vez elegida la más adecuada, se optimizó y dimensionó el sistema de orientación.

El modelo de estudio es un aerogenerador marino de 5 Mw de potencia cuya transmisión es directa y cuyo generador es síncrono de imanes permanentes. El rango de viento para el cual la turbina puede operar está entre 3.5 y 30 m/s. La localización donde se prevé instalar la turbina es la costa africana.

### 3. Desarrollo

Para la realización del modelo, se ha contado con el software Bladed 4.6. con licencia educativa. El cual se controla a través de la siguiente interfaz:



**Ilustración 1: interfaz Bladed 4.6.- Fuente: elaboración propia**

En primer lugar, se introducen todos los parámetros geométricos, físicos y eléctricos del modelo mediante los distintos menús. A continuación, se diseñan las distintas estrategias de orientación:

- Rígida
- Flexible de acumulador hidráulico
- Flexible de resorte lineal

Una vez diseñadas, se simulan cada una de ellas por separado atendiendo a la norma GL.

La norma establece como deben ser las simulaciones realizadas para garantizar la fiabilidad de cada uno de los sistemas. Exigiendo para el sistema de guiñada simulaciones bajo turbulencia normal y simulaciones en cambios simultáneos de velocidad y dirección del viento. Cada una de las simulaciones se realiza bajo 3 velocidades de viento, la velocidad de acople (3,5 m/s), la velocidad nominal (11,686 m/s) y la velocidad máxima (30 m/s). De esta forma se obtiene una amplia visión del comportamiento del aparato.

### 4. Resultados

Después de realizar los diferentes cálculos y simulaciones, la estrategia elegida como más adecuada es un sistema de guiñada de resorte lineal. Esta estrategia permite reducir los esfuerzos recibidos por el cojinete de guiñada y maximizar la energía producida por la turbina. Por otro lado, esta elección reduce el uso de aceites y lubricantes de tal forma que se reduce el riesgo de contaminación del medio marino cumpliendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la ley Española.

## **5. Conclusiones**

Como se ha visto a lo largo del Proyecto, el Sistema de orientación es una parte indispensable de un aerogenerador ya que sin este, el rendimiento del aparato seria muy escaso y las cargas sobre el Sistema muy elevadas.

Cabe mencionar que la licencia educativa de Bladed 4.6. limita muchas opciones, reduciendo la exactitud y posibilidades de este proyecto.

---

# Desing and study under load of the yaw system of an off-shore wind turbine for energy production

**Author:** Normand Falagán Álvaro

**Supervisor:** Talavera Martín Juan Antonio

## PROJECT SUMMARY

This project has its main goal at the desing and sizing of the yaw system for a wind turbine wich produces 5Mw of power. To make the model and all the simulations of the machine, Bladed 4.6. software was used, with an educational license. Every calculation and simulation was made under GL and IEC standards.

### 1. Introduction

Nowadays, the power supply has become an indispensable commodity for society, not only for domestic use but also for industry. With the develop of society, the growth in the demand of electricity is exponential. This fact together with the consequences of global warming and the future exhaustion of petrol has caused the increase in clean an renewable energy technologies.

Being the second in popularity around the world, wind energy is constantly evolving with the aim of having a better efficient and a bigger power production. Inside wind turbines, one of the most important systems to achive a greater energy production is the yaw system.

This system has the objective of guiding the nacelle to the wind, when this two are misaligned. Having it's main objective in maximizing energy production and reducing the loads applied to the yaw bearing.

### 2. Project definition

This Project simulates and compares different yaw strategies. Once the correct one has been chosen, the yaw system has been sized and optimized.

The model to be study is an off-shore wind turbine of 5 Mw of power with direct transmission and with a syncronus generator of permanent magnets. The range of winds of work for the turbine is between 3.5 y 30 m/s. The location where the turbine is planned to be installed is in the african coast.

### 3. Development

To make the model, the program used was Bladed 4.6. with an educational license. This software is controlled through the next interface:

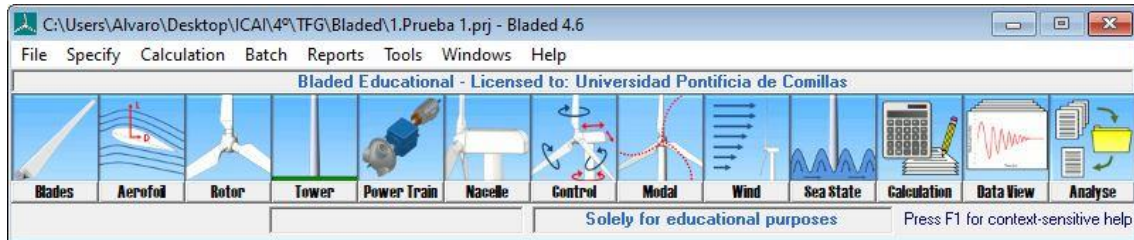


Ilustración 2: interface Bladed 4.6.

Firstly, all the geometric, physic and electrical parameters were introduced using the different menus. Next, new yaw strategies were desing:

- Rigid
- Flexible yaw accumulator
- Flexible linear spring

Once designed, each of the strategies was simulated under GL standards.

This standard stablishes how each simulation must be done to ensure the reliability of every system in the turbine. Fort he yaw system, simulations under normal turbulence and under simultaneous wind speed an direction change are required. Each of the simulations will be conducted with three different wind speeds, coupling speed (3,5 m/s), nominal speed (11,686 m/s) and maximun velocity (30 m/s). This way a greater visión of the behavior of the machine is obtained.

### 4. Results

After all calcularions and simulations were made, the chosen as adequate strategie is the linear spring yaw system. This strategie allows to reduce the loads at the yaw bearing and maximizes the power produced. Further more, this election reduces the use of oils and lubricants meaning that the risk of spilling is reduced, avoiding ocean pollution. This decisión meets Sustainable Development Goals defined by the UN and the spanish laws.

## **5. Conclusions**

As it has been seen through out the Project, the yaw system is an essential part of a wind turbine. With out it, the performance would be very low and the load son the yaw bearing very big.

It is important to consider that the limitations on the educational version of the software Bladed 4.6. reduces the reliability and the options in this Project.

---

## Índice de la memoria

1.	Introducción.....	19
2.	Estado de la cuestión .....	21
2.1.	Introducción histórica.....	21
2.2.	Estado de la cuestión.....	23
2.2.1.	Aerogeneradores de eje vertical: .....	23
2.2.2.	Aerogeneradores de eje horizontal: .....	24
2.2.3.	Estrategias para la reducción de esfuerzos en el sistema de guiñada.....	25
2.3.	Partes principales de un aerogenerador .....	26
2.3.1.	Estructura .....	27
2.3.3.	Rotor aerodinámico.....	28
2.3.4.	Góndola.....	31
3.	Memoria .....	35
3.1.	Modelo .....	35
3.1.1.	Palas.....	36
3.1.2.	Aerofoil (Perfil aerodinámico).....	41
3.1.3.	Rotor .....	42
3.1.4.	Torre .....	46
3.1.5.	Tren motriz.....	48
3.1.6.	Góndola.....	52
3.1.7.	Control .....	53
3.1.8.	Modal.....	55
3.1.9.	Wind.....	56
3.1.10.	Condiciones marinas.....	64
3.2.	Cálculo y simulación del comportamiento básico en carga del modelo .....	68
3.3.	Diseño de nuevas estrategias de orientación.....	71
3.4.	Simulación comparativa de los nuevos diseños propuestos .....	74
3.5.	Elección de estrategia .....	77
3.6.	Optimización de las cargas del diseño final.....	78
3.7.	Dimensionamiento del sistema de guiñada: .....	87
3.7.1.	Número motores: .....	87
3.7.2.	Dimensionamiento cojinete: .....	88

3.7.3.	Análisis fuerzas corona sistema guiñada.....	88
3.8.	Elección componentes eléctricos del sistema de guiñada .....	89
3.8.1.	Motor de guiñada .....	89
3.8.2.	Inversor .....	89
3.8.3.	Protecciones .....	90
3.8.4.	Controlador de torsión.....	91
3.8.5	Sistemas de medición del viento.....	91
4.	Cálculos.....	93
4.1.	Generador.....	93
4.1.1.	Cálculo diámetro exterior rotor.....	93
4.1.2.	Cálculo diámetros estator .....	93
4.1.3.	Cálculo masa del rotor .....	93
4.1.4.	Cálculo inercias rotor .....	94
4.1.5.	Cálculo masa del estator .....	94
4.1.6.	Cálculo inercias estator .....	94
4.1.7.	Cálculo del par máximo.....	94
4.2.	Buje .....	94
4.2.1.	Cálculo altura paraboloides (h) .....	95
4.2.2.	Cálculo inercia del buje .....	95
4.2.3.	Cálculo coeficiente de arrastre del buje.....	96
4.3.	Torre.....	96
4.3.1.	Cálculo diámetro exterior torre.....	96
4.3.2.	Cálculo espesor de la torre ( $\delta$ ).....	96
4.3.3.	Cálculo coeficiente de arrastre torre .....	97
4.4.	Góndola .....	97
4.4.1.	Cálculo masa góndola .....	98
4.4.2.	Cálculo diámetro interno góndola ( $\varnothing_{interno\ gondola}$ ).....	98
4.4.3.	Cálculo espesor góndola.....	98
4.4.4.	Cálculo altura centro de masas respecto al extremo superior de la torre.....	98
4.4.5.	Cálculo inercia de guiñada (Yaw inertia).....	98
4.4.6.	Cálculo inercia de cabeceo (Nodding inertia).....	99
4.4.7.	Cálculo inercia de alabeo (Rolling inertia).....	99
4.4.8.	Cálculo coeficiente de arrastre de la góndola .....	99
4.5.	Transmisión.....	99

4.5.1.	Cálculo masa transmisión.....	100
4.5.2.	Cálculo longitud transmisión (L) .....	100
4.5.3.	Cálculo diámetro interno transmisión .....	100
4.5.4.	Cálculo inercia transmisión.....	100
4.5.5.	Cálculo de las pérdidas de par mecánico .....	100
4.6.	Diseño de los controles del aerogenerador.....	101
4.6.1.	Cálculo velocidad del viento nominal: .....	101
4.6.2.	Cálculo PI control de par .....	101
4.6.3.	Cálculo PI control de paso.....	103
4.6.4.	Modo óptimo de ganancia .....	105
4.7.	Sistema de guiñada .....	105
4.7.1.	Fricción sistema de guiñada .....	106
4.8.	DLC 1.1.....	106
4.8.1.	Cálculo de la desviación típica de la componente longitudinal del viento: .....	106
4.9.	DLC 1.3.....	107
4.10.	Dimensionamiento de engranajes del sistema de guiñada.....	108
4.10.1.	Cálculo velocidad del piñón.....	108
4.10.2.	Cálculo radio del piñón .....	109
4.10.3.	Relación engranajes.....	109
4.10.4.	Número de motores necesarios en el sistema de guiñada .....	109
4.11.	Dimensionamiento cojinete .....	109
4.11.1.	Dimensionamiento cojinete a torsión:.....	110
4.11.2.	Dimensionamiento cojinete a flexión: .....	110
4.11.3.	Comprobación cojinete a fatiga:.....	110
5.	Conclusión .....	113
5.1.	Futuros proyectos: .....	113
ANEXOS .....		114
ANEXO I: Objetivos de Desarrollo Sostenible .....		115
ANEXO II: Estudio económico .....		117
Costes directos:.....		117
Costes indirectos:.....		118
Costes generales: .....		118
Resumen de gastos: .....		119
ANEXO III: Datos aerogenerador.....		120

---

ANEXO IV: catalogo sistema de guiñada .....	122
.....	122
Bibliografía .....	124

---

## Índice de tablas

Tabla 1: DLCs – Fuente: norma GL[5].....	69
Tabla 2: DLC1.1 – Sin sistema de orientación - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	70
Tabla 3: DLC1.1– Sin sistema de orientación - Velocidad viento 11.686 m/ s – Fuente: elaboración propia.....	71
Tabla 4: DLC1.1– Sin sistema de orientación - Velocidad viento 30 m/ s – Fuente: elaboración propia.....	71
Tabla 5: menú Control - Yaw Control – Fuente: elaboración propia .....	72
Tabla 6: DLC1.1 - Con sistema de orientación rígido - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia .....	75
Tabla 7: DLC1.1 - Con sistema de orientación rígido - Velocidad viento 11.686 m/s– Fuente: elaboración propia .....	75
Tabla 8: DLC1.1 - Con sistema de orientación rígido - Velocidad viento 30 m/s– Fuente: elaboración propia .....	75
Tabla 9: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de resorte lineal - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia .....	75
Tabla 10: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de resorte lineal - Velocidad viento 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia.....	75
Tabla 11: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de resorte lineal - Velocidad viento 30 m/s – Fuente: elaboración propia .....	76
Tabla 12: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de acumulador hidráulico - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	76
Tabla 13: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de acumulador hidráulico - Velocidad viento 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia.....	76
Tabla 14:DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de acumulador hidráulico - Velocidad viento 30 m/s– Fuente: elaboración propia.....	76
Tabla 15: DLC 1.3 - modelo #1 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	79
Tabla 16: DLC 1.3 - modelo #1 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia.	79
Tabla 17: DLC 1.3 - modelo #1 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia.....	79
Tabla 18: DLC 1.3 - modelo #2 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	80
Tabla 19: DLC 1.3 - modelo #2 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia.	80

Tabla 20: DLC 1.3 - modelo #2 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia.....	80
Tabla 21: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	80
Tabla 22: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia.	81
Tabla 23: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia.....	81
Tabla 24: DLC 1.3 - modelo #4 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	81
Tabla 25: DLC 1.3 - modelo #4 – velocidad 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia.	81
Tabla 26: DLC 1.3 - modelo #4 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia.....	82
Tabla 27: DLC 1.3 - modelo #5 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	82
Tabla 28: DLC 1.3 - modelo #5 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia.	82
Tabla 29: DLC 1.3 - modelo #5 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia.....	82
Tabla 30: DLC 1.3 - modelo #6 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	83
Tabla 31: DLC 1.3 - modelo #6 – velocidad 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia.	83
Tabla 32: DLC 1.3 - modelo #6 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia.....	83
Tabla 33: DLC 1.3 - modelo #7 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	84
Tabla 34: DLC 1.3 - modelo #7 – velocidad 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia.	84
Tabla 35: DLC 1.3 - modelo #7 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia.....	84
Tabla 36: DLC1.1 - modelo #3 - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia .....	85
Tabla 37: DLC1.1 - modelo #3 - Velocidad viento 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia .....	85
Tabla 38: DLC1.1 - modelo #3 - Velocidad viento 30 m/s – Fuente: elaboración propia .....	85
Tabla 39: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia.....	85
Tabla 40: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia.	85
Tabla 41: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia.....	86
Tabla 42: parámetros básicos para las clases de turbinas. Norma GL [5] .....	107
Tabla 43: desviación típica componente longitudinal viento – Fuente: elaboración propia .....	107
Tabla 44: tabla de velocidades y ángulos DLC 1.3 .....	108
Tabla 45: costes directos - componentes - Fuente: elaboración propia .....	117
Tabla 46: costes directos - personal - Fuente: elaboración propia.....	117
Tabla 47: costes directos - transporte - Fuente: elaboración propia .....	118
Tabla 48: costes directos - Fuente: elaboración propia.....	118

---

Tabla 49: costes indirectos - Fuente: elaboración propia.....	118
Tabla 50: costes generales - Fuente: elaboración propia .....	118
Tabla 51: Resumen gastos - Fuente: elaboración propia .....	119

---

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: interfaz Bladed 4.6.- Fuente: elaboración propia .....	3
Ilustración 2: interface Bladed 4.6.....	6
Ilustración 3: primer sistema de orientación con túneles - Fuente [14].....	21
Ilustración 4: Molino del s.XII con orientación manual - Fuente [15].....	22
Ilustración 5: aerogenerador Savonius - Fuente [16].....	22
Ilustración 6: aerogenerador Darrieus -Fuente [17].....	23
Ilustración 7: sotavento vs barlovento [18] .....	24
Ilustración 8: aerogenerador tipo veleta - Fuente [19].....	25
Ilustración 9: estrategias de anclaje de los aerogeneradores marinos – Fuente: [20].....	27
Ilustración 10: torre de un aerogenerador - Fuente: [21] .....	28
Ilustración 11: rotor aerodinámico - Fuente [22].....	28
Ilustración 12: esquema sustentación aerodinámica - Fuente [23].....	29
Ilustración 13: construcción pala aerogenerador - Fuente [24].....	29
Ilustración 14: esquema del buje - Fuente [25] .....	30
Ilustración 15: esquema góndola - Fuente [26] .....	31
Ilustración 16: esquema generador -- Fuente [27].....	32
Ilustración 17: esquema sistema de guiñada [28] .....	32
Ilustración 18: Interfaz principal Bladed 4.6. – Fuente: elaboración propia.....	35
Ilustración 19: menú Blade Properties-Blade Information – Fuente: elaboración propia .....	36
Ilustración 20: menú Blade Properties-Blade Geometry – Fuente: elaboración propia	37
Ilustración 21: menú Blade Properties-Mass ans Stiffness – Fuente: elaboración propia .....	38
Ilustración 22: menú Blade Properties - Aditonal Mass/Inertia – Fuente: elaboración propia .....	40
Ilustración 23: menú Aerofoil – Fuente: elaboración propia .....	41
Ilustración 24: menú Turbine configuration – Turbine and Rotor – Fuente: elaboración propia.....	42
Ilustración 25: menú Turbine configuration – Hub – Fuente: elaboración propia. ....	44
Ilustración 26: menú Tower – Fuente: elaboración propia .....	46
Ilustración 27: menú Power Train – Transmission – Fuente: elaboración propia.....	48

Ilustración 28: menú Power Train – Electrical – Fuente: elaboración propia.....	49
Ilustración 29: menú Power Train – Losses – Fuente: elaboración propia .....	50
Ilustración 30: menú Power Train – Network – Fuente: elaboración propia .....	51
Ilustración 31: menú Nacelle – Fuente: elaboración propia.....	52
Ilustración 32: menú Control – Fuente: elaboración propia.....	54
Ilustración 33: menú Modal – Fuente: generación propia .....	55
Ilustración 34: menú Modal - Modal damping: Blade – Fuente: generación propia.....	56
Ilustración 35: wind – anual wind distribution – Fuente: generación propia .....	57
Ilustración 36: Función densidad velocidad viento – Fuente: generación propia .....	58
Ilustración 37: Wind - Wind Shear – Fuente: generación propia .....	58
Ilustración 38: menú Wind - Time varaying wind – No variation – Fuente: elaboración propia .....	59
Ilustración 39: menú Wind –Define Turbulence – Fuente: elaboración propia .....	60
Ilustración 40: wind - time varying wind - 3D Turbulent Wind – Fuente: elaboración propia .....	62
Ilustración 41: wind - Time varying – Transient – Fuente: elaboración propia .....	63
Ilustración 42: Sea state – Currents – Fuente: elaboración propia .....	65
Ilustración 43: Sea state – Waves – Fuente: elaboración propia .....	66
Ilustración 44: sea state - Tide and SEA file – Fuente: elaboración propia .....	67
Ilustración 45: menús simulación – Fuente: elaboración propia .....	68
Ilustración 46: sistema referencia Yaw System – Fuente [25].....	70
Ilustración 56: gráfica de densidad del viento a lo largo del año en la localización elegida – Fuente: elaboración propia .....	78
Ilustración 78: número de ciclos para Mxy – Fuente: elaboración propia.....	86
Ilustración 79: número de ciclos para Fz – Fuente: elaboración propia .....	87
Ilustración 80: estrategias de control .....	90
Ilustración 81: paraboloide - Fuente [13].....	95
Ilustración 82: Drag coeficients - Fuente [14].....	96
Ilustración 83: vertical cilinder drag coefficinets – Fuente [15] .....	97
Ilustración 84: horizontal cilinder drag coefficinets – Fuente [16] .....	99
Ilustración 85: menú control de par – Fuente: elaboración propia .....	101
Ilustración 86: gráfica cálculo ganancia proporcional PI control de par – Fuente: elaboración propia.....	102

---

Ilustración 87: gráfica cálculo ganancia integral PI control de par – Fuente: elaboración propia .....	103
Ilustración 88: menú control de paso – Fuente: elaboración propia .....	104
Ilustración 89: gráfica cálculo ganancia proporcional PI control de paso – Fuente: elaboración propia.....	104
Ilustración 90: gráfica cálculo ganancia integral PI control de paso – Fuente: elaboración propia.....	105
Ilustración 92: curva S-N - Fuente [ ] .....	111
Ilustración 93: objetivos de desarrollo sostenible – Fuente [12].....	115

# INTRODUCCIÓN

---

## 1. Introducción

En la actualidad, el suministro eléctrico es un bien indispensable para el hombre, tanto en la vida cotidiana como en la industria. Con el desarrollo de la sociedad, el crecimiento de la demanda de energía es exponencial. Esto unido a las consecuencias del cambio climático y al futuro agotamiento de los combustibles fósiles ha propiciado el crecimiento de fuentes de energía alternativas y renovables.

Siendo la segunda fuente de energía limpia más popular en el mundo, la energía eólica se encuentra en constante evolución, para conseguir mejorar la eficiencia y la producción de energía renovable. Dentro de los aerogeneradores, uno de los sistemas esenciales para conseguir la mayor energía posible del viento, es el sistema de guiñada u orientación.

Este sistema se encarga de orientar la góndola a la dirección del viento. Teniendo como principales objetivos:

- Incrementar la potencia obtenida del viento, orientando el rotor aerodinámico de forma precisa maximizando el área de barrido en todo momento.
- Reducir las cargas estructurales producidas por las rachas de viento, permitiendo la rotación pasiva de la góndola bajo altas cargas.
- Reducir el coste de los materiales estructurales al reducir las cargas.
- En caso de superarse velocidades de viento elevadas, el sistema se podría utilizar como regulador de potencia reduciendo el área de barrido de las palas. Reduciendo también las cargas estructurales

En este trabajo se simularan y compararan diferentes estrategias de guiñada, para un aerogenerador marino de 5MW de transmisión directa y generador síncrono de imanes permanentes, con el objetivo de optimizar el sistema además de cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de Naciones Unidas (ONU).

A la hora de diseñar el sistema de orientación, se deben tener en cuenta los problemas y situaciones más habituales:

- Para aumentar la producción de energía se puede aumentar la sensibilidad del sistema de guiñada, pero esto produce un aumento de las cargas alternativas, produciendo una mayor fatiga en los componentes reduciendo su vida útil.
- Las paradas en la rotación de la góndola produce oscilaciones torsionales. Por lo tanto el intervalo de tiempo entre maniobras debe ser adecuado para evitar solapes y generar grandes cargas torsionales.
- Después del sistema de control de paso, el sistema de orientación es aquel que más fallos y averías produce. Siendo recomendable la redundancia de motores de guiñada. Lo que permite seguir operando el sistema en caso de que falle uno de los motores, hasta que llegue el equipo de mantenimiento.

Un diseño óptimo del sistema de guiñada depende de la localización donde vaya a operar y las condiciones eólicas que se den en este emplazamiento. La localización para la que se realiza este estudio es la costa africana.

# ESTADO DE LA CUESTIÓN

---

## 2. Estado de la cuestión

### 2.1. Introducción histórica

El viento se lleva utilizando desde la antigüedad con diversos fines. Los primeros indicios de la utilización del viento como fuente de energía se remontan a los egipcios con la utilización de las velas para navegar. En el s.I, Herón de Alejandría construyó el primer molino de viento y lo utilizó para hacer sonar un órgano musical. A partir del s.VII los persas utilizaron la energía extraída del viento para actividades cotidianas como moler grano o la extracción de agua.

En 1887, Charles Brush construyó la primera turbina eólica. Fue la primera vez que se conseguía generar electricidad a partir del viento, con un total de 144 palas y un diámetro de rotor de 17 metros. Este aparato generaba una potencia de 12 kW.

Con el paso de los años y la innovación, se consiguió incrementar la potencia obtenida del viento. A principios del s. XX Poul la Cour, pionero de la energía eólica, consiguió un total de 3 MW de potencia, lo que fue todo un avance para el momento. Actualmente se ha conseguido producir una potencia de 12 MW.

La primera vez que se tuvo constancia de la existencia de molinos capaces de orientarse al viento fue con los persas. Utilizaron pequeños túneles donde se situaban los molinos de palas verticales para aprovechar el viento, y poder dirigirlo y orientarlo hacia las palas.



**Ilustración 3: primer sistema de orientación con túneles - Fuente [\[14\]](#)**

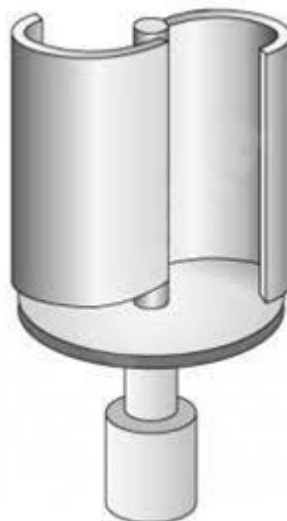
Los primeros molinos con capacidad de orientarse aparecieron en Europa en el siglo XII en Francia e Inglaterra, pero acabaron distribuyéndose por todo el continente. Estos

molinos se caracterizaban por tener una estructura de madera llamada torres de molino, que se giraban a mano para levantar y orientar las aspas al viento. Además, se colocaba una veleta detrás de las aspas, para poder guiarlas en la dirección del viento.



**Ilustración 4: Molino del s.XII con orientación manual - Fuente [15]**

En 1922 el ingeniero Sigurd Johannes Savonius inventó la turbina de eje vertical llamada Savonius. Esta turbina es un dispositivo de arrastre, lo que significa que la energía rotacional se genera por el viento y no por la sustentación aerodinámica, como en la mayoría de las turbinas actuales. Esto significaría la introducción de aerogeneradores que no necesitan de sistema de orientación, puesto que el viento siempre atravesase de forma perpendicular el aparato.



**Ilustración 5: aerogenerador Savonius - Fuente [16]**

---

En cuanto a los aerogeneradores de eje horizontal, fueron aparecieron diferentes estrategias de guiñada. Las cuales se explican a continuación:

## 2.2. Estado de la cuestión

Atendiendo a los diferentes tipos de aerogenerador, se encuentran distintas estrategias que permiten la correcta orientación de las turbinas eólicas a la dirección del viento.

### 2.2.1. Aerogeneradores de eje vertical:

Por su diseño con el eje dispuesto verticalmente, se podría decir que están siempre orientados al viento, lo que permite simplificar el aparato eliminando el sistema de guiñada.

El gran inconveniente de estos aparatos es su bajo rendimiento frente a los de eje horizontal. Sin embargo, son silenciosos y tienen velocidades de giro menores.

Los principales modelos que se utilizan son el Darrieus y el Savonius



Ilustración 6: aerogenerador Darrieus -Fuente [17]

### 2.2.2. Aerogeneradores de eje horizontal:

Para esta disposición se encuentran dos opciones atendiendo a la posición del rotor respecto del viento:

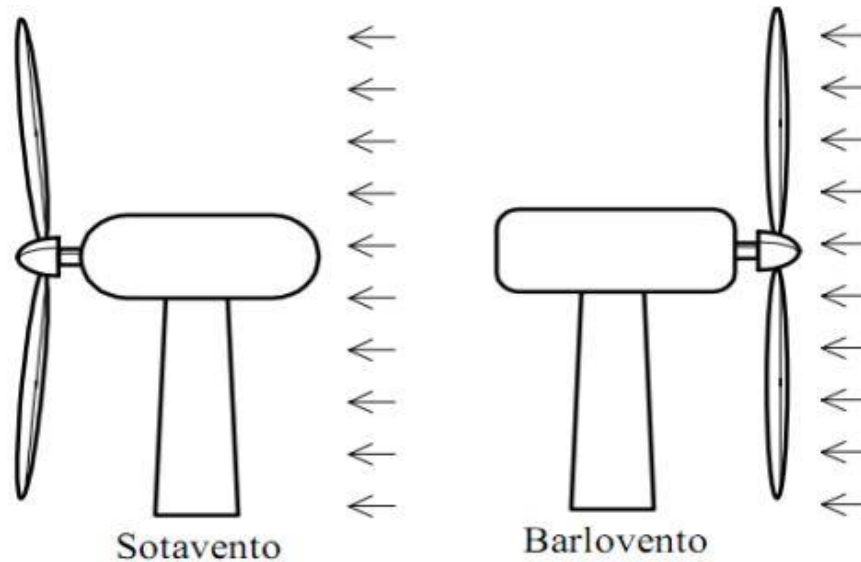


Ilustración 7: sotavento vs barlovento [18]

- Sotavento, cuando la torre se encuentra entre el viento y el rotor  
La ventaja teórica que tienen, es que se pueden construir sin sistema de orientación (orientación pasiva). Con un diseño apropiado del rotor y la góndola, se consigue que esta se oriente de forma pasiva además se podría construir una góndola más flexible y ligera, lo que reduce las cargas en la torre. Pero en grandes aerogeneradores donde los anillos rozantes o los colectores mecánicos no son una opción debido al alto amperaje, la orientación pasiva no permitiría destorsionar los cables. También se producen fluctuaciones en el viento debido a la torre.
- Barlovento, cuando el rotor se encuentra entre el viento y la torre  
Este es el diseño más empleado en la actualidad ya que es el más eficiente y eficaz. No obstante, para mantener la orientación correcta necesita de un sistema de orientación o guiñada. Para esta construcción existen 2 opciones:
  1. Orientación pasiva. Estos aerogeneradores son aquellos que están dotados de una aleta de cola o veleta que aplican un par correctivo a la góndola cuando esta no está alineada con el viento. Hay que diseñarlos para que no torsión en instantáneamente la góndola ante cualquier ráfaga de viento ya que se elevarían las cargas a fatiga. Esta estrategia es muy utilizada en pequeños aerogeneradores con el fin de reducir el coste. En grandes aerogeneradores este sistema no sería capaz de producir un momento suficiente para mover la góndola.



Ilustración 8: aerogenerador tipo veleta - Fuente [19]

2. Orientación activa. Es la estrategia elegida para los grandes aerogeneradores, ya que permite una orientación precisa y soluciona el problema que tienen los rotors a sotavento de torsión en cables. Consiste en un sistema de control que obtiene datos de una veleta y un anemómetro colocados sobre la góndola y orienta la góndola a través de una corona dentada y un sistema de motores.

Dentro de los diferentes componentes del sistema encontramos diversas opciones y estrategias

- Motores de guiñada Pueden variar tanto en potencia como en número y disposición en función del par requerido
- Reductora Convencional o planetaria
- Piñón mayor o menor tamaño en función de la relación de reducción requerida.
- Corona dentada con los dientes internos o externos
- Sistema de frenado (disco más pinza):
- Rodamiento o cojinete
- Control
- Veleta y anemómetro

### 2.2.3. Estrategias para la reducción de esfuerzos en el sistema de guiñada

Para lidiar con los momentos generados por las turbulencias y los cambios de dirección repentinos se han desarrollado distintas estrategias a lo largo de los años:

- 
- a) Fixed yaw o guiñada fija. Un freno formado por hasta 6 pinzas frena un disco de forma que impide las rotaciones no deseadas. A la hora de cambiar la orientación de la góndola, el freno es liberado parcialmente permitiendo un movimiento suave.
  - b) Friction damped yaw o guiñada amortiguada por fricción. El sistema esta amortiguado mediante fricción, la cual se puede generar de 3 formas:
    - 1) La góndola apoya unos cojinetes de fricción sobre una superficie anular horizontal situada en el extremo superior de la torre. Los motores del sistema de guiñada trabajan contra esta fricción la cual permite a su vez deslizamiento en el caso de cargas extremas.
    - 2) En este diseño, la góndola descansa sobre un rodamiento convencional y la fricción es aplicada por un freno al igual que en la guiñada fija.
    - 3) Otra de las estrategias empleadas es la utilización de rodamientos de rodillos a los cuales se les sustituyen los elementos rodantes por piezas de compuestos elastoméricos las cuales aportan la fricción necesaria.
  - c) Soft yaw o guiñada suave. Este es un sistema de amortiguamiento hidráulico las líneas de aceite a cada lado del motor hidráulico están conectadas a un acumulador a través de una válvula de estrangulamiento que alivia las cargas repentinas.
  - d) Damped free yaw o guiñada de amortiguación libre. Al igual que la estrategia anterior se compone de un sistema hidráulico pero esta vez las líneas de aceite están conectadas entre sí con una válvula de retención en lugar de estar conectadas a un motor hidráulico.
  - e) Controlled free yaw o guiñada libre controlada. Esta estrategia es similar a la anterior, pero se dispone de un equipo que controla la guiñada para hacer correcciones si fuese necesario.

En cuanto a los distintos tipos de control que encontramos en el sistema de guiñada tenemos tres tipos:

En primer lugar los controles rígidos, los cuales siguen de forma precisa cada cambio de orientación. Esta estrategia es la más eficiente en cuanto a producción de energía se refiere. Por otro lado, la constante actuación del sistema de guiñada provocará más fatiga en los componentes del aerogenerador.

A continuación se encuentran los sistemas de guiñada flexible. Estos se caracterizan por no modificar la orientación de la góndola hasta que el error de orientación no supere un ángulo determinado. Para realizar esta estrategia se pueden utilizar resortes lineales o sistemas hidráulicos colocados a ambos lados de los motores de guiñada, acumulando o aportando energía dependiendo de la situación.

### **2.3. Partes principales de un aerogenerador**

A continuación, se definirán las distintas partes de las que se compone un aerogenerador marino (off-shore) de eje horizontal:

## 2.3.1. Estructura

### 2.3.1.1. Anclaje

Es la parte de la estructura encargada de mantener vertical y en posición la turbina. En función de la profundidad del lecho marino, este soporte puede ser flotante (estando debidamente anclado al fondo marino) o puede tratarse de unos cimientos convencionales. A continuación se muestra una imagen de diferentes estrategias empleadas:



Ilustración 9: estrategias de anclaje de los aerogeneradores marinos – Fuente: [20]

### 2.3.2.2. Torre

Estructura cilíndrica o cónica unida al anclaje que se encarga de elevar la góndola y el rotor aerodinámico por encima del agua para permitir que opere con la mínima influencia del agua posible. Esta estructura puede medir desde 120 hasta casi 200 metros.



Ilustración 10: torre de un aerogenerador - Fuente: [21]

### 2.3.2.3. Góndola

Está, es la parte de la estructura donde se encuentran alojados todos los componentes eléctricos de la turbina, así como la transmisión y donde se encuentra acoplado el rotor aerodinámico.

### 2.3.3. Rotor aerodinámico

El rotor aerodinámico se encarga de absorber la energía del viento transformando esta en sustentación aerodinámica en las palas, las cuales rotarán moviendo el rotor del generador y produciendo energía eléctrica.



Ilustración 11: rotor aerodinámico - Fuente [22]

### 2.3.3.1. Palas

Es uno de los principales elementos del aparato. Con un perfil similar al que podría utilizar el ala de un avión, las palas consiguen generar sustentación aerodinámica. Esta diferencia de presiones propicia la rotación del conjunto, transmitiendo el movimiento hasta el generador donde se transformará a energía eléctrica.

