



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

CIMENTACIÓN Y ESTRUCTURA SOPORTE DE HORMIGÓN PARA AEROGENERADOR MARINO, DIMENSIONADO PARA CARGAS EXTREMAS

Autor: Manuel de la Cruz Perez

Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid

Julio de 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **Cimentación y Estructura Soporte de Hormigón para Aerogenerador Marino, Dimensionado para Cargas Extremas** e la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025/2026 2025/2026 es de mi autoría 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.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

- ☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.
- ☒ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

Ayuda con la estructuración del proyecto, la asistencia en la búsqueda de fuentes, asistencia en la creación de código de MATLAB, ayuda en la corrección ortográfica.

Firmado (alumno): Manuel de la Cruz Perez

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

Fecha: 15/07/2026

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
	
Fdo: JUAN ANTONIO TALAVERA	Fdo:
Fecha: 19/07/2026	Fecha:



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

CIMENTACIÓN Y ESTRUCTURA SOPORTE DE HORMIGÓN PARA AEROGENERADOR MARINO, DIMENSIONADO PARA CARGAS EXTREMAS

Autor: Manuel de la Cruz Perez

Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid

Julio de 2026

CIMENTACIÓN Y ESTRUCTURA SOPORTE DE HORMIGÓN PARA AEROGENERADOR MARINO, DIMENSIONADO PARA CARGAS EXTREMAS

Autor: Cruz Perez, Manuel de la.

Director: Talavera Martín, Juan Antonio

Entidad colaboradora: ICAI- Universidad Pontificia de Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el diseño, dimensionamiento y validación frente a cargas extremas de una cimentación y estructura soporte para un aerogenerador marino de 5MW, utilizando hormigón como material principal. Con este fin se utiliza la herramienta Bladed 4.6 para la creación de un modelo y la realización de las simulaciones necesarias para la obtención de las cargas últimas de diseño. Partiendo de dichas cargas, el dimensionamiento de la cimentación se realiza con la ayuda de MATLAB, siguiendo las normativas GL2012 [GLRC12], Eurocódigo 2 [CEN_04] y DB-SE-C [BOE_21].

Palabras clave: Aerogenerador, GBS, Hormigón, Cargas, extremas, Bladed, MATLAB, Eurocódigo 2

1. Introducción

La producción de energía sostenible es uno de los grandes temas discutidos en el siglo XXI, y dentro de este tema la eólica marina es hoy una de las tecnologías más prometedoras. Comparada con la eólica terrestre tiene las ventajas de la ausencia de obstáculos que produzcan turbulencia y un límite superior para el valor del diámetro de rotor. Según la IEA [IEA_25] y la IRENA [IREN25], la eólica marina podría pasar de suministrar menos del 1% de la demanda energética mundial actual a un 7-10% en 2050.

Dentro de las partes que componen un aerogenerador marino, la cimentación es una de las más vitales, ya que gran parte de la viabilidad del proyecto dependen de ella, en especial a medida que crece la potencia (y con ella el diámetro) del aerogenerador. Para aerogeneradores de gran diámetro de rotor los monopilotes de acero son cada vez una opción menos atractiva, debido a sus grandes dimensiones, lo que complica y encarece su fabricación. En consecuencia, el desarrollo de alternativas de hormigón armado que funcionan por gravedad (GBS) se ha impulsado, por ejemplo, con proyectos ya validados como ELISA/ILSCAN de la compañía española Esteyco [ESTE16]. Siguiendo esta línea, el Trabajo de Fin de Grado que aquí se presenta busca diseñar, dimensionar y validar la cimentación y estructura soporte de hormigón de un aerogenerador marino de 5MW frente a cargas extremas, evaluando la viabilidad técnica y económica del proyecto.

2. Definición del Proyecto

Para el proyecto se ha partido de un modelo base de aerogenerador marino de 5MW construido en Bladed, a partir de este, se han realizado una serie de simulaciones con el objetivo de conseguir las cargas características de diseño (extremas y de fatiga) para distintos casos de carga (DLC) exigidos por la norma IEC 61400-3, y completada con la IEC 61400-1. A partir de estas cargas se ha realizado el dimensionamiento geotécnico y estructural de la cimentación, siguiendo el Eurocódigo 2 [CEN_04] y el DB-SE-C [BOE_21], para terminar el proyecto se comprueba que la estructura diseñada cumple todos los estados límite últimos aplicables.

El objetivo principal en este proyecto es el diseño, dimensionado y validación de una cimentación y estructura soporte de hormigón para un aerogenerador de 5MW frente a cargas extremas. A partir de este objetivo principal se desglosan 4 objetivos secundarios: (1) construir un modelo de Bladed de aerogenerador sobre el que se va a diseñar la cimentación; (2) obtener a través de simulaciones las cargas características de diseño del aerogenerador; (3) Diseño y dimensionado de la cimentación y estructura soporte; (4) análisis técnico de validación del proyecto.

3. Descripción del Modelo/Sistema/Herramienta

Durante el proyecto se utilizan principalmente dos herramientas de software, cada una en partes diferentes del proyecto. La primera es Bladed 4.6 Educational, su uso es fundamental para la creación del modelo del aerogenerador y la realización de las simulaciones de los diferentes casos de carga (DLCs). Se utiliza en su versión educativa, por lo que presenta ciertas limitaciones como lo son: máximo de 10 secciones de pala y 60s de tiempo máximo de simulación. Estas limitaciones obligan a adaptar casos largos a equivalentes deterministas.

La otra herramienta de software utilizada en el proyecto es MATLAB, se utiliza como herramienta de cálculo para conseguir el dimensionado de la estructura y la posterior validación del diseño. Todos estos cálculos se utilizan siguiendo las normativas Eurocódigo 2 [CEN_04], GL 2012 [GLRC12] y DB-SE-C [BOE_21].

4. Resultado

El modelo obtenido tras el dimensionamiento consta de una losa de cimentación circular de $D=53.5\text{m}$, $h=4.00\text{m}$; un fuste lastrado de 12.0m de diámetro y 0.70m de espesor, cilíndrico en 48.6m y troncocónico en los 13.0m superiores con un $D=5.91\text{m}$ en la brida de la torre; y una losa de coronación de 1.80m con un anillo de acero embebido postensado con 28 tendones. La estructura resiste el momento de vuelco de diseño de $601.6\text{MN}\cdot\text{m}$ (DLC 6.1) y el momento final en la mudline de $1090.6\text{MN}\cdot\text{m}$, tras una corrección Delta-Morison.

CIMENTACION GBS -- SECCION LONGITUDINAL COMPLETA (base geometrica para plano, escala 1:1, unidades m)

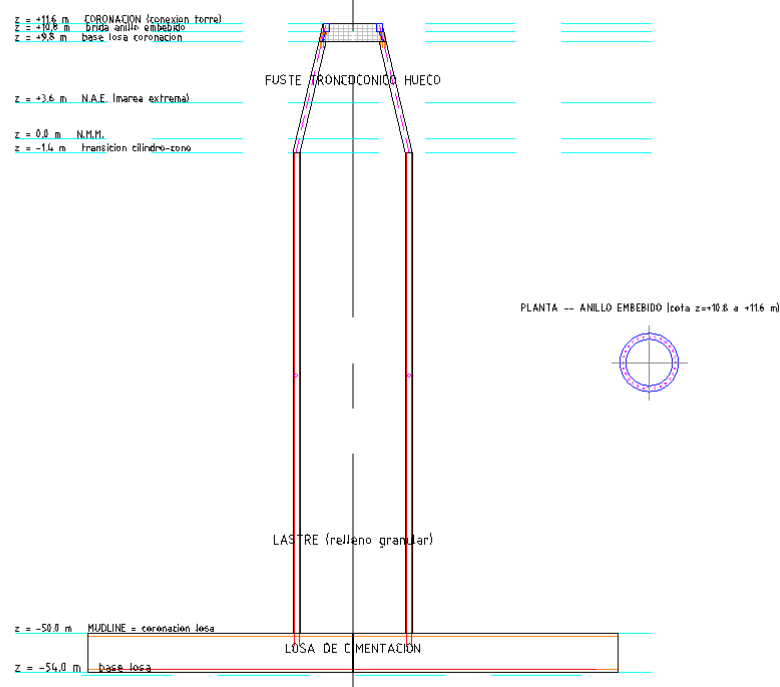


Ilustración 1: Croquis de la cimentación

En la tabla 1 se recogen los 10 coeficientes de seguridad calculados durante la validación del diseño. Se observa que la estructura cumple para todos los casos siendo el factor de seguridad más bajo el de Flexo-compresión del fuste para el DLC 6.1, FS=1.05.

Tabla 1: Resumen global de los coeficientes de seguridad de la cimentación

Comprobación	FS	Estado
Núcleo central (losa)	$e=4.05m \leq 6.35m$	Cumple
Vuelco (losa)	6.60	Cumple
Deslizamiento (losa)	5.80	Cumple
Hundimiento (losa)	15.94	Cumple
Cortante viga ancha (losa)	1.65	Cumple
Flexo-compresión (fuste)	1.05	Cumple
Fatiga, exención (fuste)	margen 26.1%	Cumple
Interfase a cortante losa-fuste	8.54	Cumple
Descompresión del postensado (anillo embebido)	1.14	Cumple
Tirante de anillo, bielas y tirantes (losa de coronación)	1.37	Cumple

5. Conclusiones

En el proyecto queda demostrada la viabilidad técnica de una cimentación por gravedad para aerogenerador de 5MW frente a cargas extremas. Las diez comprobaciones geotécnicas se satisfacen. La metodología seguida, realización de simulaciones aeroelásticas en Bladed y dimensionamiento y validación en MATLAB, es replicable para otros emplazamientos o modelos de turbina.

Varios aspectos de detalle quedan fuera del alcance de este TFG, estos son: fatiga del acero pasivo (artículo 6.8.4 del Eurocódigo 2), trazado completo de los 28 tendones del anillo embebido, diseño en detalle de la composición y estudio a detalle de la virola de acero embebido (espesores, rigidizadores y soldaduras).

6. Referencias

[IEA_25] International Energy Agency (IEA), "Renewables 2025: Renewable Electricity", IEA, París, 2025.

[IREN25] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Power Generation Costs in 2024", IRENA, Abu Dabi, junio 2025.

[ESTE16] Esteyco, "Cimentación por gravedad para la instalación de aerogeneradores offshore y torres meteorológicas", Patente WO2016042173A1, Madrid. Marzo 2016.

[IEC_09] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61400-3: Wind Turbines – Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines", 1ª ed., Ginebra, 2009.

[CEN_04] Comité Europeo de Normalización (CEN), "Eurocódigo 2: Proyecto de Estructuras de Hormigón (UNE-EN 1992-1-1)", Bruselas, 2004.

[MINI06] Ministerio de Fomento, "Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C: Seguridad Estructural – Cimientos", Madrid, 2006 (consultado en codigotecnico.org).

[GLRC12] GL Renewables Certification (Germanischer Lloyd), "Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines", Hamburgo, 2012.

[BOE_21] Gobierno de España, "Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural" (BOE-A-2021-13681), BOE, Madrid, 2021.

Author: Cruz Pérez, Manuel de la.

Supervisor: Talavera Martín, Juan Antonio

Collaborating Institution: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

PROJECT SUMMARY

This Bachelor's Thesis aims to design, size and validate, under extreme loads, a foundation and support structure for a 5 MW offshore wind turbine, using concrete as the main material. To this end, the Bladed 4.6 tool is used to build a model and run the simulations needed to obtain the ultimate design loads. Based on these loads, the foundation is sized with the help of MATLAB, following the GL 2012 [GLRC12], Eurocode 2 [CEN_04] and DB-SE-C [BOE_21] standards.

Keywords: Offshore wind turbine, GBS, Concrete, Extreme loads, Bladed, MATLAB, Eurocode 2

1. Introduction

Sustainable energy production is one of the major topics debated in the 21st century, and within this field offshore wind is today one of the most promising technologies. Compared to onshore wind, it offers the advantages of an absence of obstacles that generate turbulence and a higher upper limit on rotor diameter. According to the IEA [IEA_25] and IRENA [IREN25], offshore wind could grow from supplying less than 1% of current global energy demand to 7-10% by 2050.

Among the parts that make up an offshore wind turbine, the foundation is one of the most critical, since much of the project's viability depends on it — especially as turbine power (and with it, diameter) increases. For large-diameter turbines, steel monopiles are becoming an increasingly less attractive option, as their large dimensions complicate and raise the cost of manufacturing. As a result, the development of gravity-based concrete (GBS) alternatives has been driven forward, for example through already-validated projects such as ELISA/ELICAN by the Spanish company Esteyco [ESTE16]. In this line, the Bachelor's Thesis presented here seeks to design, size and validate the concrete foundation and support structure of a 5 MW offshore wind turbine under extreme loads, assessing the project's technical and economic viability.

2. Project Definition

The project starts from a base model of a 5 MW offshore wind turbine built in Bladed. From this model, a series of simulations were run to obtain the characteristic design loads (extreme and fatigue) for the different load cases (DLC) required by the IEC 61400-3 standard, complemented by IEC 61400-1. Based on these loads, the geotechnical and structural sizing of the foundation was carried out following Eurocode 2 [CEN_04] and DB-SE-C [BOE_21]; to conclude the project, the designed structure is checked against all applicable ultimate limit states.

The main objective of this project is the design, sizing and validation of a concrete foundation and support structure for a 5 MW wind turbine under extreme loads. From this

main objective, four secondary objectives follow: (1) building a Bladed model of the turbine on which the foundation will be designed; (2) obtaining, through simulations, the turbine's characteristic design loads; (3) designing and sizing the foundation and support structure; (4) a technical analysis validating the project.

3. Description of the Model/System/Tool

Two main software tools are used throughout the project, each for a different part of the work. The first is Bladed 4.6 Educational, essential for building the turbine model and running the simulations for the different load cases (DLCs). Because the educational version is used, it presents certain limitations, namely a maximum of 10 blade sections and a maximum simulation time of 60 s. These limits require long-duration cases to be adapted into deterministic equivalents.

The other software tool used in the project is MATLAB, used as a calculation tool to obtain the sizing of the structure and its subsequent validation. All these calculations follow the Eurocode 2 [CEN_04], GL 2012 [GLRC12] and DB-SE-C [BOE_21] standards.

4. Results

The model obtained after sizing consists of a circular foundation slab of $D = 53.5$ m, $h = 4.00$ m; a ballasted shaft 12.0 m in diameter and 0.70 m thick, cylindrical over 48.6 m and conical over the upper 13.0 m, reaching $D = 5.91$ m at the tower flange; and a 1.80 m top slab with an embedded, post-tensioned steel ring with 28 tendons. The structure resists the design overturning moment of $601.6 \text{ MN}\cdot\text{m}$ (DLC 6.1) and the final mudline moment of $1090.6 \text{ MN}\cdot\text{m}$ after the Delta-Morison correction.

CIMENTACION GBS -- SECCION LONGITUDINAL COMPLETA (base geometrica para plano, escala 1:1, unidades m)

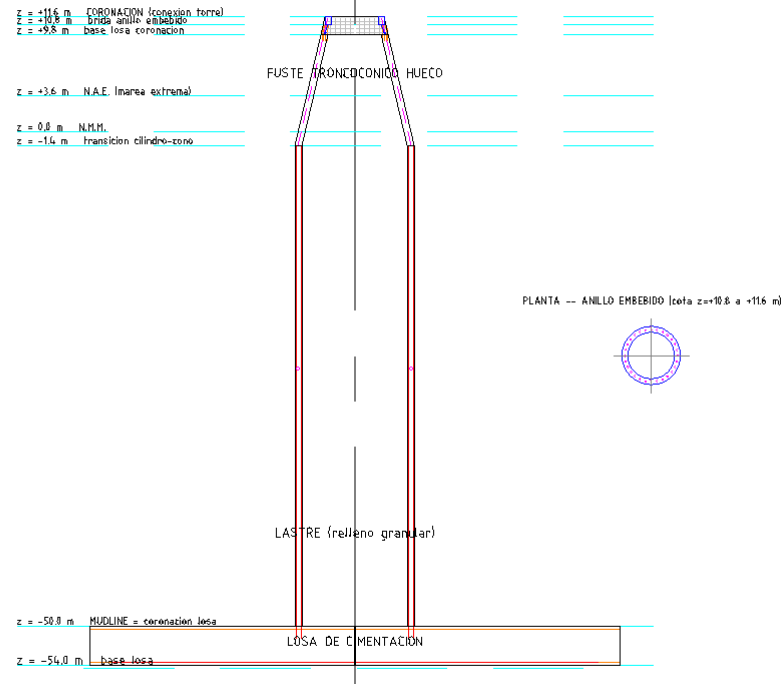


Ilustración 2: Foundation sketch

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. gathers the 10 safety factors calculated during design validation n. The structure is shown to satisfy all cases, with the lowest safety factor being that of the shaft's combined bending and axial load check for DLC 6.1, FS = 1.05.

Tabla 2: Overall summary of foundation safety factors

Check	FS	Status
Central core (slab)	$e=4.05\text{m} \leq 6.35\text{m}$	Pass
Overturning (slab)	6.60	Pass
Sliding (slab)	5.80	Pass
Bearing capacity (slab)	15.94	Pass
Wide-beam shear (slab)	1.65	Pass
Combined vending and axial load (shaft)	1.05	Pass
Fatigue, exemption check (shaft)	margen 26.1%	Pass
Slab-shaft shear interface	8.54	Pass
Decompression of the post-tensioning (embedded ring)	1.14	Pass
Ring tie, strut-and-tie (top slab)	1.37	Pass

5. Conclusions

This project demonstrates the technical viability of a gravity-based foundation for a 5 MW wind turbine under extreme loads. All ten geotechnical and structural checks are satisfied, with the shaft's combined bending and axial load check having the smallest safety margin, $FS = 1.05$. The methodology followed — running aeroelastic simulations in Bladed and carrying out sizing and validation in MATLAB — is replicable for other sites or turbine models.

Several points of detail fall outside the scope of this Bachelor's Thesis, namely: passive-steel fatigue (Eurocode 2, article 6.8.4), the complete layout of the embedded ring's 28 tendons, and a detailed design of the embedded steel shell's composition (thicknesses, stiffeners and welds)

6. References

- [IEA_25] International Energy Agency (IEA), "Renewables 2025: Renewable Electricity", IEA, París, 2025.
- [IREN25] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Power Generation Costs in 2024", IRENA, Abu Dabi, junio 2025.
- [ESTE16] Esteyco, "Cimentación por gravedad para la instalación de aerogeneradores offshore y torres meteorológicas", Patente WO2016042173A1, Madrid. Marzo 2016.
- [IEC_09] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61400-3: Wind Turbines – Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines", 1ª ed., Ginebra, 2009.
- [CEN_04] Comité Europeo de Normalización (CEN), "Eurocódigo 2: Proyecto de Estructuras de Hormigón (UNE-EN 1992-1-1)", Bruselas, 2004.
- [MINI06] Ministerio de Fomento, "Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C: Seguridad Estructural – Cimientos", Madrid, 2006 (consultado en codigotecnico.org).
- [GLRC12] GL Renewables Certification (Germanischer Lloyd), "Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines", Hamburgo, 2012.
- [BOE_21] Gobierno de España, "Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural" (BOE-A-2021-13681), BOE, Madrid, 2021

Índice de la Memoria

1.	Introducción	21
2.	Estado del Arte	22
3.	Definición del Proyecto y Objetivos	24
3.1	Justificación del proyecto.....	24
3.2	Objetivos principales y secundarios.....	25
3.3	Cimentación por gravedad (GBS)	25
3.3.1	Construcción en tierra.....	25
3.3.2	Preparación del lecho marino.....	26
3.3.3	Transporte.....	26
3.3.4	Instalación y fondeo	26
3.3.5	Montaje del aerogenerador	26
4.	Metodología y Normativa	27
4.1	Normativa de referencia.....	27
4.2	Herramientas de software utilizadas	27
5.	Definición y Diseño de Bladed.....	29
5.1	Características técnicas del aerogenerador de referencia	29
5.2	Diseño del modelo	29
5.2.1	Palas.....	30
5.2.2	Airfoil (Perfil Aerodinámico).....	36
5.2.3	Rotor	38
5.2.4	Torre	42
5.2.5	Tren de potencia	44
5.2.6	Góndola	47
5.2.7	Control	49
5.2.8	Modal.....	51
5.2.9	Wind	53
5.2.10	Sea state.....	62
5.3	Modelo de las condiciones ambientales	63
6.	Simulaciones y Análisis de Cargas (DCLs).....	64
6.1	Producción de energía para viento turbulento normal, DCL 1.1	65
6.2	Producción de ráfaga coherente extrema con cambio de dirección, DLC 1.3.....	67
6.3	Parada de emergencia, DLC 5.1	70

6.4	Parada extrema: tormenta de 50 años, DLC 6.1.....	72
6.5	Comparativa de casos y carga de diseño de la cimentación	76
7.	Cálculos justificativos.....	77
7.1	Velocidad nominal del generador.....	77
7.2	Condiciones de la ola en el DLC 1.3.....	77
7.3	Clase de turbulencia y desviación típica del viento.....	78
7.4	Cambio simultáneo de dirección del DLC 1.3.....	78
7.5	Viento extremo de 50 años (EWM) del DLC 6.1.....	78
7.6	Ola extrema de 50 años del DLC 6.1	78
7.7	Comprobaciones de vuelco, deslizamiento y hundimiento.....	79
7.7.1	Vuelco.....	79
7.7.2	Deslizamiento.....	79
7.7.3	Hundimiento	80
8.	Diseño y Dimensionamiento de la Cimentación	81
8.1	Introducción y Metodología.....	81
8.2	Propiedades de los materiales y del suelo	82
8.2.1	Hormigón y acero pasivo.....	82
8.2.2	Acero activo de postensado	83
8.2.3	Parámetros geotécnicos.....	83
8.3	Definición de la geometría.....	84
8.3.1	Cargas de diseño en la mudline	86
8.4	Conexión Torre-Cimentación.....	87
8.4.1	Cargas de diseño en la conexión.....	87
8.4.2	Geometría del anillo embebido y del postensado	88
8.4.3	Mecanismo resistente: bielas y tirantes y aplastamiento.....	88
8.5	Comprobaciones y Factores de Seguridad.....	89
8.5.1	Estabilidad geotécnica de la losa de cimentación.....	89
8.5.2	Losa de cimentación: punzonamiento, cortante flexión.....	90
8.5.3	Fuste: flexo-compresión, fatiga y presión hidrostática.	91
8.5.4	Conexiones entre partes: anclajes y solapes	92
8.5.5	Coherencia del diseño y aspectos pendientes.....	92
9.	Conclusión del proyecto.....	94
	Bibliografía	96
	Anexos	99

Anexo I: Alineación con los ODS	100
Anexo II: Especificaciones del aerogenerador (aportado por el director del TFG)	101
Anexo III: Especificaciones palas	105
Anexo IV: Estudio Económico/Presupuesto	107
Anexo V: Croquis acotado	111
Anexo VI: Códigos utilizados (MATLAB)	113
Código 1: Fuste_Losa_Excentricidad.....	113
Código 2: Comprobaciones Eurocódigo 2	124
Código 3: Comprobaciones Eurocódigo 2, 2ª parte	137
Código 4: Comprobaciones Eurocódigo 2, 3ª parte	146
Código 5: Diseño transición superior	153
Código 6: Diseño transición superior, Cargas reales	159

Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1: Croquis de la cimentación</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 2: Foundation sketch</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 3: interfaz principal Bladed 4.6- fuente: elaboración propia.....</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 4: Blade Properties-Blade Information – Fuente: elaboración propia</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 5: Blade Properties-Blade Geometry – fuente: elaboración propia</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 6: Blade Properties-Mass and Stiffness – fuente: elaboración propia.....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 7: Blade Properties-Additional Mass/Inertia – fuente: elaboración propia</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 8: Aerofoil Database – fuente: elaboración propia</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 9: Turbine Configuration-Turbine and Rotor- fuente: elaboración propia.....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 10: Turbine Configuration-Hub – fuente: elaboración propia</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 11: Tower – fuente: elaboración propia</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 12: Power Train-Transmission – fuente: elaboración propia</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 13: Power Train-Electrical – fuente: elaboración propia</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 14: Power Train-Losses – fuente: elaboración propia.....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 15: Nacelle – fuente: elaboración propia</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 16: Control systems – fuente: elaboración propia</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 17: Torque-speed curve – fuente: elaboración propia</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 18: Modal analysis parameters – fuente: elaboración propia.....</i>	<i>51</i>
<i>Ilustración 19: Modal damping: Blade – fuente: elaboración propia</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 20: Wind: Time varying wind-3D turbulent wind – fuente: elaboración propia</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 21: Wind: wind shear – fuente: elaboración propia</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 22: Wind: tower shadow – fuente: elaboración propia</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 23: Wind: upwind turbine wake – fuente: elaboración propia</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 24: Wind: define turbulence – fuente: elaboración propia</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 25: wind: áxim wind distribution – fuente: elaboración propia</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 26: grafico de densidad de velocidad del viento – fuente: elaboración propia</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 27: Wind:Time varying wind-no variation – fuente: elaboración propia</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 28: Wind: time varying wind-transients – fuente: elaboración propia.....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 29: Sea state: waves – fuente: elaboración propia.....</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 30: Potencia medida, DLC 1.1 - fuente: elaboración propia</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 31: Velocidad del viento en el buje DLC 1.3</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 32: Potencia medida DLC 1.3</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 33: ángulo de paso en la pala 1, DLC 5.1</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 34: Potencia medida, DCL 5.1</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 35: potencia medida, DCL 6.1.....</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 36: ángulo de paso pala 1, DCL 6.1</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 37: Gráfica comparativa de momentos de diseño</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 38: Croquis de la cimentación.....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 39: Croquis de la sección longitudinal completa acotada de la cimentación</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 40: Croquis de la planta acotada del anillo embebido</i>	<i>112</i>