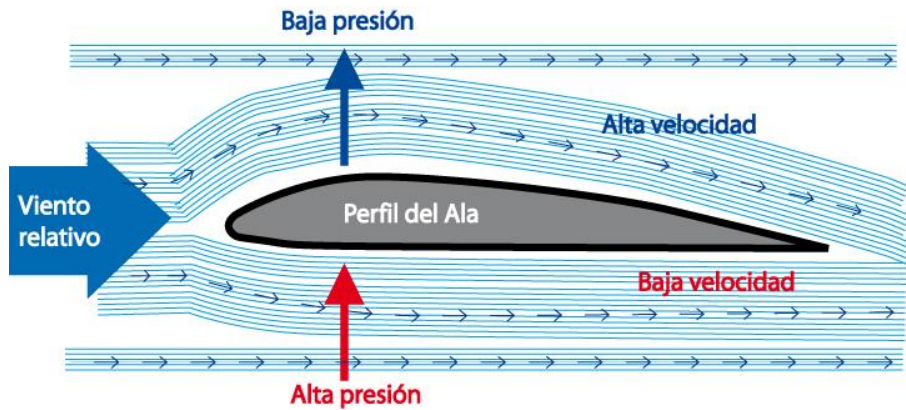


Ilustración 12: esquema sustentación aerodinámica - Fuente [23]

El número de palas es variable y depende de las condiciones y estrategia utilizada. En la actualidad existen modelos de aerogenerador con 1, 2 o 3 palas, siendo los de 3 palas los más comunes, sobre todo en localizaciones marinas.



Ilustración 13: construcción pala aerogenerador - Fuente [24]

### 2.3.3.2. Buje

Este elemento alberga la raíz de las palas así como el sistema de control de paso. Además, va conectado directamente al eje de baja velocidad transmitiéndole la rotación a la transmisión.



Ilustración 14: esquema del buje - Fuente [\[25\]](#)

La forma del buje varía en función del modelo o estrategia, pudiendo ser esférica, parabólica o más cilíndrica.

### 2.3.3.3. Sistema de control de paso

Este sistema es el encargado de mantener un correcto ángulo de ataque de las palas. La variación de este ángulo permite el control de la potencia generada una vez superada la velocidad nominal del viento, de tal forma que no se produzcan tensiones o corrientes mayores que las nominales.

### 2.3.4. Góndola

A continuación se definirán los elementos que se albergan dentro de la góndola:

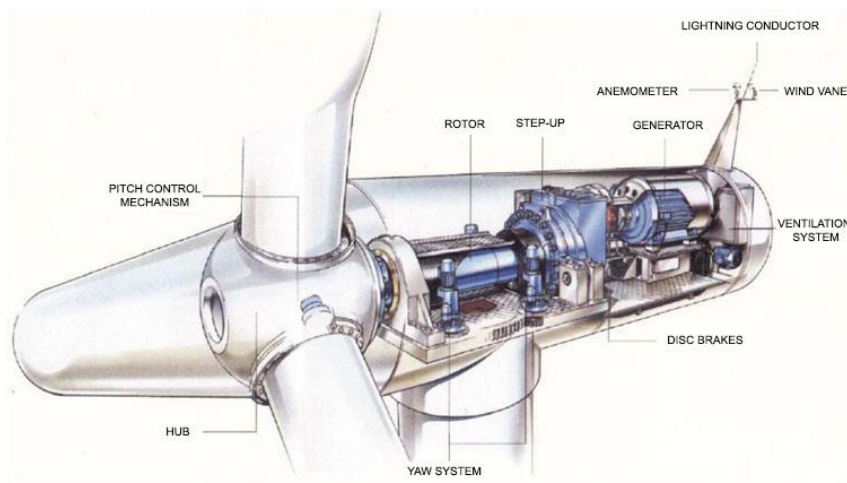


Ilustración 15: esquema góndola - Fuente [26]

#### 2.3.4.1. Transmisión

La transmisión de un aerogenerador se encarga de transmitir la rotación hasta el generador. Puede ser directa, en la cual la velocidad del aerogenerador es la misma que la del rotor del generador, o mediante una multiplicadora, en la cual unos engranajes elevan la velocidad del eje para que llegue con mayor velocidad al generador.

La ventaja de la multiplicadora, es la reducción del tamaño del generador. Por otro lado, los engranajes reducen el rendimiento del sistema y dan lugar a más averías, siendo un sistema más contaminante debido a su necesaria lubricación.

#### 2.3.4.2. Generador

Es el componente que transforma la energía cinética del eje en energía eléctrica. Para este elemento se encuentran diversas estrategias. Se pueden encontrar generadores síncronos y asíncronos según su construcción eléctrica. Y según su construcción física, estos pueden ser con rotor bobinado, con jaula de ardilla o con imanes permanentes.

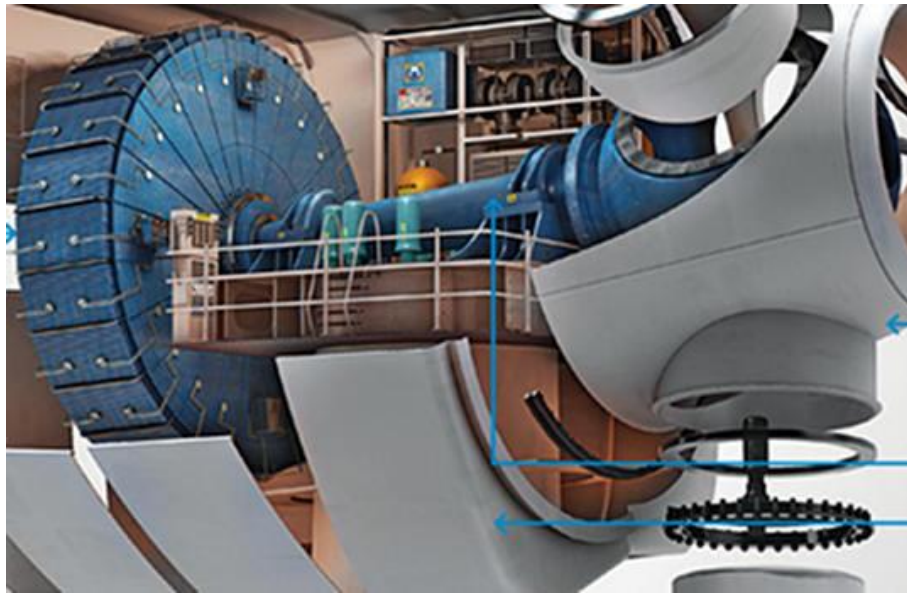


Ilustración 16: esquema generador -- Fuente [27]

#### 2.3.4.3. Sistema de guiñada u orientación

Este sistema es el encargado de mantener el rotor aerodinámico correctamente orientado al viento. En buen de orientación es esencial para garantizar un buen rendimiento del aparato.

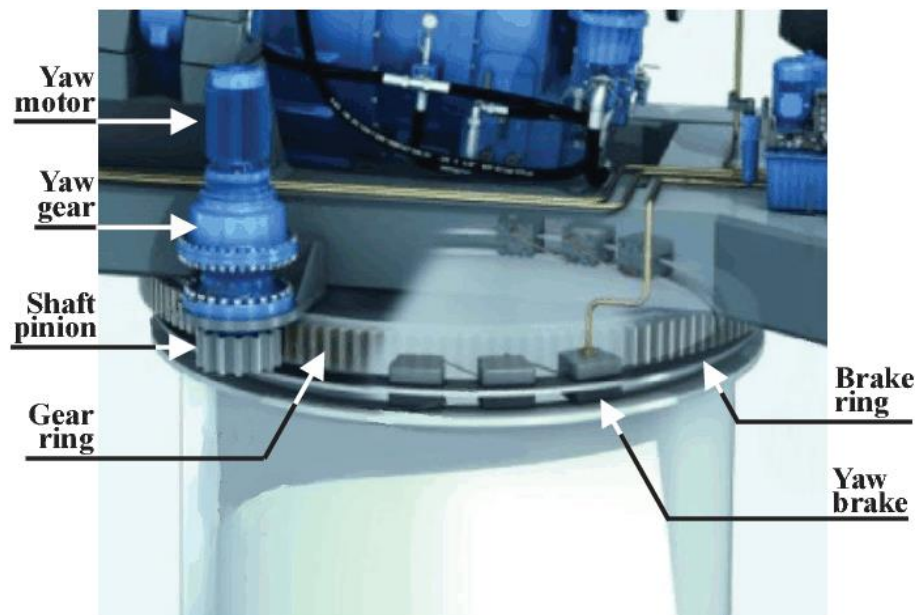


Ilustración 17: esquema sistema de guiñada [28]

En este trabajo se diseñará y estudiará el comportamiento del sistema de guiñada de un aerogenerador marino tripala de 5 Mw de potencia nominal, compuesto por un

---

generador síncrono de imanes permanentes, una transmisión directa y con unos cimientos enterrados 5 metros bajo el lecho marino.

# MEMORIA

### 3. Memoria

El objetivo de este trabajo es diseñar y comparar diferentes estrategias de guiñada para un aerogenerador marino de 5Mw de potencia, de transmisión directa y de generador síncrono de imanes permanente. Una vez elegida la estrategia más adecuada, se optimizará y se dimensionarán los distintos componentes del sistema.

Para la realización del modelo y las simulaciones, se contará con el software Bladed 4.6 con licencia educativa. Todos los parámetros introducidos en el modelo, serán aportados por el tutor de este trabajo a no ser que se indique lo contrario. Tanto las simulaciones como los distintos componentes de la turbina deberán cumplir con las especificaciones de la norma GL, la cual marca los estándares actuales para este tipo de aerogeneradores. Esta norma está basada en la norma IEC, la cual establece los requisitos para los aerogeneradores terrestres.

Además, las diferentes elecciones realizadas a lo largo de este proyecto girarán en torno a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de Naciones Unidas (ONU).

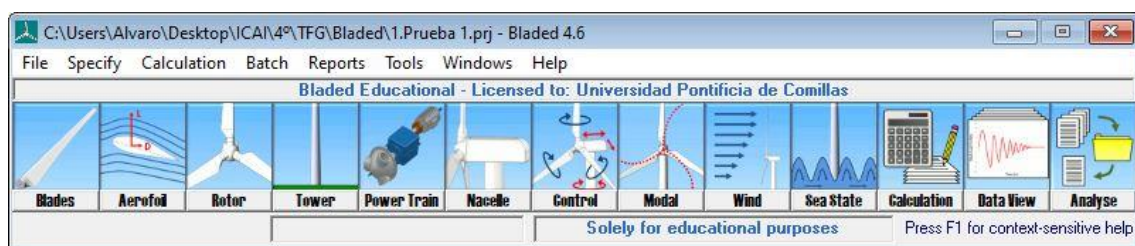
Finalmente, una vez dimensionado el sistema elegido y comprobado ante carga y fatiga, se realizará un estudio económico del mismo.

#### 3.1. Modelo

Para la obtención de las cargas y simular el comportamiento de la turbina, se emplea el software de simulación Bladed 4.6 Educational. Cabe recordar que al tratarse de una licencia educativa no se tendrá acceso a todas las opciones que permite el programa completo, limitando las posibilidades de simulación así como la precisión de los resultados obtenidos.

Antes de comenzar las simulaciones, se deberá definir el modelo de la forma más precisa posible. Para ello se emplearán los datos aportados por el tutor [\[Anexo III\]](#).

A continuación se mostrará paso a paso como se han introducido los parámetros en la interfaz del programa:

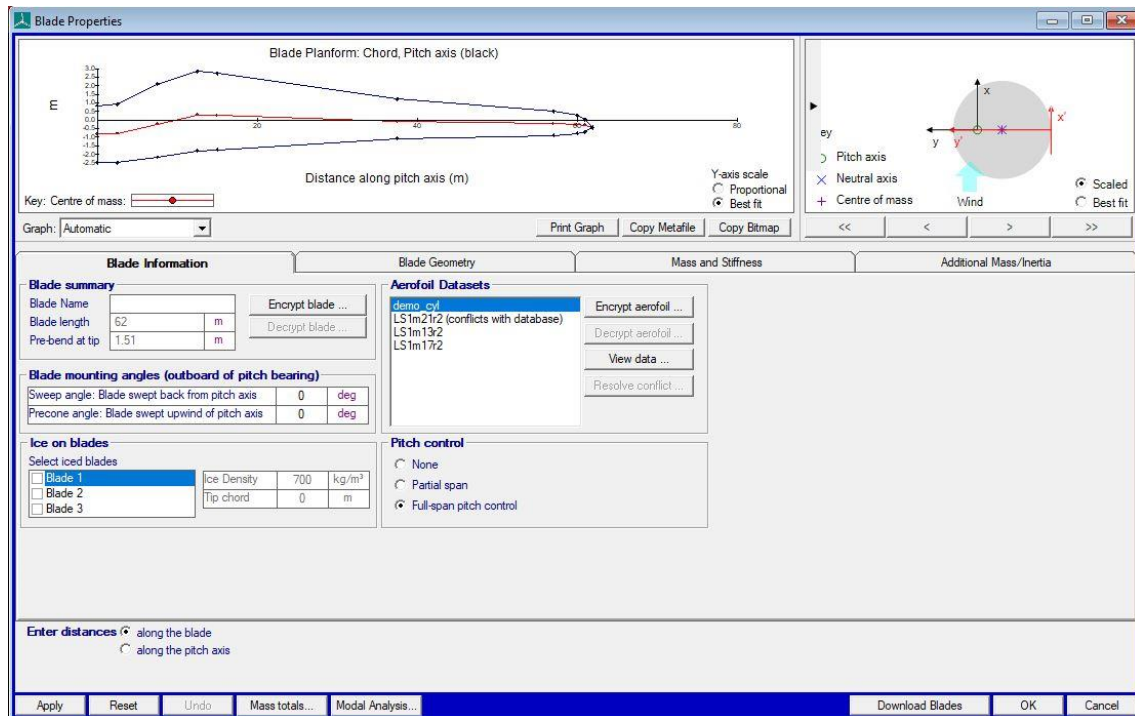


**Ilustración 18: Interfaz principal Bladed 4.6. – Fuente: elaboración propia**

Pinchando en cada uno de los apartados, se desplegarán los distintos menús que permiten definir los parámetros del aerogenerador y de las simulaciones.

### 3.1.1. Palas

En primer lugar se definen las palas:



**Ilustración 19: menú Blade Properties-Blade Information – Fuente: elaboración propia**

Como se puede observar, en la parte superior de la pantalla aparecen representadas distintas características y propiedades a lo largo de la pala, y a su derecha según la sección de la pala seleccionada. Estos gráficos son automáticos y se irán modificando según se van introduciendo los datos

En la parte inferior aparecen diferentes pestañas. En la primera, tenemos la opción de incluir hielo en alguna de las palas para realizar simulaciones en situaciones de frío. Esta opción no se empleará en ningún momento de este trabajo dado que la ubicación del aerogenerador es la costa africana y no se esperan temperaturas tan bajas.

A su vez, se permite seleccionar el tipo de control de paso que se va a utilizar en la simulación: completo, parcial o ninguno. El cual se mantendrá en completo rango de funcionamiento en todas las simulaciones.

La segunda pestaña, se centra en la geometría:

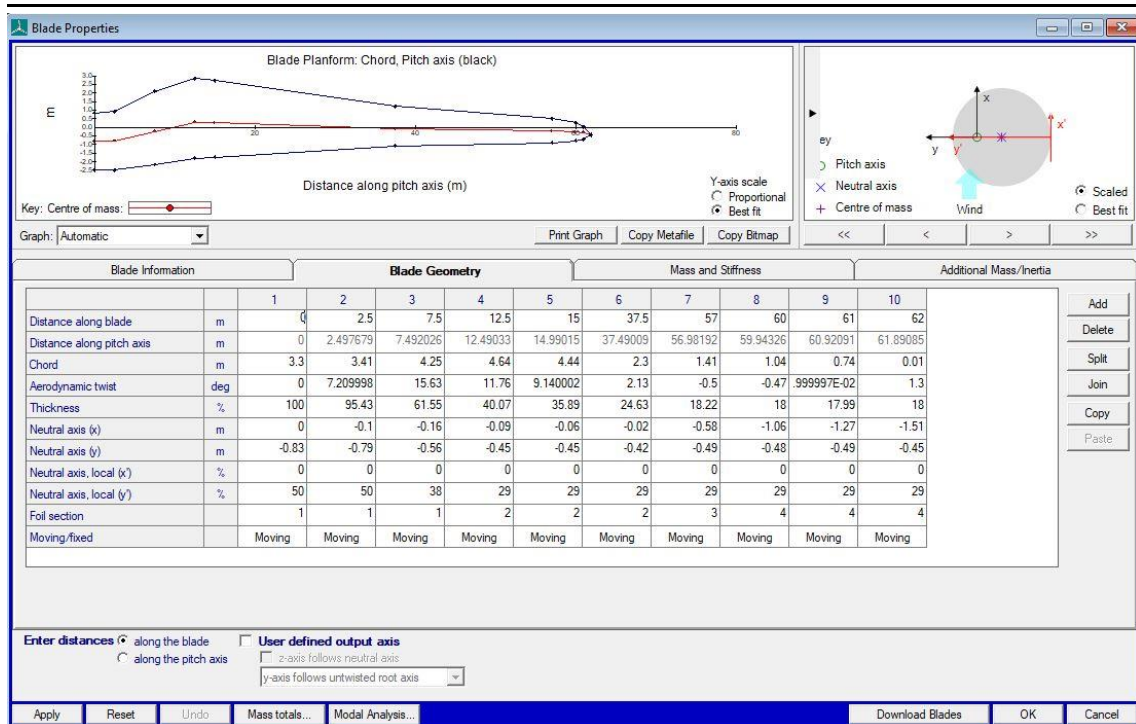


Ilustración 20: menú Blade Properties-Blade Geometry – Fuente: elaboración propia

Mediante la utilización de las 10 secciones más significativas de las palas, se definirá la geometría de estas. La limitación a 10 secciones debida a la licencia educativa, provoca una gran pérdida de información frente a las 30 secciones aportadas por el tutor.

Los datos que se deben introducir en la tabla son los siguientes:

- **Distance along the blade [m] (distancia a lo largo de la pala [m]):** distancia desde la raíz de la pala hasta la sección a definir, en metros.
- **Distance along the pitch axis [m] (distancia a lo largo del eje de paso [m]):** distancia desde la raíz de la pala hasta la sección a definir, en metros. Este parámetro está relacionado con el anterior, por lo cual solo se permite introducir uno de los dos y el otro se calcula de manera automática. En este caso el fabricante proporcionaba los datos a lo largo de la pala, por lo que esta categoría se genera de forma automática.
- **Chord [m] (cuerda [m]):** término aerodinámico, que determina la distancia entre el borde de ataque y el de salida, en metros.
- **Aerodynamic twist [deg] (giro aerodinámico [deg]):** término aerodinámico que determina el ángulo entre la cuerda y la dirección del viento, en grados. Este parámetro determina cuanto empuje realizará el viento sobre la pala, siendo mayor cuanto mayor sea el ángulo
- **Thickness[%] (espesor [%]):** indica el espesor de la sección en porcentaje sobre la longitud de la cuerda.

- **Neutral axis, (x) [m] (eje neutro (x)[m]):** determina la distancia entre el eje neutro y el eje de paso en dirección x, en metros.
- **Neutral axis (y) [m] (eje neutro (y)[m]):** determina la distancia entre el eje neutro y el eje de paso en dirección y, en metros.
- **Neutral axis, local (x') [%] (eje neutro, local (x')[%]):** indica la distancia entre el eje neutro y el eje de paso en dirección x, en porcentaje sobre la longitud de la cuerda.
- **Neutral axis, local (y') [%] (eje neutro, local (y')[%]):** determina la distancia entre el eje neutro y el eje de paso en dirección y, en porcentaje sobre la longitud de la cuerda.
- **Foil section [-] (sección de la pala [-]):** está fila le proporciona un número entero del 1 al 7 a cada una de las secciones en función de su espesor. Cada uno de estos números está asignado a un tipo de perfil aerodinámico.
- **Moving/fixed (móvil/fija):** en función de si las palas se encuentran con el control de paso activado o desactivado, definiremos el parámetro como fijo o móvil.

La tercera pestaña pone su atención en las propiedades físicas de las palas:

The screenshot shows the 'Blade Properties' window with the 'Mass and Stiffness' tab selected. The 'Define' section on the left has several checkboxes checked: 'Mass', 'Use default mass axis orientation', 'Use default radii of gyration ratio', 'Stiffness', 'Use default principal axis orientation', 'Torsional degree of freedom', and 'Shear stiffness'. The 'Enter distances' section is set to 'along the blade'. The main data table is as follows:

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distance along blade		0	2.5	7.5	12.5	15	37.5	57	60	61	62
Centre of mass (x)	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Centre of mass (y)	%	50.2	49.6	45.5	45.3	45.2	43.6	47.3	48.8	52.5	52.5
Mass axis orientation	deg	0	7.209998	15.63	11.76	9.140002	2.13	-0.5	-0.47	.999997E-02	1.3
Mass/unit length	kg/m	1939.9	732.8	481	464.6	423.3	270.1	76.5	34.6	17.6	1.8
Polar inertia/unit length	kgm	2048.5	1879.8	1147	956.8	712.6	77.8	10	3	1	0.1
Radii of gyration ratio		1	0.9543	0.6155	0.4007	0.3589	0.2463	0.1822	0.18	0.1799	0.18
Principal axis orientation	deg	0	7.209998	15.63	11.76	9.140002	2.13	-0.5	-0.47	.999997E-02	1.3
Shear centre (x')	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Shear centre (y')	%	50.2	49.6	45	42.3	42.7	41.3	44.9	48	49.4	49.4
Bending stiffness about xp	Nm <sup>2</sup>	3.87E+10	1.22E+10	7.41E+09	7.01E+09	5.85E+09	7.71E+08	8.04E+07	2.33E+07	8010000	8010000
Bending stiffness about yp	Nm <sup>2</sup>	3.87E+10	1.26E+10	5.78E+09	3.22E+09	2.39E+09	2.12E+08	7540000	1060000	293000	293000
Torsional stiffness	Nm <sup>2</sup>	2.07E+10	7.03E+09	2.55E+09	9.61E+08	6.75E+08	4.56E+07	5490000	1410000	406000	406000

**Ilustración 21: menú Blade Properties-Mass and Stiffness – Fuente: elaboración propia**

Seguido de la geometría, el programa solicita los datos relacionados con las propiedades físicas de cada una de las secciones definidas en la pestaña previa:

- **Distance along the blade [m] (distancia a lo largo de la pala [m]):** distancia desde la raíz de la pala hasta la sección a definir, en metros. (Previamente definido en la pestaña anterior).
- **Centre of mass (x') [%](centro de masas (x')[%]):** distancia en dirección x desde la cuerda al centro de masas, en porcentaje sobre la distancia de la cuerda.
- **Centre of mass (y') [%](centro de masas (y')[%]):** distancia en dirección y desde la cuerda al centro de masas, en porcentaje sobre la distancia de la cuerda.
- **Mass axis orientation [deg] (orientación del eje de masas[deg]):** este parámetro define el ángulo, en grados, de orientación del eje de inercia principal. Este parámetro se calcula automáticamente.
- **Mass/unit length[kg/m](masa por unidad de longitud[kg/m]):** como su propio nombre indica, este parámetro define la masa en kg por cada metro de pala.
- **Polar inertia/unit length [kgm](inercia polar por unidad de longitud [kgm]):** momento de inercia polar por unidad de longitud respecto al eje  $z_m$ .
- **Radii of gyration ratio[-](radio de relación de giro[-]):** es la relación que entre los radios de giro alrededor de  $x_m$  e  $y_m$ . Este valor se calcula automáticamente y tiene el mismo valor que la relación entre el espesor y la cuerda.
- **Principal axis orientation [deg](orientación eje principal [deg]):** orientación del eje de torsión estructural principal  $y_p$ . Es igual al valor de la torsión y se mide en grados.
- **Shear center (x')[%](Centro de cizalladura(x')[%]):** distancia en dirección x desde la cuerda al centro de cizalladura, en porcentaje sobre la distancia de la cuerda.
- **Shear center (y')[%](Centro de cizalladura(y')[%]):** distancia en dirección y desde la cuerda al centro de cizalladura, en porcentaje sobre la distancia de la cuerda.
- **Bending stiffness about  $x_p$  [ $Nm^2$ ](Rigidez a flexión alrededor de  $x_p$  [ $Nm^2$ ):** Rigidez a de la pala a lo largo del eje  $x_p$ , se mide en  $Nm^2$ .
- **Bending stiffness about  $y_p$  [ $Nm^2$ ](Rigidez a flexión alrededor de  $y_p$  [ $Nm^2$ ):** Rigidez a de la pala a lo largo del eje  $y_p$ , se mide en  $Nm^2$ .
- **Torsional stiffness [ $Nm^2$ ](Rigidez a torsión [ $Nm^2$ ):** Este parámetro indica cual es el valor de la rigidez torsional de la pala, se mide en  $Nm^2$ .

La cuarta y última pestaña del menú de las palas, da la opción de añadir masas de equilibrado en las palas. En este trabajo, no se trabajará con dichas masas:

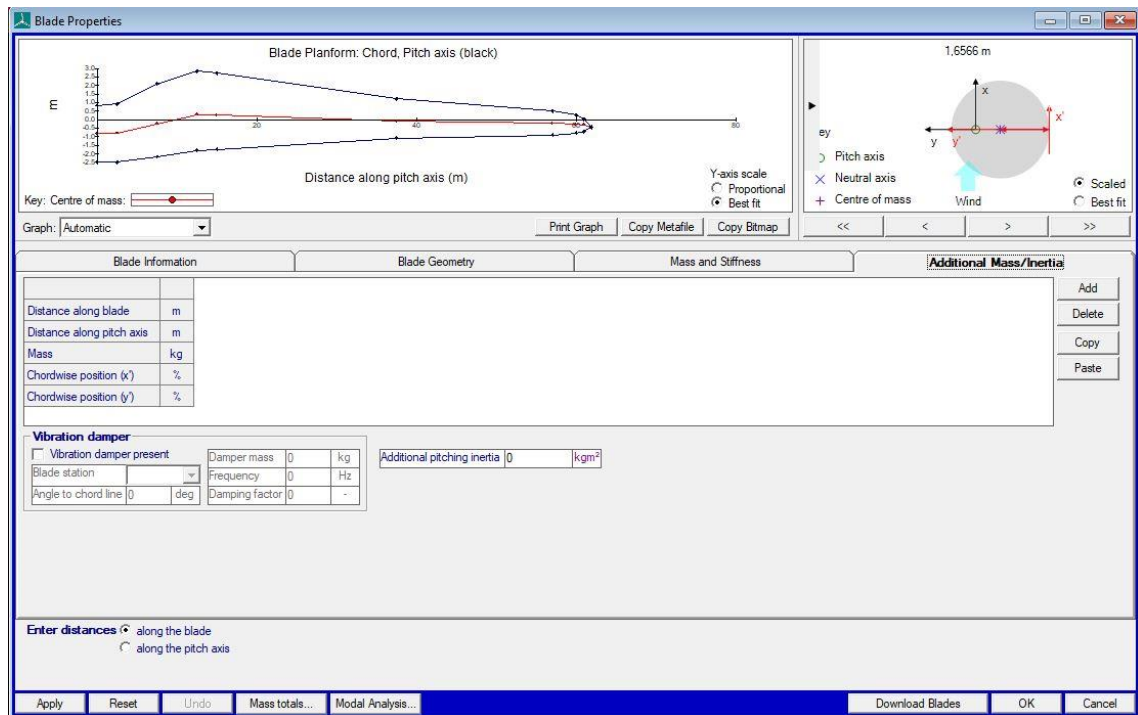


Ilustración 22: menú Blade Properties - Aditonal Mass/Inertia – Fuente: elaboración propia

### 3.1.2. Aerofoil (Perfil aerodinámico)

En el siguiente menú, permite definir los distintos parámetros del perfil aerodinámico de las palas:

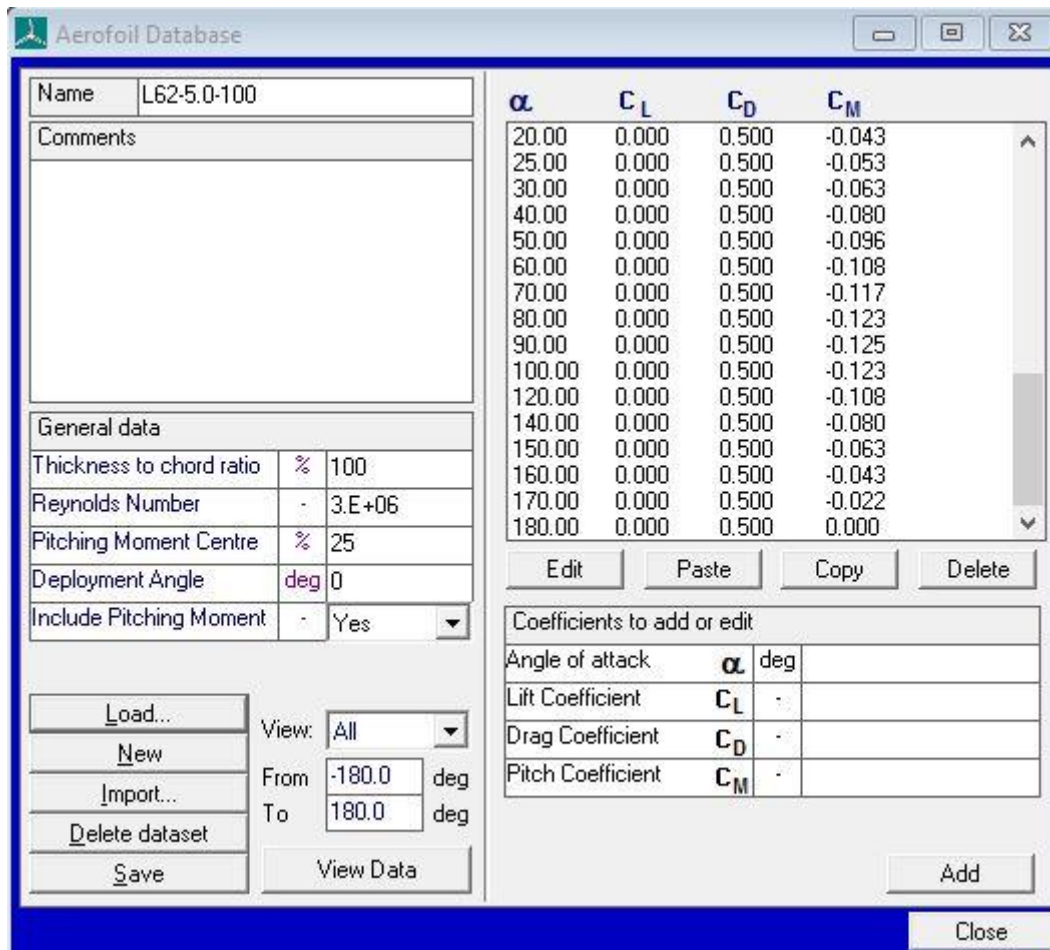


Ilustración 23: menú Aerofoil – Fuente: elaboración propia

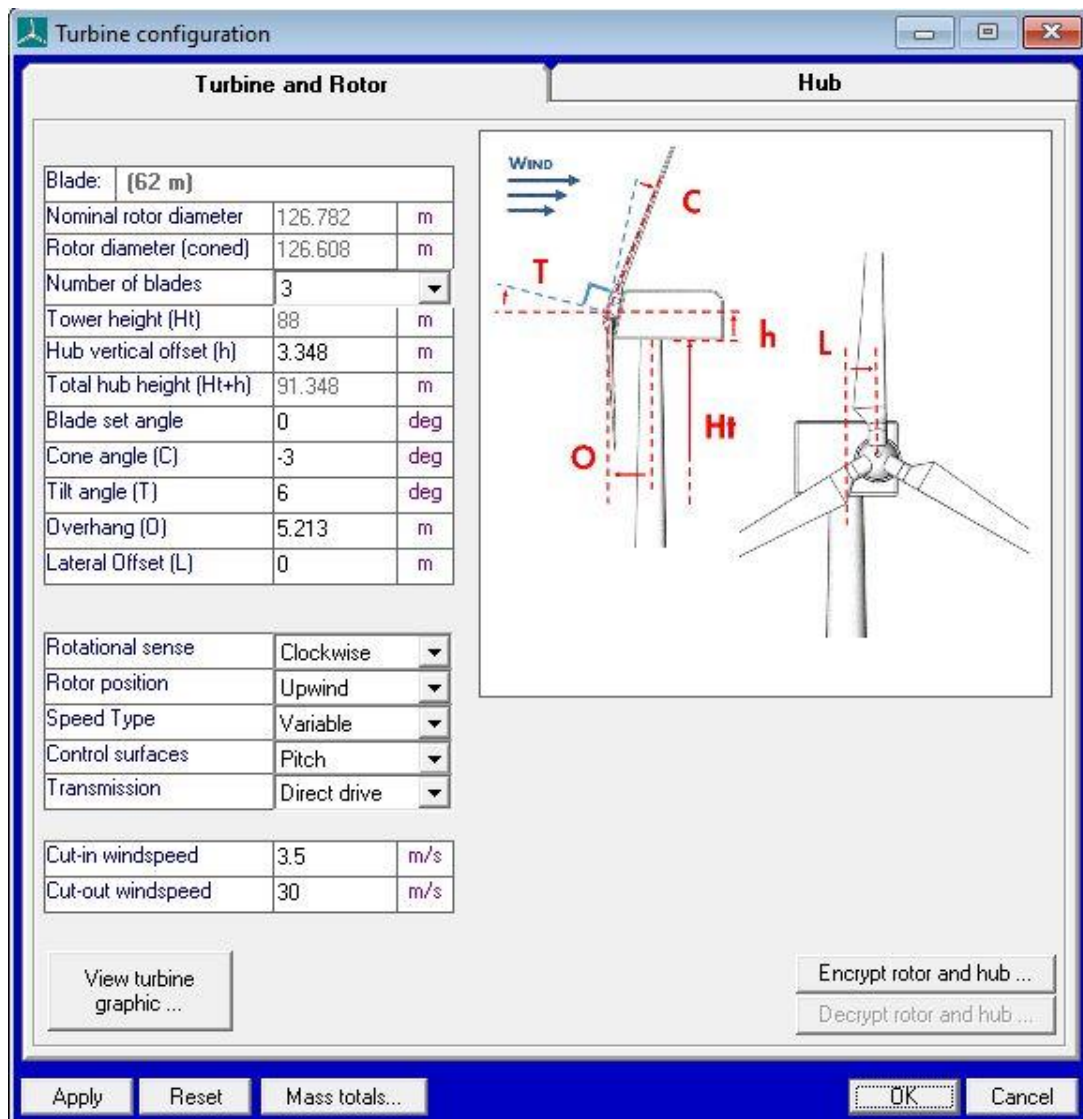
Todos los datos que se explican a continuación, fueron facilitados por el tutor:

- **Thickness to chord ratio [%](relación entre espesor y la cuerda[%]):** como su nombre indica, este parámetro establece la relación entre el espesor de la sección y la longitud de la cuerda en forma de porcentaje.
- **Reynolds Number[-] (Número de Reynolds[-]):** el número de Reynolds es un número adimensional empleado en la mecánica de fluidos que permite caracterizar el movimiento del fluido.
- **Pitching momento centre [%] (Centro del momento de paso [%]):** este parámetro determina la posición de aplicación de los momentos de paso respecto a la longitud cuerda, en porcentaje.
- **Angle os attack,  $\alpha$ [deg](Ángulo de ataque,  $\alpha$ [deg]):** ángulo de ataque de la sección de pala definida, en grados.