Índice de la Tablas

Tabla 1: Resumen global de los coeficientes de seguridad de la cimentación	10
Tabla 2: Overall summary of foundation safety factors	14
Tabla 3: Datos ambientales del emplazamiento.....	63
Tabla 4: Configuración común a todas las simulaciones	64
Tabla 5: Correlación metoceánica del emplazamiento: turbulencia y estado de mar asociados a cada velocidad media de viento.....	65
Tabla 6: Resultados principales del DLC 1.1 en la cimentación para la combinación colineal viento-oleaje (0°)	66
Tabla 7: Efecto de la desalineación viento-oleaje sobre los momentos máximos en la cimentación (DLC 1.1)	67
Tabla 8: Parámetros de la simulación del DLC 1.3.....	68
Tabla 9: Resultados principales del DLC 1.3 en la cimentación (+ θ_{cg} , velocidad nominal)	69
Tabla 10: Parámetros de la simulación del DLC 5.1	71
Tabla 11: Resultados principales del DLC 5.1 en la cimentación	72
Tabla 12: Parámetros de la simulación del DLC 6.1	74
Tabla 13: Resultados principales del DLC 6.1, combinación (a), en la cimentación	74
Tabla 14: Resultados principales del DLC 6.1, combinación (b), en la cimentación	75
Tabla 15: Estudio de sensibilidad del DLC 6.1: velocidad de viento y método de simulación (combinación a, +8°, Td1).....	75
Tabla 16: Comparativa de momentos característicos y de diseño en la cimentación por caso de carga ..	76
Tabla 17: Propiedades del hormigón y del acero pasivo.....	82
Tabla 18: Propiedades del acero activo de postensado.....	83
Tabla 19: Parámetros geotécnicos del emplazamiento	84
Tabla 20: Dimensiones generales de la cimentación por gravedad (geometría definitiva)	86
Tabla 21: Cargas características y de diseño en el mudline ($z = -50,0$ m).....	87
Tabla 22: Corrección Delta-Morison de las cargas extremas por el ancho real del fuste.....	87
Tabla 23: Cargas de diseño en la coronación del fuste ($z = +11,6$ m).....	88
Tabla 24: Geometría del anillo embebido y parámetros del postensado.....	88
Tabla 25: Comprobaciones del anillo embebido, el postensado y el mecanismo de bielas y tirantes.....	89
Tabla 26: Criterio de no tracción (GL2012 6.8.9.3 [GLRC12]) y estados límite últimos geotécnicos de la losa de cimentación (DB-SE-C [BOE_21])	90
Tabla 27: Comprobaciones de punzonamiento, cortante y flexión de la losa de cimentación ($h = 4,00$ m)	90
Tabla 28: Comprobación a flexo-compresión del fuste y armadura longitudinal	91
Tabla 29: Comprobaciones de fatiga del fuste (DLC 1.1)	91
Tabla 30: Conexiones entre partes: longitudes de anclaje y solape	92
Tabla 31: Resumen global de los coeficientes de seguridad de la cimentación.....	93
Tabla 32: Especificaciones geométricas de la pala LZ62-5.0. Fuente: WINDnovation Engineering Solutions GmbH (2011). [WIND11].....	105
Tabla 33: Propiedades mecánicas de la sección de las palas LZ62-5.0. Fuente: WINDnovation Engineering Solutions GmbH (2011). [WIND11]	106
Tabla 34: Cuadro de precios	108
Tabla 35: Presupuesto.....	109

1. Introducción

Los aerogeneradores son una tecnología muy antigua, y a pesar de que ahora los utilizamos principalmente para generar energía eléctrica, en su origen eran herramientas puramente mecánicas, principalmente para moler grano, no fue hasta finales del siglo XIX que se empezó a generar electricidad con ellos.

Los primeros aerogeneradores eran molinos de eje vertical que surgieron en Persia en el s.VII. En la Península Ibérica se tuvo que esperar hasta el s.X para que los árabes trajesen esta tecnología. Y no fue hasta el s.XVI que se popularizaron los famosos molinos de tipo torre con eje horizontal como los que aparecen en El Quijote. A finales del s.XIX, como se menciona en el párrafo anterior, se inventaron los aerogeneradores eléctricos, y se tuvo que esperar hasta 1991 para que se construyese el primer parque eólico marino, este se construyó en Dinamarca y constaba de 11 generadores, cada uno de 450kW.

La eólica marina presenta grandes beneficios frente a la eólica terrestre. El mar carece de sucesos topográficos como montañas o colinas que generan alteraciones y turbulencia en el viento, lo que favorece la generación de energía y disminuye la carga sobre los materiales del aerogenerador. Además, la eólica marina permite construir aerogeneradores con mayor diámetro de palas, ya que no enfrenta el reto logístico de transportar las palas por carretera. Otra ventaja es la menor competencia por el suelo, la tierra firme tiene un gran valor para labores como la agricultura, la ganadería, la construcción de industria o el desarrollo urbano, sin embargo, los océanos ofrecen una superficie inmensa que no compite por su uso en otras labores. Por último, gran parte de la población mundial se concentra en las costas, y generar energía en la costa cerca de estos núcleos de población ahorra la construcción de miles de kilómetros de líneas de alta tensión.

Sin embargo, la eólica marina también enfrenta grandes retos como la necesidad de abaratar los costes y tiempos de los procesos de instalación y construcción, y opciones de cimentación viables para emplazamientos con grandes profundidades.

2. Estado del Arte

Durante el último año consolidado (2024/2025) la demanda mundial de energía fue de 29 900 TWh [EMBE25], [OURW25], un 9,1-10,2% de esta energía (2700-3000TWh) provenía de aerogeneradores, y dentro de esta categoría, un 0,4-0,7% de la demanda total (180-210TWh) fue suministrado por aerogeneradores marinos. Con estos datos puede parecer que la contribución de la eólica marina es muy poca, sin embargo, se debe tener en cuenta que en la actualidad la eólica marina es el sector con mayor inversión tecnológica. Según la IEA (Agencia Internacional de Energía) y la IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables) [IEA_25], [IREN25] se estima que en 10 años la eólica supondrá un 20-25% de la energía a nivel global y la eólica marina un 3-5%, y para 2050 se espera que la eólica llegue a suministrar un 31-35% de la energía global y la eólica marina un 7-10%.

Conociendo estos datos se puede llegar a la conclusión de que la eólica marina es un campo de la ingeniería muy prometedor, cuyo crecimiento únicamente se va a acelerar durante los próximos años.

Con respecto a la potencia de los aerogeneradores, en la actualidad los aerogeneradores marinos más potentes ya instalados para uso comercial son de 16 MW, con diámetros de rotor de alrededor de 200 metros. Esto es mucho considerando que hace tan solo una década los aerogeneradores más potentes eran de 3-7 MW para aerogeneradores terrestres y 8MW para aerogeneradores offshore, con diámetros de rotor de 100-120 metros. Considerando proyectos que se encuentran aún en desarrollo hay aerogeneradores de 20MW en centros de estudio, por ejemplo, la compañía Siemens Gamesa tiene una propuesta de aerogenerador de 21MW que espera instalar pronto en un campo de testeo en Dinamarca. Fuera de Europa también hay grandes proyectos como el de Dongfang Electric, una compañía china que presenta un aerogenerador de 26MW con 310 metros de diámetro de rotor.

Refiriéndose a los aerogeneradores de 5MW de potencia cabe destacar que en la actualidad ya no se consideran punteros en cuanto a potencia bruta y tamaño. Sin embargo, son muy utilizados para I + D y para proyectos piloto de eólica flotante. Las novedades se prueban primero en aerogeneradores de 5MW para luego aplicarlas en aerogeneradores de mayor potencia. En el presente se usan aerogeneradores de 5-6MW en parques eólicos flotantes, ya que la tecnología de flotación para turbinas de mayor potencia tiene un coste muy superior.

Otro aspecto fundamental en el diseño de aerogeneradores es el material que se emplea en su construcción, en especial el material de las palas. En los últimos años el material más popular ha sido la fibra de vidrio y las resinas termoestables, pero en la actualidad se está investigando el uso de polímeros reforzados y resinas con grafeno. Estas resinas con

grafeno se aplican a las matrices de polímeros y consiguen mejorar la resistencia a la fatiga, reducen la propagación de grietas y mejoran la tenacidad entre láminas, también ayudan a reducir el peso y mejorar la durabilidad frente a la corrosión marina. Uno de los objetivos principales del desarrollo de nuevos materiales es mejorar la resistencia de la estructura manteniendo o incluso reduciendo su peso, de esta manera se pueden construir palas más largas sin comprometer la seguridad de la estructura.

Al igual que en muchos otros campos, se está intentando implementar el uso de inteligencia artificial en los aerogeneradores marinos. En concreto se busca usar la IA para mejorar la capacidad de prever fallos y optimizar la orientación de las palas. También se quiere implementar el uso de drones de carga pesada para mover piezas así ahorrando tiempo y riesgos humanos.

En la clase de aerogeneradores de 5MW la referencia en la actualidad en el campo de cimentación y estructura soporte de hormigón es el proyecto ELISA/ELICAN desarrollado por la compañía española Esteyco [ESTE16]. Esta es una tecnología que evita el uso de barcos grúa (el mayor coste de la eólica marina). En la cimentación en lugar de hincar pilotes de acero en el fondo marino se usa cimentación por gravedad con hormigón armado, la cimentación se construye hueca por lo que flota y tan solo hay que remolcarla desde el puerto hasta el lugar de instalación, donde se inunda de agua y se hunde hasta posarse en el fondo marino. La estructura soporte es llamada “torre telescópica”. El diseño es de secciones de hormigón concéntricas (como un catalejo), durante el transporte la torre va replegada por lo que el centro de gravedad se mantiene bajo y evita el vuelco por oleaje. Tras colocar la cimentación en el fondo marino se activan gatos internos que levantan las secciones de la torre hasta alcanzar su posición final evitando así el uso de una grúa externa.

3. Definición del Proyecto y Objetivos

3.1 Justificación del proyecto

Se considera que los avances en aerogeneradores marinos con cimentación y estructura soporte que utilicen como material principal hormigón son necesarios por los siguientes motivos:

Principalmente por la reducción en costes económicos que supone tanto en la instalación del aerogenerador como en la construcción de los componentes de hormigón. Esta bajada en los costes se debe a no tener necesidad de utilizar los medios necesarios para hincar los pilotes en el suelo marino, aparte el acero es considerablemente más caro que el hormigón, y al poder fabricar la estructura de hormigón en cualquier localización con relativa facilidad, comparado con la fabricación de los pilotes de acero, también se ahorra en costes de transporte.

Se reduce el tiempo necesario tanto en el montaje como en la producción de las partes de hormigón comparado con las de acero. En el caso de uso de hormigón como material principal la mayoría de los procesos de montaje se realizan en el puerto, mientras que en el mar tan solo se deben realizar, la preparación del suelo marino (para la cual no es necesaria la presencia de ningún elemento del aerogenerador), el hundimiento de la cimentación, y el izado de la torre. A pesar de que en la producción de una única pieza se tarda más en el caso de hormigón que del acero, debido a los tiempos de fraguado, el hormigón no necesita maquinaria pesada de alta tecnología, por lo tanto, se pueden producir decenas de estructuras en paralelo en el puerto más cercano al proyecto, lo que supone un gran ahorro de tiempo.

El uso del hormigón frente al acero muestra varias ventajas debido a las propiedades del material. Aumenta la durabilidad y la resistencia a fatiga en ambientes marinos, ya que el hormigón tiene mejor resistencia a la corrosión y a la fatiga estructural. Al necesitar una estructura más pesada cuando se utiliza hormigón en lugar de acero se proporciona una estructura más rígida y vibra menos.

En aerogeneradores de gran potencia (potencias de 15MW o mayores) el uso de acero en la cimentación supone muchas dificultades que no se presentan cuando se utiliza hormigón. En primer lugar, para aerogeneradores de gran potencia, y en consecuencia de gran tamaño, los monopilotes de acero necesarios en la cimentación son de dimensiones enormes (incluso superando los 10 metros de diámetro), esto tiene como consecuencia que muy pocas fábricas en el mundo son capaces de producirlos, además dispara los costes debido a la cantidad de acero necesario. Otra ventaja es que, al instalar aerogeneradores en zonas con gran profundidad, deja de ser viable una cimentación fija y deben utilizarse plataformas flotantes, el uso de hormigón en la plataforma flotante sube mucho el peso de la base, lo que es beneficioso para bajar el centro de gravedad de la estructura.

3.2 Objetivos principales y secundarios

El objetivo principal del proyecto es diseñar, dimensionar y validar la cimentación y estructura soporte de un aerogenerador marino de 5MW para cargas extremas usando hormigón como material principal.

Entre los objetivos secundarios del proyecto se encuentran las diferentes etapas a tener en cuenta durante la realización de este mismo, estas son:

1. La creación de un modelo base de aerogenerador marino de 5MW en base a los parámetros obtenidos.
2. Obtención de los valores clave de las cargas extremas del aerogenerador para diferentes casos a través de la realización de simulaciones.
3. Diseño y dimensionado de la cimentación y estructura soporte.
4. Análisis evaluando la viabilidad técnica y económica del proyecto.

3.3 Cimentación por gravedad (GBS)

Para este proyecto el tipo de cimentación que se escoge es una cimentación por gravedad (Gravity Based Structure, GBS). Las razones por las que se realiza esta elección son principalmente: la compatibilidad de este tipo de diseño con el software utilizado para las simulaciones (Bladed 4.6 Educational) y la alta compatibilidad del tipo de suelo del emplazamiento con este tipo de cimentaciones.

Las cimentaciones por gravedad dependen de su propio peso para mantenerse estables frente al vuelco u otros eventos perjudiciales para la estructura. Se caracterizan por tener volúmenes de grandes dimensiones. La descripción del proceso de construcción y montaje que se detalla a continuación (apartados 3.3.1 a 3.3.5) se basa en documentación técnica de Bouygues Construction [BOUY26], AF Gruppen [AFGR26], Esteves et al. [ESTE19] y la patente WO2016042173A1 [PATE16].

3.3.1 Construcción en tierra

Son estructuras demasiado pesadas para su transporte por tierra, por lo que se construyen cerca del agua.

La base de la cimentación se suele construir en el mismo muelle. Para su construcción primero se coloca la armadura de acero, sobre la que después se vierte el hormigón de alta resistencia.

Para la construcción del fuste se emplea la técnica de encofrado deslizante, esta consiste en un hormigonado de manera continua mientras el molde se desliza.

Una vez la estructura ha fraguado, se inicia el proceso de transporte.

3.3.2 Preparación del lecho marino

Este paso no existe para las cimentaciones que emplean monopilotes, sin embargo, es estrictamente necesario en las cimentaciones por gravedad. Se compone principalmente de dos pasos diferentes.

Primero se lleva a cabo el dragado, consiste en retirar la capa superficial del lecho marino hasta conseguir una superficie con capacidad de soporte.

A continuación, se construye un lecho de grava, para ello se vierte grava sobre la superficie del suelo marino para garantizar que la superficie de apoyo sea horizontal y distribuya las cargas de manera uniforme.

3.3.3 Transporte

La estructura se transporta sobre rieles de alta resistencia lubricados con teflón, desde el muelle hasta una barcaza. Este movimiento se consigue mediante gatos hidráulicos que la van empujando poco a poco.

La barcaza debe ser un buque de transporte pesado semi-sumergible, esta va variando su nivel de flotabilidad para mantener en todo momento el muelle y la superficie del barco al mismo nivel, de manera que la estructura pase del muelle a la barcaza sin perder la horizontalidad.

Una vez a bordo el transporte hasta el emplazamiento se realiza con la ayuda de remolcadores.

3.3.4 Instalación y fondeo

Esta es la maniobra con más riesgo de todo el proceso. Una vez se llega al emplazamiento del aerogenerador la barcaza se hunde de manera controlada, hasta poder aprovechar la mayor cantidad posible de flotabilidad de la estructura, de forma que su peso se reduzca a menos de la mitad del valor inicial.

Una vez sumergida se lleva a cabo un hundimiento controlado de la cimentación con la ayuda de grúas y flotadores, hasta alcanzar el lecho de grava. Cuando la cimentación se encuentra sobre el lecho de grava, el agua del interior de la estructura se bombea y se sustituye por material sólido pesado (lastre) como arena o grava. Tras esto, se construye in situ la losa de coronación de la cimentación. Por último, se colocan rocas de escollera rodeando la base de la cimentación para protegerla de la erosión.

3.3.5 Montaje del aerogenerador

Una vez la cimentación está en posición y preparada para el montaje del aerogenerador, se establece una plataforma de trabajo sobre la cimentación y con una grúa se iza la pieza de transición (la que une la torre con el hormigón), los tramos de la torre, y por último la góndola y las palas.

4. Metodología y Normativa

4.1 Normativa de referencia

A la hora de diseñar un aerogenerador, en especial en un diseño centrado para soportar cargas extremas, se debe seguir de manera rigurosa un marco normativo internacional. Este marco sirve para garantizar que las partes diseñadas cumplan con las solicitudes operativas y ambientales durante su vida útil.

Para el desarrollo de este proyecto se han utilizado principalmente tres normativas, los estándares internacionales (IEC), los Eurocódigos y DB-SE-C [BOE_21].

Tanto las directrices de GL, como el análisis aerodinámico y la definición de condiciones del viento se basan en los estándares de la International Electrotechnical Commission (IEC). Específicamente se necesitan IEC 61400-3, que rige la normativa internacional por excelencia de exigencias de diseño para turbinas de eólica marina, y IEC 61400-1, que aporta definiciones generales sobre clases de turbina y requisitos de seguridad. [IEC_09]

Para el dimensionado de estructuras de hormigón se recurre directamente a los estándares de construcción europeos. Eurocódigo 2 [CEN_04] en concreto, es el que dicta los cálculos de la armadura, resistencia a compresión y flexión, así como otras características de la estructura. [CEN_04]

El DB-SE-C [BOE_21] es el Código Técnico de la Edificación (CTE) español, aprobado por el Ministerio de Transportes y Agenda Urbana a través del Real Decreto 314/2006. Se utiliza como complemento a las normativas GL2012 [GLRC12] y Eurocódigo 2 [CEN_04], aportando criterios para el diseño geotécnico de cimentación (hundimiento, deslizamiento y vuelco de la base). [MINI06], [GLRC12]

4.2 Herramientas de software utilizadas

Durante la realización del proyecto se emplean principalmente dos herramientas de cálculo, cada una en una fase diferente del proyecto.

Blade 4.6 Educational se ha utilizado para generar un modelo aeroelástico del aerogenerador de referencia (apartado “5. Definición y Diseño de Bladed”). También se han realizado simulaciones para diferentes DLCs con el fin de obtener las cargas en la mudline y en la coronación del fuste (apartado “6. Simulaciones y Análisis de Cargas (DCLs)”), las cargas obtenidas son la base para el diseño y dimensionado de la cimentación.

Matlab se ha utilizado para el dimensionado de las partes de la cimentación (apartado “8. Diseño y Dimensionamiento de la Cimentación”): predimensionado de la losa de cimentación utilizando el criterio de excentricidad, comprobaciones del Eurocódigo 2 [CEN_04], corrección Delta-Morison, estados límite geotécnicos del DB-SE-C [BOE_21] y diseño de la transición entre fuste y torre del aerogenerador mediante un

anillo embebido postensado. Los scripts utilizados para estas tareas se incluyen en el proyecto dentro del Anexo V, permitiendo el seguimiento y regeneración de los cálculos.

5. Definición y Diseño de Bladed

En este apartado se describe el proceso de diseño de un modelo base de aerogenerador marino en Bladed 4.6, este modelo es el que posteriormente ha sido usado para la realización de todas las simulaciones.

Los datos y especificaciones que se aplican a este modelo se mantienen durante el resto del proyecto a excepción de los que se refieren a las condiciones ambientales, los cuales cambiarán según las necesidades de cada simulación.

5.1 Características técnicas del aerogenerador de referencia

Para la creación de este modelo no se comienza desde cero, ya que se utilizan especificaciones aportadas por el tutor (estas especificaciones se muestran en el Anexo II: Especificaciones del aerogenerador (aportado por el director del TFG) y el

Anexo III: Especificaciones palas), o datos que se consideran típicos en la industria para aerogeneradores de 5MW.

Algunos parámetros como por ejemplo la velocidad media del viento, los periodos de olas, la clase del aerogenerador o el grado de turbulencia, se obtienen a través de los datos históricos sobre las condiciones ambientales en el emplazamiento.

5.2 Diseño del modelo

A continuación, se muestra cómo se han introducido paso por paso los parámetros en el programa Bladed 4.6 para la creación del modelo.

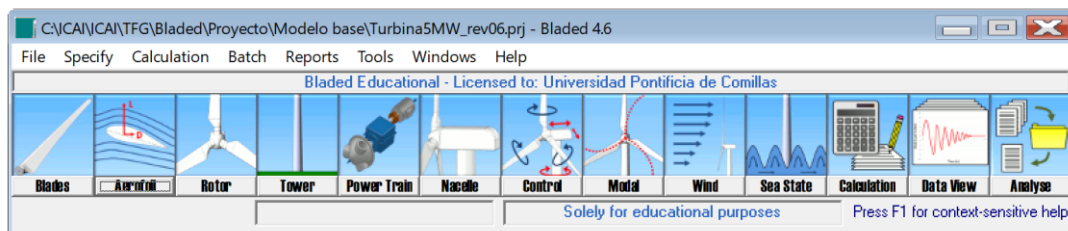


Ilustración 3: interfaz principal Bladed 4.6- fuente: elaboración propia

5.2.1 Palas

Primero se definen las palas:

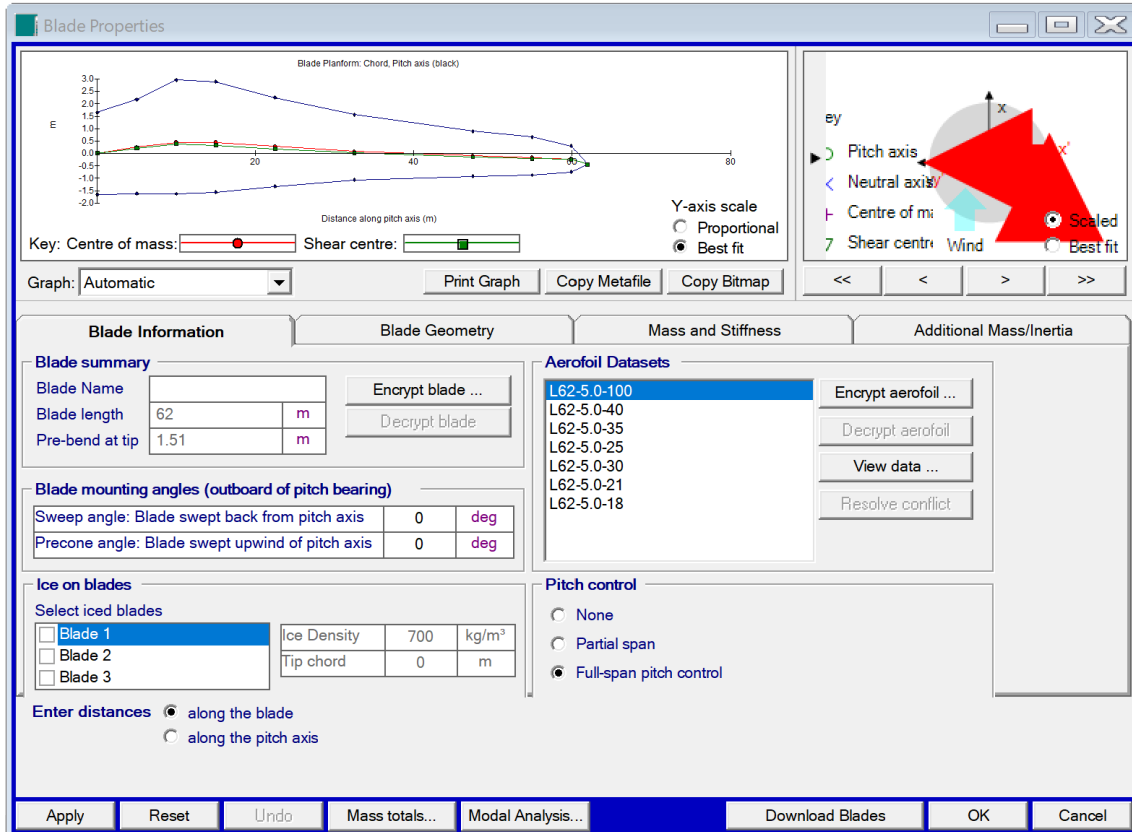


Ilustración 4: Blade Properties-Blade Information – Fuente: elaboración propia

En esta imagen se muestra el primer menú para la edición de las características de las palas.

En la parte inferior del menú se encuentra la opción de aplicar hielo en las palas, para simulaciones en climas fríos, esta opción no se usa durante el proyecto, ya que en la zona seleccionada (Sudáfrica) no se alcanzan temperaturas tan bajas. También da la opción de elegir el tipo de control de paso, este se mantiene en “completo”.

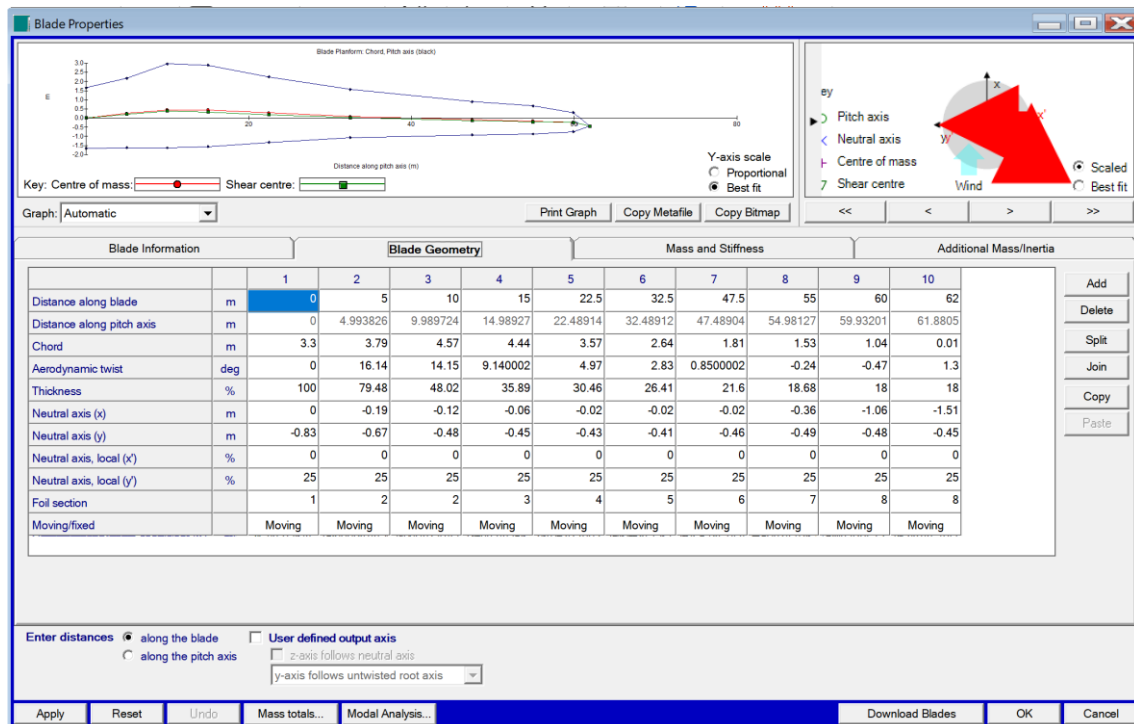


Ilustración 5: Blade Properties-Blade Geometry – fuente: elaboración propia

En la segunda pestaña se especifica la geometría. Se divide en 10 secciones (el límite para la versión educativa de Bladed) y se especifican una serie de parámetros para cada sección. Al tener un límite de 10 secciones se experimenta una pérdida de información respecto de las 30 secciones que aportan los datos de referencia.