- **Lift coefficient,  $C_L$  [-]**(coeficiente de sustentación,  $C_L$  [-]): número adimensional que representa la capacidad de la sección para producir sustentación.
- **Drag coefficient,  $C_D$  [-]**(coeficiente de arrastre,  $C_D$  [-]): número adimensional que representa la resistencia (tanto de forma como de superficie) que ofrece la sección de la pala frente al aire.
- **Pitch coefficient,  $C_M$  [-]**(Coeficiente de paso,  $C_M$  [-]): número adimensional que representa el momento producido en la sección de la pala cuando las fuerzas aerodinámicas no están aplicadas en el centro aerodinámico.

### 3.1.3. Rotor

El siguiente menú será el encargado de definir los parámetros de la turbina y del rotor así como del buje. Este menú se divide en 2 pestañas:



**Ilustración 24:** menú Turbine configuration – Turbine and Rotor – Fuente: elaboración propia.

---

En la primera pestaña se introducen los datos geométricos de la turbina y algunas características básicas de este, (datos proporcionados por el tutor).

En la parte derecha de la pestaña se muestra un esquema de las medidas requeridas:

- **Blade [m] (Pala[m]):** longitud de la pala expresada en metros. Este parámetro ya se introduce en el menú de las propiedades de la pala. [\[menú pala\]](#)
- **Nominal rotor diameter [m] (Diámetro nominal del rotor [m]):** Diámetro nominal del rotor aerodinámico en metros. Este parámetro también se genera automáticamente con los datos introducidos en otros menús.
- **Rotor diameter (coned)[m](Diámetro del rotor (cónico)[m]):** al igual que el parámetro anterior representa el diámetro del rotor aerodinámico en metros, pero en esta ocasión teniendo en cuenta el ángulo de conicidad de estas.
- **Number of blades (Número de palas):** en este desplegable se puede seleccionar el número de palas del aerogenerador.
- **Tower heigh(Ht)[m] (Altura de la torre (Ht)[m]):** altura de la torre en metros. Este parámetro se introducirá más adelante en el menú de la torre.
- **Hub vertical offset (h)[m]( Altura veritcal del buje (h)[m]):** Altura del buje respecto a la base de la góndola, en metros.
- **Total hub heigh (Ht+h)[m](altura total del buje(Ht+h)[m]):** Este parámetro es la suma de los dos anteriores.
- **Blade set angle [deg](ángulo de montaje de las palas [deg]):** Indica el ángulo con el que se montan las palas, en grados. Acostumbra a ser 0 en muchos proyectos.
- **Cone ángle, (C) [deg] (Ángulo de conicidad, (C) [deg]):** ángulo de conicidad de las palas, es decir, ángulo formado entre el plano perpendicular a la dirección del viento y el eje de las palas. Se mide en grados.
- **Tilt angle, (T) [deg] (Ángulo de inclinación, (T) [deg]):** ángulo de inclinación del buje respecto de la horizontal, medido en grados.
- **Overhang, (O) [m] (desalineación, (O)[m]):** Distancia del eje de guiñada al centro de masas del rotor, en metros.
- **Lateral offset, (L)[m](desvío lateral, (L)[m]):** distancia del centro de la góndola al centro de masas del rotor, en metros.
- **Rotational sense (Sentido de rotación):** permite elegir la dirección de rotación, puede ser anti-horaria u horaria como es el caso de este modelo.
- **Rotor position (Posición del rotor):** si el rotor se encuentra a barlovento o a sotavento.
- **Speed type (tipo de velocidad):** puede ser fija o variable. Esto depende del tipo de generador y si de la turbina posee o no transmisión.

- **Control surfaces (control de área):** establece si existe algún tipo de sistema que controle las superficie de contacto de las palas. En este modelo se cuenta con control de paso (Pitch control).
- **Transmisión (Transmisión):** puede encontrarse una caja de cambios o una transmisión directa como en este caso.
- **Cut-in wind speed [m/s] (velocidad del viento para encendido [m/s]):** velocidad mínima del viento a la cual el aerogenerador es capaz de funcionar, en metros partido de segundo.
- **Cut-in wind speed [m/s] (velocidad del viento para apagado [m/s]):** velocidad máxima del viento a la cual el aerogenerador es capaz de funcionar, en metros partido de segundo.

En la siguiente pestaña se definen los parámetros correspondientes al buje. Tanto geométricos como máscicos e inerciales:

**Turbine configuration**

**Turbine and Rotor** **Hub**

Blade Root

Root Length (L)	1.5	m
Diameter (D)	3.3	m
Drag Coefficient	0.42	-
Spinner diameter (S)	3	m

Teetered hub

Pitch-teeter coupling:

Delta-3  Special

Delta-3 Angle	0	deg
---------------	---	-----

Direct drive generator

Rotor inertia	255118	kgm <sup>2</sup>
---------------	--------	------------------

Assign Mass

Hub mass properties:

Mass (including internal hub system)	40000	kg
Centre of mass	0 (H)	m
Inertia about shaft	3000	kgm <sup>2</sup>
Inertia perpendicular to shaft	56587	kgm <sup>2</sup>

Direct drive generator (if not included in nacelle):

Total mass (rotor + stator)	43288.2	kg
Centre of mass (rotor + stator)	1.34 (K)	m
Inertia about shaft (stator only)	274976	kgm <sup>2</sup>
Inertia perpendicular to shaft (rotor + stator)	269912	kgm <sup>2</sup>

Mass (including imbalance mass)

Mass	40135	kg
------	-------	----

Counterweight for one-bladed turbine

Mass	0	kg
Inertia about shaft	0	kgm <sup>2</sup>

Apply Reset Mass totals... OK Cancel

Ilustración 25: menú Turbine configuration – Hub – Fuente: elaboración propia.

---

La sección superior se centra en los datos de la raíz de la pala. A la derecha de la pestaña se muestra un esquema de las diferentes medidas requeridas:

- **Root length, (L) [m] (Longitud de la raíz de la pala, (L) [m]):** longitud desde el centro del buje hasta la raíz de la pala, en metros.
- **Diameter, (D) [m] (Diámetro (D) [m]):** diámetro de la raíz de la pala, en metros.
- **Drag coefficient [-] (Coeficiente de arrastre [-]):** número adimensional que representa el coeficiente de arrastre del buje con el viento. Cálculos realizados en la sección [4.2.3](#).
- **Spinner diameter, (S) [m] (Diámetro del spinner aerodinámico, (S) [m]):** diámetro del spinner aerodinámico, sin incluir la longitud de la raíz de las palas. Medida en metros.

A continuación pide datos sobre el rotor:

- **Rotor inertia [ $kgm^2$ ] (inercia del rotor [ $kgm^2$ ):** el valor de la inercia del rotor se calculado en la sección [4.1.4](#). Expresado en  $kgm^2$ .

Propiedades másicas del buje:

- **Mass (including inertial hub system) [kg] (Masa (incluyendo la inercia del sistema del buje) [kg]):** Como su propio nombre indica, en este parámetro se introduce la masa del buje en kilogramos.
- **Center of mass, (H)[m](centro de masas, (H)[m]):** distancia al centro de masas respecto del centro de la raíz de la pala, en metros.
- **Inertia about shaft [ $kgm^2$ ](Inercia alrededor del eje x [ $kgm^2$ ):** inercia del buje respecto al eje de este, en  $kgm^2$ . Calculado en la sección [4.2.2](#)
- **Inertia perpendicular to shaft [ $kgm^2$ ] (Inercia del buje perpendicular al eje y [ $kgm^2$ ):** aquí se introducirá la inercia del buje respecto al eje perpendicular al propio eje del buje, en  $kgm^2$ . Calculado en la sección [4.2.2](#)

Datos del generador de transmisión directa:

- **Total mass (rotor + stator) [kg] (Masa total (rotor + estator)[kg]):** masa total del generador incluyendo la masa del rotor y del estator, en kilogramos.
- **Center of mass (rotor + stator), (K) [m] (Centro de masas (rotor + estator)), (K) [m]):** Centro de masas del generador, combinado el rotor y el estator, en  $kgm^2$ .
- **Inertia about shaft (stator only) [ $kgm^2$ ](Inercia alrededor del eje (solo estator) [ $kgm^2$ ):** inercia que aporta el estator alrededor del eje, en  $kgm^2$ . Calculado en la sección [4.1.6](#).

- **Inertia perpendicular to shaft (rotor + stator) [ $kgm^2$ ]**(Inertia perpendicular al eje (rotor + estator) [ $kgm^2$ ]): inercia perpendicular al eje combinando rotor más estator en  $kgm^2$  .Calculado en la sección [4.1.6](#).
- **Mass [kg] (Masa [kg]):** Masa del buje incluyendo la masa descentrada

### 3.1.4. Torre

El menú para definir los parámetros de la torre se dispone de la siguiente forma:

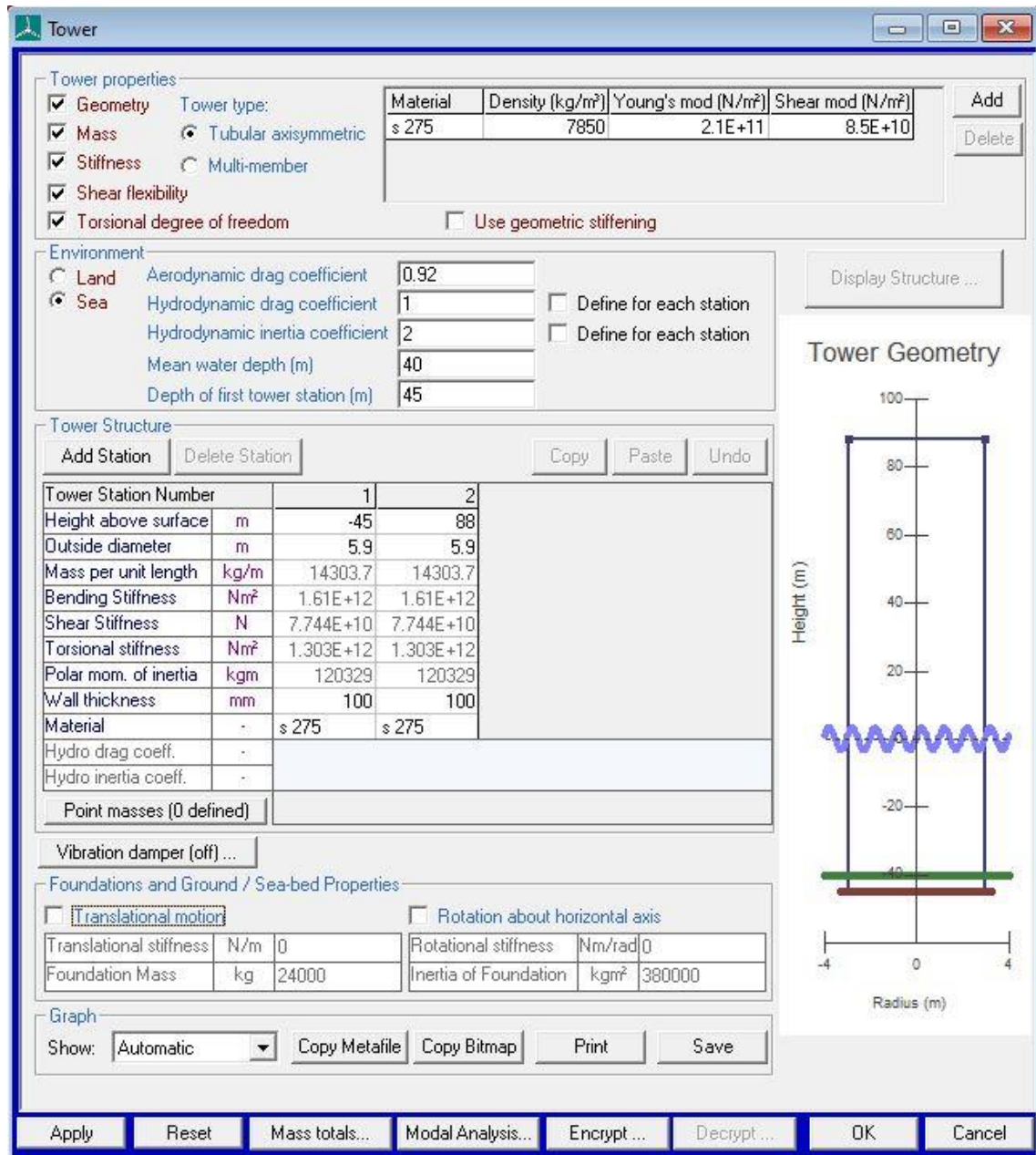


Ilustración 26: menú Tower – Fuente: elaboración propia

---

En primer lugar, en la parte superior se define el material que se utiliza para construirla así como sus propiedades. Se ha elegido acero estructural S-275 por sus propiedades, las cuales se ajustan muy bien con las condiciones a las que será sometido, además de ser un material muy común en multitud de aplicaciones tales como: vigas o estructuras.

A continuación, se elige el tipo de emplazamiento del aparato. En este caso será del tipo marino, y se deberán introducir los siguientes parámetros:

- **Aerodynamic drag coefficient (Coeficiente de arrastre aerodinámico):** número adimensional que representa la resistencia (tanto de forma como de superficie) que ofrece la parte de la torre expuesta al aire al paso de este. Calculado en la sección [4.3.3](#).
- **Hydrodynamic drag coefficient (Coeficiente de arrastre hidrodinámico):** número adimensional que representa la resistencia (tanto de forma como de superficie) que ofrece la parte de la torre sumergida al paso de las corrientes marinas. Calculado en la sección [4.3.3](#).
- **Hydrodynamic inertia coefficient (coeficiente hidrodinámico de inercia):** número adimensional que representa las fuerzas que son ejercidas en la parte sumergida de la torre cuando circula a su alrededor un fluido acelerado.
- **Mean water depth [m] (Media de la profundidad del agua [m]):** Valor en metros de la profundidad media del agua a lo largo del tiempo.
- **Depth of the first tower station [m] (Profundidad de la primera estación en la torre [m]):** esta profundidad determina cuantos metros de la torre se encuentran bajo tierra en el lecho marino. En el caso de este proyecto, dado que la profundidad media del agua son 40 metros, y la torre debe encontrarse enterrada 5 metros por debajo del lecho marino, esta profundidad será de 45 metros.

Al igual que a la hora de definir las palas, la torre se definirá por secciones. Debido a que no forma parte de este proyecto, la forma de la torre se simplificará en un cilindro hueco. Por lo tanto, se definirá en dos secciones: la superior y la inferior. En la zona de la derecha aparece una representación automática de las distintas modificaciones que vayamos realizando.

Como ya quedó definido el material de la torre en la parte superior de la ventana, bastará con definir los parámetros geométricos, generándose los físicos automáticamente:

- **Height above surface [m] (Altura sobre la superficie [m]):** en primer lugar se debe introducir la altura de la sección de la torre que vamos a definir sobre el nivel del mar, en metros.

- **Outside diameter [m] (Diámetro exterior [m]):** a continuación, el programa solicita que se introduzca el diámetro exterior de la torre en dicha sección, en metros. Calculado en la sección [4.3.1](#)
- **Wall tickness [mm] (Espesor de la pared [mm]):** Como último parámetro geométrico, se requiere el espesor de la pared de la torre. Calculado en la sección [4.3.2](#)
- **Material (Material):** para finalizar se debe seleccionar para cada sección el material previamente definido.

El resto de parámetros: Masa por unidad de longitud, rigidez a flexión, módulo de cizalladura, rigidez a torsión y momento polar de inercia, se generan de manera automática con los datos introducidos.

En la zona inferior de la pantalla se pueden definir los cimientos del aerogenerador. Al no ser parte de este proyecto esos datos se quedarán con el valor predeterminado.

### 3.1.5. Tren motriz

La siguiente casilla se destina a la definición del tren motriz o tren de potencia:

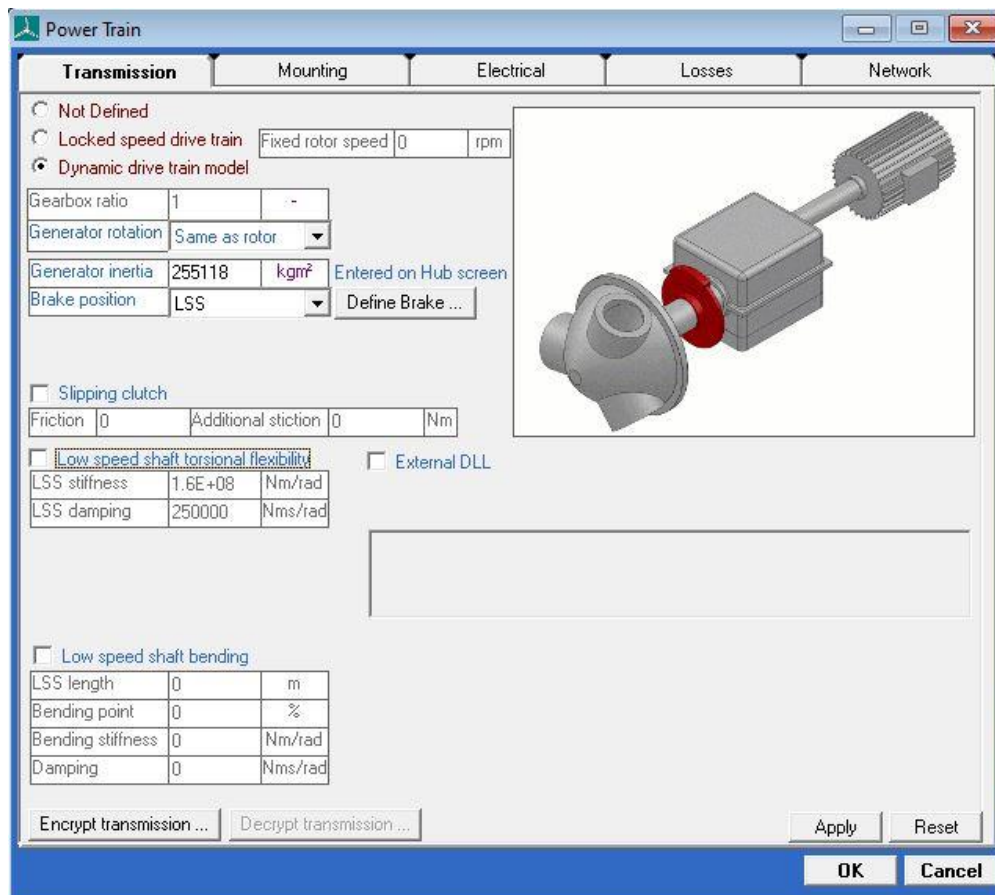
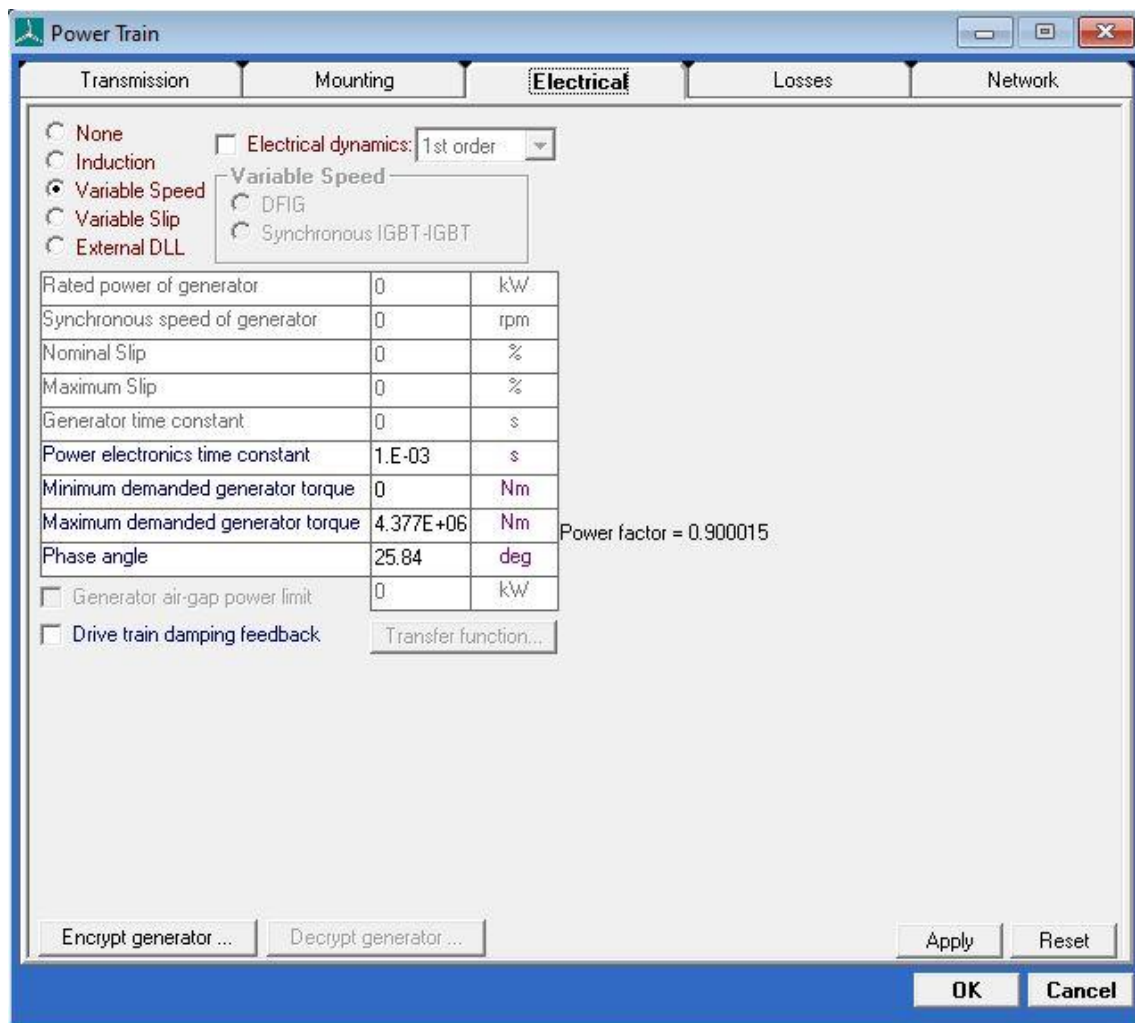


Ilustración 27: menú Power Train – Transmission – Fuente: elaboración propia

En la primera pestaña se define el tipo de transmisión. En el caso de este proyecto la transmisión es de tipo directo y gira en el mismo sentido que el rotor.

A continuación se introduce la inercia del generador, calculada en la sección 4.1 Y se elige la posición del freno del rotor, pudiendo ponerse en el eje rápido o en el lento. Dado que este modelo presenta una transmisión directa con relación de transformación 1, no es relevante elegir un lado o el otro ya que rotan a la misma velocidad.

La siguiente pestaña define los parámetros más relevantes del sistema eléctrico del aerogenerador:



**Ilustración 28: menú Power Train – Electrical – Fuente: elaboración propia**

Para este modelo se empleará un generador síncrono de imanes permanentes, el cual funciona entre 6 y 20 revoluciones por minuto (r.p.m.) teniendo en 12 r.p.m. su valor nominal.

- **Power electronics time constant [s] (Constante de tiempo de sistemas electrónicos [s]):** este parámetro define la velocidad y estabilidad de las respuestas del sistema eléctrico.
- **Minimun demanded generator torque [Nm] (Par mínimo demandado por el generador [Nm]):** Par mínimo necesario para que el generador comience a funcionar, expresado en Nm.
- **Maximun demanded generator torque [Nm] (Par máximo demandado por el generador [Nm]):** Par máximo que puede absorber el generador, en Nm. Calculado en la sección [4.1.7](#).
- **Phase angle [deg] (Ángulo de fase [deg]):** sabiendo que el factor de potencia de nuestro generador es 0.9, el ángulo de fase será:  $\alpha = \cos^{-1}(0.9) = 25.842^\circ$ .

La siguiente pestaña representará las pérdidas tanto mecánicas como eléctricas del aerogenerador:

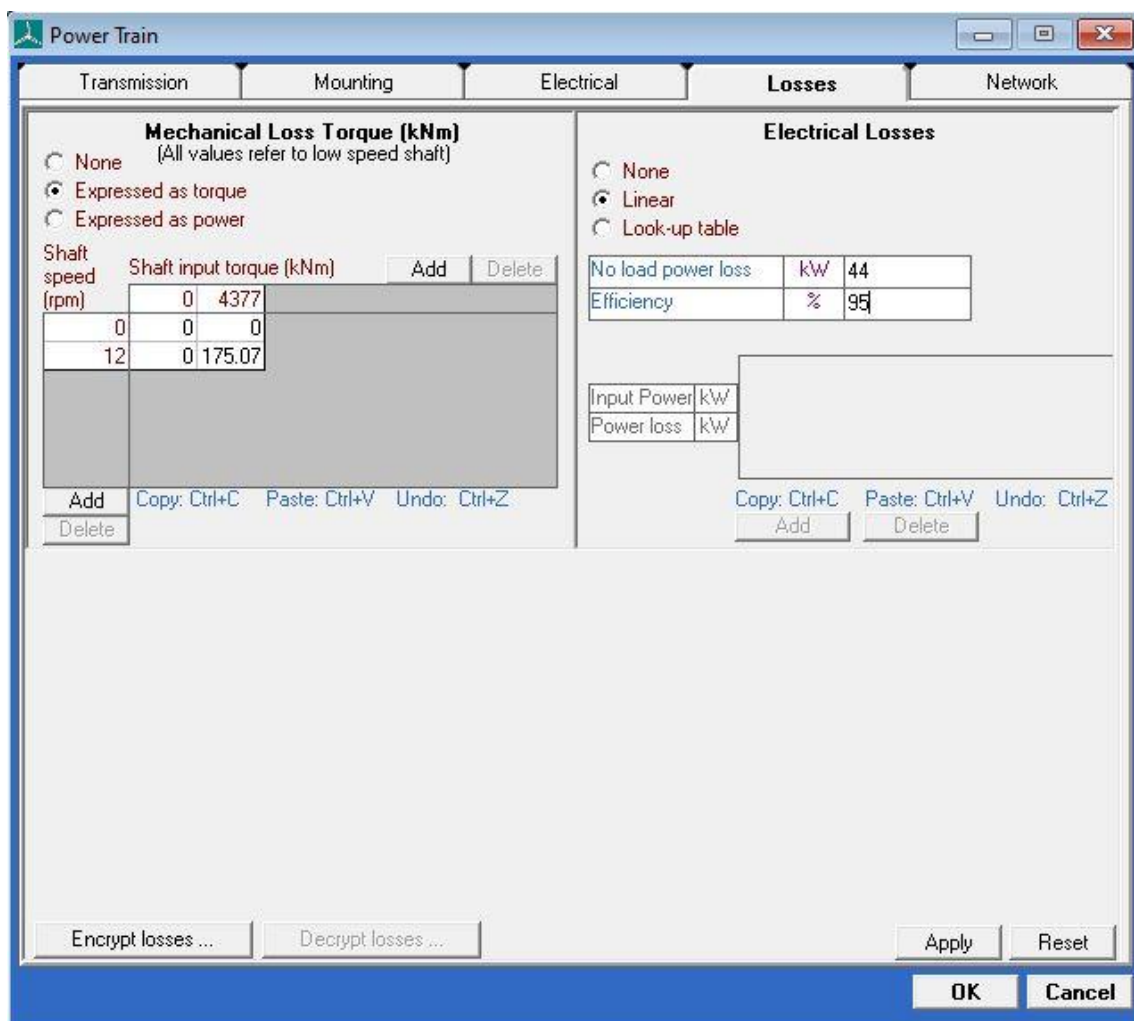
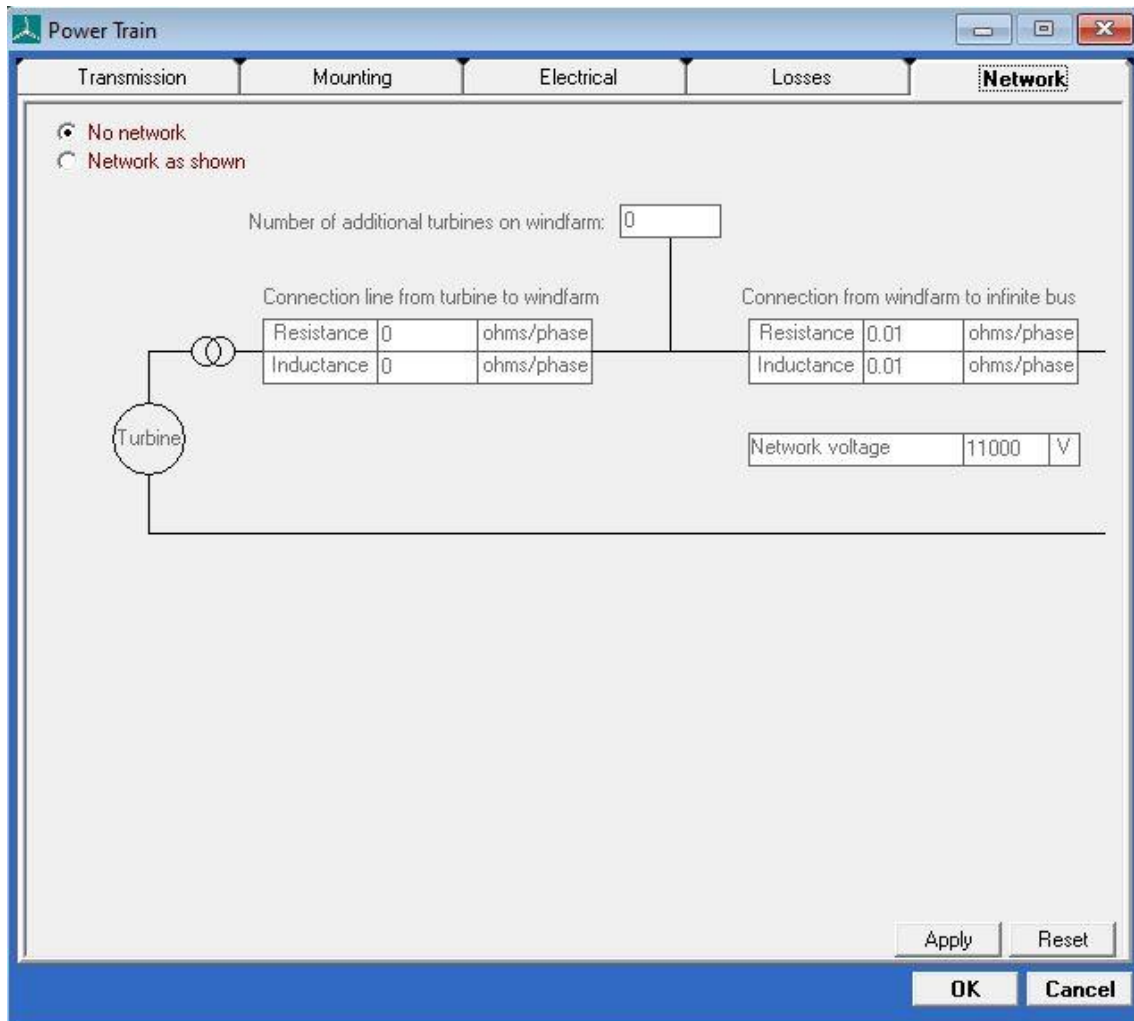


Ilustración 29: menú Power Train – Losses – Fuente: elaboración propia

A la izquierda de la pestaña se introducirán las pérdidas mecánicas expresadas en forma de par. Calculadas en la sección [4.5.5](#)

En la parte derecha de la pantalla se introducirán las pérdidas eléctricas. En primer lugar las pérdidas sin carga, que equivalen a las pérdidas de magnetización, expresadas en kw. Y en segundo lugar el rendimiento del generador.

Por último se da la posibilidad de especificar las características de la granja completa:



**Ilustración 30: menú Power Train – Network – Fuente: elaboración propia**

En este proyecto se realizarán todas las simulaciones con un solo aerogenerador, sin tener en cuenta la influencia de las líneas ni el resto de aparatos.

### 3.1.6. Góndola

En este apartado se definirán los parámetros geométricos y físicos de la góndola. Cabe destacar que la góndola de este proyecto se simplificará en un cilindro hueco, dado que no es objeto de este estudio.

Assign Geometry		
Nacelle windage: <input checked="" type="radio"/> Drag only <input type="radio"/> As an aerofoil		
Nacelle length	m	8
Nacelle height	m	8.5
Nacelle width	m	8.5
Nacelle drag coefficient	-	0.97
Location of front of nacelle measured from tower axis	m	7.2
Aerofoil dataset (from database)		

Assign Mass (excluding rotor, hub and generator)		
Mass	kg	128160
Position of Centre of Mass to side of tower axis	m	0
Height of Centre of Mass, relative to tower top	m	3.2
Position of Centre of Mass in front of tower axis	m	1
Yaw inertia (about tower axis)	kg m <sup>2</sup>	1.948E+01
Nodding inertia (about centre of mass)	kg m <sup>2</sup>	1.82E+06
Rolling inertia (about centre of mass)	kg m <sup>2</sup>	2.27E+06

Ilustración 31: menú Nacelle – Fuente: elaboración propia

En la parte superior se introducen los parámetros geométricos:

- **Nacelle length [m] (Longitud de la góndola [m]):** Longitud desde la parte trasera hasta la delantera, en metros.
- **Nacelle Height [m](Altura de la góndola[m]):** altura desde la base hasta la parte superior de la góndola, en metros.
- **Nacelle width [m](Anchura de la góndola[m]):** ancho de lado a lado de la góndola, en metros.
- **Nacelle drag coefficient [-] (Coeficiente de arrastre de la góndola [-]):** número adimensional que representa la resistencia (tanto de forma como de superficie) que ofrece la góndola al paso del flujo de aire. Calculado en la sección [4.4.8.](#)

---

En la zona inferior se centra en pedir las magnitudes físicas relacionadas con la góndola:

- **Mass [kg](Masa [Kg]):** Masa de la góndola excluyendo el rotor el buje y el aerogenerador, en kg. Calculada en la sección [4.4.1](#).
- **Position of centre of mass to side of tower axis [m] (Posición del centro de masas lateral al eje de la torre [m]):** como su nombre indica, este parámetro determina la posición del centro de masas de la góndola relativo al eje de la torre. Puesto que el modelo presentado es simétrico, este punto se localizará sobre el mismo eje. Calculado en la sección [4.4.4](#).
- **Height of centre of mass, relative to tower top [m] (Altura del centro de masas respecto del punto superior de la torre [m]):** En este caso se pide la altura del centro de masas de la góndola respecto del punto más alto de la torre, en metros.
- **Position of centre of mass in front of tower axis [m] (Posición del centro de masas delante del eje de la torre [m]):** adelanto del centro de masas de la góndola con respecto al eje de la torre, en metros.
- **Yaw inertia [ $kgm^2$ ] (Inercia de guiñada [ $kgm^2$ ):** Inercia de la góndola calculada respecto al eje de la torre (o al eje z del sistema de guiñada) en  $kgm^2$ . Calculada en la sección [4.4.5](#).
- **Nodding inertia [ $kgm^2$ ] (Inercia de cabeceo [ $kgm^2$ ):** inercia de la góndola respecto a un eje perpendicular al eje de la torre y al eje del rotor (o eje y del sistema de guiñada), expresado en  $kgm^2$ . Calculada en la sección [4.4.6](#).
- **Rolling inertia [ $kgm^2$ ](inercia de alabeo [ $kgm^2$ ):** inercia de la góndola respecto al eje del rotor (o eje x del sistema de guiñada), expresado en  $kgm^2$ . Calculada en la sección [4.4.7](#).