Los datos que se muestran en el programa en esta ventana son:

- **Distance along Blade (distancia a lo largo de la pala) [m]:** distancia desde la raíz de la pala hasta la sección que se define.
- **Distance along pitch axis (distancia a lo largo del eje de paso) [m]:** posición de la sección respecto al eje en el que gira la pala al cambiar su ángulo de ataque. Este parámetro se define en función del anterior (distancia a lo largo de la pala). Por tanto, no hace falta introducirlo, se calcula automáticamente al introducir el otro dato.
- **Chord (cuerda) [m]:** ancho de la sección medido desde el borde de ataque hasta el de fuga.
- **Aerodynamic twist (torsión aerodinámica) [°]:** ángulo de torsión de la sección. Define el ángulo entre la cuerda y la dirección del viento.
- **Thickness (espesor) [%]:** grosor máximo del perfil aerodinámico (airfoil), se expresa de porcentaje de la cuerda.
- **Neutral axis “x” and “y” [m]:** define la posición en la sección del eje neutro (lugar que no experimenta tensiones de flexión pura) en coordenadas x e y, respecto del eje de paso.

- **Neutral axis, local “x” and “y” [%]:** define la posición en la sección del eje neutro en coordenadas “x” e “y” respecto del eje de paso en porcentaje de la cuerda.
- **Foil section (sección de perfil) [-]:** en este apartado se define el tipo de perfil aerodinámico de cada sección. Cada número representa un tipo diferente de forma geométrica para el perfil aerodinámico.
- **Moving/fixed [-]:** se definen las secciones como móviles o fijas dependiendo de si las palas tienen el control de paso activado o no.

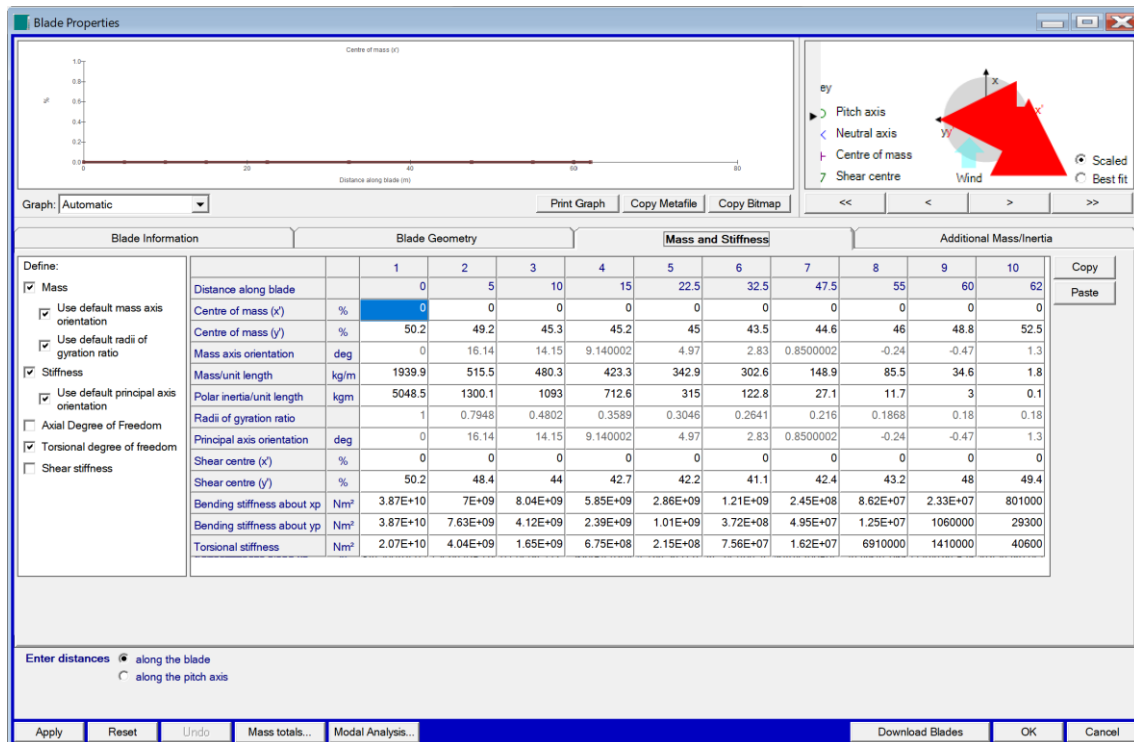


Ilustración 6: Blade Properties-Mass and Stiffness – fuente: elaboración propia

En la tercera pestaña se especifican los parámetros relacionados con la masa y rigidez de las palas. La pala se divide en 10 secciones para las que se definen los diferentes parámetros.

Los datos que se muestran en el programa en esta ventana son:

- **Distance along blade (distancia a lo largo de la pala) [m]:** distancia desde la raíz de la pala hasta la sección que se define (definido ya en la ventana de Blade Geometry)
- **Centre of mass “x” and “y” (centro de masas en “x e “y”) [%]:** define la ubicación del centro de masas en esa sección con un sistema de coordenadas xy donde se usa el porcentaje de la cuerda como unidad.
- **Mass axis orientation (orientación del eje de masas) [°]:** define el ángulo de inclinación del eje de inercia principal respecto al eje de coordenadas de la pala.
- **Mass unit length (masa por unidad de longitud) [kg/m]:** densidad lineal de la pala en la sección que se mide.
- **Polar inertia/unit length (inercia polar por unidad de longitud) [kgm]:** define el momento de inercia polar por unidad de longitud alrededor de su eje longitudinal.
- **Radii of giration ratio (radio de relación de giro) [-]:** define la relación entre los radios de giro. Se calcula automáticamente.
- **Principal axis orientation (orientación del eje principal) [°]:** orientación del eje de torsión principal.

- **Shear centre “x” and “y” (centro de cizalladura “x” e “y”) [%]:** ubicación del centro de cizalladura en la sección definido en un sistema de coordenadas xy utilizando como unidad el porcentaje de cuerda.
- **Bending stiffness about xp and yp (rigidez de máxima en xp e yp) [Nm^2]:** rigidez de flexión de la pala alrededor de los ejes xp e yp.
- **Torsional stiffness (rigidez a torsión) [Nm^2]:** indica la resistencia de la pala a retorcerse en su eje longitudinal, debido a un momento torsor.

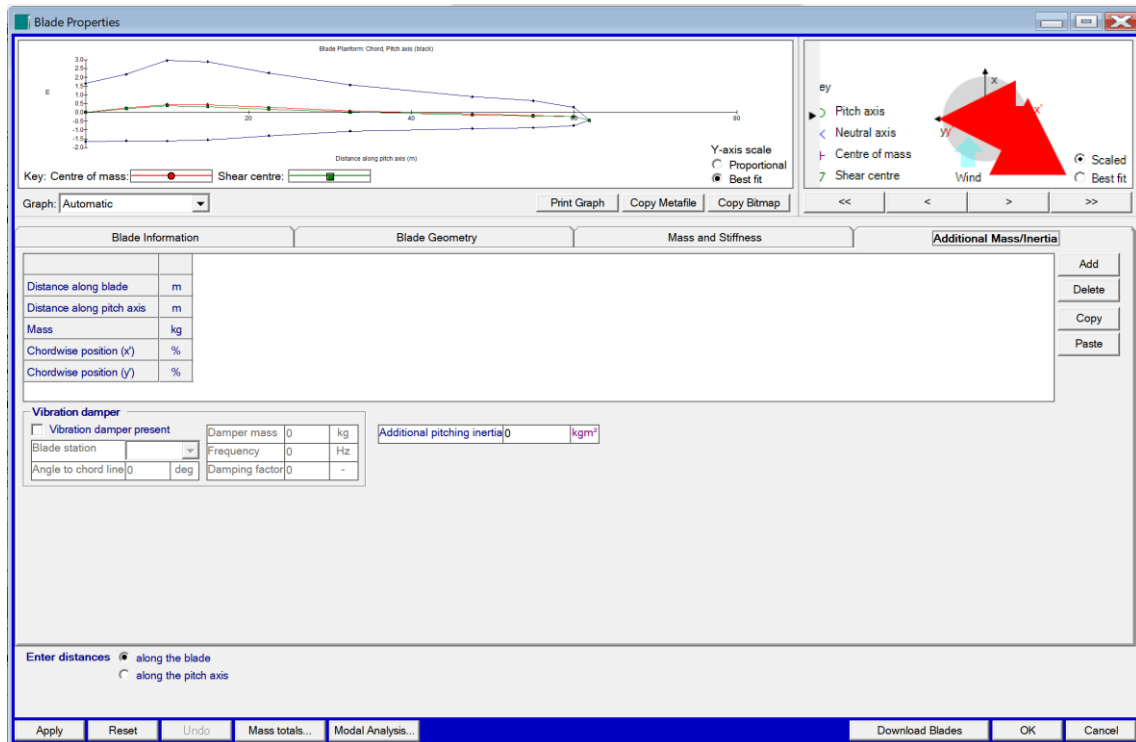
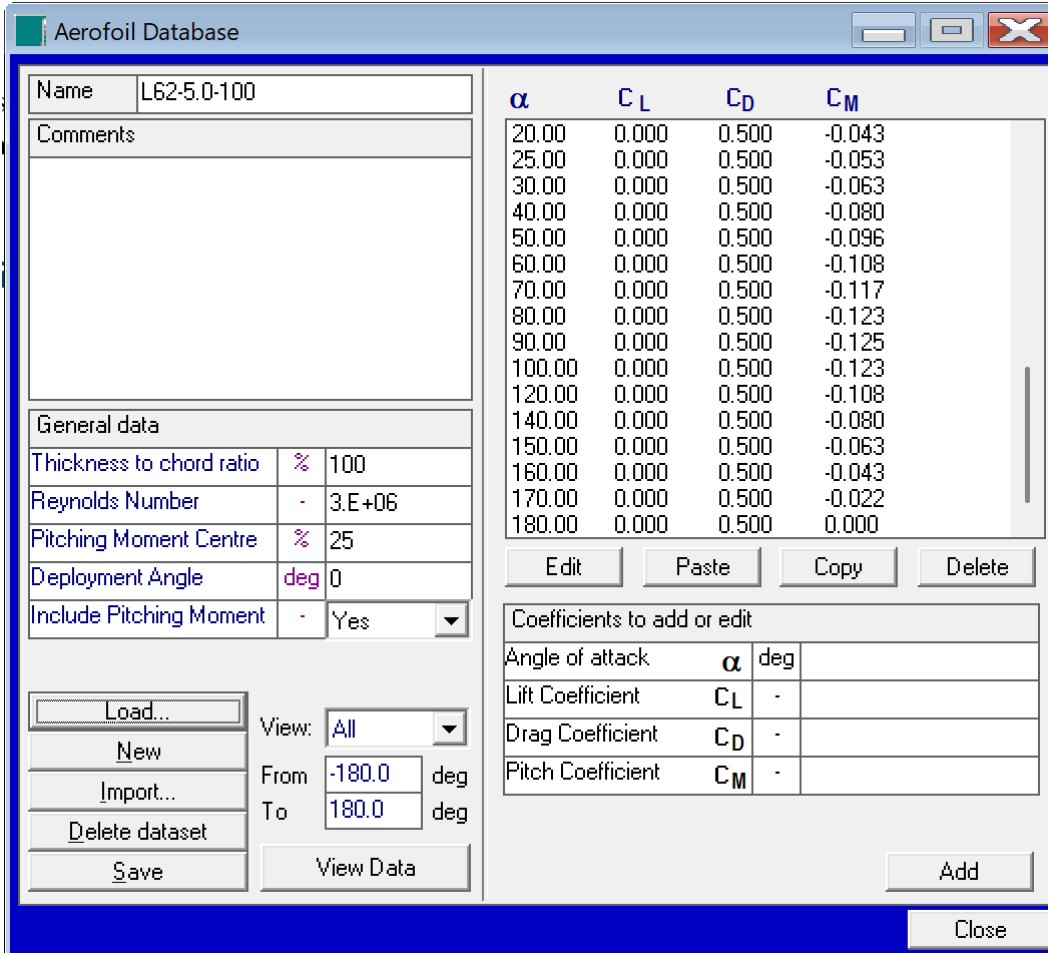


Ilustración 7: Blade Properties-Additional Mass/Inertia – fuente: elaboración propia

En la cuarta pestaña se da la opción de añadir masas adicionales a las palas para equilibrarlas. Estas masas adicionales no se utilizan en el proyecto.