### 3.1.7. Control

En el apartado “Control” se definirán los parámetros de los diferentes sistemas que controlan el buen funcionamiento del aparato:

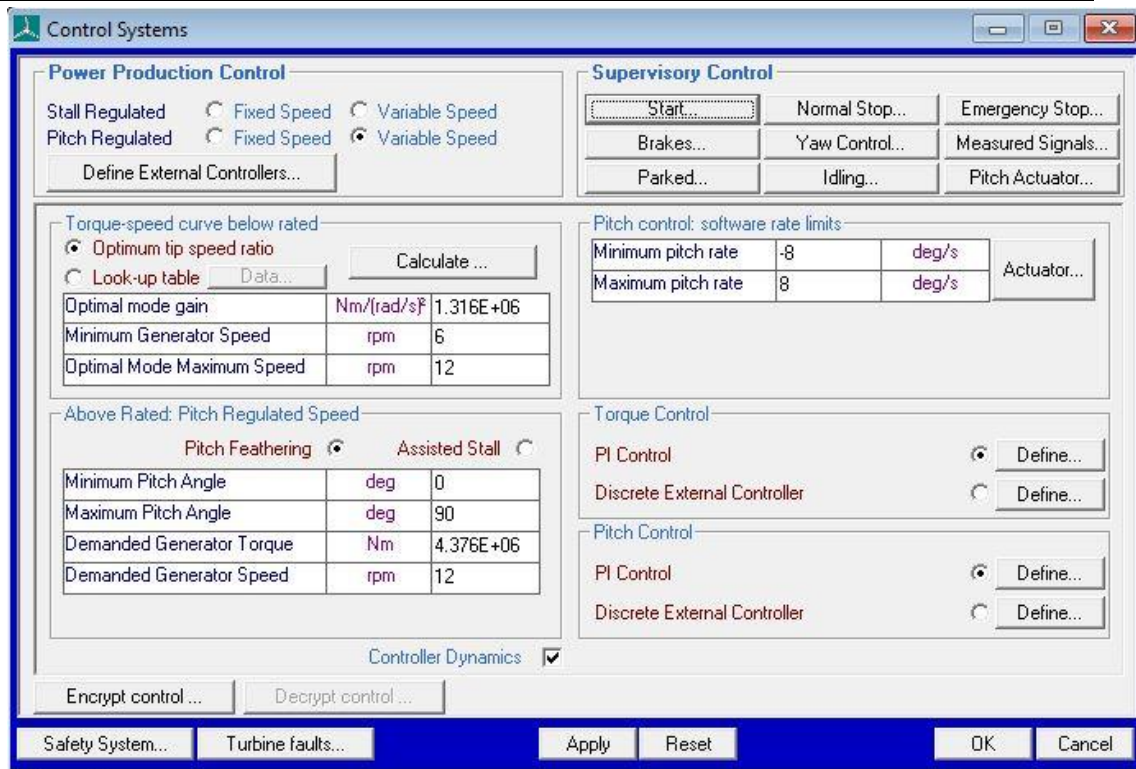


Ilustración 32: menú Control – Fuente: elaboración propia

En primer lugar, se debe seleccionar cual será la forma de regular la potencia producida. En este proyecto esta tarea la realizará el control de paso y la velocidad del rotor será variable.

- **Optimum tip speed ratio (relación de velocidad óptima):** Este parámetro establece la relación óptima entre velocidad del viento y del rotor para obtener el máximo intercambio de potencia.

Sigue la curva par-velocidad, la cual quedará definida por:

- **Optimal mode gain [Nm/(rad/s)<sup>2</sup>] (Modo óptimo de ganancia [Nm/(rad/s)<sup>2</sup>]):** este parámetro se calcula en la sección [4.6.4](#).
- **Minimum generator speed [rpm] (velocidad mínima del generador [rpm]):** Velocidad mínima de funcionamiento del generador o velocidad de acople, en revoluciones por minuto.
- **Optimal mode maximum speed [rpm] (máxima velocidad en el modo óptimo)[rpm]:** velocidad máxima a la que el coeficiente de potencia es óptimo. En revoluciones por minuto.

Control de paso:

- **Minimum pitch angle [deg] (Ángulo mínimo de paso [deg]):** límite inferior de ángulo del sistema de control de paso, en grados.
- **Maximum pitch angle [deg] (Ángulo máximo de paso [deg]):** límite superior de ángulo del sistema de control de paso, en grados.
- **Demanded generator torque [Nm] (Par demandado por el generador [Nm]):** es el par generado por el rotor cuando este funciona en condiciones nominales. Calculado en la sección [4.1.7](#).
- **Demanded generator speed [rpm] (Velocidad demandada por el generador [rpm]):** es la velocidad del rotor cuando este funciona en condiciones nominales. Expresado en revoluciones por minuto.
- **Maximum and minimum pitch rate [deg/s] (Velocidades máximas y mínimas del control de paso [deg/s]):** estos valores límites de la velocidad de rotación del sistema de control de paso son aportados por la norma GL [\[5\]](#).

A continuación, se definen los controles proporcionales integrales del control de par y el control de paso. Calculados en la sección [4.6](#).

El resto de secciones accesibles desde este menú se utilizarán para definir las diferentes estrategias de cada uno de los sistemas. En este proyecto tan solo se empleará el apartado del sistema de guiñada (Yaw system) que es el que nos permitirá definir las diferentes estrategias.

### 3.1.8. Modal

El programa permite estudiar los modos de vibración tanto de la torre como de las palas. Para definir el número de puntos de estudio se emplea el siguiente menú:

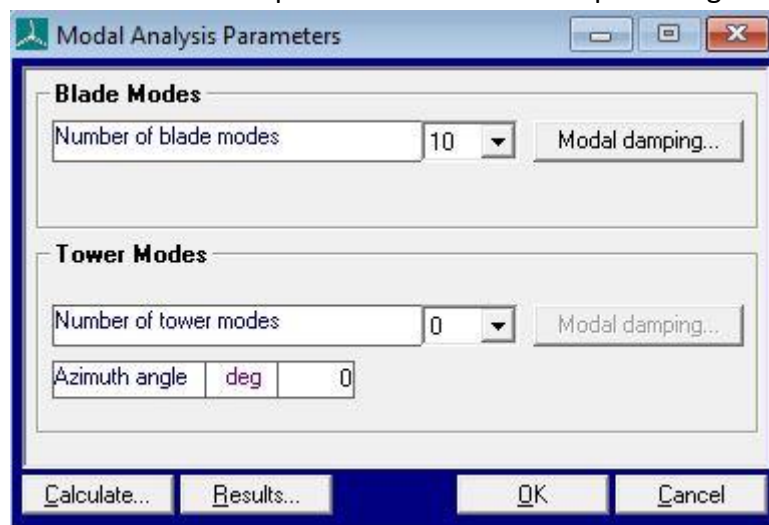
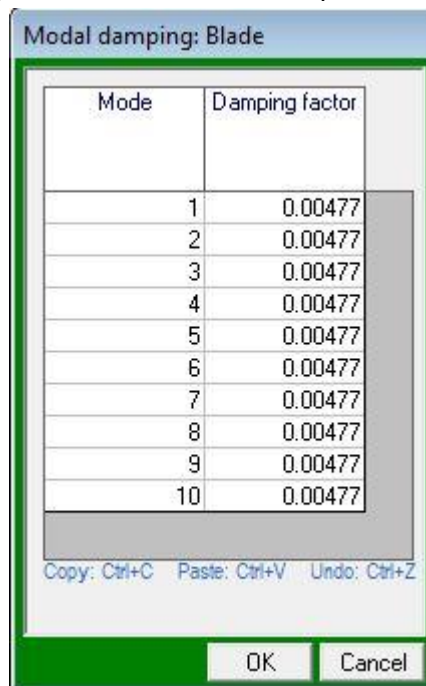


Ilustración 33: menú Modal – Fuente: generación propia

En cuanto al amortiguamiento, siguiendo las especificaciones facilitadas, este debe ser de 0.477% en los 10 puntos de estudio de las palas:

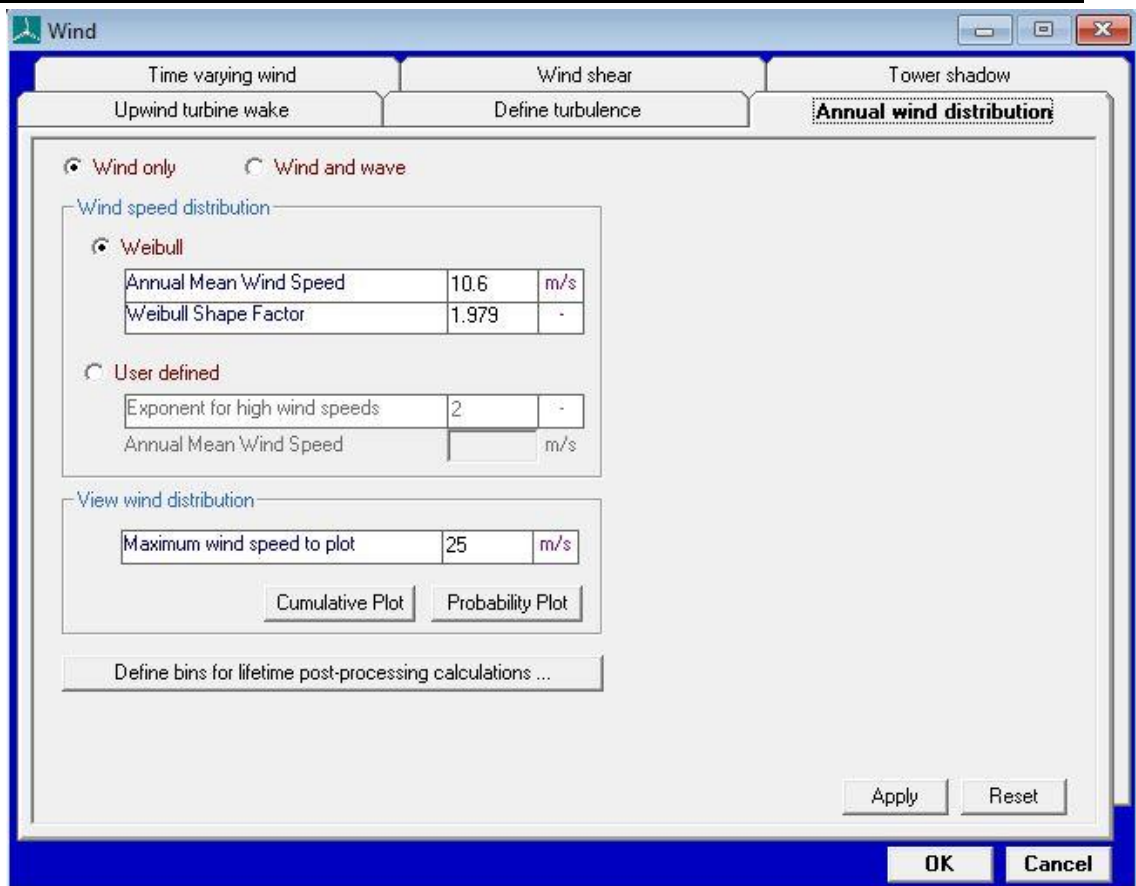


**Ilustración 34: menú Modal - Modal damping: Blade – Fuente: generación propia**

### 3.1.9. Wind

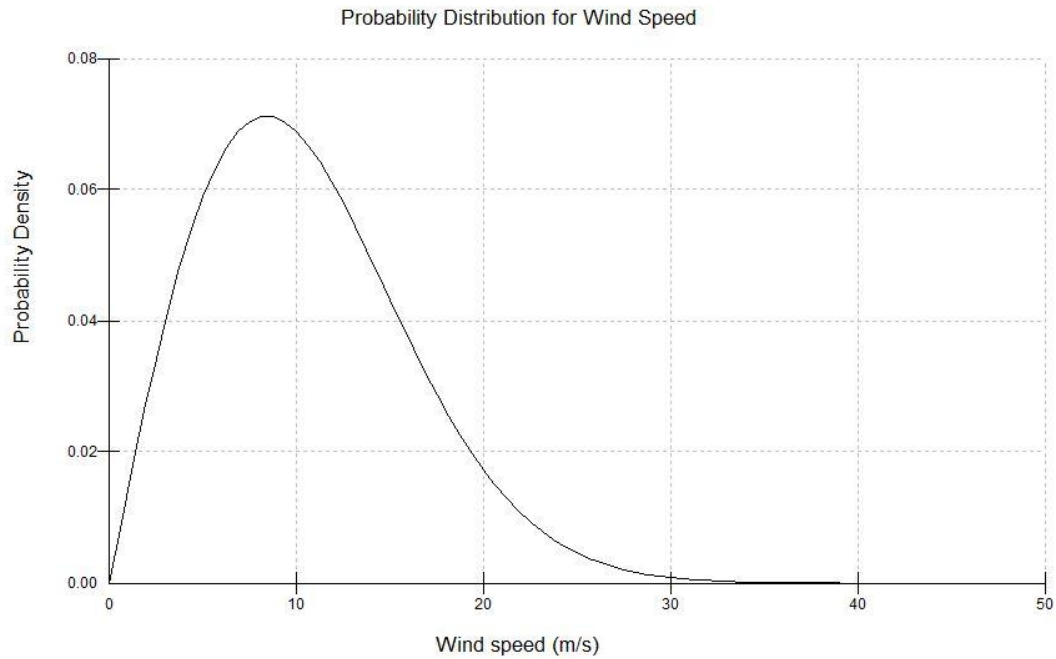
A la hora de realizar las diferentes simulaciones, se precisarán distintas condiciones de viento. Para definir las se dispone de las siguientes herramientas:

En primer lugar, se deberán definir los datos del viento a lo largo del año:



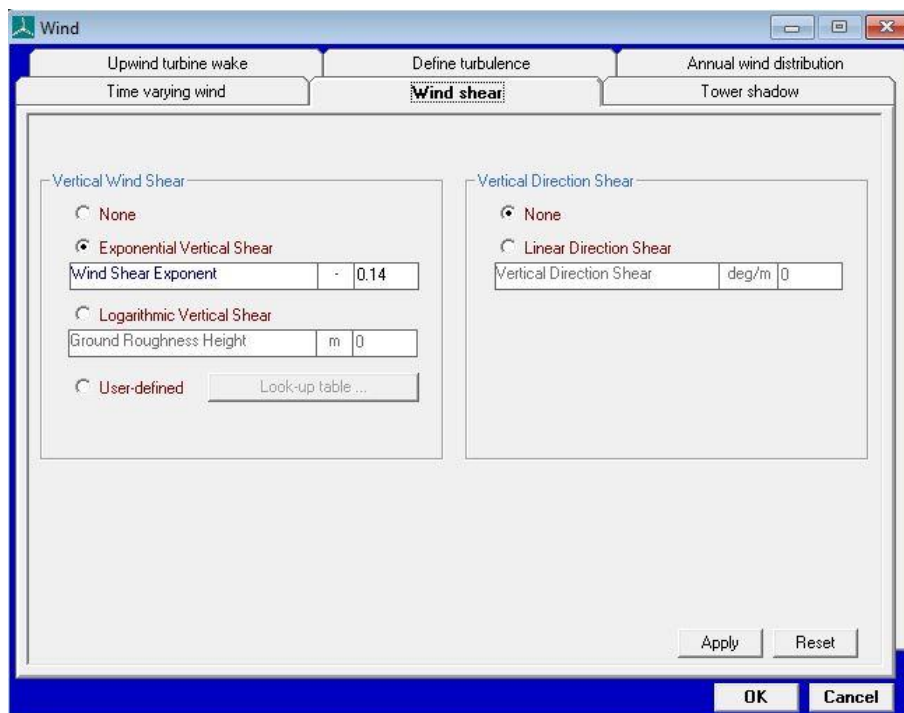
**Ilustración 35: wind – anual wind distribution – Fuente: generación propia**

- **Annual Mean Wind Speed [m/s] (Velocidad anual media del viento [m/s]):** la velocidad anual media del viento es un parámetro que depende del emplazamiento del aerogenerador, y en este caso es de 10.6 m/s.
- **Weibull Shape Factor (Factor de distribución Weibull):** factor que define la distribución que representa la velocidad del viento a lo largo del año. A continuación, se muestra la función de densidad obtenida con los datos introducidos:



**Ilustración 36: Función densidad velocidad viento – Fuente: generación propia**

A continuación, se especificará el perfil que sigue la distribución del viento:

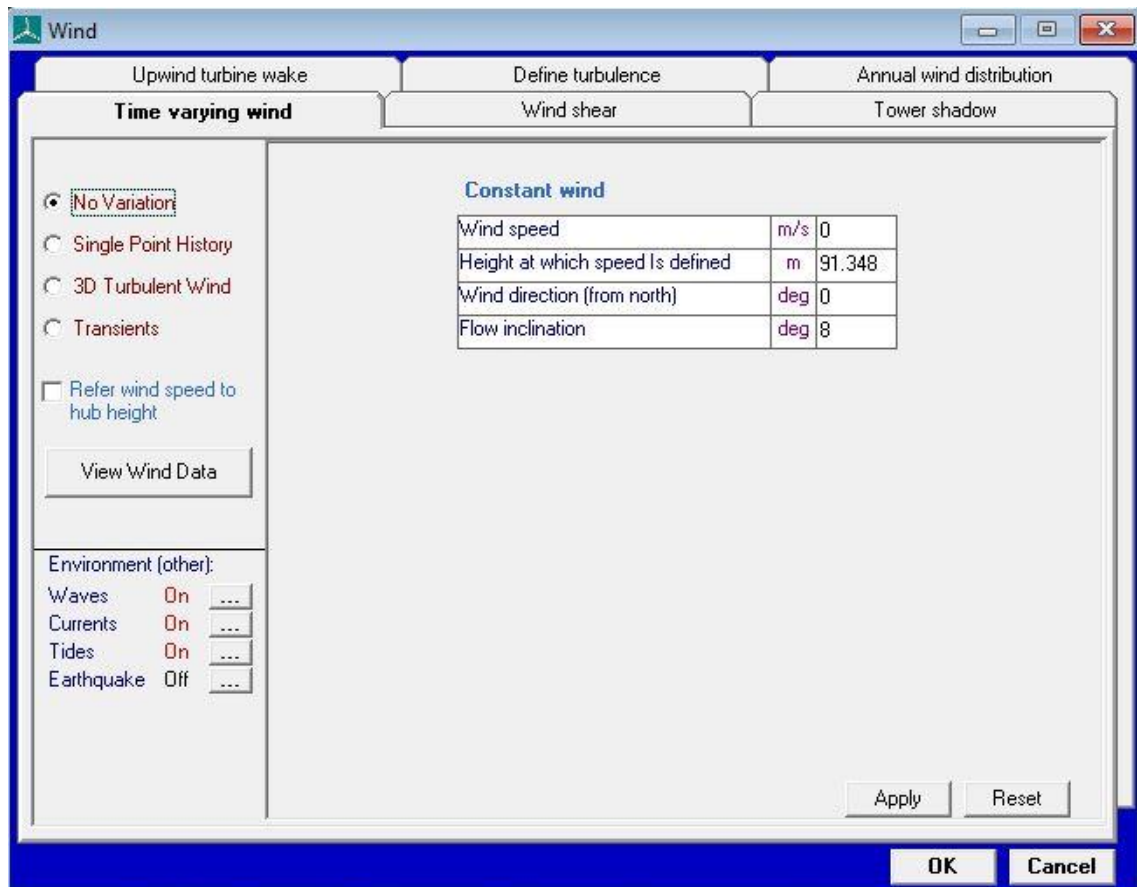


**Ilustración 37: Wind - Wind Shear – Fuente: generación propia**

La componente vertical del perfil de viento se definirá como una distribución exponencial de exponente 0.14.

Una vez definidos los distintos parámetros estadísticos del viento en el emplazamiento seleccionado, se deberán definir las condiciones de simulación que queramos realizar. Para ello, se disponen de varias herramientas:

Si se quiere un flujo de viento invariante, se empleará el siguiente menú:



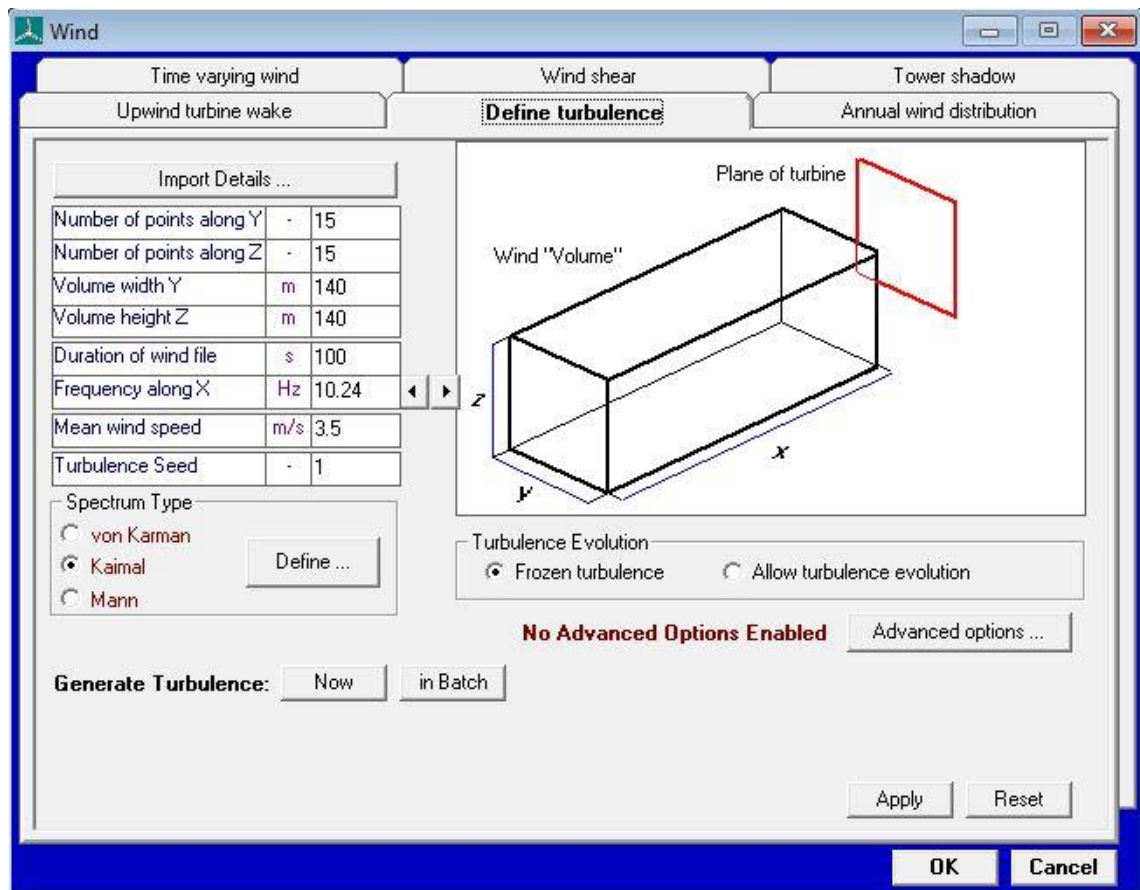
**Ilustración 38: menú Wind - Time varaying wind – No variation – Fuente: elaboración propia**

Los parámetros a definir son los siguientes:

- **Wind speed [m/s] (Velocidad del viento [m/s]):** Como su propio nombre indica, aquí se establecerá la velocidad del viento en metros por segundo.
- **Height at wich the speed is defined [m](Altura a la que el viento está definido [m]):** indica en qué punto se aplica la velocidad definida. En este trabajo, esa velocidad siempre estará definida en el buje, expresada en metros.

- **Wind direction (from North)[Deg](Dirección del viento (desde el Norte)[deg]):** Dirección del flujo de viento en grados. Siendo 0º dirección Norte, 90º dirección Este, 180º dirección Sur y -90º dirección Oeste.
- **Flow inclination[deg](Inclinación del flujo[deg]):** Este parámetro define la inclinación del flujo de aire respecto de la horizontal. Atendiendo a la norma IEC [6], el ángulo debe ser como mínimo 8º. Esta norma fue concebida principalmente para aerogeneradores terrestres, donde la inclinación del flujo es mayor debida a la pendiente del terreno que rodea al aerogenerador. Sin embargo, en el mar este ángulo es mucho menor, por lo que se elige el menor ángulo posible atendiendo a esta norma.

Si se precisa una turbulencia tridimensional, deberá ser definida en la siguiente interfaz:

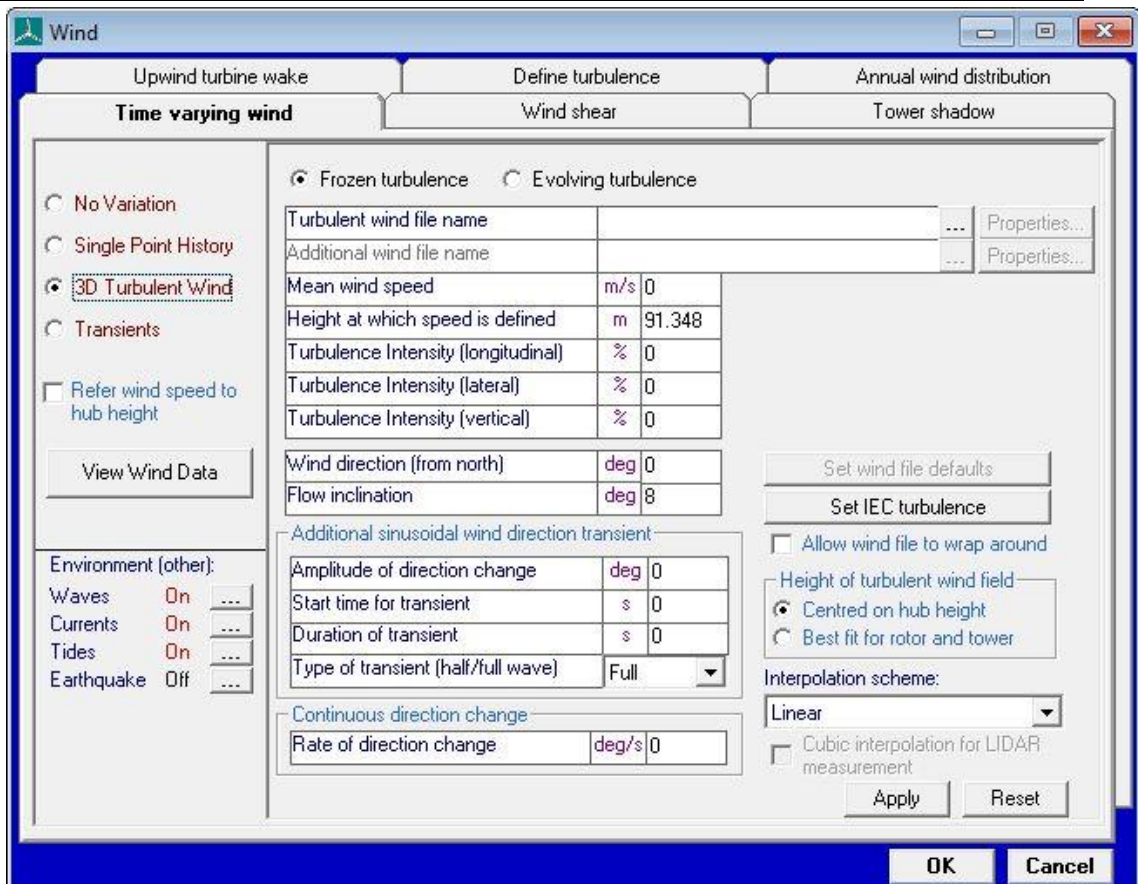


**Ilustración 39: menú Wind –Define Turbulence – Fuente: elaboración propia**

Como indica la figura, para definir una turbulencia tridimensional, se definirá un volumen de viento que atravesará el área de barrido de las palas.

- 
- **Number of points along Y/Z [-] (número de puntos a lo largo de Y/Z [-]):** cuanto mayor sea el mallado realizado en los ejes, mayor precisión se obtendrá. Por otro lado, a mayor mallado, también aumentará considerablemente el tiempo de cada una de las simulaciones. Por esta razón, hay que intentar buscar un buen compromiso entre calidad y duración de la simulación.
  - **Volumen width Y [m] (Anchura del volumen Y [m]):** aquí se definirá la anchura que tendrá el volumen de aire simulado. Es necesario que este volumen abarque por completo el área de barrido de las palas (diámetro rotor aerodinámico = 130m), en este modelo, con 140m de ancho será suficiente.
  - **Volumen height Z [m] (Altura del volumen Z [m]):** aquí se definirá la altura que tendrá el volumen de aire simulado. Es necesario que este volumen abarque por completo el área de barrido de las palas (diámetro rotor aerodinámico = 130m), en este modelo, con 140m de alto será suficiente.
  - **Duration of wind file [s] (duración del archivo de viento [s]):** el tiempo de simulación necesario viene definido por la norma GL[5] y debe ser de 10 minutos para que una simulación se pueda considerar válida. Por motivos de la licencia académica, Bladed 4.6 solo permite hacer simulaciones de un máximo de 60 segundos. Por este motivo, el archivo de viento debe ser de una duración igual o superior a 60 segundos.
  - **Frequency along X [Hz] (Frecuencia a lo largo de X [Hz]):** esta frecuencia representa la frecuencia de muestreo. Que nos indica el número de muestras por segundo que formará la turbulencia. Este dato esta generado de forma automática por Bladed 4.6.
  - **Mean wind speed [m/s] (Media de la velocidad del viento [m/s]):** velocidad media de la turbulencia en el punto de definición.
  - **Turbulence seed [-](semilla de turbulencia [-]):** modificando el valor de esta casilla entre 0 y 999 conseguiremos diferentes campos de turbulencias para los mismos parámetros insertados y bajo las mismas estadísticas.
  - **Spectrum type (tipo de espectro):** en esta sección se podrá seleccionar el tipo de espectro de turbulencia a generar. Para la selección de este campo se atendió a los requerimientos de la norma GL[5] donde se especifica el uso del tipo "Kaimal"

Una vez definida la turbulencia, se genera y se guarda el archivo para posteriormente introducirlo en la siguiente pestaña:



**Ilustración 40: wind - time varying wind - 3D Turbulent Wind – Fuente: elaboración propia**

Una vez seleccionado “3D Turbulent Wind” en el menú de time varying wind deberemos cargar el archivo que previamente habíamos generado en la primera celda (Turbulent wind file name). A continuación, el programa solicita los siguientes datos adicionales sobre el viento:

- **Mean wind speed [m/s] (Media de la velocidad del viento [m/s]):** velocidad media de la turbulencia en el punto de definición. Debe coincidir con la velocidad definida previamente en el archivo de la turbulencia.
- **Height at which the speed is defined [m](Altura a la que el viento está definido [m]):** indica en qué punto se aplica la velocidad definida. En este trabajo, la velocidad siempre estará definida en el buje, expresada en metros.
- **Turbulence intensity (longitudinal) [%] (Intensidad de la turbulencia (longitudinalmente) [%]):** desviación estándar de la intensidad del viento en la componente longitudinal calculado en la sección [4.8.1](#). Este parámetro depende de la velocidad de la turbulencia definida. El resto de componentes (lateral y vertical) no serán definidas ya que la licencia educativa del Bladed 4.6 no permite trabajar con ellas.

- **Wind direction (from North)[Deg](Dirección del viento (desde el Norte)[deg]):** Dirección del flujo de viento en grados. Siendo 0º dirección Norte, 90º dirección Este, 180º dirección Sur y -90º dirección Oeste.
- **Flow inclination[deg](Inclinación del flujo[deg]):** Este parámetro define la inclinación del flujo de aire respecto de la horizontal. Atendiendo a la norma IEC [6], este ángulo debe ser como mínimo 8º. La norma fue concebida principalmente para aerogeneradores terrestres, donde la inclinación del flujo es mayor debida la pendiente del terreno que rodea al aerogenerador. Sin embargo, en el mar este ángulo es mucho menor, por lo que se elige el menor ángulo posible atendiendo a esta norma.

A la hora de definir un transitorio en el viento se puede realizar tanto con la turbulencia definida como se haría utilizando las casillas inferiores, o en el menú “Transient” donde el viento no es turbulento si no constante:

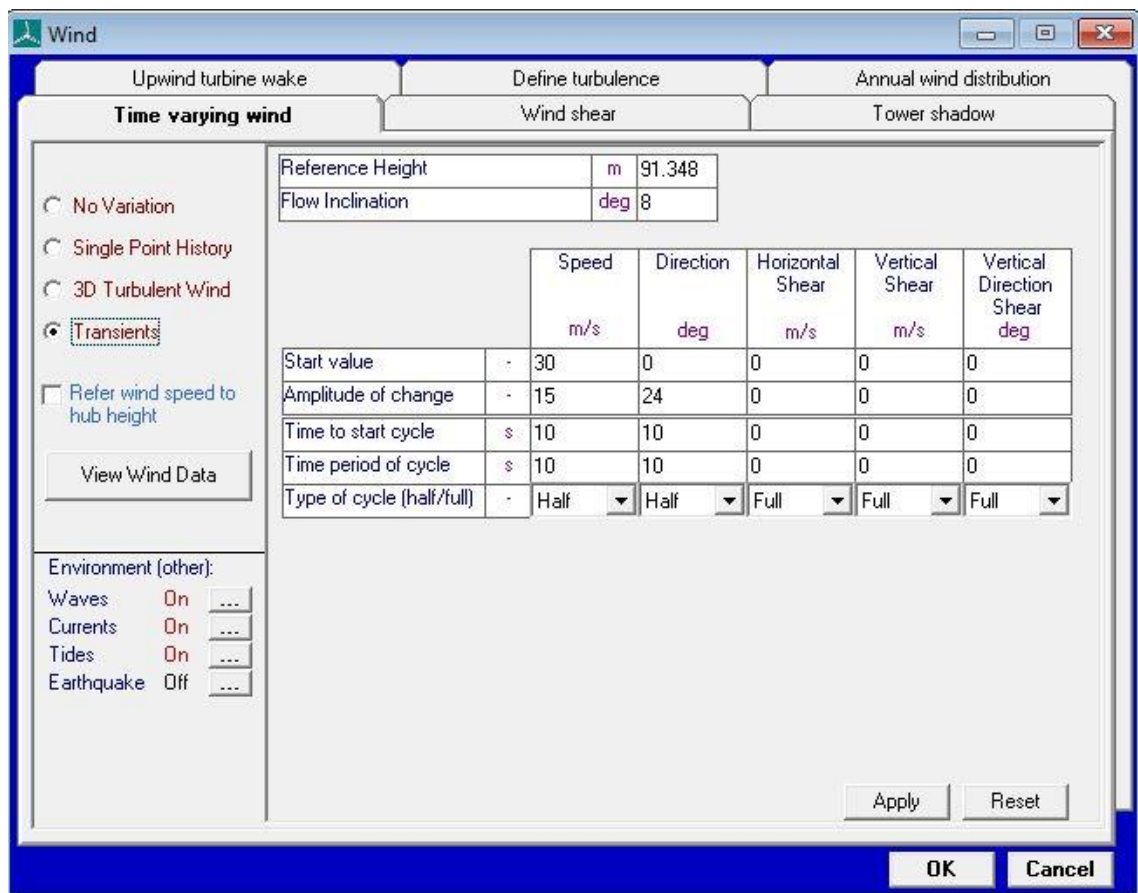


Ilustración 41: wind - Time varying – Transient – Fuente: elaboración propia

En este trabajo, siempre que se ha introducido un transitorio se ha hecho utilizando este método. El cual solicita los siguientes datos:

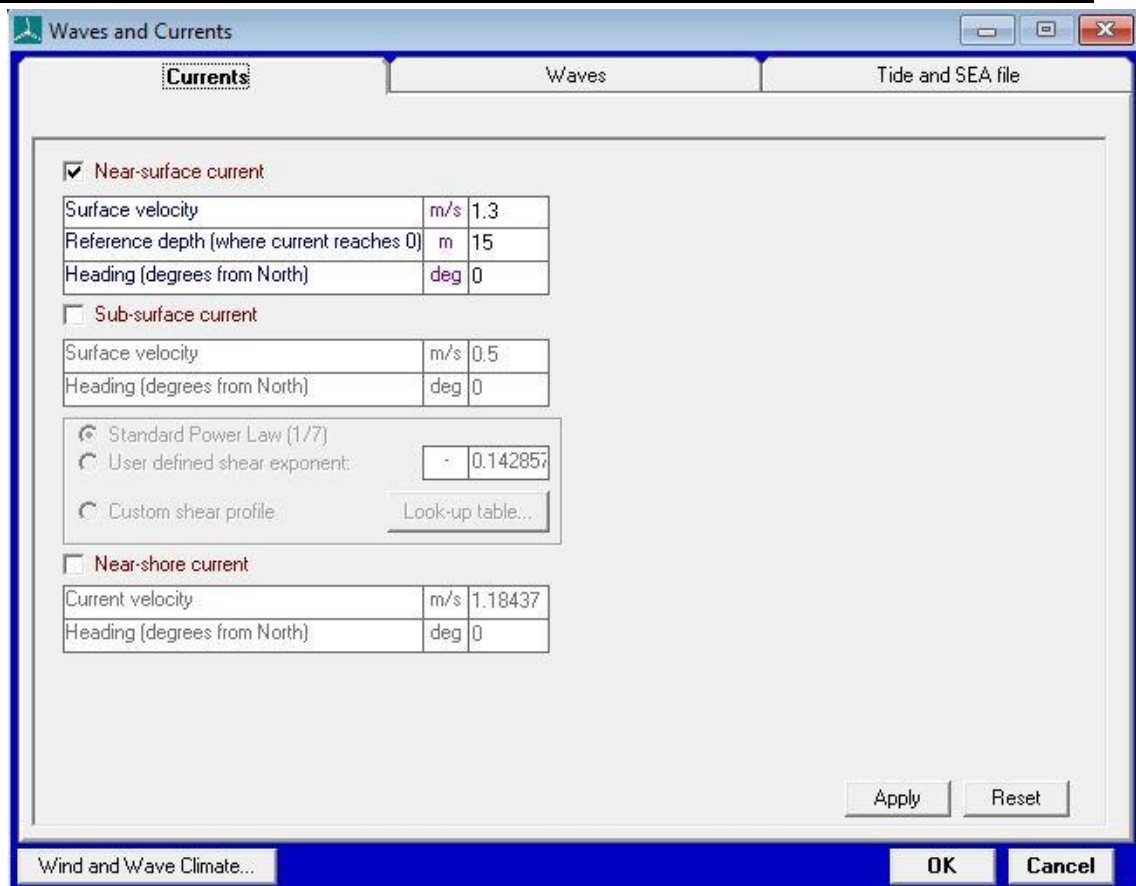
- 
- **Reference height [m](Altura de referencia [m]):** indica en qué punto se aplica la velocidad definida. En este trabajo, esa velocidad siempre estará definida en el buje, expresada en metros.
  - **Flow inclination[deg](Inclinación del flujo[deg]):** define la inclinación del flujo de aire respecto de la horizontal. Atendiendo a la norma IEC [6], el ángulo debe ser como mínimo 8°. La norma fue concebida principalmente para aerogeneradores terrestres, donde la inclinación del flujo es mayor debida la pendiente del terreno que rodea al aerogenerador. Sin embargo, en el mar este ángulo es mucho menor, por lo que se elige el menor ángulo posible atendiendo a esta norma.

En la tabla a continuación, de nuevo se han obviado los parámetros horizontales y verticales debido a la limitación académica de Bladed 4.6. Por lo tanto, solo se definirá el transitorio en velocidad y dirección del viento:

- **Start value:** Valor de inicio de los distintos parámetros.
- **Amplitude of change:** Amplitud de cambio de los distintos parámetros durante el transitorio.
- **Time to start cycle:** Tiempo transcurrido en la simulación antes de comenzar a realizar el transitorio, en segundos.
- **Time period of cycle:** tiempo de duración del transitorio, en segundos. Aumentando o dejando a 0 este valor podemos conseguir un escalón de viento o una onda sinusoidal de periodo variable según se desee.
- **Type of cycle (half/full):** tipo de ciclo. Si seleccionamos full (completo) se obtendrá un transitorio que comienza y termina en la misma magnitud de parámetro, encontrando el máximo de la amplitud en la mitad del transitorio. Por otro lado, si se selecciona "Half" (medio), el transitorio comenzará en su valor inicial, y finalizará en el valor de máxima amplitud.

### 3.1.10. Condiciones marinas

Al tratarse de un aerogenerador marino, es de vital importancia tener en consideración las condiciones del medio marino. Al igual que para el viento, se dispone de unos menús donde se podrán definir todos los parámetros:

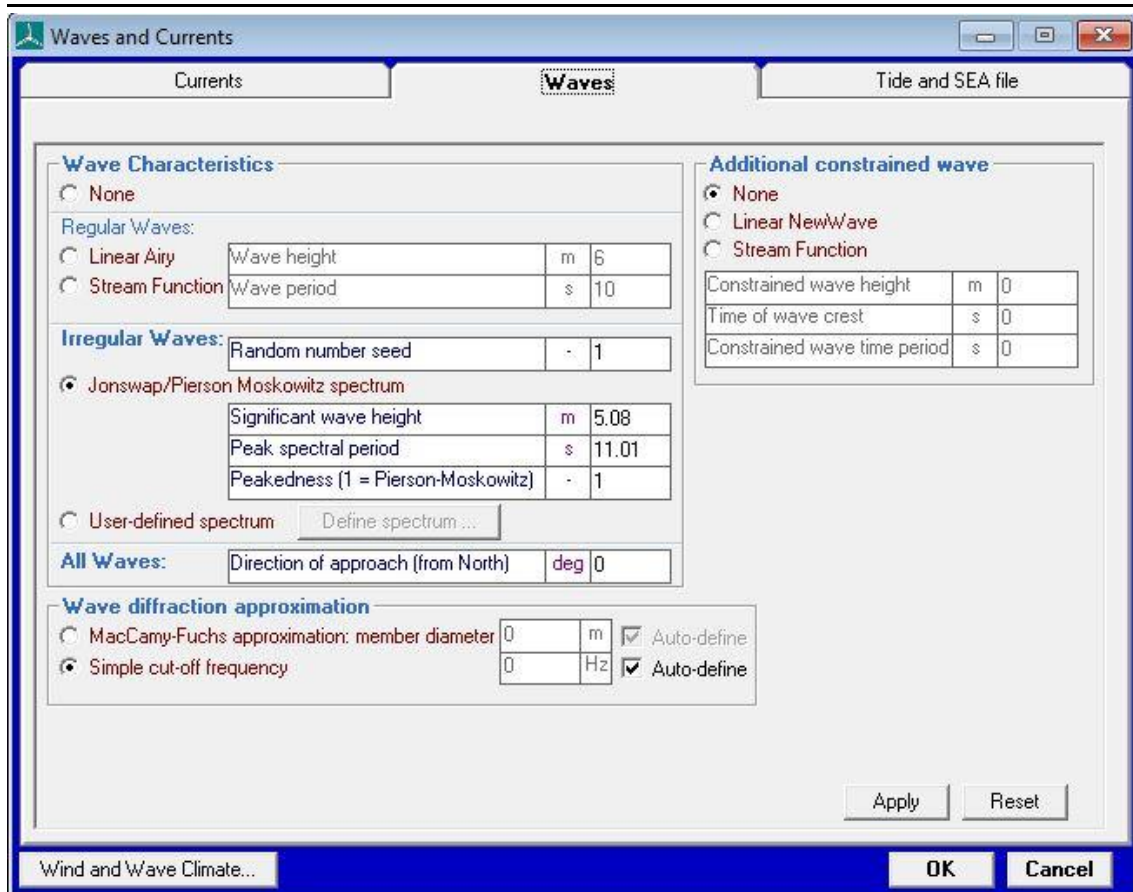


**Ilustración 42: Sea state – Currents – Fuente: laboración propia**

En primer lugar se definirán las corrientes de la zona, se permite trabajar tanto con corrientes superficiales como con corrientes sub superficiales e incluso con corrientes cercanas a la costa:

- **Surface velocity [m/s]:** velocidad superficial de la corriente en m/s
- **Reference depth (where current reaches 0)[m]:** profundidad de referencia donde la corriente alcanza el 0, en metros.
- **Heading (degrees from North) [deg]:** Dirección de la corriente en grados, tomando el Norte como 0º.

El siguiente paso es definir el oleaje:

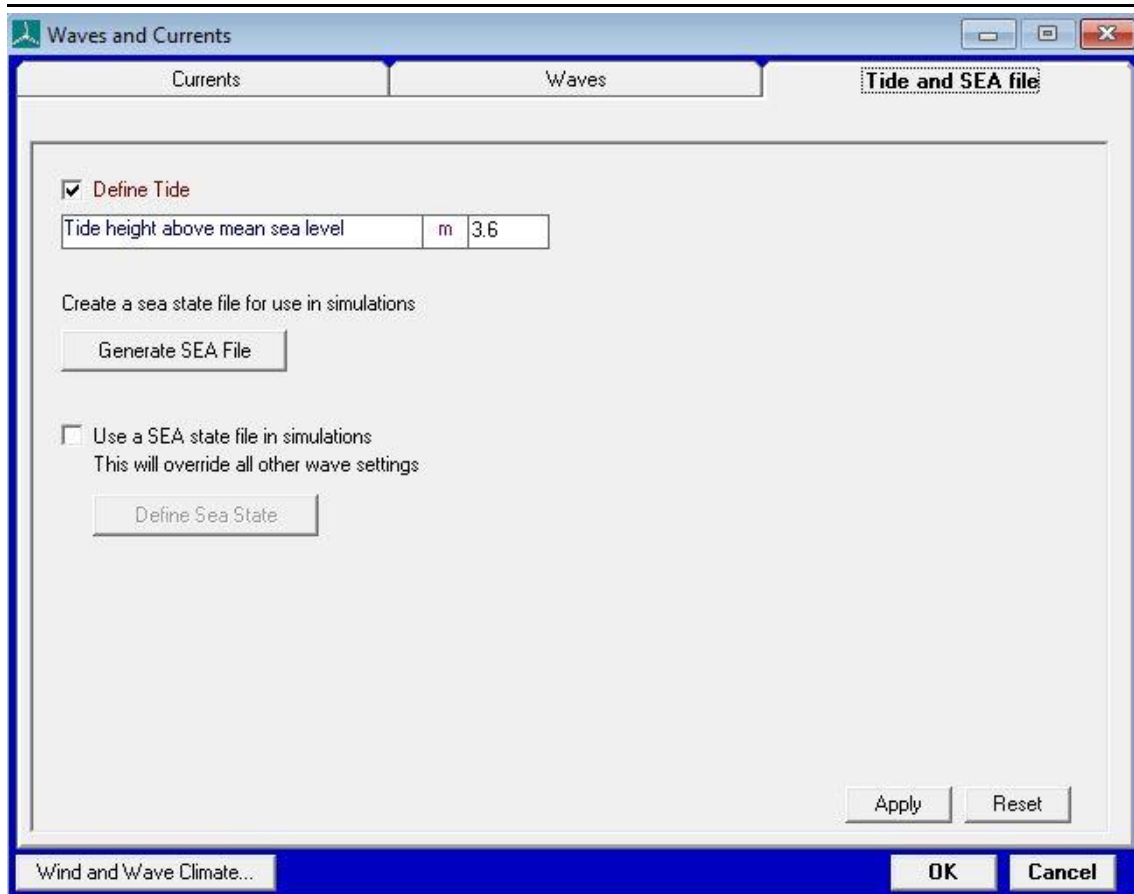


**Ilustración 43: Sea state – Waves – Fuente: elaboración propia**

Para definir el oleaje se empleará el espectro de Jonswap/Pierson Moskowitz que define olas irregulares.

- **Random number of seed (Número aleatorio de semilla):** Al igual que en el espectro de turbulencia, se permite generar diferentes condiciones de oleaje bajo las mismas condiciones modificando este valor.
- **Significant Wave Height [m]:** Altura significativa de las olas expresada en metros.
- **Peak Spectral period [s]:** periodo del espectro de picos en segundos.

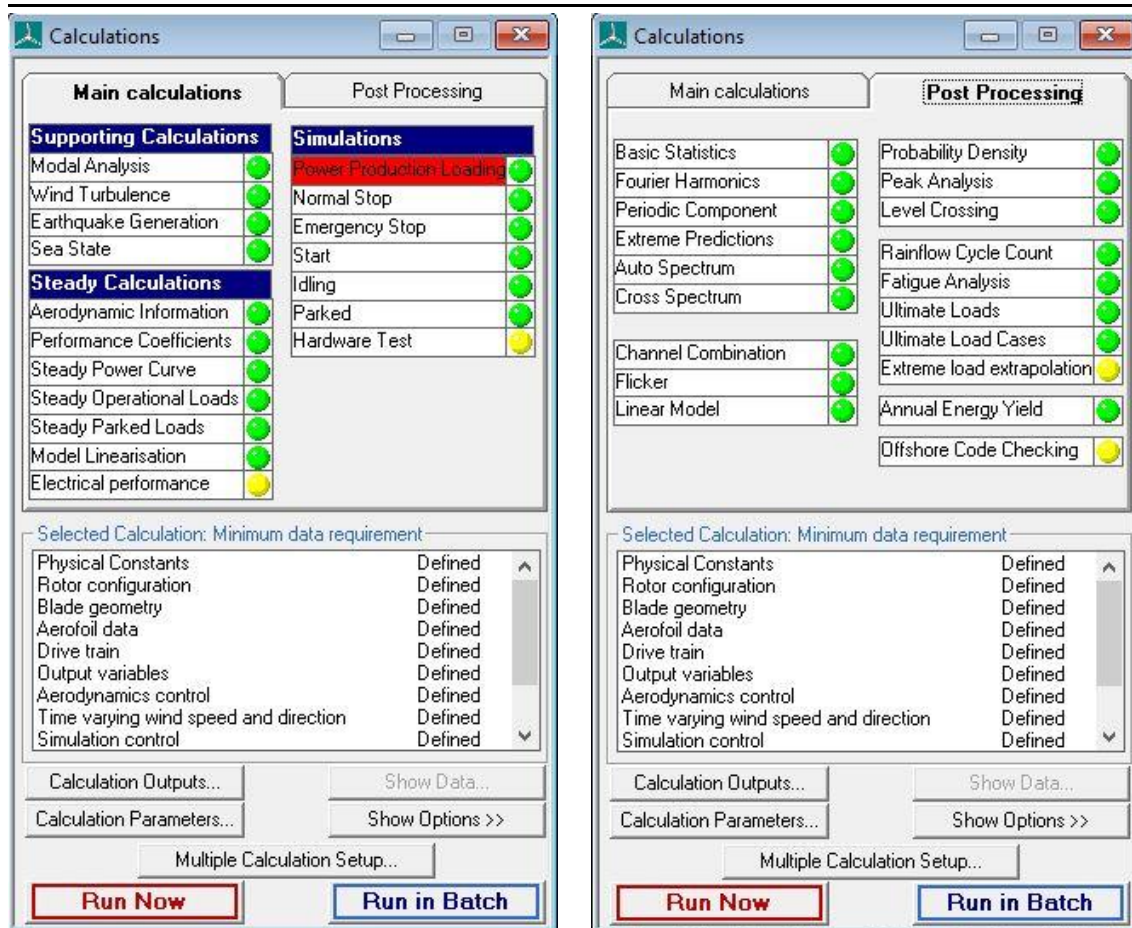
Por último, se establecerán los parámetros referentes a la marea:



**Ilustración 44: sea state - Tide and SEA file – Fuente: elaboración propia**

**Tide height above mean sea level [m]:** Altura de la marea por encima del nivel medio del mar, en metros.

Con esto el modelo ya quedaría definido de forma completa, quedando únicamente por explicar los menús de simulación, que son los siguientes:



**Ilustración 45: menús simulación – Fuente: elaboración propia**

A través de las distintas opciones se pueden calcular y determinar todos los parámetros necesarios de un aerogenerador. Este proyecto hará un mayor uso de la opción: “Cargas en producción de energía”.

### 3.2. Cálculo y simulación del comportamiento básico en carga del modelo

Para el correcto dimensionamiento del sistema de guiñada, se realizarán diversas simulaciones. Atendiendo a la norma GL[5] las simulaciones necesarias para garantizar que el sistema es fiable es muy amplia y abarca todo tipo de situaciones. Bajo la recomendación del tutor del proyecto, se redujeron los casos de estudio a aquellos que afectaban directamente al sistema de orientación, los cuales son los más relevantes a la hora del diseño de este. Son los siguientes:

- DLC 1.1
- DLC 1.3

Como se puede observar en la siguiente tabla extraída de la norma GL[5]:

Design situation	DLC	Wind conditions <sup>1</sup>	Marine conditions	Other conditions	Type of analysis	Partial safety factors
1. Power production	1.1	NTM $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Irregular sea state with $H_s(V)$	MIS, MUL	F/U	*/N
	1.2	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Irregular sea state with $H_s(V)$		U	E
	1.3	ECD $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_r$	Irregular sea state with $H_s(V)$ or regular waves with $H = H_s(V)$	MIS, MUL	U	E

**Tabla 1: DLCs – Fuente: norma GL[5]**

Cada simulación debe cumplir ciertas condiciones para que se consideren buenas. En el caso de los dos casos a realizar en este proyecto se deben realizar en una situación de producción de energía.

En el DLC ( desing load case / Caso de diseño de carga ) 1.1, las condiciones de viento deberán ser NTM (Normal Turbulence Model / Modelo de turbulencia normal) y la velocidad del viento se deberá encontrar entre la velocidad de acople y la velocidad de apagado del aerogenerador. En cuanto a las condiciones marinas, se esperan unas condiciones irregulares con  $H_s(V)$  lo que quiere decir que deberán tener una altura significativa correspondiente a  $V_{hub}$  (velocidad del viento correspondiente a la altura del buje). Además se debe considerar la desalineación del mar y del viento (MIS/MUL). Este caso de carga debe estudiarse tanto a fatiga como a carga última.

En cuanto al DLC 1.3, la diferencia con el DLC anterior es la adición de transitorios de cambio de velocidad y de viento de manera simultánea. Además, este caso no será necesario estudiarlo a fatiga.

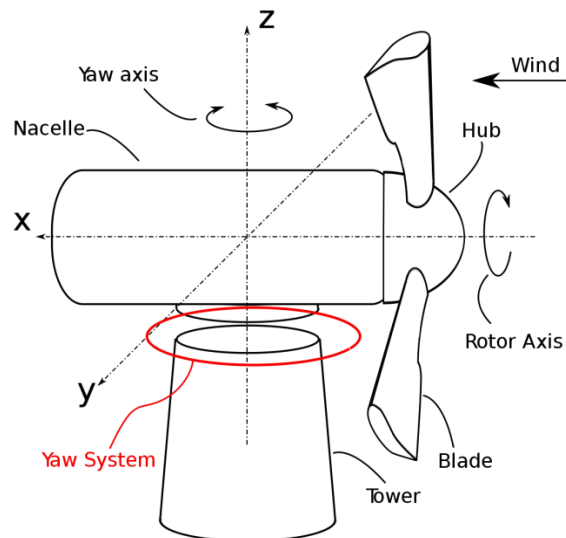
En este primer apartado relacionado con la simulación del modelo, se llevará a cabo la realización del DLC 1.1 sin sistema de orientación. Una vez obtenidos los resultados, se diseñaran nuevas estrategias de orientación y se someterán de nuevo a la misma prueba para ver cómo responden cada una de ellas a las cargas.

### **DLC 1.1**

Como ya se ha explicado previamente, en este caso de carga, se simulará el modelo bajo condiciones de turbulencia normales (definidas en el menú “Wind–Define Turbulence” utilizando el espectro de Kaimal) y a una velocidad comprendida entre los límites de operación del aerogenerador. Para obtener una visión más amplia del comportamiento del aparato, se realizarán las simulaciones a 3 velocidades: a la velocidad de acoplamiento (3.5 m/s), a velocidad nominal teórica (11.686 m/s

(calculada en la sección 4.6.1) y a velocidad de desacople (30m/s). Para cada una de estas velocidades, se deberá tener en cuenta la desviación típica longitudinal de cada una de estas velocidades calculado en la sección 4.8.1. Además, en todo momento el aerogenerador se encontrará perfectamente alineado con el viento, dado que esta será la situación de mayores esfuerzos.

El sistema de referencia empleado para referirse a los diferentes esfuerzos del sistema de guiñada es el siguiente:



**Ilustración 46: sistema referencia Yaw System – Fuente [25]**

Siendo el eje X el coincidente con el eje del rotor, el eje Z el eje coincidente con el eje de la torre, y el eje Y el eje perpendicular a los dos ejes anteriores.

A continuación, se muestra una tabla con los datos obtenidos en las primeras simulaciones pertenecientes al caso de carga DLC 1.1, cuando el sistema no presenta ningún tipo de sistema de orientación:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	1,25E+05	<b>-9,64E+06</b>	-6,42E+05	7,35E+06	4,52E+04	-9,87E+03	<b>-2,73E+06</b>	4,52E+04	4,24E+04
<b>Mean</b>	2,52E+05	-8,41E+06	1,44E+05	8,41E+06	8,84E+04	-1,22E+03	-2,71E+06	8,85E+04	9,88E+04
<b>Max</b>	3,64E+05	-7,35E+06	9,80E+05	<b>9,64E+06</b>	1,27E+05	1,28E+04	<b>-2,70E+06</b>	1,27E+05	1,37E+05

**Tabla 2: DLC1.1 – Sin sistema de orientación - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,20E+06	<b>-8,46E+06</b>	-2,20E+06	4,73E+06	5,09E+05	-7,05E+04	<b>-2,84E+06</b>	5,10E+05	3,80E+06
<b>Mean</b>	3,79E+06	-6,11E+06	8,95E+05	7,23E+06	6,34E+05	-7,32E+03	-2,77E+06	6,34E+05	4,45E+06
<b>Max</b>	4,53E+06	-2,02E+06	3,25E+06	<b>9,32E+06</b>	7,52E+05	6,22E+04	<b>-2,71E+06</b>	7,52E+05	5,19E+06

**Tabla 3: DLC1.1– Sin sistema de orientación - Velocidad viento 11.686 m/ s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,51E+06	<b>-1,29E+07</b>	-7,49E+06	4,20E+06	-1,79E+05	-2,27E+05	<b>-2,91E+06</b>	7,91E+03	5,24E+06
<b>Mean</b>	4,41E+06	-5,60E+06	-2,03E+06	7,32E+06	3,04E+05	-1,63E+04	-2,70E+06	3,15E+05	5,50E+06
<b>Max</b>	5,35E+06	1,73E+06	4,55E+06	<b>1,35E+07</b>	7,14E+05	1,85E+05	<b>-2,51E+06</b>	7,18E+05	5,86E+06

**Tabla 4: DLC1.1– Sin sistema de orientación - Velocidad viento 30 m/ s – Fuente: elaboración propia**

Todas las simulaciones anteriores han sido realizadas con el viento las corrientes marinas y el oleaje con dirección norte. Se han realizado simulaciones con direcciones desalineadas de estos tres componentes, como sugiere la norma GL [\[5\]](#) y el resultado no ha sufrido ningún tipo de variación. Al ser un sistema aislado del mar se asume que el estado del mar no le influye, a diferencia de elementos como la torre que si debe tenerlo en cuenta. De ahora en adelante, todas las simulaciones se realizarán con la dirección del viento, corrientes marinas y oleaje alineadas y provenientes del Norte inicialmente.

Como era de esperar, a medida que incrementa la velocidad del viento incrementan las cargas en el sistema. Los momentos más grandes detectados (en valor absoluto) son los aplicados en el eje xy. Mientras que las fuerzas más elevadas (en valor absoluto) es Fz la cual corresponde la fuerza vertical, principal mente producida por la masa del conjunto góndola-rotor.

### 3.3. Diseño de nuevas estrategias de orientación

Para el diseño de las diferentes estrategias de orientación se hará uso de la siguiente interfaz de Bladed 4.6 que se encuentra en la sección de "Control":

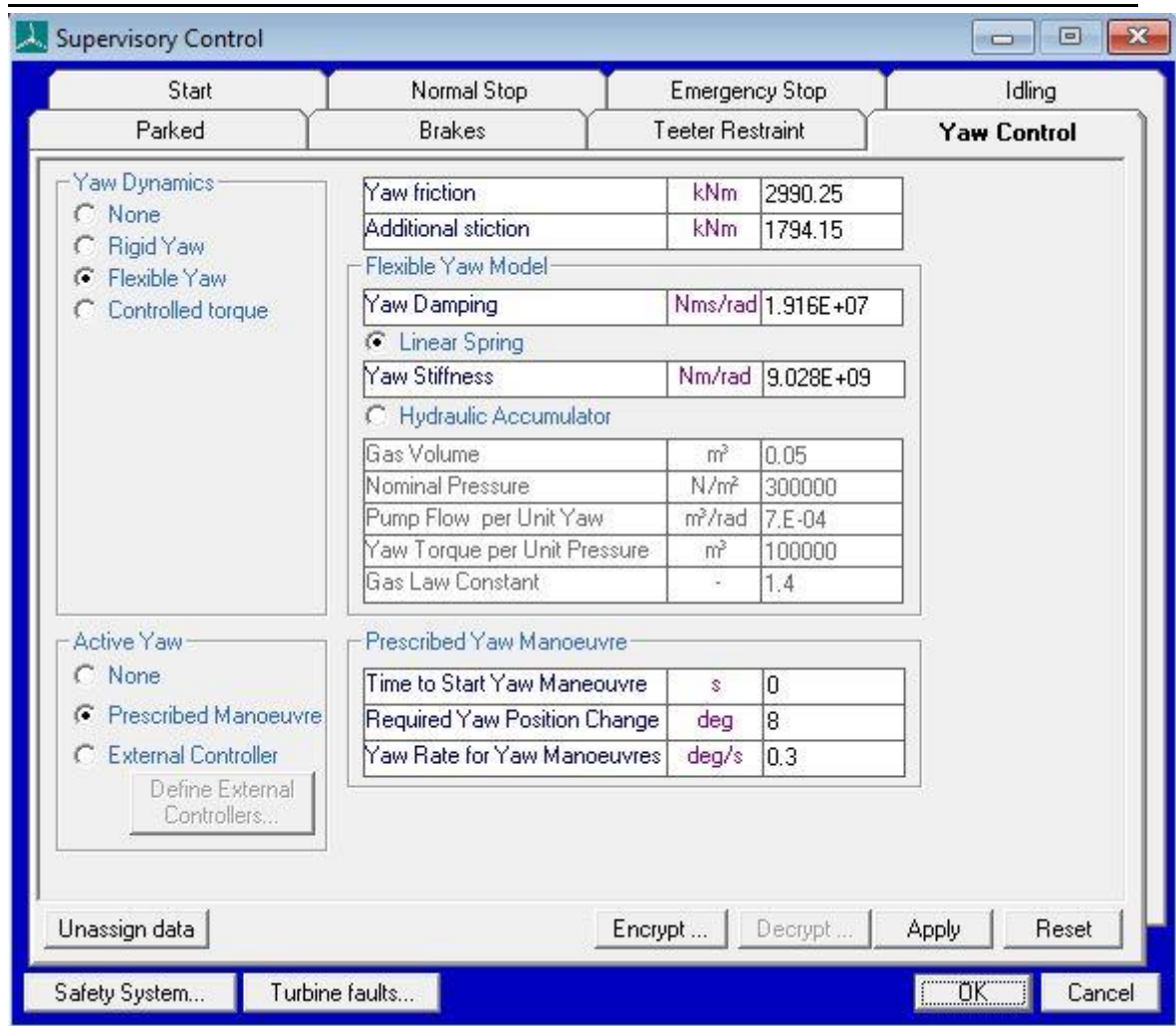


Tabla 5: menú Control - Yaw Control – Fuente: elaboración propia

Arriba a la izquierda, se podrá seleccionar el tipo de estrategia:

- **None (ninguna):** si el aerogenerador no posee ningún tipo de sistema de guiñada.
- **Rigid Yaw (Guiñada rígida):** Este sistema sigue de forma precisa cada desviación del viento, maximizando la producción energética en todo momento. La gran desventaja de esta estrategia es el aumento de cargas de fatiga por su continuo accionamiento.
- **Flexible Yaw (Guiñada flexible):** con esta estrategia, el sistema seguirá el viento de forma pasiva, quedando en reposo hasta que la desalineación entre el viento y la góndola supere un valor previamente determinado. Dentro de esta estrategia se encuentran dos opciones: resorte lineal o acumulador hidráulico.

- 
- **Controlled torque (Par controlado):** Esta estrategia se basa en el control del par en cada situación para orientar la góndola. Debido a las limitaciones de la licencia académica de Bladed 4.6, esta opción no se podrá simular en este trabajo.

En el mismo lateral izquierdo pero en la zona inferior, se podrá activar o desactivar el sistema de orientación. Además, se da la opción de seleccionar un controlador externo, el cual está bloqueado por la licencia académica.

En el centro de la pantalla, se encuentra la tabla con los distintos parámetros que definen las diferentes estrategias de orientación. Los parámetros comunes para todos ellos son:

- **Yaw friction [kNm] (Fricción de guiñada [kNm]):** este parámetro establece el par que hay que vencer para rotar la góndola, debido a la fricción entre los distintos elementos del sistema. Calculada en la sección [4.7.1.](#)
- **Additional sticction [kNm] (Fricción adicional [kNm]):** este parámetro puede ser o no introducido por el usuario con el fin de modificar las cargas en el sistema. Actúa como una fuerza de fricción adicional a la existente en el sistema de guiñada, e impide que el sistema rote de forma no deseada bajo la acción de las cargas del viento. Este parámetro se modificará para mejorar la distribución de cargas en el sistema.

A continuación encontramos los parámetros que definen a los dos tipos de sistema de orientación flexible. El valor inicial de estos parámetros se obtuvo del documento [6]. A través de diferentes simulaciones, se buscará optimizar el sistema encontrando un valor más adecuado para cada uno de los parámetros. El primer parámetro a introducir es genérico tanto para la estrategia de resorte lineal como para la de acumulador hidráulico:

- **Yaw damping [Nms/rad] (amortiguamiento de guiñada [Nms/rad]):** esta amortiguación se encargará de aliviar las sacudidas repentinas por los cambios de velocidad y dirección del viento, evitando que sufra en exceso.

Resorte lineal:

- **Yaw Stiffness [Nm/rad](Rigidez de guiñada [Nm/rad]):** parametro que modela la rigidez del muelle que se encargará de almacenar la energía absorbida del aire en sus cambios de

---

dirección para después poder devolverla al sistema ahorrando el esfuerzo de los motores de guiñada.

Acumulador hidráulico:

- **Gas volumen [ $m^3$ ](Volumen del gas [ $m^3$ ]):** volumen del gas disponible en los acumuladores hidráulicos, expresado en metros cúbicos.
- **Nominal pressure [ $N/m^2$ ](Presión nominal [ $N/m^2$ ]):** La presión nominal, es la presión en la cual el sistema se encuentra en equilibrio.
- **Pump Flow per unit Yaw [ $m^3/rad$ ](Caudal bombeado por cada unidad guiñada [ $m^3/rad$ ]):** Volumen de aceite que se necesita bombear para conseguir un radián rotado en el sistema de guiñada.
- **Yaw torque per unit pressure [ $m^3$ ](Par de guiñada por cada unidad de presión [ $m^3$ ]):** par ejercido en el sistema de guiñada por cada unidad de presión ejercida.
- **Gas law constant (Constante del gas):** valor de la constante del gas introducido.

Maniobra preestablecida del sistema de guiñada:

- **Time to start yaw Maneuver (Tiempo para empezar la maniobra de guiñada):** en esta celda se establecerá el tiempo de demora desde que se ha alcanzado la desalineación requerida, hasta que comienza la maniobra de guiñada.
- **Required yaw position change [rad](Posición de guiñada requerida para el cambio [rad]):** Desalineación mínima requerida para que actúe el sistema de guiñada.
- **Yaw rate for yaw maneuver [deg/s] (Relación de guiñada para la maniobra de guiñada [deg/s]):** velocidad de rotación a la que se realizan las maniobras de guiñada.
- 

### 3.4. Simulación comparativa de los nuevos diseños propuestos

Una vez definidas las distintas estrategias de guiñada, se procederá a realizar el caso de cargas DLC 1.1 de cada una de ellas para así poder compararlas.