5.2.2 Airfoil (Perfil Aerodinámico)

La ventana que se muestra en la Ilustración 8 se da la posibilidad de introducir/alterar los parámetros del perfil aerodinámico.



α	C_L	C_D	C_M
20.00	0.000	0.500	-0.043
25.00	0.000	0.500	-0.053
30.00	0.000	0.500	-0.063
40.00	0.000	0.500	-0.080
50.00	0.000	0.500	-0.096
60.00	0.000	0.500	-0.108
70.00	0.000	0.500	-0.117
80.00	0.000	0.500	-0.123
90.00	0.000	0.500	-0.125
100.00	0.000	0.500	-0.123
120.00	0.000	0.500	-0.108
140.00	0.000	0.500	-0.080
150.00	0.000	0.500	-0.063
160.00	0.000	0.500	-0.043
170.00	0.000	0.500	-0.022
180.00	0.000	0.500	0.000

Ilustración 8: Aerofoil Database – fuente: elaboración propia

En esta ventana se muestran los siguientes parámetros:

- **Thickness to chord ratio (relación espesor-cuerda) [%]:** grosor máximo del perfil aerodinámico expresado en porcentaje de cuerda.
- **Reynold number (número de Reynolds) [-]:** parámetro adimensional utilizado en mecánica de fluidos para conocer el régimen de un fluido (el aire alrededor de la pala en este caso).
- **Pitching moment centre (centro del momento de paso) [%]:** posición a lo largo de la cuerda entorno a la cual se calcula el momento de paso. Se expresa en porcentaje de cuerda y suele tener un valor del 25% (un cuarto de la cuerda).
- **Deployment angle (ángulo de despliegue) [°]:** este parámetro se utiliza si el perfil incluye elementos aerodinámicos móviles como “flaps”, si el perfil no los incluye, se le asigna el valor 0.

- **Include pitching moment (incluir momento de cabeceo) [yes/no]:** indica al software si se debe incluir el parámetro C_M en sus cálculos o no.
- **Angle of attack, α (ángulo de ataque) [°]:** ángulo formado entre la línea de la cuerda del perfil y la dirección relativa incidente del flujo del viento en la pala.
- **Lift coefficient C_L (coeficiente de sustentación) [-]:** Define la fuerza aerodinámica generada en dirección perpendicular a la dirección del flujo del viento incidente.
- **Drag coefficient C_D (coeficiente de arrastre) [-]:** Define la fuerza aerodinámica generada paralelamente a la dirección del flujo de viento incidente.
- **Pitch coefficient C_P (coeficiente de paso) [-]:** define el momento generado en el perfil de la pala cuando las fuerzas aerodinámicas no se aplican en el centro aerodinámico de esta.

5.2.3 Rotor

La ventana que se muestra en la  ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se da la posibilidad de introducir/alterar los parámetros relacionados con el rotor y la turbina.

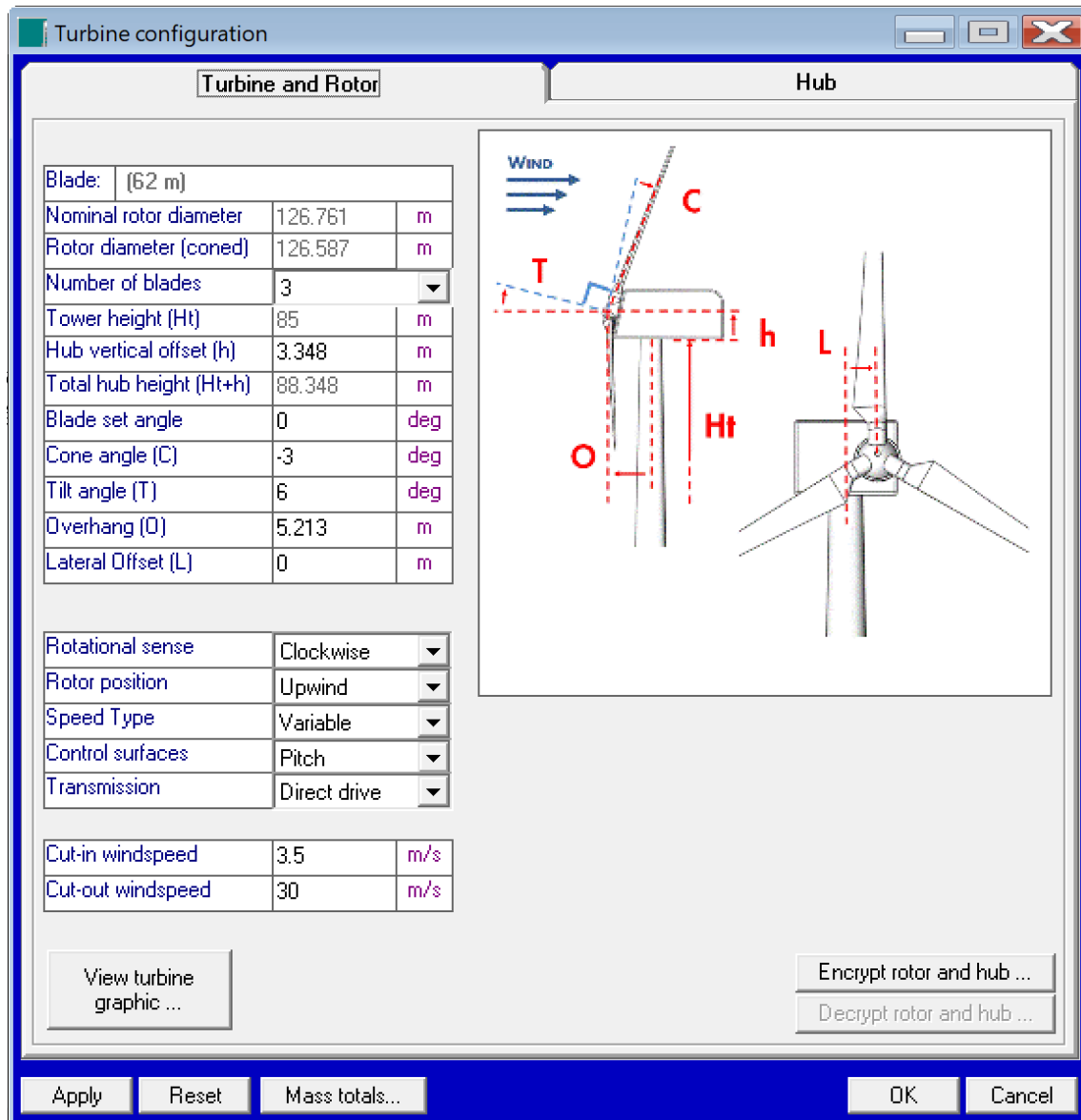


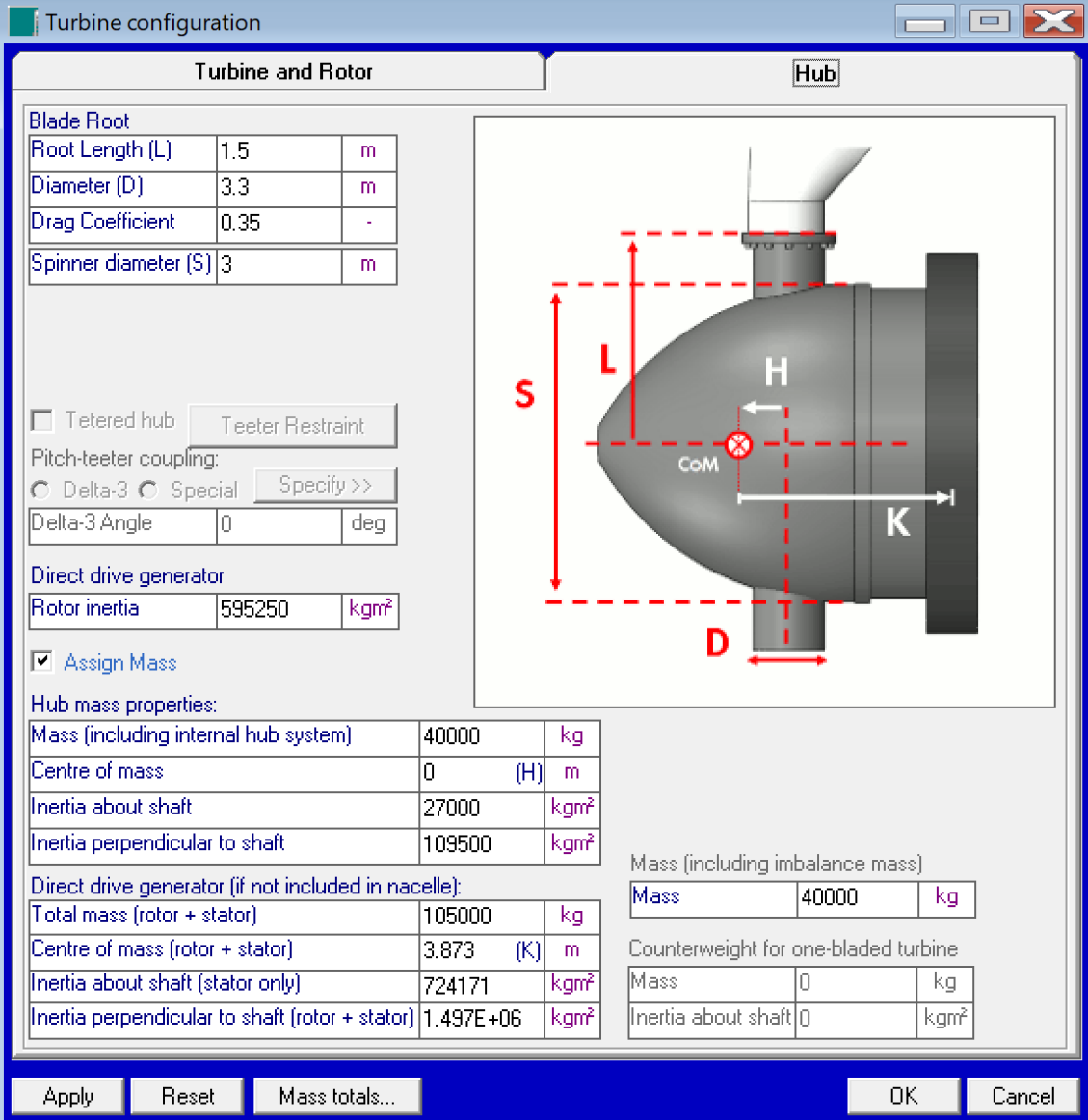
Ilustración 9: Turbine Configuration-Turbine and Rotor-fuente: elaboración propia

En esta ventana se muestran los siguientes parámetros:

- **Blade (pala) [m]:** muestra la longitud de la pala. Dato ya introducido en el menú de propiedades de la pala.
- **Nominal rotor diameter (diámetro nominal del rotor) [m]:** diámetro teórico del círculo que describirían las puntas de las palas si estas estuviesen montadas completamente rectas.

- **Rotor diameter (coned) [m]:** diámetro real del área que barren las palas tenido en cuenta que estas están montadas con cierta inclinación, con un ángulo de cono.
- **Number of Blades (número de palas) [-]:** define el número de palas que forman el rotor.
- **Tower height, (Ht) (altura de la torre) [m]:** distancia desde la base del aerogenerador hasta la parte superior de la torre, donde se encuentra la góndola.
- **Hub vertical offset, (h) (altura vertical del buje) [m]:** distancia vertical desde la base de la parte superior de la torre hasta el centro del buje.
- **Total hub height, (Ht+h) (altura total del buje) [m]:** suma de la altura de la torre y la altura vertical del buje.
- **Blade set angle (ángulo de montaje de palas) [°]:** ángulo de paso con el que se montan las palas, suele ser 0.
- **Cone angle © (ángulo de conicidad) [°]:** ángulo con el que se montan las palas respecto al plano vertical de rotación.
- **Tilt angle (T) (ángulo de inclinación) [°]:** ángulo de inclinación del eje principal del rotor con respecto a una línea horizontal.
- **Overhang (O) (desalineación) [m]:** distancia horizontal entre el eje de guiñada (eje de rotación vertical de la torre) y el centro de masas del rotor.
- **Lateral offset (L) (desplazamiento lateral) [m]:** desplazamiento horizontal a izquierda o derecha del centro del buje respecto al eje de guiñada. Suele ser 0 en diseños simétricos.
- **Rotational sense (sentido de rotación):** define en qué sentido gira el rotor visto desde el viento.
- **Rotor position (posición del rotor):** define la posición del rotor respecto de la torre y del viento. Upwind significa que el rotor choca con el viento antes que la torre y downwind significa lo contrario.
- **Speed type (tipo de velocidad):** define si la turbina puede cambiar su velocidad de giro para adaptarse a la velocidad del viento o no.
- **Control surfaces (superficies de control):** define si hay algún sistema que controle la superficie de contacto de las palas.
- **Transmission (transmisión):** describe el tren de potencia. Establece si hay una caja multiplicadora (gearbox) o no entre el rotor y el generador.
- **Cut-in windspeed (velocidad de viento para conexión) [m/s]:** velocidad mínima de viento sostenida para que el aerogenerador comience a generar energía útil.
- **Cut-out windspeed (velocidad de viento para desconexión) [m/s]:** velocidad máxima de viento a la que la turbina puede operar de forma segura. Si se supera este valor se frena la turbina para evitar daños en la estructura.