En primer lugar, se simulará el sistema de orientación rígido:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	1,25E+05	<b>-9,64E+06</b>	-6,42E+05	7,35E+06	4,52E+04	-9,80E+03	<b>-2,73E+06</b>	4,52E+04	4,25E+04
<b>Mean</b>	2,52E+05	-8,41E+06	1,44E+05	8,41E+06	8,84E+04	-1,22E+03	-2,71E+06	8,85E+04	9,87E+04
<b>Max</b>	3,64E+05	-7,34E+06	9,80E+05	<b>9,64E+06</b>	1,27E+05	1,52E+04	<b>-2,70E+06</b>	1,27E+05	1,37E+05

**Tabla 6: DLC1.1 - Con sistema de orientación rígido - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,19E+06	<b>-8,45E+06</b>	-2,22E+06	4,74E+06	5,08E+05	-7,18E+04	<b>-2,84E+06</b>	5,09E+05	3,80E+06
<b>Mean</b>	3,79E+06	-6,11E+06	8,93E+05	7,23E+06	6,34E+05	-7,32E+03	-2,77E+06	6,34E+05	4,45E+06
<b>Max</b>	4,52E+06	-2,00E+06	3,24E+06	<b>9,31E+06</b>	7,53E+05	6,15E+04	<b>-2,70E+06</b>	7,53E+05	5,19E+06

**Tabla 7: DLC1.1 - Con sistema de orientación rígido - Velocidad viento 11.686 m/s– Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,56E+06	<b>-1,42E+07</b>	-8,30E+06	4,05E+06	-1,10E+05	-1,49E+05	<b>-2,86E+06</b>	6,41E+03	5,18E+06
<b>Mean</b>	4,40E+06	-5,68E+06	-2,08E+06	7,39E+06	3,05E+05	-1,61E+04	-2,70E+06	3,15E+05	5,50E+06
<b>Max</b>	5,46E+06	1,26E+06	5,28E+06	<b>1,47E+07</b>	8,51E+05	1,43E+05	<b>-2,57E+06</b>	8,56E+05	5,97E+06

**Tabla 8: DLC1.1 - Con sistema de orientación rígido - Velocidad viento 30 m/s– Fuente: elaboración propia**

A continuación, se someterá al mismo estudio al sistema de guiñada flexible de resorte lineal, sin fricción adicional:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	-2,55E+05	<b>-9,36E+06</b>	-9,55E+05	7,22E+06	5,23E+04	-1,15E+05	<b>-2,73E+06</b>	5,25E+04	4,03E+04
<b>Mean</b>	2,53E+05	-8,32E+06	1,59E+05	8,32E+06	8,87E+04	-9,99E+02	-2,71E+06	8,90E+04	9,88E+04
<b>Max</b>	6,45E+05	-7,22E+06	8,66E+05	<b>9,37E+06</b>	1,26E+05	1,31E+05	<b>-2,70E+06</b>	1,51E+05	1,36E+05

**Tabla 9: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de resorte lineal - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	2,85E+06	<b>-7,82E+06</b>	-1,68E+06	4,37E+06	5,13E+05	-1,56E+05	<b>-2,84E+06</b>	5,13E+05	3,77E+06
<b>Mean</b>	3,77E+06	-5,55E+06	9,94E+05	6,75E+06	6,33E+05	-7,38E+03	-2,77E+06	6,33E+05	4,41E+06
<b>Max</b>	4,51E+06	-1,95E+06	3,36E+06	<b>8,80E+06</b>	7,55E+05	1,58E+05	<b>-2,70E+06</b>	7,55E+05	5,20E+06

**Tabla 10: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de resorte lineal - Velocidad viento 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,00E+06	<b>-1,38E+07</b>	-1,09E+07	3,68E+06	-1,05E+05	-2,53E+05	<b>-2,88E+06</b>	2,98E+03	5,17E+06
<b>Mean</b>	4,33E+06	-6,34E+06	-2,29E+06	7,88E+06	3,13E+05	-8,13E+02	-2,71E+06	3,26E+05	5,49E+06
<b>Max</b>	5,29E+06	1,89E+06	3,78E+06	<b>1,46E+07</b>	8,24E+05	3,11E+05	<b>-2,47E+06</b>	8,25E+05	5,93E+06

**Tabla 11: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de resorte lineal - Velocidad viento 30 m/s – Fuente: elaboración propia**

Por último, se estudiará en comportamiento del sistema de guiñada flexible de acumulador hidráulico, sin fricción adicional:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	5,41E+04	<b>-9,37E+06</b>	-6,59E+05	7,23E+06	5,23E+04	-2,81E+04	<b>-2,73E+06</b>	5,23E+04	4,08E+04
<b>Mean</b>	2,54E+05	-8,32E+06	1,60E+05	8,32E+06	8,87E+04	-1,03E+03	-2,71E+06	8,89E+04	9,90E+04
<b>Max</b>	4,07E+05	-7,22E+06	9,47E+05	<b>9,37E+06</b>	1,26E+05	3,78E+04	<b>-2,70E+06</b>	1,26E+05	1,36E+05

**Tabla 12: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de acumulador hidráulico - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,12E+06	<b>-8,02E+06</b>	-1,66E+06	4,39E+06	5,12E+05	-8,36E+04	<b>-2,83E+06</b>	5,12E+05	3,76E+06
<b>Mean</b>	3,77E+06	-5,56E+06	9,91E+05	6,76E+06	6,33E+05	-7,45E+03	-2,77E+06	6,34E+05	4,41E+06
<b>Max</b>	4,51E+06	-1,94E+06	3,23E+06	<b>9,01E+06</b>	7,55E+05	1,02E+05	<b>-2,70E+06</b>	7,56E+05	5,20E+06

**Tabla 13: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de acumulador hidráulico - Velocidad viento 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,25E+06	<b>-1,35E+07</b>	-9,01E+06	3,73E+06	-3,20E+05	-2,07E+05	<b>-2,87E+06</b>	4,69E+03	5,17E+06
<b>Mean</b>	4,33E+06	-6,31E+06	-2,32E+06	7,82E+06	3,12E+05	-7,15E+02	-2,71E+06	3,28E+05	5,49E+06
<b>Max</b>	5,55E+06	2,20E+06	4,04E+06	<b>1,40E+07</b>	7,76E+05	2,17E+05	<b>-2,46E+06</b>	7,76E+05	5,86E+06

**Tabla 14: DLC1.1 - Con sistema de orientación flexible de acumulador hidráulico - Velocidad viento 30 m/s – Fuente: elaboración propia**

Comparando los distintos resultados, se aprecia que:

- A medida que se incrementa la velocidad del viento, las cargas máximas tienden a elevarse, como cabía esperar. Siendo el mayor par encontrado el aplicado en Mxy y la mayor fuerza, la aplicada en vertical hacia abajo (Fz).

---

Comparando las diferentes estrategias de orientación, queda claro que el sistema rígido es el que mayores esfuerzos presenta ya que se encuentra reajustando continuamente la dirección de la góndola. Por otro lado, el que menores cargas presenta bajo vientos de velocidad elevada, es el sistema con acumulador hidráulico. Sin embargo, el que mejores datos muestra en la zona de funcionamiento nominal, es el sistema de resorte lineal.

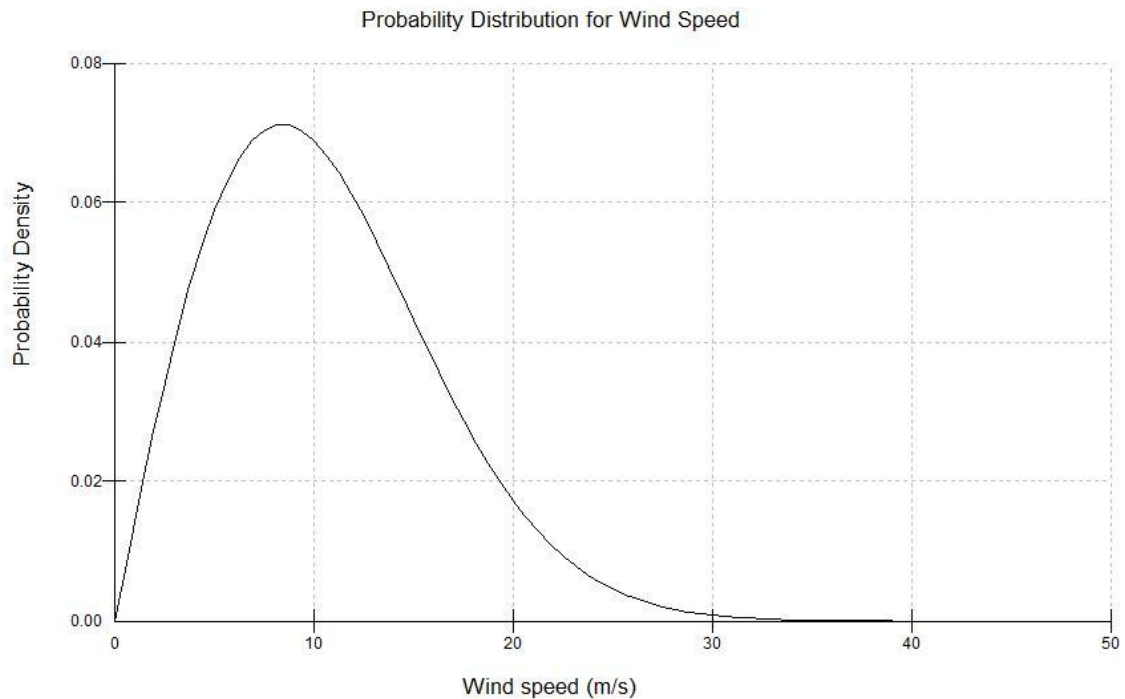
- Si se atiende a la potencia eléctrica en cada situación, de nuevo esta aumenta con la velocidad como era de esperar. En cuanto a la comparación entre las distintas estrategias, el sistema que mejor generación produce es el rígido, ya que es el más preciso en todo momento. Comparando las estrategias flexibles, vemos como se reduce ligeramente potencia generada, esto es debido a la pasividad del sistema de guiñada. Entre el sistema de resorte lineal y el de acumulador hidráulico, este último es el que presenta unos datos un poco peores.

### **3.5. Elección de estrategia**

A la vista de los resultados obtenidos, parece obvio descartar un aerogenerador sin sistema de guiñada. Una máquina de este tipo solo sería capaz de trabajar en su punto de diseño en una única dirección del viento. Lo cual no es rentable ni eficiente.

En cuanto a los sistemas rígidos, presentan la mejor eficiencia, ya que son los que obtienen mayor potencia generada. Esto era de esperar, ya que son los que siguen la dirección del viento de forma precisa. Sin embargo, esta estrategia es la que propicia los mayores esfuerzos en el sistema de orientación y genera constantemente cargas alternativas, las cuales degenerarán en problemas de fatiga. Para el empleo de esta estrategia sería necesario aumentar las cualidades de los distintos componentes. Por estos motivos se descartará el empleo de esta estrategia.

Por último, quedan las estrategias flexibles, de resorte lineal o de acumulador hidráulico. Atendiendo a la energía generada, el resorte lineal muestra una ligera mejora respecto al acumulador hidráulico. Si nos centramos en las cargas a las que se le somete a los sistemas, opción hidráulica muestra una reducción de cargas ante vientos de alta velocidad, por el contrario, el resorte lineal se comporta mejor bajo vientos próximos al nominal. Sabiendo que la distribución del aire a lo largo del año, sigue la siguiente gráfica de densidad:



**Ilustración 47:** gráfica de densidad del viento a lo largo del año en la localización elegida – Fuente: elaboración propia

Como muestra la gráfica, es muy poco probable que se den vientos de 30 m/s, y mucho más probable que estos se encuentren en torno a 8 m/s, por lo tanto, es preferible que el sistema se comporte mejor ante vientos próximos a los nominales que ante vientos extremos.

Otro condicionante para rechazar el sistema hidráulico son los posibles vertidos de aceites al medio marino, causados por tareas de mantenimiento o fugas en el sistema. Estos vertidos afectan directamente a la biocenosis marina así como al medio físico. Este tipo de accidentes tienen que evitarse a toda costa para preservar el océano. Además es un requisito estipulado por diversos países. Concretamente en España, se debe seguir la siguiente norma [8].

Por todos estos motivos, se selecciona el sistema de guiñada flexible de resorte lineal como estrategia definitiva. A partir de aquí se trabajará y ensayará sobre este modelo para conseguir optimizar las cargas y mejorar la producción de energía.

### 3.6. Optimización de las cargas del diseño final

A continuación, se simulará el modelo bajo el caso de carga DCL 1.3. Este caso de estudio, pide simular el aerogenerador ante un cambio de velocidad de viento simultáneo con un cambio de dirección. Los valores de dichos incrementos vienen

determinados por la norma GL [5] y se han calculado en la sección 4.9. Atendiendo a los requerimientos, los transitorios deben producirse en un intervalo de 10 segundos.

#### Datos modelo #1:

- Amortiguación de guiñada =  $1,916 \cdot 10^7$  Nms/rad
- Rigidez de guiñada =  $9,028 \cdot 10^9$  Nm/rad
- Fricción adicional = 0 kNm

Los resultados obtenidos para la primera versión del modelo, previamente definido, sin fricción adicional y sin modificar ninguno de los valores son los siguientes:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	-9,63E+03	-1,02E+07	-1,52E+06	7,18E+06	-2,80E+05	-1,25E+05	-2,72E+06	1,66E+04	-1,24E+06
<b>Mean</b>	1,49E+05	-8,96E+06	1,32E+05	8,96E+06	-9,33E+04	-4,92E+03	-2,69E+06	1,73E+05	-1,67E+05
<b>Max</b>	6,40E+05	-7,17E+06	1,10E+06	1,02E+07	1,76E+05	1,14E+05	-2,66E+06	2,80E+05	3,48E+05

Tabla 15: DLC 1.3 - modelo #1 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,34E+06	-1,20E+07	-4,55E+06	4,58E+06	-1,55E+05	-2,88E+05	-2,83E+06	8,21E+04	-1,24E+06
<b>Mean</b>	4,64E+06	-5,39E+06	1,80E+06	7,33E+06	5,15E+05	-8,31E+04	-2,75E+06	5,33E+05	-2,47E+05
<b>Max</b>	5,99E+06	1,97E+06	7,25E+06	1,31E+07	9,05E+05	8,69E+04	-2,59E+06	9,05E+05	3,48E+05

Tabla 16: DLC 1.3 - modelo #1 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	2,15E+06	-1,89E+07	-2,21E+07	3,82E+06	-7,90E+05	-1,24E+06	-3,30E+06	7,35E+04	4,74E+06
<b>Mean</b>	5,20E+06	1,42E+05	-2,56E+06	8,66E+06	5,43E+05	-3,11E+05	-2,51E+06	6,96E+05	6,07E+06
<b>Max</b>	8,95E+06	2,79E+07	1,51E+07	2,83E+07	3,59E+06	3,48E+05	-1,68E+06	3,60E+06	1,07E+07

Tabla 17: DLC 1.3 - modelo #1 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia

Con el fin de intentar reducir las cargas y mejorar la producción de energía, se añadirá una fricción adicional en el sistema de guiñada. En primer lugar se probará añadiendo 1000 kNm:

#### Datos modelo #2:

- Amortiguación de guiñada =  $1,916 \cdot 10^7$  Nms/rad
- Rigidez de guiñada =  $9,028 \cdot 10^9$  Nm/rad
- Fricción adicional = 1000 kNm

Siendo los datos obtenidos los siguientes:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	-4,26E+04	-1,02E+07	-1,68E+06	7,27E+06	-2,80E+05	-1,83E+05	-2,72E+06	1,63E+04	-4,40E+04
<b>Mean</b>	1,49E+05	-8,96E+06	1,32E+05	8,96E+06	-9,33E+04	-4,96E+03	-2,69E+06	1,73E+05	3,02E+04
<b>Max</b>	8,15E+05	-7,26E+06	1,40E+06	1,02E+07	1,76E+05	1,13E+05	-2,66E+06	2,80E+05	3,10E+05

**Tabla 18: DLC 1.3 - modelo #2 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,28E+06	-1,16E+07	-4,50E+05	6,30E+06	2,76E+05	-1,86E+05	-2,81E+06	2,79E+05	4,11E+06
<b>Mean</b>	4,42E+06	-8,08E+06	1,26E+06	9,23E+06	5,97E+05	-3,34E+04	-2,77E+06	5,99E+05	5,30E+06
<b>Max</b>	5,17E+06	-5,07E+06	3,51E+06	1,27E+07	8,59E+05	1,28E+05	-2,71E+06	8,59E+05	6,22E+06

**Tabla 19: DLC 1.3 - modelo #2 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,72E+06	-1,04E+07	-8,66E+06	3,90E+06	-1,69E+05	-3,68E+05	-2,98E+06	6,69E+04	5,25E+06
<b>Mean</b>	4,61E+06	-2,97E+06	-2,23E+06	6,08E+06	3,51E+05	-9,44E+04	-2,66E+06	3,85E+05	5,64E+06
<b>Max</b>	5,79E+06	4,53E+06	3,38E+06	1,16E+07	1,21E+06	1,71E+05	-2,38E+06	1,22E+06	6,41E+06

**Tabla 20: DLC 1.3 - modelo #2 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia**

Comparando los resultados obtenidos con la adición de una fricción de 1000 kNm, además de observarse una cierta mejora en algunos de los esfuerzos obtenidos, se mejora notablemente la producción de energía, eliminando casi por completo los periodos de consumo de energía por parte del generador.

A continuación, se realiza de nuevo la simulación, incrementando la fricción adicional a un valor de 2000 kNm:

#### Datos modelo #3:

- Amortiguación de guiñada =  $1,916 \cdot 10^7$  Nms/rad
- Rigidez de guiñada =  $9,028 \cdot 10^9$  Nm/rad
- Fricción adicional = 2000 kNm

Siendo los datos obtenidos los siguientes:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	-2,99E+05	-1,03E+07	-1,74E+06	7,22E+06	-2,81E+05	-1,51E+05	-2,72E+06	1,59E+04	-4,40E+04
<b>Mean</b>	1,49E+05	-8,96E+06	1,31E+05	8,96E+06	-9,33E+04	-4,82E+03	-2,69E+06	1,73E+05	3,04E+04
<b>Max</b>	6,79E+05	-7,21E+06	1,20E+06	1,03E+07	1,75E+05	1,55E+05	-2,66E+06	2,81E+05	3,10E+05

**Tabla 21: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,10E+06	-1,15E+07	-4,82E+05	6,31E+06	2,80E+05	-1,78E+05	-2,81E+06	2,83E+05	4,11E+06
<b>Mean</b>	4,42E+06	-8,08E+06	1,26E+06	9,23E+06	5,97E+05	-3,32E+04	-2,77E+06	5,99E+05	5,30E+06
<b>Max</b>	5,17E+06	-5,07E+06	3,49E+06	1,25E+07	8,58E+05	1,59E+05	-2,71E+06	8,58E+05	6,21E+06

**Tabla 22: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,59E+06	-7,29E+06	-9,22E+06	3,71E+06	-5,92E+04	-4,79E+05	-2,77E+06	6,63E+04	5,31E+06
<b>Mean</b>	4,62E+06	-2,81E+06	-2,27E+06	5,93E+06	3,43E+05	-9,65E+04	-2,66E+06	3,76E+05	5,64E+06
<b>Max</b>	6,14E+06	2,72E+06	2,26E+06	8,44E+06	7,56E+05	1,12E+05	-2,40E+06	7,56E+05	6,04E+06

**Tabla 23: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia**

La nueva fricción adicional muestra mejores resultados ante altas velocidades de viento, reduciendo el esfuerzo máximo aplicado. Por lo tanto, nos quedaremos con el valor de 2000 kNm.

Una vez establecida la fricción adicional a aplicar, buscaremos mejorar el valor de la rigidez del resorte. En primer lugar, se reducirá esta en una magnitud de un 10%. Obteniendo los siguientes resultados:

#### Datos modelo #4:

- Amortiguación de guiñada =  $1,916 \cdot 10^7$  Nms/rad
- Rigidez de guiñada =  $8,1252 \cdot 10^9$  Nm/rad
- Fricción adicional = 2000 kNm

Siendo los datos obtenidos los siguientes:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	-2,72E+05	-1,01E+07	-1,25E+06	7,44E+06	-2,12E+05	-1,88E+05	-2,73E+06	1,56E+04	-4,40E+04
<b>Mean</b>	1,36E+05	-8,90E+06	1,27E+05	8,90E+06	-6,21E+04	-3,68E+03	-2,69E+06	1,40E+05	2,48E+04
<b>Max</b>	8,74E+05	-7,43E+06	1,89E+06	1,01E+07	1,58E+05	1,54E+05	-2,67E+06	2,13E+05	2,41E+05

**Tabla 24: DLC 1.3 - modelo #4 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,19E+06	-1,16E+07	-4,75E+05	6,30E+06	2,81E+05	-2,36E+05	-2,81E+06	2,84E+05	4,11E+06
<b>Mean</b>	4,42E+06	-8,08E+06	1,26E+06	9,23E+06	5,98E+05	-3,33E+04	-2,77E+06	5,99E+05	5,30E+06
<b>Max</b>	5,18E+06	-5,07E+06	3,49E+06	1,26E+07	8,58E+05	1,36E+05	-2,71E+06	8,58E+05	6,21E+06

**Tabla 25: DLC 1.3 - modelo #4 – velocidad 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	1,42E+06	-8,85E+06	-1,10E+06	6,37E+06	2,78E+05	-2,68E+04	-2,76E+06	2,78E+05	1,30E+06
<b>Mean</b>	1,64E+06	-7,13E+06	5,36E+05	7,32E+06	3,56E+05	-5,18E+03	-2,74E+06	3,57E+05	1,47E+06
<b>Max</b>	1,94E+06	-6,10E+06	2,36E+06	9,01E+06	4,43E+05	1,56E+04	-2,71E+06	4,43E+05	1,74E+06

**Tabla 26: DLC 1.3 - modelo #4 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia**

Comparando estos datos con los datos del valor de rigidez inicial, nos damos cuenta que esta rigidez inferior no aporta una buena generación de energía. Por lo tanto, esta estrategia queda descartada. A continuación incrementaremos en un 10% sobre el valor inicial la rigidez:

**Datos modelo #5:**

- Amortiguación de guiñada =  $1,916 \cdot 10^7$  Nms/rad
- Rigidez de guiñada =  $9,9308 \cdot 10^9$  Nm/rad
- Fricción adicional = 2000 kNm

Siendo los datos obtenidos los siguientes:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	-1,66E+05	-1,00E+07	-1,10E+06	7,50E+06	-2,13E+05	-2,89E+05	-2,72E+06	1,65E+04	-4,40E+04
<b>Mean</b>	1,37E+05	-8,90E+06	1,29E+05	8,90E+06	-6,20E+04	-3,77E+03	-2,69E+06	1,40E+05	2,48E+04
<b>Max</b>	1,16E+06	-7,49E+06	2,05E+06	1,01E+07	1,58E+05	1,44E+05	-2,67E+06	3,01E+05	2,41E+05

**Tabla 27: DLC 1.3 - modelo #5 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,15E+06	-1,15E+07	-4,97E+05	6,30E+06	2,73E+05	-1,06E+05	-2,81E+06	2,75E+05	4,10E+06
<b>Mean</b>	4,42E+06	-8,07E+06	1,26E+06	9,22E+06	5,97E+05	-3,33E+04	-2,77E+06	5,99E+05	5,30E+06
<b>Max</b>	5,16E+06	-5,07E+06	3,50E+06	1,25E+07	8,60E+05	1,53E+05	-2,71E+06	8,60E+05	6,22E+06

**Tabla 28: DLC 1.3 - modelo #5 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,34E+06	-8,40E+06	-9,89E+06	3,80E+06	-3,69E+04	-6,23E+05	-2,81E+06	3,75E+04	5,27E+06
<b>Mean</b>	4,62E+06	-2,87E+06	-2,24E+06	6,08E+06	3,43E+05	-9,61E+04	-2,66E+06	3,76E+05	5,64E+06
<b>Max</b>	6,71E+06	5,85E+06	4,50E+06	9,32E+06	7,58E+05	1,88E+05	-2,36E+06	7,63E+05	6,05E+06

**Tabla 29: DLC 1.3 - modelo #5 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia**

El incremento de rigidez tampoco ha dado resultados mejores o más satisfactorios. Permaneciendo la potencia en la misma generación y aumentando las cargas ligeramente. Por tanto, el modelo permanecerá con el valor inicial.

Por último, se modificará el valor del amortiguamiento con la finalidad de ver su influencia en las cargas y producción de energía del sistema. En primer lugar, se reducirá en un 10% el valor original:

#### Datos modelo #6:

- Amortiguación de guiñada =  $1,724 \cdot 10^7$  Nms/rad
- Rigidez de guiñada =  $9,028 \cdot 10^9$  Nm/rad
- Fricción adicional = 2000 kNm

Siendo los datos obtenidos los siguientes:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	-3,14E+05	-1,02E+07	-1,22E+06	7,50E+06	-2,12E+05	-1,55E+05	-2,72E+06	1,61E+04	-4,40E+04
<b>Mean</b>	1,36E+05	-8,90E+06	1,27E+05	8,90E+06	-6,21E+04	-3,59E+03	-2,69E+06	1,40E+05	2,49E+04
<b>Max</b>	6,91E+05	-7,49E+06	1,21E+06	1,02E+07	1,58E+05	1,57E+05	-2,67E+06	2,18E+05	2,42E+05

Tabla 30: DLC 1.3 - modelo #6 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,10E+06	-1,15E+07	-5,10E+05	6,30E+06	2,80E+05	-1,82E+05	-2,81E+06	2,84E+05	4,11E+06
<b>Mean</b>	4,42E+06	-8,08E+06	1,26E+06	9,23E+06	5,97E+05	-3,33E+04	-2,77E+06	5,99E+05	5,30E+06
<b>Max</b>	5,17E+06	-5,07E+06	3,50E+06	1,25E+07	8,60E+05	1,61E+05	-2,71E+06	8,60E+05	6,21E+06

Tabla 31: DLC 1.3 - modelo #6 – velocidad 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,49E+06	-7,96E+06	-8,99E+06	3,63E+06	-9,41E+04	-4,96E+05	-2,81E+06	3,35E+04	5,28E+06
<b>Mean</b>	4,62E+06	-2,87E+06	-2,25E+06	6,09E+06	3,44E+05	-9,70E+04	-2,66E+06	3,78E+05	5,64E+06
<b>Max</b>	5,92E+06	6,06E+06	2,82E+06	9,26E+06	7,95E+05	1,42E+05	-2,38E+06	8,09E+05	6,12E+06

Tabla 32: DLC 1.3 - modelo #6 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia

Reducir el valor de la amortiguación, tampoco beneficia al sistema.

A continuación, se aumentará el valor del amortiguamiento en un 10% con respecto al valor original:

**Datos modelo #7:**

- Amortiguación de guiñada =  $2,1076 \cdot 10^7$  Nms/rad
- Rigidez de guiñada =  $9,028 \cdot 10^9$  Nm/rad
- Fricción adicional = 2000 kNm

Siendo los datos obtenidos los siguientes:

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	-2,84E+05	-1,01E+07	-1,13E+06	7,48E+06	-2,13E+05	-1,47E+05	-2,72E+06	1,62E+04	-4,40E+04
<b>Mean</b>	1,36E+05	-8,90E+06	1,27E+05	8,90E+06	-6,21E+04	-3,58E+03	-2,69E+06	1,40E+05	2,49E+04
<b>Max</b>	6,66E+05	-7,48E+06	1,19E+06	1,01E+07	1,58E+05	1,53E+05	-2,67E+06	2,18E+05	2,42E+05

**Tabla 33: DLC 1.3 - modelo #7 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,11E+06	-1,15E+07	-4,71E+05	6,30E+06	2,84E+05	-1,74E+05	-2,81E+06	2,87E+05	4,10E+06
<b>Mean</b>	4,42E+06	-8,08E+06	1,26E+06	9,23E+06	5,97E+05	-3,33E+04	-2,77E+06	5,99E+05	5,30E+06
<b>Max</b>	5,18E+06	-5,07E+06	3,50E+06	1,25E+07	8,58E+05	1,57E+05	-2,71E+06	8,58E+05	6,22E+06

**Tabla 34: DLC 1.3 - modelo #7 – velocidad 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
<b>Min</b>	3,64E+06	-7,29E+06	-8,42E+06	4,07E+06	-3,16E+04	-3,76E+05	-2,79E+06	3,83E+04	5,31E+06
<b>Mean</b>	4,62E+06	-2,84E+06	-2,24E+06	5,94E+06	3,43E+05	-9,58E+04	-2,66E+06	3,75E+05	5,64E+06
<b>Max</b>	5,96E+06	3,12E+06	2,98E+06	8,43E+06	7,13E+05	2,04E+05	-2,38E+06	7,21E+05	6,01E+06

**Tabla 35: DLC 1.3 - modelo #7 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia**

En esta ocasión, si se ven leves mejoras en los datos obtenidos de algunos esfuerzos. Pero también se reduce la potencia generada para velocidades bajas de viento. Es por esto, que se decide dejar el valor inicial del amortiguamiento.

Después de las simulaciones, se concluye que la estrategia de orientación más apropiada para el sistema en este aerogenerador, es un sistema de guiñada con resorte lineal con los siguientes datos (modelo #3):

- Amortiguación de guiñada =  $1,916 \cdot 10^7$  Nms/rad
- Rigidez de guiñada =  $9,028 \cdot 10^9$  Nm/rad
- Fricción adicional = 2000 kNm

Para estos datos, las cargas obtenidas bajo las diferentes condiciones de estudio son las siguientes:

**DLC 1.1**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
Min	-2,99E+05	-1,03E+07	-1,74E+06	7,22E+06	-2,81E+05	-1,51E+05	-2,72E+06	1,59E+04	-4,40E+04
Mean	1,49E+05	-8,96E+06	1,31E+05	8,96E+06	-9,33E+04	-4,82E+03	-2,69E+06	1,73E+05	3,04E+04
Max	6,79E+05	-7,21E+06	1,20E+06	1,03E+07	1,75E+05	1,55E+05	-2,66E+06	2,81E+05	3,10E+05

Tabla 36: DLC1.1 - modelo #3 - Velocidad viento 3.5 m/s – Fuente: elaboración propia

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
Min	2,85E+06	-7,84E+06	-1,60E+06	4,37E+06	5,12E+05	-1,43E+05	-2,83E+06	5,12E+05	3,77E+06
Mean	3,77E+06	-5,54E+06	9,95E+05	6,75E+06	6,33E+05	-7,26E+03	-2,77E+06	6,33E+05	4,41E+06
Max	4,52E+06	-2,02E+06	3,40E+06	8,80E+06	7,56E+05	1,59E+05	-2,70E+06	7,56E+05	5,21E+06

Tabla 37: DLC1.1 - modelo #3 - Velocidad viento 11.686 m/s – Fuente: elaboración propia

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
Min	3,32E+06	-1,61E+07	-8,52E+06	3,56E+06	-1,62E+05	-3,05E+05	-2,88E+06	2,96E+03	5,15E+06
Mean	4,33E+06	-6,38E+06	-2,28E+06	7,90E+06	3,13E+05	-6,80E+02	-2,71E+06	3,26E+05	5,49E+06
Max	5,82E+06	1,47E+06	4,41E+06	1,66E+07	9,84E+05	2,51E+05	-2,54E+06	9,84E+05	6,11E+06

Tabla 38: DLC1.1 - modelo #3 - Velocidad viento 30 m/s – Fuente: elaboración propia

**DLC 1.3**

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
Min	-2,99E+05	-1,03E+07	-1,74E+06	7,22E+06	-2,81E+05	-1,51E+05	-2,72E+06	1,59E+04	-4,40E+04
Mean	1,49E+05	-8,96E+06	1,31E+05	8,96E+06	-9,33E+04	-4,82E+03	-2,69E+06	1,73E+05	3,04E+04
Max	6,79E+05	-7,21E+06	1,20E+06	1,03E+07	1,75E+05	1,55E+05	-2,66E+06	2,81E+05	3,10E+05

Tabla 39: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 3,5 m/s – Fuente: elaboración propia

	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
Min	3,10E+06	-1,15E+07	-4,82E+05	6,31E+06	2,80E+05	-1,78E+05	-2,81E+06	2,83E+05	4,11E+06
Mean	4,42E+06	-8,08E+06	1,26E+06	9,23E+06	5,97E+05	-3,32E+04	-2,77E+06	5,99E+05	5,30E+06
Max	5,17E+06	-5,07E+06	3,49E+06	1,25E+07	8,58E+05	1,59E+05	-2,71E+06	8,58E+05	6,21E+06

Tabla 40: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 11,686 m/s – Fuente: elaboración propia

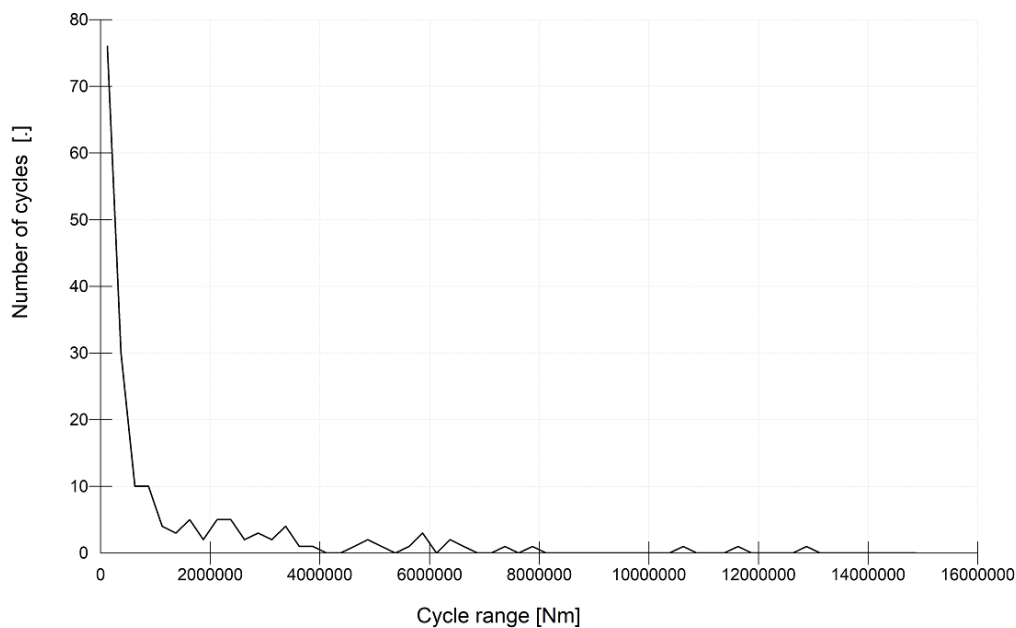
	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]	Mxy[Nm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fxy [N]	Measured power [W]
Min	3,59E+06	-7,29E+06	-9,22E+06	3,71E+06	-5,92E+04	-4,79E+05	-2,77E+06	6,63E+04	5,31E+06
Mean	4,62E+06	-2,81E+06	-2,27E+06	5,93E+06	3,43E+05	-9,65E+04	-2,66E+06	3,76E+05	5,64E+06
Max	6,14E+06	2,72E+06	2,26E+06	8,44E+06	7,56E+05	1,12E+05	-2,40E+06	7,56E+05	6,04E+06

**Tabla 41: DLC 1.3 - modelo #3 – velocidad 30 m/s – Fuente: elaboración propia**

En amarillo quedan resaltados los valores de los esfuerzos máximos que el sistema deberá soportar el sistema, tanto en condiciones de turbulencia normal, como en condiciones de cambio de velocidad y dirección del viento. Siendo la turbulencia normal a 30 m/s el caso más desfavorable de los estudiados.

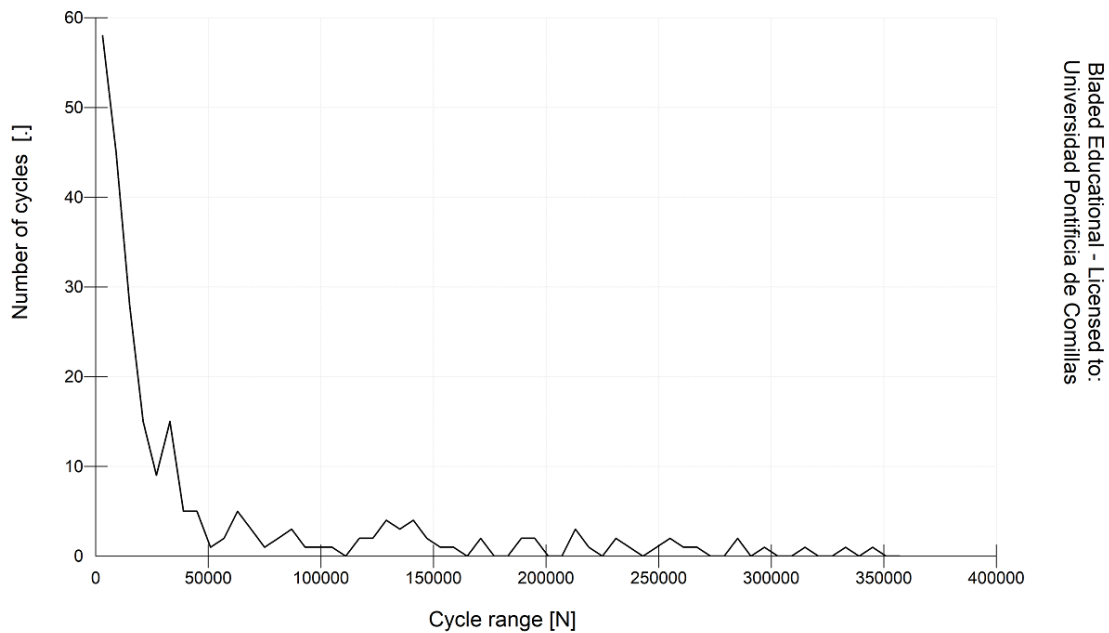
### DLC 1.1 (Fatiga)

A partir de los datos obtenidos en el DLC 1.1, se realizará el estudio de fatiga. Simulando a 30 m/s y centrándonos en el momento Mxy y en la fuerza Fz, ya que son los esfuerzos de mayor modulo. Utilizando el “método RainFlow”, se obtienen las siguientes gráficas:



Bladed Educational - Licensed to:  
Universidad Pontificia de Comillas

**Ilustración 48: número de ciclos para Mxy – Fuente: elaboración propia**



**Ilustración 49: número de ciclos para Fz – Fuente: elaboración propia**

Estas gráficas permitirán determinar la vida útil del cojinete, si este está correctamente dimensionado o romperá por fatiga.

### 3.7. Dimensionamiento del sistema de guiñada:

Una vez realizadas todas las simulaciones necesarias, se procede a dimensionar el sistema de guiñada para que cumpla con los requerimientos expuestos:

#### 3.7.1. Número motores:

Los motores de guiñada tienen una potencia de 5.5 kw con un par nominal de 49 kNm y un par pico de 98,1 kNm [Anexo III]. Sabiendo esto y a partir de los datos obtenidos tras la optimización del sistema, se decidirá el número de motores a instalar.

El caso más desfavorable para los motores del sistema de orientación, es el caso DLC1.1 con una velocidad de viento de 30 m/s y un par requerido de  $6,15 \cdot 10^6$  Nm. Una vez realizados los cálculos (en la sección 4.10.4), se obtiene que el número mínimo necesario de motores de guiñada es de 6.

Atendiendo a criterios de redundancia, los cuales permitirían seguir operando el aerogenerador incluso bajo el fallo de uno de los motores, se opta por montar 7 motores.

### 3.7.2. Dimensionamiento cojinete:

Para el dimensionamiento del cojinete se deben tener en cuenta las mayores cargas a las que será sometido. El caso de cargas más desfavorable para este modelo, es el DLC 1.1 con una velocidad de viento de 30 m/s. Bajo estas condiciones se obtienen las siguientes cargas:

- $M_z = 3,49 \cdot 10^6 \text{ Nm}$
- $M_{xy} = 1,25 \cdot 10^7 \text{ Nm}$
- $F_z = -2,81 \cdot 10^6 \text{ N}$

Con el objetivo de simplificar los cálculos, se asumirá que el cojinete es un cilindro hueco, del que se saben los siguientes datos:

- Diámetro interior = 5925 mm
- Espesor = 200 mm
- Material: acero S-275
- Coeficiente de seguridad = 1,2 (según norma GL [\[5\]](#))

Una vez estudiado el cojinete a torsión, flexión y comprobado a fatiga (cálculos realizados en la sección [4.11](#)), se obtienen las dimensiones finales de este:

- Diámetro exterior = 6125 mm
- Diámetro interior = 5925 mm
- Espesor = 500 mm

### 3.7.3. Análisis fuerzas corona sistema guiñada

El movimiento de guiñada es realizado a velocidad constante, es por esto que para la obtención de la fuerza máxima aplicada en los engranajes, solo se tendrán en cuenta las fuerzas de rozamiento y el par máximo obtenido en las simulaciones:

- $M_{\text{rozamiento}} = 2990,25 \text{ kNm}$
- $M_{\text{rozamiento adicional}} = 2000 \text{ kNm}$
- $M_{z \text{ max}} = 9220 \text{ kNm}$

$$M_{\text{corona}} = M_{\text{rozamiento}} + M_{\text{rozamiento adicional}} + M_{z \text{ max}}$$

$$M_{\text{corona}} = 14210 \text{ kNm}$$

Este par será aplicado entre los 7 motores del sistema, es decir, cada uno de los motores deberá aplicar:

---

$$M_{motor} = \frac{M_{corona}}{7}$$

$$M_{motor} = 2030 \text{ kNm}$$

### 3.8. Elección componentes eléctricos del sistema de guiñada

A continuación se seleccionarán los componentes eléctricos que van a formar el sistema de guiñada:

#### 3.8.1. Motor de guiñada

La estrategia finalmente elegida cuenta con 7 motores de guiñada. Cada uno de los cuales debe cumplir los siguientes requisitos:

- Par nominal de cada accionamiento = 49,0 kNm
- Par de pico de cada accionamiento = 98,1 kNm
- Relación engranajes = 1253,6
- Z piñón = 14
- Potencia nominal motor = 5,5 kW
- Velocidad motor = 940 rpm

Tras realizar un estudio del mercado actual, se ha localizado el siguiente modelo que cumple las especificaciones:

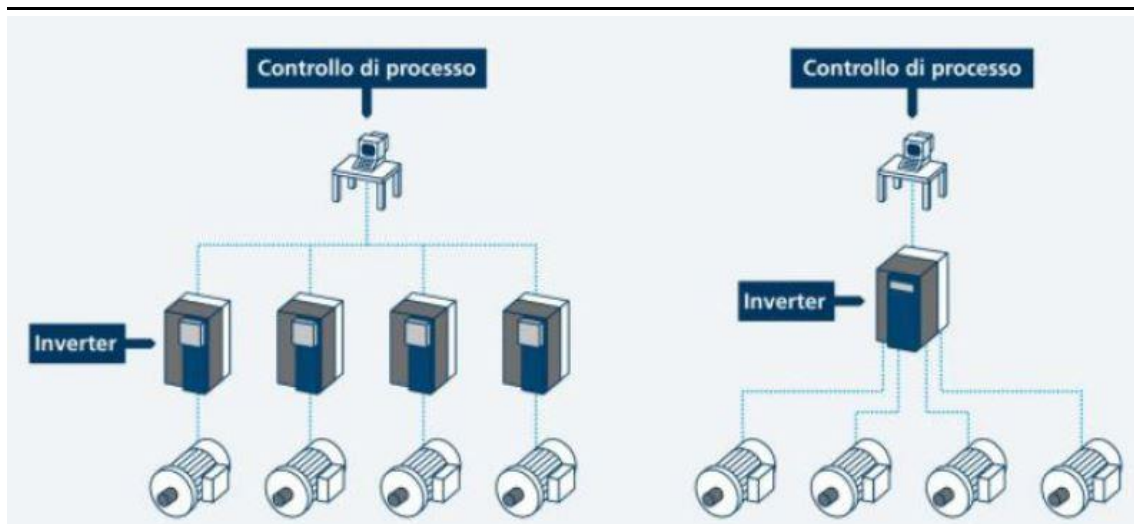
-NGC StanGear - SYW 05 C 3 K 1223 L P + F O 01

En el [anexo IV](#), se puede encontrar el catálogo de dicho motor.

#### 3.8.2. Inversor

Para el control de los 7 motores, se puede optar entre 2 estrategias. La primera de ellas consiste en instalar un inversor por cada uno de los motores. Y en segundo lugar se puede instalar un inversor mayor que controle todos los accionamientos.

En este proyecto se busca la obtención de un sistema robusto y fiable, de tal forma, que aunque sea algo más caro, se opta por instalar un inversor por cada accionamiento. De esta manera, en caso de que se pierda uno de ellos, el sistema podrá seguir en funcionamiento.



**Ilustración 50: estrategias de control**

Especificaciones requeridas:

- Tensión de alimentación = 380 V
- Intensidad de alimentación = 14 A

Tras realizar un estudio del mercado actual, se ha localizado el siguiente modelo que cumple con los requisitos pedidos:

-KEB – COMBIVERT P6

### 3.8.3. Protecciones

Para proteger los sistemas eléctricos de posibles picos de tensión o sobrecargas se dispondrá de diferentes sistemas de protección:

- Relee de intensidad: Se utilizarán para proteger el sistema de la exposición, durante largos periodos a picos, de intensidad demasiado elevada que puedan dañar el sistema. Estos relees serán debidamente calculados para evitar que salten en situaciones no deseadas.
- Relee digital de sobrecarga: Este otro tipo de relee se utilizarán para prevenir el sistema de situaciones prolongadas de altas temperaturas que puedan dañar el aislamiento de los componentes.

#### **3.8.4. Controlador de torsión**

El cableado eléctrico se conecta a la red de distribución que se encuentra en el lecho marino atravesando la torre. Debido a los cambios de orientación de la góndola, los cables se van torsionando, siendo posible llegar a su estrangulación si se supera un cierto ángulo de rotación en un mismo sentido. Por este motivo se debe instalar un contador de revoluciones, que antes de llegar a ese ángulo de estrangulamiento ordene destorsionar los cables.

#### **3.8.5 Sistemas de medición del viento**

Para conseguir una buena orientación de la góndola, se colocan sobre esta una veleta y un anemómetro que le proporcionarán al sistema la información necesaria de velocidad y dirección del viento.

Cabe mencionar, que al encontrarse tras el rotor aerodinámico, la información que les llega a estos aparatos esta distorsionada por las palas. Esta distorsión se tiene que corregir mediante algoritmos. Aun así esta distorsión es una de las fuentes más comunes de la orientación incorrecta de los aparatos.

# CÁLCULOS

## 4. Cálculos

### 4.1. Generador

#### Datos:

- Potencia nominal =  $5 \pm 10\%$  Mw
- Velocidad nominal ( $w_{nominal}$ ) = 12 rpm = 1,26 rad/s
- Densidad Acero S-275 ( $\rho$ ) =  $7850 \text{ kg/m}^3$
- Longitud axial de los polos y yugos (L) = 1300 mm
- Diámetro entrehierro generador ( $\phi_{entre \text{ hierro}}$ ) = 7000 mm
- Diámetro interno del rotor en el generador ( $\phi_{interior \text{ rotor}}$ ) = 6800 mm
- Entrehierro generador = 6 mm
- Altura/Anchura de los polos (imanes) = 18mm/42,5mm
- Altura de los yugos rotóricos (Hyr) / estáticos (Hye) = 15mm/13mm
- Altura (Hre) y anchura (Wre) de las ranuras estatoricas: 83mm/9,26 mm

#### Cálculos:

Modelamos el rotor como un cilindro hueco de acero para el cálculo de las inercias:

#### 4.1.1. Cálculo diámetro exterior rotor ( $\phi_{exterior \text{ rotor}}$ )

$$\phi_{exterior \text{ rotor}} = \phi_{entre \text{ hierro}} - \text{entrehierro generador}$$

$$\phi_{exterior \text{ rotor}} = 6994 \text{ mm}$$

#### 4.1.2. Cálculo diámetros estator

$$\phi_{entrehierro} = \phi_{interior \text{ estator}}$$

$$\phi_{exterior \text{ estator}} = \phi_{interior \text{ estator}} + 2(Hye + Hre)$$

$$\phi_{exterior \text{ estator}} = 7192 \text{ mm}$$

#### 4.1.3. Cálculo masa del rotor

$$\text{Masa rotor} = \rho L \left( \pi \frac{\phi_{exterior \text{ rotor}}^2}{4} - \pi \frac{\phi_{interior \text{ rotor}}^2}{4} \right)$$

$$\text{Masa rotor} = 21448,4 \text{ kg}$$

**4.1.4. Cálculo inercias rotor**

$$I_x = \frac{1}{2} \text{Masa rotor} \left( \frac{\Phi_{\text{exterior rotor}}^2}{4} + \frac{\Phi_{\text{interior rotor}}^2}{4} \right)$$

$$I_x = 255118,06 \text{ kgm}^2$$

$$I_y = \frac{1}{4} \text{Masa rotor} \left( \frac{\Phi_{\text{exterior rotor}}^2}{4} + \frac{\Phi_{\text{interior rotor}}^2}{4} \right) + \frac{1}{12} \text{Masa rotor } L^2$$

$$I_y = 129348,08 \text{ kgm}^2$$

**4.1.5. Cálculo masa del estator**

$$\text{Masa estator} = \rho L \left( \pi \frac{\Phi_{\text{exterior estator}}^2}{4} - \pi \frac{\Phi_{\text{interior estator}}^2}{4} \right)$$

$$\text{Masa estator} = 21839,75 \text{ kg}$$

**4.1.6. Cálculo inercias estator**

$$I_x = \frac{1}{2} \text{Masa estator} \left( \frac{\Phi_{\text{exterior estator}}^2}{4} + \frac{\Phi_{\text{interior estator}}^2}{4} \right)$$

$$I_x = 274975,77 \text{ kgm}^2$$

$$I_y = \frac{1}{4} \text{Masa estator} \left( \frac{\Phi_{\text{exterior estator}}^2}{4} + \frac{\Phi_{\text{interior estator}}^2}{4} \right)$$

$$+ \frac{1}{12} \text{Masa estator } L^2$$

$$I_y = 140563,65 \text{ kgm}^2$$

**4.1.7. Cálculo del par máximo**

$$M_{\text{max}} = \frac{P_{\text{nominal}}}{\omega_{\text{nominal}}}$$

$$M_{\text{max}} = 4,377 \cdot 10^6 \text{ Nm}$$

**4.2. Buje****Datos**

- Densidad Acero S-275 ( $\rho$ ) = 7850 kg/m<sup>3</sup>
- Masa buje = 4 · 10<sup>4</sup> kg
- Diámetro buje ( $\Phi_{\text{bujes}}$ ) = 3 m

## Cálculos

Modelamos el buje como un paraboloides hueco de acero para el cálculo de las inercias:

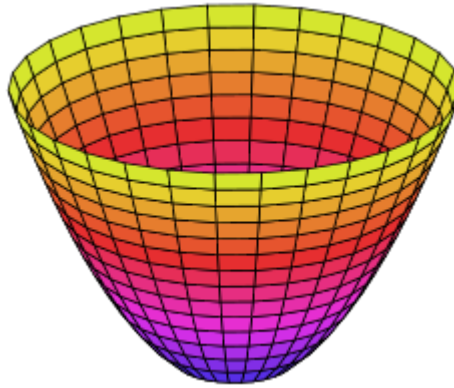


Ilustración 51: paraboloides - Fuente [13]

### 4.2.1. Cálculo altura paraboloides (h)

$$\text{Volumen paraboloides} = \text{Volumen buje} = \frac{\text{Masa buje}}{\rho}$$

$$\text{Volumen paraboloides} = \text{Volumen buje} = 5,1 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen paraboloides} = \frac{\pi \left(\frac{\Phi_{\text{bujes}}}{2}\right)^2 h}{\rho}$$

$$h = 1,44 \text{ m}$$

### 4.2.2. Cálculo inercia del buje

$$I_x = \frac{\text{Masa buje} \left(\frac{\Phi_{\text{bujes}}}{2}\right)^2}{3}$$

$$I_x = 3000 \text{ kgm}^2$$

$$I_y = I_z = \frac{1}{2} \text{Masa buje} \left(\frac{1}{3} \left(\frac{\Phi_{\text{bujes}}}{2}\right)^2 + h^2\right)$$

$$I_y = I_z = 56587,28 \text{ kgm}^2$$

### 4.2.3. Cálculo coeficiente de arrastre del buje

Para el cálculo del coeficiente de arrastre del buje, se recurrirá al valor tabulado de una semi- esfera:



Shape		Drag Coefficient
Sphere	→ 	0.47
Halfsphere	→ 	0.42

Ilustración 52: Drag coeficients - Fuente [14]

Valor seleccionado para el coeficiente de arrastre del buje = 0,42

### 4.3. Torre

#### Datos

- Densidad Acero S-275 ( $\rho$ )= 7850 kg/m<sup>3</sup>
- Altura total torre = 133 m
- Diámetro interior torre ( $\phi_{interior\ torre}$ ) = 5,7 m
- Masa total de la torre = 1,9 10<sup>6</sup> kg

#### Cálculos

Modelamos el buje como un paraboloides hueco de acero para el cálculo de las inercias:

#### 4.3.1. Cálculo diámetro exterior torre ( $\phi_{exterior\ torre}$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} Volumen\ torre = L \left( \pi \frac{\phi_{exterior\ torre}^2}{4} - \pi \frac{\phi_{interior\ torre}^2}{4} \right) \\ Masa\ torre = \rho\ Volumen\ torre \\ \phi_{exterior\ torre} = 5,9\ m \end{array} \right.$$

#### 4.3.2. Cálculo espesor de la torre ( $\delta$ )

$$\delta = \frac{\phi_{exterior\ torre} - \phi_{interior\ torre}}{2}$$

$$\delta = 0,1\ m$$

### 4.3.3. Cálculo coeficiente de arrastre torre

Para el cálculo del coeficiente de arrastre del buje, se recurrirá la siguiente tabla:

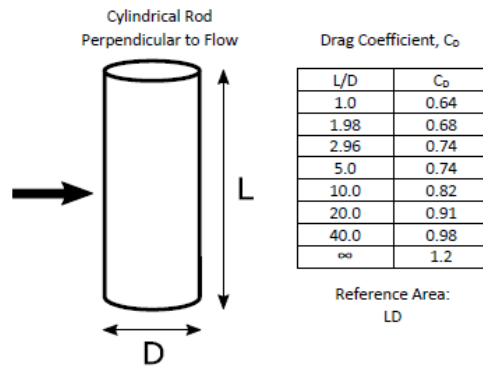


Ilustración 53: vertical cilinder drag coefficinets – Fuente [15]

$$L/D = \frac{\text{Longitud torre}}{\phi_{\text{exterior torre}}}$$

$$L/D = 22,54$$

Entrando con ese valor en la columna izquierda de la tabla,, se obtiene que el coeficiente de arrastre de Latorre será= 0,92.

### 4.4. Góndola

La góndola del aerogenerador tiene forma cilíndrica, pero en Bladed 4.6 tan solo admite formas prismáticas, de tal forma que los parámetros que se introducirán en el modelo, serán los del cuadrado que quede circunscrito por la circunferencia de la góndola real.

#### Datos

- Densidad Acero S-275 ( $\rho$ )= 7850 kg/m<sup>3</sup>
- Dimensiones de la góndola:  
Cilindro con diámetro ( $\phi_{\text{exterior gondola}}$ )= 8,5 m y longitud (L) = 8m
- Masa global de la góndola (no incluido rotor aerodinámico): 2 10<sup>5</sup> kg
- Masa rotorica = 5 10<sup>4</sup>kg
- Masa estatorica = 2,184 10<sup>4</sup>kg
- Centro de masas de la góndola: X=- 1000; Z=+3000mm
- -Origen de coordenadas: cruce del plano horizontal 200 mm sobre la torre con el eje de la torre

#### Cálculos

**4.4.1. Cálculo masa góndola**

$$\begin{aligned} \text{Masa góndola} &= 2 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^4 - 2,184 \cdot 10^4 \\ \text{Masa góndola} &= 128160 \text{ kg} \end{aligned}$$

**4.4.2. Cálculo diámetro interno góndola ( $\Phi_{\text{interno góndola}}$ )**

$$\begin{aligned} \text{Masa góndola} &= \rho L \left( \pi \frac{\Phi_{\text{exterior góndola}}^2}{4} - \pi \frac{\Phi_{\text{interior góndola}}^2}{4} \right) \\ \Phi_{\text{interior góndola}} &= 8,35 \text{ m} \end{aligned}$$

**4.4.3. Cálculo espesor góndola ( $\delta$ )**

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\Phi_{\text{exterior góndola}} - \Phi_{\text{interior góndola}}}{2} \\ \delta &= 0,077 \text{ m} \end{aligned}$$

**4.4.4. Cálculo altura centro de masas respecto al extremo superior de la torre**

El centro de masas de la góndola está referenciado al sistema de coordenadas del sistema de guiñada, el cual se encuentra 200 mm sobre la torre.

$$\begin{aligned} Z_G &= Z_o + Z_g \\ Z_G &= 3200 \text{ mm} \end{aligned}$$

**4.4.5. Cálculo inercia de guiñada (Yaw inertia)**

Inercia de la góndola alrededor del eje de la torre

$$\begin{aligned} I_y &= \frac{1}{4} \text{Masa góndola} \left( \frac{\Phi_{\text{exterior góndola}}^2}{4} + \frac{\Phi_{\text{interior góndola}}^2}{4} \right) \\ &\quad + \frac{1}{12} \text{Masa góndola} L^2 \\ I_y &= 1,82 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Aplicando Esteiner para trasladar la inercia a su punto de aplicación:

$$\text{esteiner: } I_o = I_g + m d^2 \Rightarrow \text{Inercia de guiñada} = 1,948 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2$$

Donde d es la distancia entre el centro de masas de la góndola y el eje de la torre = 1m

#### 4.4.6. Cálculo inercia de cabeceo (Nodding inertia)

$$I_y = \frac{1}{4} \text{Masa góndola} \left( \frac{\phi_{\text{exterior góndola}}^2}{4} + \frac{\phi_{\text{interior góndola}}^2}{4} \right) + \frac{1}{12} \text{Masa góndola} L^2$$

$$I_y = 1,82 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2$$

Inercia de cabeceo =  $1,82 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2$

#### 4.4.7. Cálculo inercia de alabeo (Rolling inertia)

$$I_x = \frac{1}{2} \text{Masa góndola} \left( \frac{\phi_{\text{exterior góndola}}^2}{4} + \frac{\phi_{\text{interior góndola}}^2}{4} \right)$$

$$I_x = 2,27 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2$$

Inercia de alabeo =  $2,27 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2$

#### 4.4.8. Cálculo coeficiente de arrastre de la góndola

Para el cálculo del coeficiente de arrastre del buje, se recurrirá la siguiente tabla:

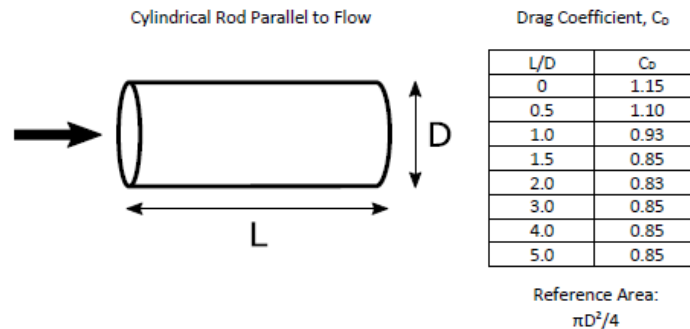


Ilustración 54: horizontal cylinder drag coefficients – Fuente [16]

$$L/D = \frac{\text{Longitud torre}}{\phi_{\text{exterior torre}}}$$

$$L/D = 22,54$$

Entrando con ese valor en la columna izquierda de la tabla,, se obtiene que el coeficiente de arrastre de Latorre será= 0,92.

## 4.5. Transmisión

### Datos

- Densidad Acero S-275 ( $\rho$ ) = 7850 kg/m<sup>3</sup>
- Diámetro transmisión ( $\Phi_{\text{externo transmisión}}$ ) = 6,8 m
- Masa rotórica = 5 10<sup>4</sup>kg
- Posición cojinete anterior = -3197 mm
- Posición cojinete posterior = 950 mm
- Par máximo ( $M_{\text{max}}$ ) = 4,377 10<sup>6</sup>Nm
- Rendimiento de la transmisión ( $\eta$ ) = 96%

### Cálculos

#### 4.5.1. Cálculo masa transmisión

$$\text{Masa transmisión} = \text{Masa rotórica} - \text{Masa rotor}$$

$$\text{Masa transmisión} = 28551,6 \text{ kg}$$

#### 4.5.2. Cálculo longitud transmisión (L)

$$L = \text{Posición cojinete posterior} - \text{Posición cojinete anterior}$$

$$L = 4,15 \text{ m}$$

#### 4.5.3. Cálculo diámetro interno transmisión ( $\Phi_{\text{interno transmisión}}$ )

$$\text{Masa transmisión} = \rho L \left( \pi \frac{\Phi_{\text{exterior transmisión}}^2}{4} - \pi \frac{\Phi_{\text{interior transmisión}}^2}{4} \right)$$

$$\Phi_{\text{interior góndola}} = 6,54 \text{ m}$$

#### 4.5.4. Cálculo inercia transmisión

$$I_x = \frac{1}{2} \text{Masa transmisión} \left( \frac{\Phi_{\text{exterior transmisión}}^2}{4} + \frac{\Phi_{\text{interior transmisión}}^2}{4} \right)$$

$$I_x = 3,1810^5 \text{ kgm}^2$$

$$I_y = \frac{1}{4} \text{Masa transmisión} \left( \frac{\Phi_{\text{exterior transmisión}}^2}{4} + \frac{\Phi_{\text{interior transmisión}}^2}{4} \right)$$

$$+ \frac{1}{12} \text{Masa transmisión } L^2$$

$$I_y = 2 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$$

#### 4.5.5. Cálculo de las pérdidas de par mecánico

$$M_{\text{perdidas}} = M_{\text{max}} (1 - \eta)$$

$$M_{\text{perdidas}} = 175 \text{ kNm}$$

## 4.6. Diseño de los controles del aerogenerador

### Datos

- Potencia nominal ( $P_{nominal}$ ) = 5 Mw  $\pm$  10%
- Densidad del aire ( $\rho$ ) = 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- Coeficiente de potencia óptimo ( $C_{p\ óptimo}$ ) = 0,452
- Radio del aérea barrida por el rotor aerodinámico ( $r_{area\ barrida}$ ) = 63,5 m
- Ratio de velocidad punta ( $\lambda$ ) = 8,7
- Relación de reducción (G) = 1

### Cálculos

#### 4.6.1. Cálculo velocidad del viento nominal:

$$P_{nominal} = \frac{1}{2} \rho C_{p\ óptimo} \pi r_{area\ barrida}^2 V_{hub\ nominal}^3$$

$$V_{hub\ nominal} = 11,686\ m/s$$

#### 4.6.2. Cálculo PI control de par

La búsqueda de los valores del control se realizará de forma iterativa:

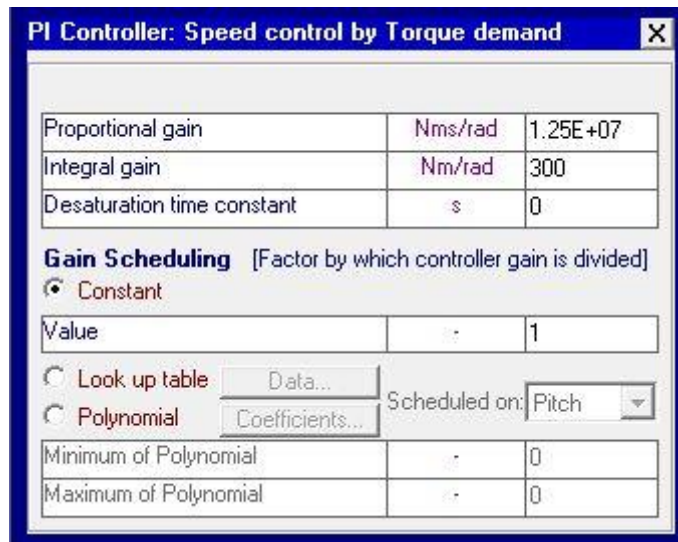
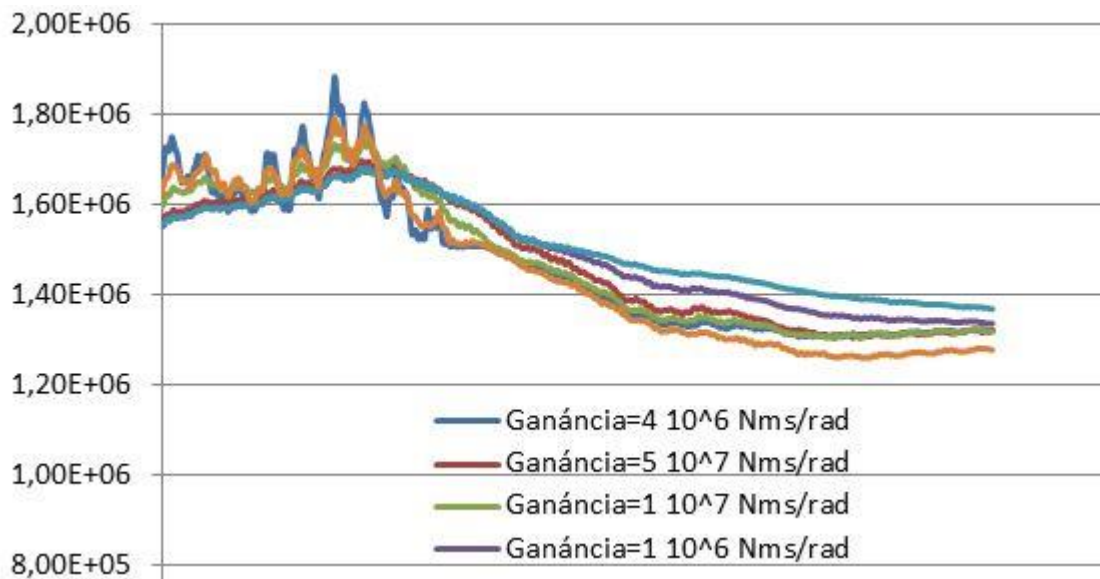


Ilustración 55: menú control de par – Fuente: elaboración propia

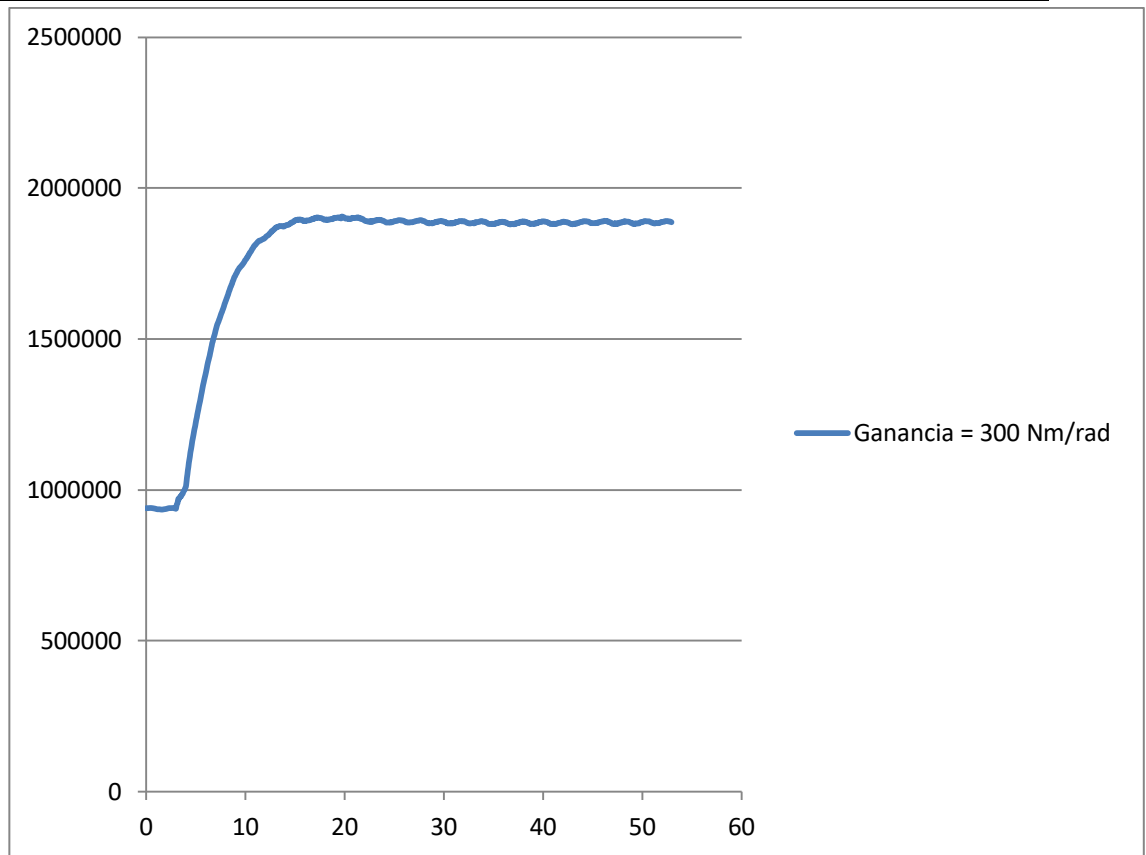
En primer lugar, con la ganancia integral igualada a cero, se le darán valores a la ganancia proporcional. El objetivo de este proceso es encontrar el punto en el cual el control comenzará a oscilar:



**Ilustración 56: gráfica cálculo ganancia proporcional PI control de par – Fuente: elaboración propia**

Después de numerosas iteraciones, se determina que el punto crítico en el cual el control comienza a oscilar es con una ganancia de  $2,5 \cdot 10^7 \text{ Nms/rad}$ . A partir de este resultado, se determinará el valor de la ganancia proporcional del control de par como la mitad de este valor  $1,25 \cdot 10^7 \text{ Nms/rad}$ .

En segundo lugar, se buscará encontrar el valor apropiado para la ganancia integral:



**Ilustración 57: gráfica cálculo ganancia integral PI control de par – Fuente: elaboración propia**

Como se puede observar, con un valor de 300 Nm/rad la gráfica de potencia es bastante estable. El resultado final que se empleará en el modelo será:

- Ganancia proporcional control de par =  $1,25 \cdot 10^7 \text{ Nms/rad}$
- Ganancia integral control de par =  $300 \text{ Nm/rad}$

#### 4.6.3. Cálculo PI control de paso

Para el diseño del control de paso se llevará a cabo el mismo procedimiento que para el control de par.