En la siguiente imagen (Ilustración 10) se muestran los parámetros correspondientes al buje.



Turbine configuration

Turbine and Rotor

Blade Root

Root Length (L)	1.5	m
Diameter (D)	3.3	m
Drag Coefficient	0.35	-
Spinner diameter (S)	3	m

☐ Tetered hub Teeter Restraint
 Pitch-teeter coupling:
☐ Delta-3 ☐ Special Specify >>
 Delta-3 Angle 0 deg

Direct drive generator

Rotor inertia	595250	kgm²
---------------	--------	------

☒ Assign Mass

Hub mass properties:

Mass (including internal hub system)	40000	kg
Centre of mass	0 (H)	m
Inertia about shaft	27000	kgm²
Inertia perpendicular to shaft	109500	kgm²

Direct drive generator (if not included in nacelle):

Total mass (rotor + stator)	105000	kg
Centre of mass (rotor + stator)	3.873 (K)	m
Inertia about shaft (stator only)	724171	kgm²
Inertia perpendicular to shaft (rotor + stator)	1.497E+06	kgm²

Mass (including imbalance mass)

Mass	40000	kg
------	-------	----

Counterweight for one-bladed turbine

Mass	0	kg
Inertia about shaft	0	kgm²

Apply Reset Mass totals... OK Cancel

Ilustración 10: Turbine Configuration-Hub – fuente: elaboración propia

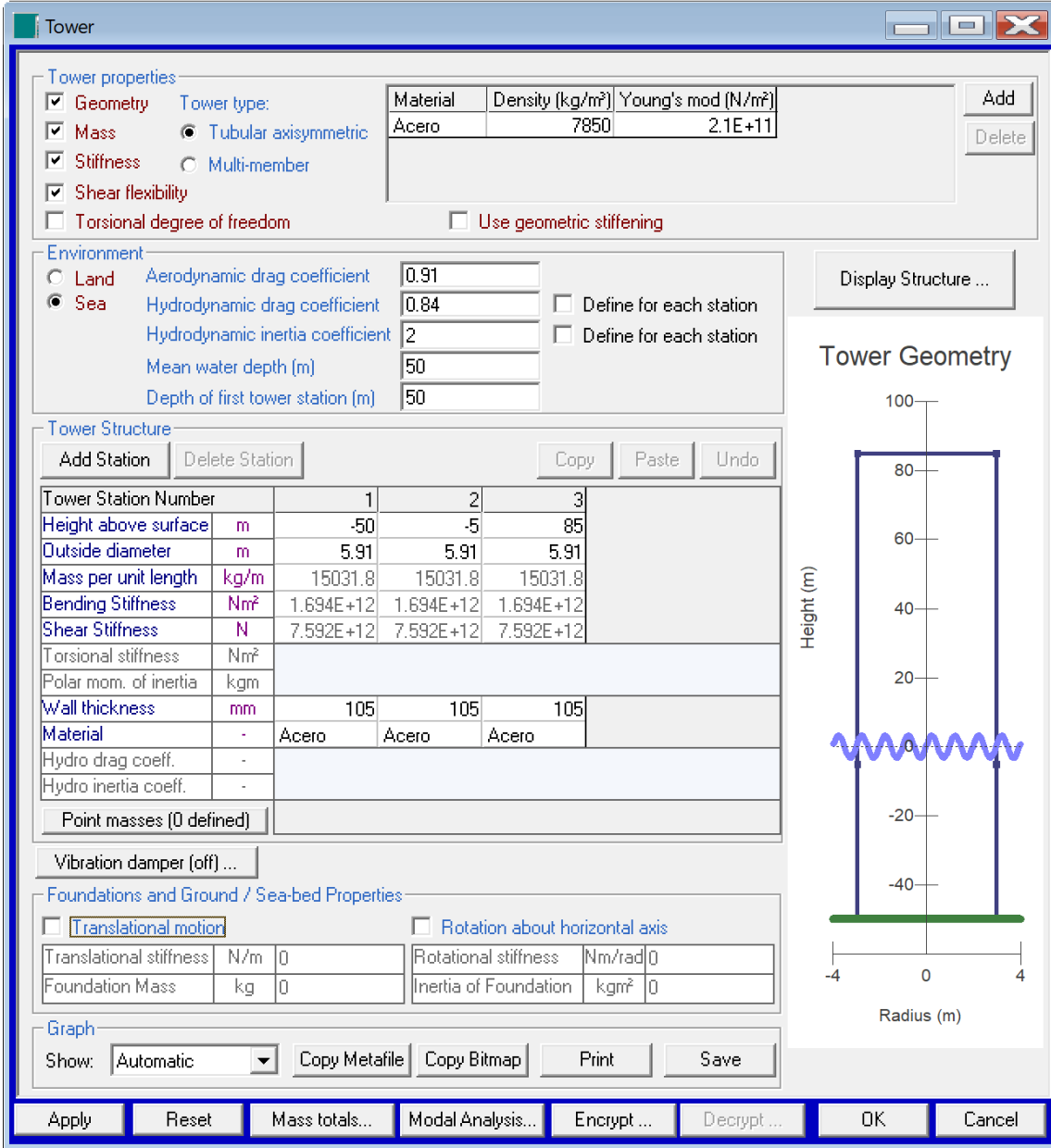
En esta ventana se muestran los siguientes parámetros:

- **Root length (L) (longitud de la pala) [m]:** distancia desde el centro del buje hasta la raíz.
- **Diameter (D) (diámetro) [m]:** diámetro de la raíz.
- **Drag coefficient (coeficiente de arrastre) [-]:** define el valor de la resistencia aerodinámica que se presenta en la zona del buje y la raíz de la pala
- **Spinner diameter (diámetro del spinner) [m]:** diámetro del spinner aerodinámico sin tener en cuenta la raíz.

- **Rotor inertia (inercia del rotor) [kgm^2]:** momento de inercia de la parte giratoria del generador.
- **Mass (including internal hub system) (masa (incluyendo la masa interna del buje)) [kg]:** peso físico total del bloque del buje.
- **Centre of mass (H) (centro de masa) [m]:** representa la distancia a lo largo del eje principal de rotación del centro de masas de la pieza respecto del centro de la raíz.
- **Inertia about shaft (inercia en el eje principal) [kgm^2]:** momento de inercia del buje respecto a el eje de rotación principal (el de la turbina).
- **Inertia perpendicular to shaft (inercia perpendicular al eje) [kgm^2]:** momento de inercia del buje respecto a los ejes transversales.
- **Total mass (rotor + stator) (masa total- rotor + estator) [kg]:** peso combinado del generador eléctrico completo.
- **Center of mass (rotor + stator) (K) (centro de masa- rotor + estator) [m]:** representa la distancia a lo largo del eje principal de rotación del centro de masas del generador eléctrico completo respecto del centro de la raíz.
- **Inertia about shaft (stator only) (inercia sobre el eje principal- solo del estator) [kgm^2]:** momento de inercia de la parte fija respecto a el eje de rotación principal (el de la turbina).
- **Inertia perpendicular to shaft (rotor + estator) [kgm^2]:** momento de inercia del generador eléctrico completo respecto a los ejes transversales.
- **Mass (masa) [kg]:** masa total del buje incluyendo masa de desequilibrio.

5.2.4 Torre

En la ventana que se encuentra en la siguiente imagen (Ilustración 11) se muestran los parámetros de la torre del aerogenerador.



Tower properties

☒ Geometry Tower type: ☒ Tubular axisymmetric ☐ Multi-member

☒ Mass

☒ Stiffness

☒ Shear flexibility

☐ Torsional degree of freedom ☐ Use geometric stiffening

Material	Density (kg/m³)	Young's mod (N/m²)
Acero	7850	2.1E+11

Add Delete

Environment

☐ Land ☒ Sea

Aerodynamic drag coefficient: 0.91

Hydrodynamic drag coefficient: 0.84 ☐ Define for each station

Hydrodynamic inertia coefficient: 2 ☐ Define for each station

Mean water depth (m): 50

Depth of first tower station (m): 50

Display Structure ...

Tower Structure

Add Station Delete Station Copy Paste Undo

Tower Station Number	1	2	3
Height above surface m	-50	-5	85
Outside diameter m	5.91	5.91	5.91
Mass per unit length kg/m	15031.8	15031.8	15031.8
Bending Stiffness Nm²	1.694E+12	1.694E+12	1.694E+12
Shear Stiffness N	7.592E+12	7.592E+12	7.592E+12
Torsional stiffness Nm²			
Polar mom. of inertia kgm			
Wall thickness mm	105	105	105
Material	Acero	Acero	Acero
Hydro drag coeff.	-		
Hydro inertia coeff.	-		

Point masses (0 defined)

Vibration damper (off) ...

Foundations and Ground / Sea-bed Properties

☐ Translational motion ☐ Rotation about horizontal axis

Translational stiffness N/m	0	Rotational stiffness Nm/rad	0
Foundation Mass kg	0	Inertia of Foundation kgm²	0

Graph

Show: Automatic Copy Metafile Copy Bitmap Print Save

Tower Geometry

Height (m)

Radius (m)

Ilustración 11: Tower – fuente: elaboración propia

En esta ventana se muestran los siguientes parámetros:

En la parte superior se especifica el material utilizado para construir la torre junto a la densidad y módulo de Young de este material. Este material es acero S275 elegido por sus propiedades mecánicas, facilidad de fabricación y ligereza.

A continuación, se define el emplazamiento del aerogenerador (en tierra o en mar), en este caso se trata de un aerogenerador marino. En este mismo apartado se definen los siguientes parámetros:

- **Aerodynamic drag coefficient (coeficiente de arrastre aerodinámico) [-]:** resistencia que opone la torre al viento en la parte de la torre que no se encuentra sumergida.
- **Hydrodynamic drag coefficient (coeficiente de arrastre hidrodinámico) [-]:** resistencia que ofrece la parte sumergida de la torre frente a las corrientes.
- **Hydrodynamic inertia coefficient (coeficiente de inercia hidrodinámica) [-]:** define la fuerza inercial que sufre la torre debido al oleaje.
- **Mean water Depth (profundidad media del agua) [m]:** Distancia vertical desde el nivel medio del mar (coordenada de altura del mar) hasta el lecho marino.
- **Depth of first tower station (profundidad de la primera estación de la torre) [m]:** coordenada bajo el agua en la que empieza el análisis estructural de la torre.

Al igual que se hace al definir las palas la torre también se divide en secciones para definir sus parámetros, en este caso se divide en 3 secciones, una en el lecho marino, a poca profundidad bajo el agua y una última en la parte superior de la torre. Los parámetros que se definen en cada una de estas secciones son los siguientes:

- **Height above Surface (altura sobre la superficie) [m]:** posición vertical de la sección de la torre que se está definiendo, donde 0 es la superficie del mar.
- **Outside diameter (diámetro exterior) [m]:** Ancho del tubo de la torre en esa sección. En este caso el diámetro es igual para las tres secciones (5,91m), por lo que la torre que se define es un cilindro.
- **Wall thickness (espesor de la pared) [mm]:** el grosor de la pared de la torre.
- **Material:** define el material (de los que se encuentran especificados en la tabla superior) que se emplea en la sección a definir.

El resto de los parámetros que se muestran en la ventana se generan de manera automática en función de los parámetros ya definidos.

5.2.5 Tren de potencia

En la siguiente imagen (**Ilustración 12**) se definen los parámetros relacionados con la transmisión dentro del tren de potencia del aerogenerador.