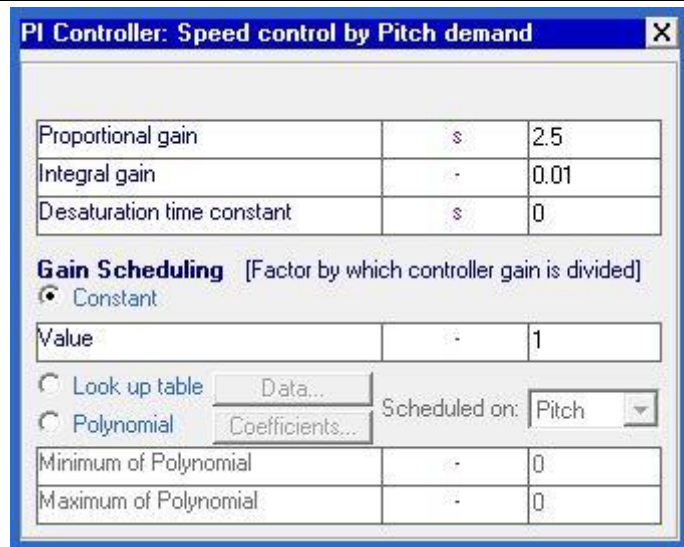


Ilustración 58: menú control de paso – Fuente: elaboración propia

En primer lugar se procede a encontrar el valor apropiado de la ganancia proporcional:

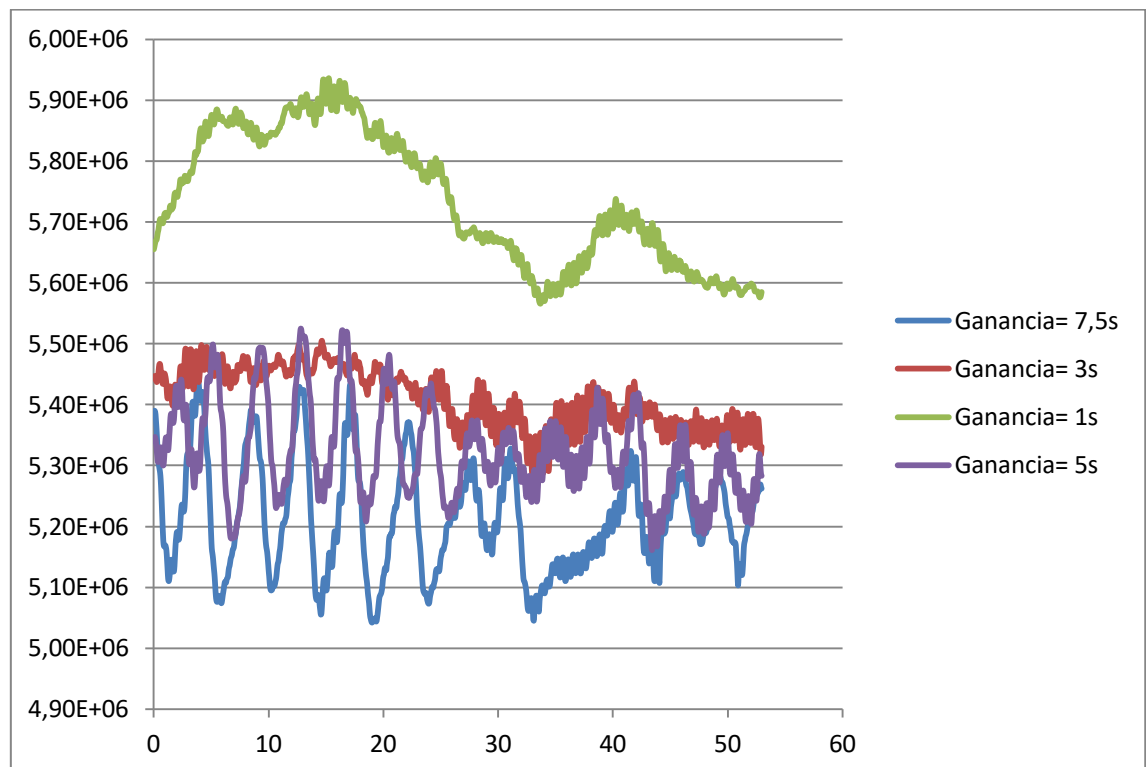
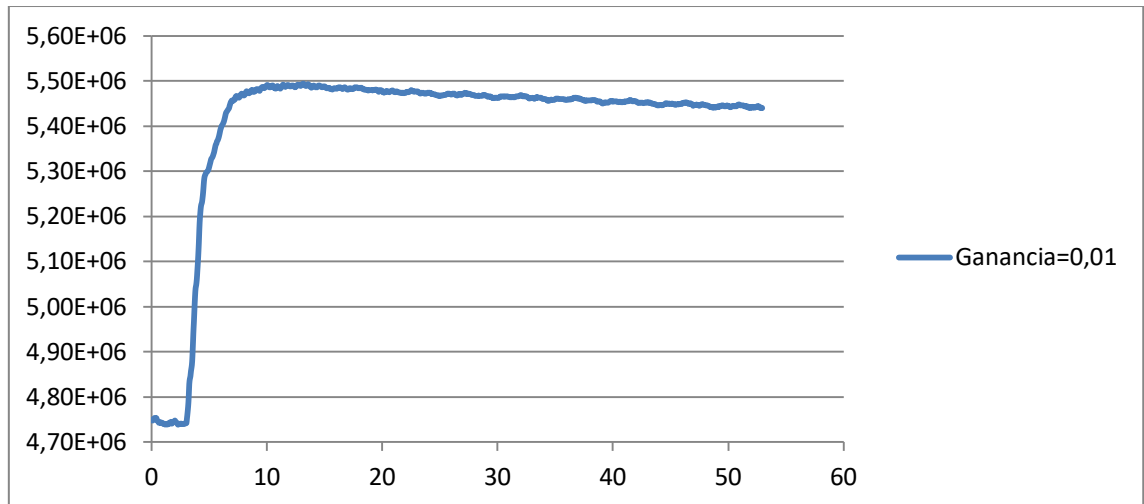


Ilustración 59: gráfica cálculo ganancia proporcional PI control de paso – Fuente: elaboración propia

Se observa que la gráfica comienza a oscilar a partir de una ganancia de 5s. Por lo tanto, el modelo utilizará un valor de ganancia proporcional de 2,5 s. A continuación, se procede a definir el valor de la ganancia integral:



**Ilustración 60: gráfica cálculo ganancia integral PI control de paso – Fuente: elaboración propia**

Se observa que la gráfica tiene un buen comportamiento para una ganancia integral de 0,01. Por lo tanto, el control de paso quedará definido con los siguientes valores:

- Ganancia proporcional control de paso = 2,5 s
- Ganancia integral control de paso = 0,01

#### 4.6.4. Modo óptimo de ganancia

$$k_{opt} = \frac{\pi \rho r_{rotor}^5 c_p}{2 \lambda^3 G}$$

$$k_{opt} = 1368937,03 \text{ kgm}^2$$

### 4.7. Sistema de guiñada

#### Datos

- Masa de las palas ( $m_{palas}$ )= 22170 kg
- Masas rotóricas de la transmisión más generador ( $m_{rotorica}$ ) =  $5 \cdot 10^4$  kg

- Masa global de la góndola (sin rotor aerodinámico) ( $m_{g\acute{o}ndola}$ ) =  $2 \cdot 10^5 \text{ kg}$
- Masa del buje (sin incluir las palas) ( $m_{buj\acute{e}}$ ) =  $4 \cdot 10^4 \text{ kg}$
- Valor estimado del coeficiente de rozamiento torre-góndola ( $\mu$ ) = 0,3
- Valor de la aceleración de la gravedad ( $g$ ) =  $9,81 \text{ m/s}^2$
- Diámetro de la torre ( $\phi_{torre}$ ) =  $5,7 \text{ m}$

### Cálculos

#### 4.7.1. Fricción sistema de guiñada

$$m_{total} = 3 m_{palas} + m_{rotorica} + m_{g\acute{o}ndola} + m_{buj\acute{e}}$$

$$F_{roz} = \mu m_{total} g = 1049208,93 \text{ N}$$

$$M_{roz} = F_{roz} \frac{\phi_{torre}}{2}$$

$$M_{roz} = 2990,25 \text{ kNm}$$

### 4.8. DLC 1.1

#### Datos

- Velocidad del viento en los casos de estudio ( $V_{hub}$ ):
  - 3,5 m/s
  - 11,686 m/s
  - 30 m/s

#### Cálculos

##### 4.8.1. Cálculo de la desviación típica de la componente longitudinal del viento:

$$\sigma = \frac{I_{15}(15 + a V_{hub})}{a + 1}$$

Dónde:

- $\sigma$ : desviación típica de la componente longitudinal del viento
- $I_{15}$ : Intensidad de la turbulencia a una velocidad de 15 m/s.  $a$ : Pendiente de la intensidad de la turbulencia.
- $V_{hub}$ : Velocidad del viento a la altura del buje [m/s]

Wind turbine class	I	II	III	S
– V <sub>ref</sub> [m/s]	50	42.5	37.5	Site specific
– V <sub>ave</sub> [m/s]	10	8.5	7.5	
– A I15 (-)	0.18			
– a (-)	2			
– B I15 (-)	0.16			
– a (-)	3			
– C I15 (-)	0.145			
– a (-)	3			

**Tabla 42: parámetros básicos para las clases de turbinas. Norma GL [5]**

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos para las tres velocidades:

V <sub>hub</sub> [m/s]	σ [m/s]	σ [%]
3,5	1,02	29,1433
11,686	2,0022	17,13
30	4,2	14

**Tabla 43: desviación típica componente longitudinal viento – Fuente: elaboración propia**

#### 4.9. DLC 1.3

Cálculo del incremento de velocidad de viento así como del cambio de dirección de viento simultaneo para el caso de carga ECG (Extreme coherent gust/ráfaga extrema coherente)

- V(z,t)= aumento de la velocidad del viento
- $\theta_{cg}(V_{hub})$ = cambio dirección del viento
- V<sub>cg</sub>= 15 m/s (valor definido por (REFERENCIA GL))

$$V(z, t) = \begin{cases} V(z) & \text{for } t < 0 \\ V(z) + 0,5 V_{cg} \left( 1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) \right) & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ V(z) + V_{cg} & \text{for } t > T \end{cases}$$

Amplitud del cambio de dirección del viento:

$$\theta_{cg}(V_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ & \text{for } V_{hub} < 4 \text{ [m/s]} \\ \frac{720^\circ \left[ \frac{m}{s} \right]}{V_{hub}} & \text{for } 4 \text{ [m/s]} \leq V_{hub} \leq V_{ref} \end{cases}$$

Amplitud del cambio en la dirección del viento simultaneo al incremento de velocidad del aire:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & \text{for } t < 0 \\ \pm 0,5 \theta_{cg} \left( 1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) \right) & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ \pm \theta_{cg} & \text{for } t > T \end{cases}$$

Resultados obtenidos para las distintas velocidades de estudio:

Velocidad de viento inicial	Velocidad final del viento	Variación ángulo viento
3,5 m/s	18,5 m/s	180°
11,686 m/s	26,686 m/s	61,61°
30 m/s	45 m/s	24°

Tabla 44: tabla de velocidades y ángulos DLC 1.3

#### 4.10. Dimensionamiento de engranajes del sistema de guiñada

##### Datos:

- Diámetro primitivo de sistema de orientación: 5925 mm
- Módulo sistema de orientación: 24 mm
- Velocidad de orientación ( $w_{corona}$ ): 0,3°/s=0,00524 rad/s
- Tiempo de aceleración giro: 6 segundos
- Par nominal de cada accionamiento: 49,0 kNm
- Par de pico de cada accionamiento (Par pico): 98,1 kNm
- Relación engranajes reductora: 1253,6
- Z piñón: 14
- Potencia nominal motor: 5,5 kW
- Velocidad motor: 940 rpm = 98,44 rad/s
- Rendimiento (motor+reductora) ( $\eta$ ): 70,00%
- Par máximo requerido por el sistema de guiñada: 6,15 10<sup>6</sup>Nm

##### Cálculos:

##### 4.10.1. Cálculo velocidad del piñón ( $w_{piñon}$ )

$$w_{\text{piñon}} = \frac{\text{Velocidad motor}}{\text{Relación engranajes reductora}}$$

$$w_{\text{piñon}} = 0,079 \text{ rad/s}$$

#### 4.10.2. Cálculo radio del piñón ( $r_{\text{piñon}}$ )

$$v_{\text{corona}} = w_{\text{corona}} r_{\text{corona}}$$

$$v_{\text{corona}} = 0,0155 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{corona}} = v_{\text{piñon}}$$

$$r_{\text{piñon}} = \frac{v_{\text{piñon}}}{w_{\text{piñon}}}$$

$$r_{\text{piñon}} = 0,1965 \text{ m}$$

#### 4.10.3. Relación engranajes ( $R_{\text{engranaje}}$ )

$$R_{\text{engranaje}} = \frac{w_{\text{piñon}}}{w_{\text{corona}}}$$

$$R_{\text{engranaje}} = 15,076$$

#### 4.10.4. Número de motores necesarios en el sistema de guiñada

$$\text{número de motores} = \frac{\text{Par maximo requerido}}{R_{\text{engranaje}} \text{ Par pico } \eta}$$

$$\text{número de motores} = 5,97$$

### 4.11. Dimensionamiento cojinete

#### Datos

- $M_z = 4,41 \cdot 10^6 \text{ Nm}$
- $M_{xy} = 1,66 \cdot 10^7 \text{ Nm}$
- $F_z = 2,88 \cdot 10^6 \text{ N}$
- Diámetro interior = 5925 mm
- Espesor = 200 mm
- Densidad Acero S-275 ( $\rho$ ) = 7850 kg/m<sup>3</sup>
- Coeficiente de seguridad ( $\gamma$ ) = 1,2 (según norma GL [\[5\]](#))

## Cálculos

### 4.11.1. Dimensionamiento cojinete a torsión:

$$\begin{cases} I_o = I_x + I_y = 2 \frac{\pi(\phi_{exterior}^4 - \phi_{interior}^4)}{64} \\ \tau = \frac{\sigma}{2\gamma} = \frac{Mz}{I_o} \rho \end{cases}$$

El diámetro exterior para que el cojinete soporte la torsión es demasiado pequeño, por lo tanto, se supondrá un diámetro y se harán el resto de cálculos a partir de este.

$$\phi_{exterior} = 6125 \text{ mm}$$

### 4.11.2. Dimensionamiento cojinete a flexión:

Para el dimensionamiento a flexión, se utilizará la fórmula de Navier:

$$\sigma_{xx} = \frac{Fz}{A} + \frac{Mxy}{Wxy}$$

Dónde el momento resistente (Wxy) de un cilindro hueco es:

$$Wxy = Wx + Wy = 2 \frac{\pi(\phi_{exterior}^3 - \phi_{interior}^3)}{32}$$

El área (A) de un cilindro hueco es:

$$A = \frac{\pi(\phi_{exterior}^2 - \phi_{interior}^2)}{4}$$

Aplicando la siguiente formula se obtendrá el valor esfuerzo máximo a flexión para este componente:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \gamma \left( \frac{Fz}{A} + \frac{Mxy}{Wxy} \right) \\ \sigma_{xx} &= 5,06 \cdot 10^6 \text{ Pa} \end{aligned}$$

### 4.11.3. Comprobación cojinete a fatiga:

Para realizar el estudio de fatiga, se empleará la regla de Palmgren-Miner:

$$\sum_{j,k} \frac{n_{jk}}{N(\gamma S_k)} \leq 1$$

Dónde:

- $n_{jk}$  = número de ciclos
- $N$  = número de ciclos máximos antes de fallo
- $\gamma$  = Coeficiente de seguridad (según norma GL [5])

- $S_k$ =Rango de carga para cada ciclo

En primer lugar, se deben obtener las tensiones producidas por cada uno de los esfuerzos:

$$\sigma_z = \frac{Fz}{A} = 1,52 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{xy} = \frac{Mxy}{W_{xy}} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$$

Una vez obtenidas las tensiones, y conociendo en número de ciclos de cada una de las gráficas de fatiga. Se entra en la curva S-N:

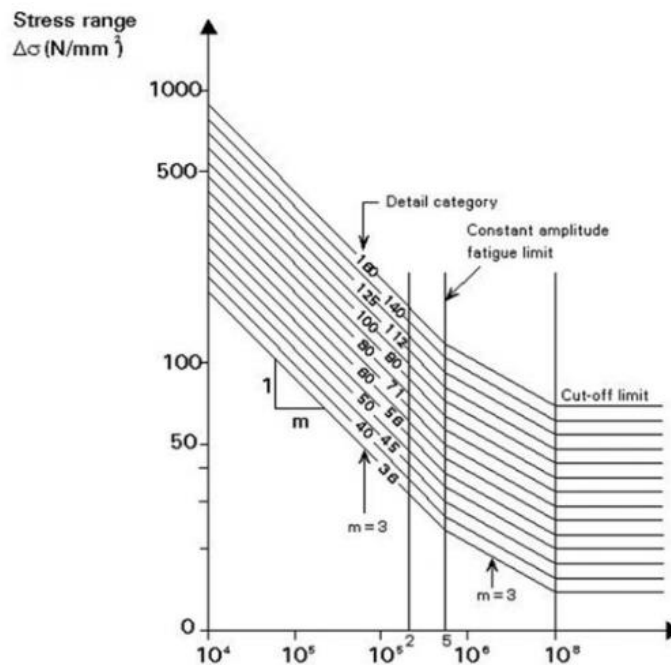


Ilustración 61: curva S-N - Fuente []

Al tratarse de un cilindro hueco, se entrará por la curva más alta (no hay geometría mejor contra fatiga que un cilindro). Atendiendo a la curva S-N y a la magnitud de las tensiones, se puede garantizar que el cojinete no romperá por fatiga.

# CONCLUSIONES

---

## 5. Conclusión

La principal conclusión de este proyecto, es la necesidad de contar con un sistema de orientación en los aerogeneradores. Sin este componente, la energía producida se vería drásticamente reducida y las cargas sobre el aparato serían considerablemente mayores, lo que obligaría a montar componentes más caros para soportar las tensiones producidas.

En cuanto a las gráficas de potencia generada obtenidas, se han percibido ligeras oscilaciones. Estas fluctuaciones son debidas a una baja optimización del control de par, así como del control de paso. Para conseguir curvas de potencia más limpias y suaves, se deberían mejorar el diseño de dichos controles.

La versión utilizada del programa Bladed 4.6., ha sido una muy buena herramienta para el desarrollo del trabajo. No obstante, cabe destacar que las limitaciones de la licencia educativa:

- En primer lugar, a la hora de introducir datos como la geometría de las palas, estaba limitado el número de secciones disponibles, esto ha hecho que se pierda bastante información respecto a los datos aportados por el fabricante.
- En segundo lugar, las simulaciones con esta licencia están limitadas a 60 segundos, cuando el mínimo tiempo, según la norma GL, debería ser de 10 minutos.
- En tercer lugar, solo permite realizar simulaciones considerando la componente longitudinal del viento. De esta forma se dejan de tener en cuenta las componentes transversal y vertical, las cuales son indispensables para realizar simulaciones fiables.
- Por último, numerosas opciones ofrecidas por la versión completa se encuentran bloqueadas. Lo que ha limitado las posibilidades de estudio de este proyecto.

Por estas razones, la licencia educativa es suficiente para aprender a utilizar el software y comprender como se comporta el aparato de estudio en rasgos generales. Pero en caso de precisar datos precisos, es necesaria la versión completa.

### 5.1. Futuros proyectos:

Para futuros proyectos que deseen estudiar y comparar las diferentes estrategias de guiñada, se aconseja estudiar los sistemas de orientación de par controlado. Los cuales no han podido ser estudiados en este trabajo, debido a las limitaciones de la licencia educativa.

# ANEXOS

## ANEXO I: Objetivos de Desarrollo Sostenible

El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales desarrollaron a través de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) una nueva agenda de desarrollo sostenible. En esta agenda se especifican un conjunto de objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con el fin de erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos. Cada uno de estos objetivos cuenta con unas metas específicas que se deben alcanzar antes del año 2030.



Ilustración 62: objetivos de desarrollo sostenible – Fuente [12]

El diseño de un aerogenerador tiene un claro trasfondo ecológico, ya que su principal objetivo es la producción de energía limpia y sostenible. Estas intenciones, por si solas, cuadran perfectamente con el séptimo objetivo propuesto (7. Energía asequible y no contaminante). Además, al ser África la localización elegida para la instalación de la turbina, se favorecerá el abastecimiento de energía en zonas en vías de desarrollo.

Las principales metas que se cumplen con este proyecto son las siguientes:

**7.2** De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas

**7.3** De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética

**7.b** De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo.

Por otro lado, este proyecto individualmente, participará de este objetivo así como del número 14 (14. Vida submarina), al intentar reducir al mínimo los posibles vertidos de

---

aceites y lubricantes al océano descartando estrategias hidráulicas que utilizan estos productos. De esta forma se desea reducir al mínimo el impacto en el medio marino favoreciendo la vida submarina. Como establece la siguiente meta del objetivo 14:

**14.1** De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes.

Cabe destacar que muchos países europeos, tienen regulada todo tipo de actividad marina con el fin de preservar la vida marina. En concreto, la normativa aplicada en España, la cual regula la instalación de aerogeneradores marinos, viene reflejada en el Real Decreto 79/2019, del 22 de febrero, por el que se regula el informe de compatibilidad y se establecen los criterios de compatibilidad con las estrategias marinas. Boletín Oficial del Estado, 23 de febrero de 2019, núm. 47, pp. 17604 a 17619.

Por último, dada la situación excepcional que se está viviendo en el mundo actualmente, debido a la pandemia provocada por el SARS-CoV-2, se debe mencionar la revisión que ha realizado la ONU en los ODS. Esta revisión prima la salud y bien estar de la población mundial frente a esta pandemia.

En relación con este proyecto, destaca el siguiente objetivo en relación a la producción de energía:

- Aumentar la producción de energía fiable, ininterrumpida y suficiente como preparación para una recuperación económica más sostenible.

Este trabajo aboga por conseguir un aerogenerador robusto y fiable que garantice el suministro energético. Por eso, el sistema de guiñada, se ha diseñado con elementos redundantes. Para reducir al mínimo el tiempo de inutilización del aparato durante una avería.

## ANEXO II: Estudio económico

A continuación, se realizará un análisis económico del diseño, transporte y montaje del sistema de guiñada para un aerogenerador marino.

### Costes directos:

#### Coste de los distintos componentes

Componente	Marca - Nombre	Precio unitario [€/und.]	Nº. de unidades [und.]	Precio total [€]
Accionamiento de guiñada	NGC StanGear - SYW 05 C 3 K 1223 LP + FO 01	10.000	7	70.000
Inversor	KEB – COMBIVERT P6	1.500	7	10.500
Relee – sobrecarga térmica	ABB - 1SAZ211201R1009	80	7	560
Relee – sobreintensidad	ABB - 1SVR450335R0100	200	7	1.400
Cojinete + corona	-	100.000	1	100.000
Sistema de resorte lineal	-	50.000	1	50.000
Veleta + anemómetro	-	500	1	500
<b>TOTAL</b>	-	-	-	<b>232.960</b>

Tabla 45: costes directos - componentes - Fuente: elaboración propia

#### Coste de personal

Actividad	Horas [h]	Precio por horas [€/h]	Precio total [€]
Diseño	800	100	80.000
Montaje	50	50	2.500
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>82.500</b>

Tabla 46: costes directos - personal - Fuente: elaboración propia

#### Coste de transporte

Actividad	Precio total
-----------	--------------

	[€]
Transporte + instalación	30.000

**Tabla 47: costes directos - transporte - Fuente: elaboración propia**

### Total costes directos

<b>Total costes directos</b>	345.460 €
------------------------------	-----------

**Tabla 48: costes directos - Fuente: elaboración propia**

### Costes indirectos:

Estos costes se estiman en un 15% del precio de los costes directos y contabilizan todos aquellos gastos que no forman parte directa del proyecto:

<b>Total costes indirectos</b>	51.819 €
--------------------------------	----------

**Tabla 49: costes indirectos - Fuente: elaboración propia**

### Costes generales:

Estos costes se estiman en un 10 % del precio de los costes directos más los indirectos y contabilizan los gastos de los departamentos auxiliares al proyecto: compras, administración...

<b>Total costes generales</b>	39.727 €
-------------------------------	----------

**Tabla 50: costes generales - Fuente: elaboración propia**

**Resumen de gastos:**

Componente	Marca - Nombre	Precio unitario [€/und.]	Nº. de unidades [und.]	Precio total [€]
Accionamiento de guiñada	NGC StanGear - SYW 05 C 3 K 1223 LP + FO 01	10.000	7	70.000
Inversor	KEB – COMBIVERT P6	1.500	7	10.500
Relee – sobrecarga térmica	ABB - 1SAZ211201R1009	80	7	560
Relee – sobreintensidad	ABB - 1SVR450335R0100	200	7	1.400
Cojinete + corona	-	100.000	1	100.000
Sistema de resorte lineal	-	50.000	1	50.000
Veleta + anemómetro	-	500	1	500
Horas de diseño	-	100	800	80.000
Horas de montaje	-	50	50	2.500
Transporte + instalación	-	-	1	30.000
<b>Total directos</b>	-	-	-	345.460
<b>Total indirectos</b>	-	-	-	51.819
<b>Total generales</b>	-	-	-	39.727
<b>TOTAL</b>	-	-	-	437.006

**Tabla 51: Resumen gastos - Fuente: elaboración propia**

---

### **ANEXO III: Datos aerogenerador**

Los siguientes datos fueron aportados por el director del TFG

- Clase IEC: I
- Turbulencia: B (según GL)
- Condiciones de viento (emplazamiento A): 10,6 m/s de velocidad media, K Weibull 1,979
- Profundidad emplazamiento A: 40 m
- Condiciones de viento (emplazamiento B): 10,8 m/s de velocidad media, K Weibull 1,985
- Profundidad emplazamiento B: 50 m
- Potencia eléctrica generada: 5 MW+10%
- Diámetro rotor aerodinámico: 126 m
- Longitud de las palas: 61,5m
- Diámetro del buje: 3m
- Tipo de transmisión: directa.
- Tipo generador: síncrono a imanes permanentes
- Revoluciones mínimas/nominales/máximas: 6 rpm/12 rpm/ 20rpm
- Rango de viento operativo: 3,5m/s-30m/s
- Ángulo de inclinación eje principal: +6 grados.
- Ángulo de conicidad de las palas: -3 grados.
- Altura buje sobre el nivel medio del mar: 92m
- Coordenadas del centro geométrico del buje: X=-5213; Z=3148mm
- Sistema de coordenadas: coordenadas de orientación (Yaw System Coordinates según GL)
- Origen de coordenadas: cruce del plano horizontal 200 mm sobre la torre con el eje de la torre.
- Masa del buje (sin incluir las palas): 4E4 kg (en su centro geométrico)
- Amortiguamiento de los modos de resonancia de la pala (todos los modos): 0,477%
- Posición del cojinete anterior: XA= -3197; ZA= 2936mm
- Posición del cojinete posterior: XB= 950; ZB=2500mm
- Diámetro interno del rotor en el generador: 6800 mm
- Masas rotóricas de la transmisión más generador: 5 E4 kg
- Centro de masas rotóricas de la transmisión más generador: X=-1340, Z=2710mm
- Pérdidas mecánicas de la transmisión (incluido rotor generador): 4%
- Dimensiones de la góndola: cilindro con diámetro 8,5 m, longitud 8m
- Masa global de la góndola (no incluido rotor aerodinámico): 2E5 kg
- Centro de masas de la góndola: X=- 1000; Z=+3000mm
- Diámetro interior torre: 5700 mm
- Altura sumergida flotante: 45 m
- Altura entrada acoplamiento cables: 55 m
- Altura total torre A: 133 m
- Masa total torre en espera del diseño: 1,9E6 kg
- Clase sistema de control: control de paso
- Velocidad máxima giro palas: 8 grados/segundo
- Tiempo de aceleración giro: 0,2 segundos.
- Diámetro entrehierro del generador: 7000 mm
- Entrehierro del generador: 6 mm
- Número de polos: 360
- Longitud axial de los polos y yugos: 1300 mm
- Altura/anchura de los polos (imanes): 18mm/42,5 mm
- Clase de los imanes: N3616
- Altura de yugos rotórico/estatórico : 15mm/13mm
- Altura y anchura de las ranuras estatoricas: 83mm/9,26 mm
- Número de ranuras por paso polar: 3

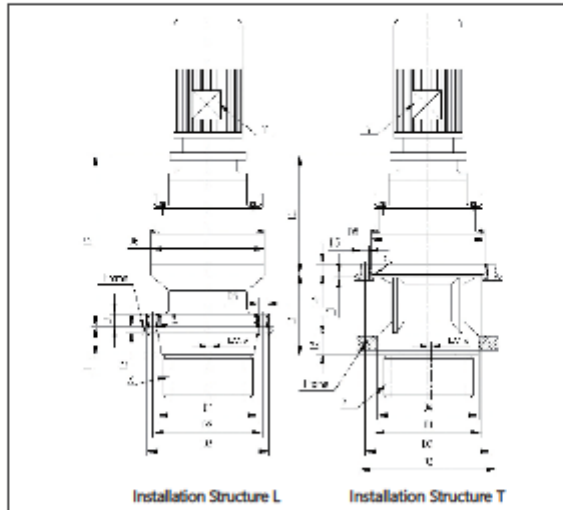
- 
- Resistencia del estator: calcular  $7,7E-2/30$  ohmios
  - Impedancia síncrona: calcular  $3,5E-2$  ohmios
  - Pérdidas en el hierro: calcular  $4,4E4$  W
  - Rendimiento del generador: calcular 95%
  - Tensión nominal: 690V
  - Factor de potencia: 0,9
  - Máxima corriente del convertidor: 6E3A
  - Máxima tensión del convertidor: 800V
  - Rendimiento del convertidor: 97%
  - Potencia de cargas auxiliares:  $1E4$  W
  - Diámetro primitivo de sistema de orientación: 5925 mm
  - Módulo sistema de orientación: 24 mm
  - Velocidad de orientación: 0,3grados/segundo
  - Tiempo de aceleración giro: 6 segundos
  - Par nominal de cada accionamiento: 49,0 kNm
  - Par de pico de cada accionamiento: 98,1 kNm
  - Relación engranajes: 1253,6
  - Z piñón: 14
  - Potencia nominal motor: 5,5 kW
  - Velocidad motor: 940 rpm
  - Rendimiento (motor+reductora): 70,00%
  - Condiciones marítimas
  - Máxima altura significativa de ola (50 años): 5,08 m
  - Periodo pico de ola: 11,01 segundos
  - Densidad del agua:  $1027$  kg/m<sup>3</sup>
  - Máxima variación del nivel del mar (50 años): 3,6 m
  - Máxima velocidad de corriente marina (50 años): 1,3 m/s

---

**ANEXO IV: catalogo sistema de guiñada**



7.1 Yaw Drive



Remark:

Y is electrical motor, further details will be provided on request.

X is output pinion, and can be configured according to (module, number of teeth, tooth width etc.) yaw bearing. Data in the following table are only for selection, not corresponding to the maximum torque of each platform.

The data are only for reference, if you need more detail information please contact NGC f.

Type	Installation Structure	D1	D2	D3	D4	D5	D6	R
SYW 01	L	Φ400	Φ445	Φ490	-	24-Φ22	Φ366	0.8
SYW 03	T	Φ425	Φ460	Φ500	Φ330	18-Φ20	Φ418	1.6
SYW 05	L	Φ410	Φ450	Φ490	-	24-Φ22	Φ424	1.6
SYW 05	T	Φ425	Φ470	Φ510	Φ400	30-Φ20	Φ424	1.6
SYW 07	T	Φ395	Φ435	Φ485	Φ393	24-Φ26	Φ450	2
SYW 09	L	Φ430	Φ495	Φ545	-	28-Φ26	Φ495	2
SYW 11	L	Φ555	Φ600	Φ650	-	32-Φ30	Φ560	2
SYW 13	L	Φ555	Φ630	Φ680	-	32-Φ30	Φ57	2

Table 5

Type	Installation Structure	L1	L2	L3	L4	L5	A	Output connection pinion m n x z x x x b
SYW 01	L	71	645.5	25	37	-	1.5	18 x 14 x 0.5 x 130
SYW 03	T	350	455	15	40	75	2	18 x 14 x 0.5 x 125
SYW 05	L	125	743	25	37	-	2.5	20 x 14 x 0.5 x 180
SYW 05	T	348	505	15	40	71	2.5	25 x 12 x 0.5 x 170
SYW 07	T	115	676	21.5	50	41	1.5	22 x 13 x 0.5 x 165
SYW 09	L	76	915	48	50	-	2.5	25 x 12 x 0.5 x 220
SYW 11	L	97	903	67.5	52.5	-	2.5	24 x 14 x 0.5 x 205
SYW 13	L	160	885	70	70	-	2.5	25 x 14 x 0.5 x 245

Table 6

---

## Bibliografía

- [1] DNV GL – Energy, User manual de Bladed, 2014.
- [2] DNV GL – Energy, Theory manual de Bladed, 2014.
- [3] D. S. N. J. E. B. Tony Burton, Wind energy Handbook, 2001.
- [4] D.W,Dudley, Gear Handbook, McGraw-hill book Company.
- [5] GL Renewables Certification, Guideline for the certification of offshore wind turbines, Hanburgo: Guppy Desing.
- [6] IEC, Wind turbines – Part 1: Desing requirements, Ginebra, 2005
- [7] D.D.Fuller, Coeficients of friction, Colmbia university, 1984.
- [8] Real Decreto 79/2019, del 22 de febrero, por el que se regula el informe de compatibilidad y se establecen los criterios de compatibilidad con las estrategias marinas. Boletín Oficial del Estado, 23 de febrero de 2019, núm. 47, pp. 17604 a 17619.
- [9] M. G. K. P. H. Dalhoff, Yaw systems for wind turbines – Overview of concepts, current challenges and desing methods, Universidad de Hamburgo de Ciencias Aplicadas, 2014.
- [10] CEDEX, Estrategia marina demarcación marina noratlántica parte V. objetivos ambientales, Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, Madrid, 2012.
- [11] H. C. P. T. O. A. S. Stubkier, State of the art-hydraulic yaw system for wind turbines
- [12] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Recuperado de: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- [13] Foto paraboloide. Recuperado de: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/12/Paraboloid\\_of\\_Revolution.svg/230px-Paraboloid\\_of\\_Revolution.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/12/Paraboloid_of_Revolution.svg/230px-Paraboloid_of_Revolution.svg.png)
- [14] Foto coeficiente aerodinámico. Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente\\_de\\_arrastre](https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_arrastre)
- [15] Foto coeficiente arrastre cilindro vertical. Recuperado de: <http://documentation.dsaocean.com/tutorials/Tutorials/PDS-ACP.html>

- 
- [16] Foto coeficiente arrastre cilindro horizontal. Recuperado de: <http://documentation.dsaocean.com/tutorials/Tutorials/PDS-ACP.html>
- [17] Foto aerogenerador Darreius. Recuperado de: <https://docplayer.es/docs-images/68/59821694/images/11-0.jpg>
- [18] Foto estrategias rotor aerodinámico. Recuperado de: <https://repositorio.uho.edu.cu/jspui/bitstream/uho/4433/1/Trabajo%20de%20Diploma%20Bryan%20Ricardo%20Turruellas.pdf>
- [19] Foto aerogenerador tipo veleta. Recuperado de: <https://elektromovil.com/aerogeneradores-domesticos-instalacion-fotovoltaica-autoconsumo/>
- [20] Foto estrategias cimentación. Recuperado de: <http://aquaret.com/>
- [21] Foto torre aerogenerador. Recuperado de: <https://www.evwind.es/wp-content/uploads/2019/10/Work-in-the-wind-power-sector-672x372.png>
- [22] Foto rotor aerogenerador marino. Recuperado de: <https://www.esteyco.com/prototipo-de-aerogenerador-marino-con-la-pionera-tecnologia-elisa/>
- [23] Foto sustentación pala. Recuperado de: <http://www.escueladevueloalas.com.ar/portal/?p=303>
- [24] Foto construcción pala. Recuperado de: <https://www.xataka.com/energia/pala-turbina-grande-mundo-mide-107-metros-su-aerogenerador-casi-colosal-como-torre-eiffel>
- [25] Foto interior buje. Recuperado de: <https://www.banderacountrycourier.com/>
- [26] Foto góndola. Recuperado de: <https://app.mapfre.com/fundacion/html/revistas/seguridad/n135/en/article3.html>
- [27] Foto generador. Recuperado de: <https://www.ge.com/>
- [28] Foto sistema de guiñada. Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/Indirect-estimation-of-the-Yaw-Angle-misalignment-a-Tsioumas-Karakasis/5fbb35a3d7cffe3034dc8218a3685dd3b6f35d97/figure/0>