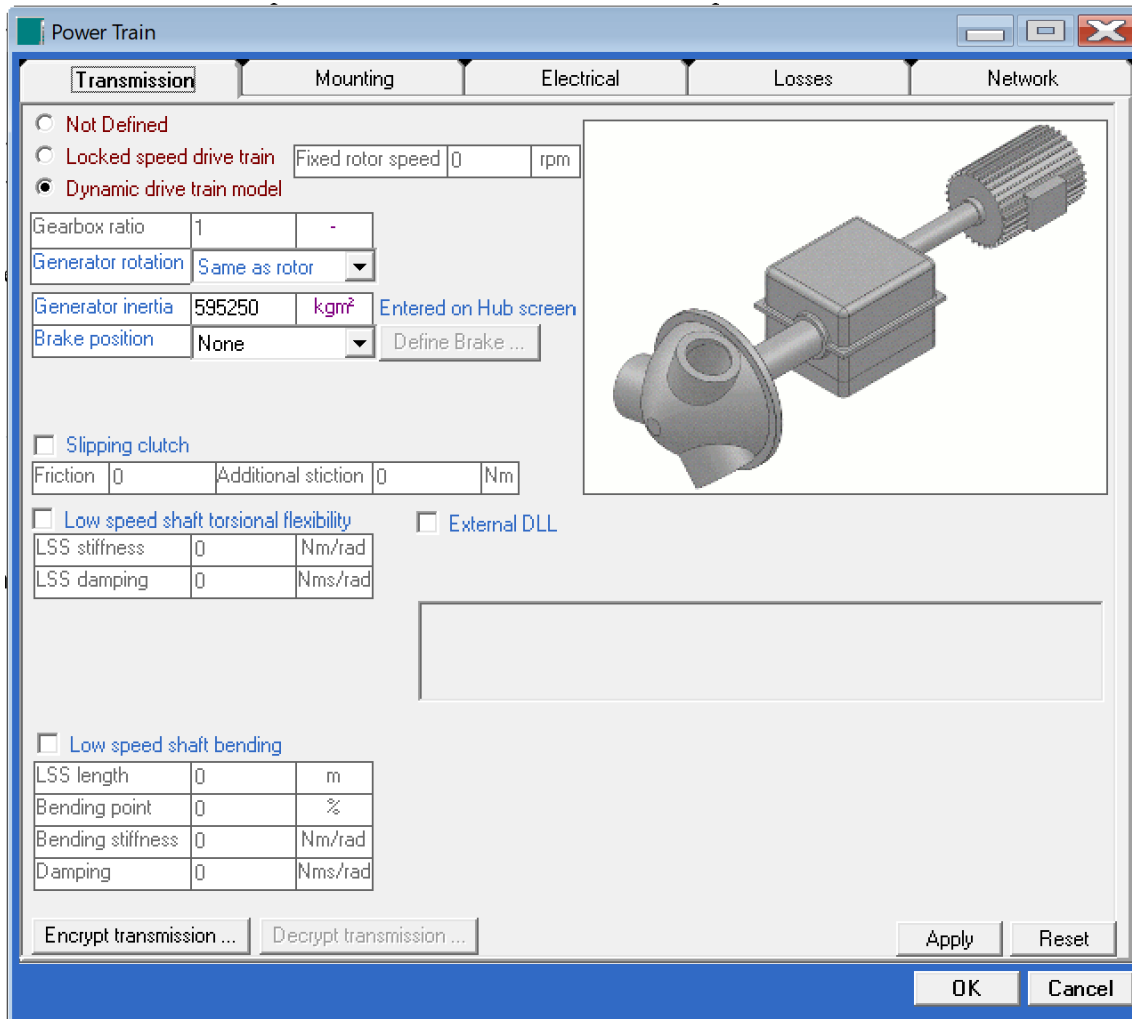
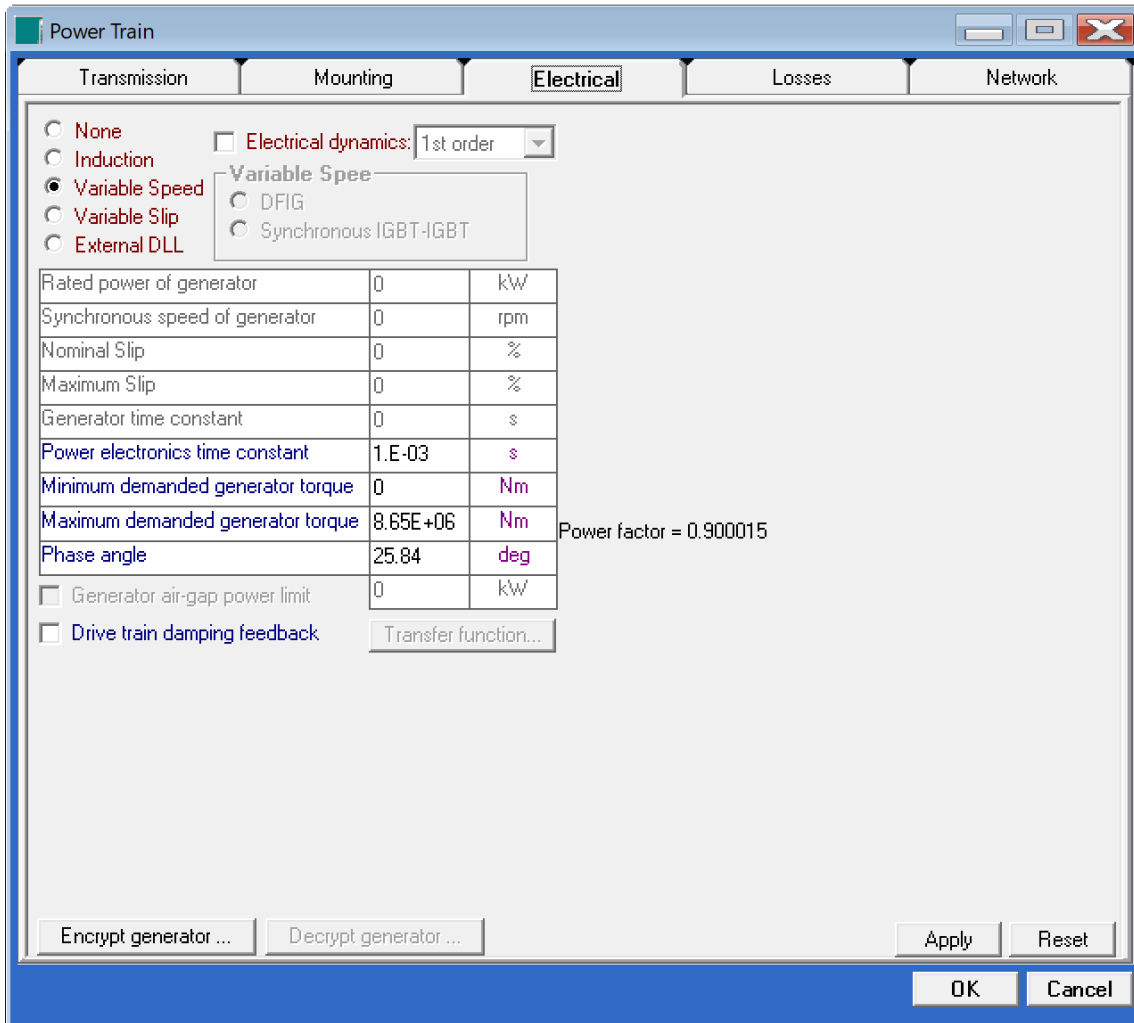


Ilustración 12: Power Train-Transmission – fuente: elaboración propia

Esta es la primera pestaña dentro del apartado de diseño del tren de potencia. En esta pestaña se define el tipo de transmisión. En este caso la transmisión gira en el mismo sentido que el rotor ya que es de tipo directo. También se introduce la inercia del generador y la posición del freno, en este último apartado está marcada la opción “none” por lo que no hay freno mecánico en el aerogenerador, esto significa que depende de otros mecanismos de frenado, como por ejemplo, el freno aerodinámico (girando las palas).

La siguiente pestaña define parámetros relacionados con el sistema eléctrico del aerogenerador.



Power Train

Transmission Mounting **Electrical** Losses Network

☐ None
☐ Induction
☒ Variable Speed
☐ Variable Slip
☐ External DLL

☐ Electrical dynamics: 1st order

Variable Speed

☐ DFIG
☐ Synchronous IGBT-IGBT

Rated power of generator	0	kW
Synchronous speed of generator	0	rpm
Nominal Slip	0	%
Maximum Slip	0	%
Generator time constant	0	s
Power electronics time constant	1.E-03	s
Minimum demanded generator torque	0	Nm
Maximum demanded generator torque	8.65E+06	Nm
Phase angle	25.84	deg

Power factor = 0.900015

☐ Generator air-gap power limit 0 kW
☐ Drive train damping feedback Transfer function...

Encrypt generator ... Decrypt generator ...

Apply Reset

OK Cancel

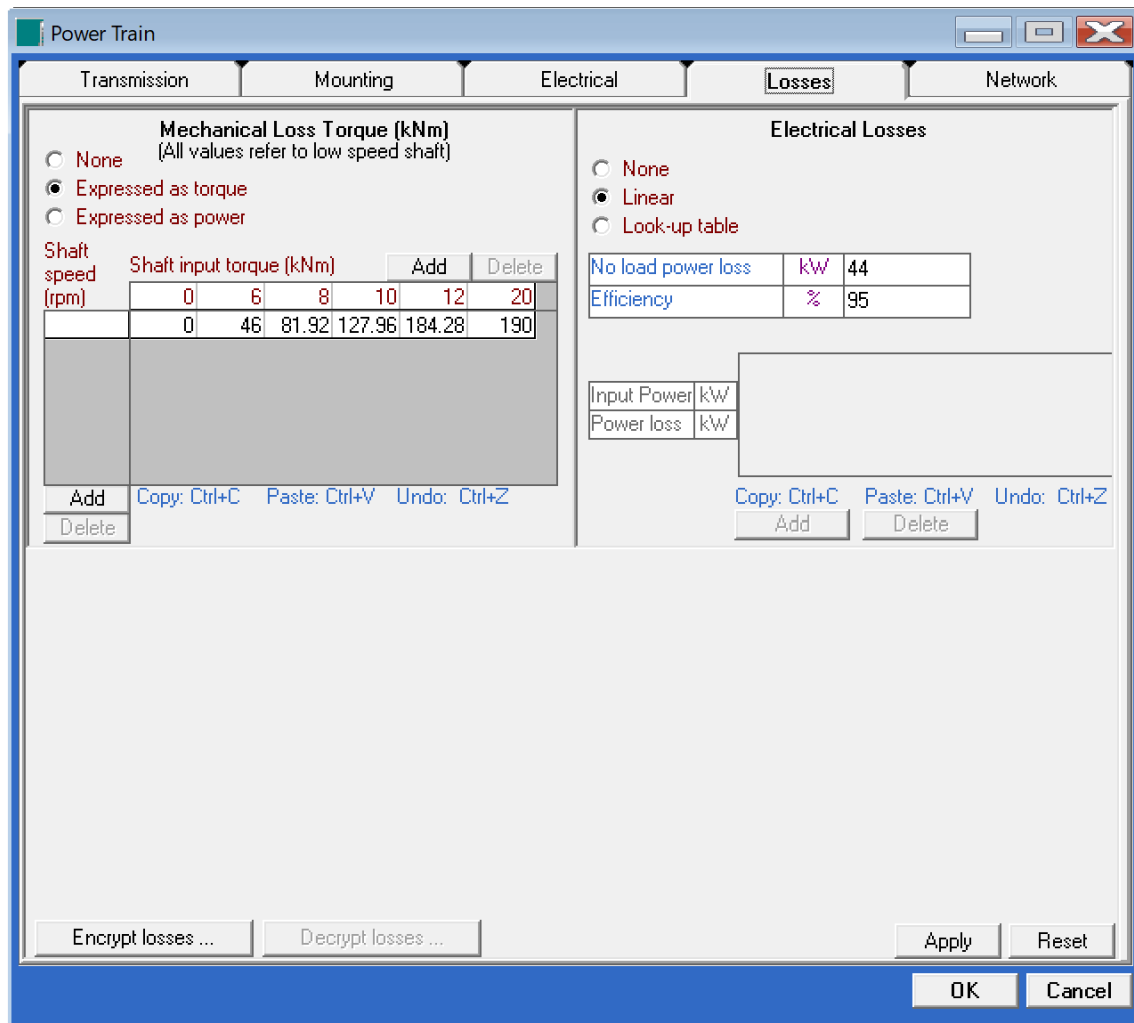
Ilustración 13: Power Train-Electrical – fuente: elaboración propia

En primer lugar, se especifica que el aerogenerador es de velocidad variable, aparte de esto se muestran los siguientes parámetros:

- **Power electronics time constant (constante de tiempo de la electrónica de potencia) [s]:** define el tiempo de respuesta física de los convertidores electrónicos a la hora de ejecutar un cambio en la dinámica mecánica de la máquina.
- **Mínimum demanded generator torque (par mínimo demandado al generador) [Nm]:** Par electromagnético mínimo que el controlador de la turbina puede exigir al generador. En caso de que este valor fuese negativo el generador podría actuar como motor para impulsar las palas.
- **Maximum demanded generator torque (par máximo demandado al generador) [Nm]:** Par electromagnético máximo que el controlador de la turbina puede exigir al generador. Este valor actúa como límite de seguridad para el generador.

- **Phase angle (ángulo de fase) [°]:** desfase entre el voltaje y la corriente que el generador inyecta en la red eléctrica. Es el coseno de este ángulo el que define el factor de potencia.

En la siguiente pestaña se encuentran los parámetros relacionados con las pérdidas en el tren de potencia.



Power Train

Transmission Mounting Electrical **Losses** Network

Mechanical Loss Torque (kNm)
(All values refer to low speed shaft)

☐ None
☒ Expressed as torque
☐ Expressed as power

Shaft speed (rpm)	0	6	8	10	12	20
	0	46	81.92	127.96	184.28	190

Add Delete

Copy: Ctrl+C Paste: Ctrl+V Undo: Ctrl+Z

Electrical Losses

☐ None
☒ Linear
☐ Look-up table

No load power loss	kW	44
Efficiency	%	95

Input Power kW
Power loss kW

Copy: Ctrl+C Paste: Ctrl+V Undo: Ctrl+Z

Add Delete

Encrypt losses ... Decrypt losses ...

Apply Reset

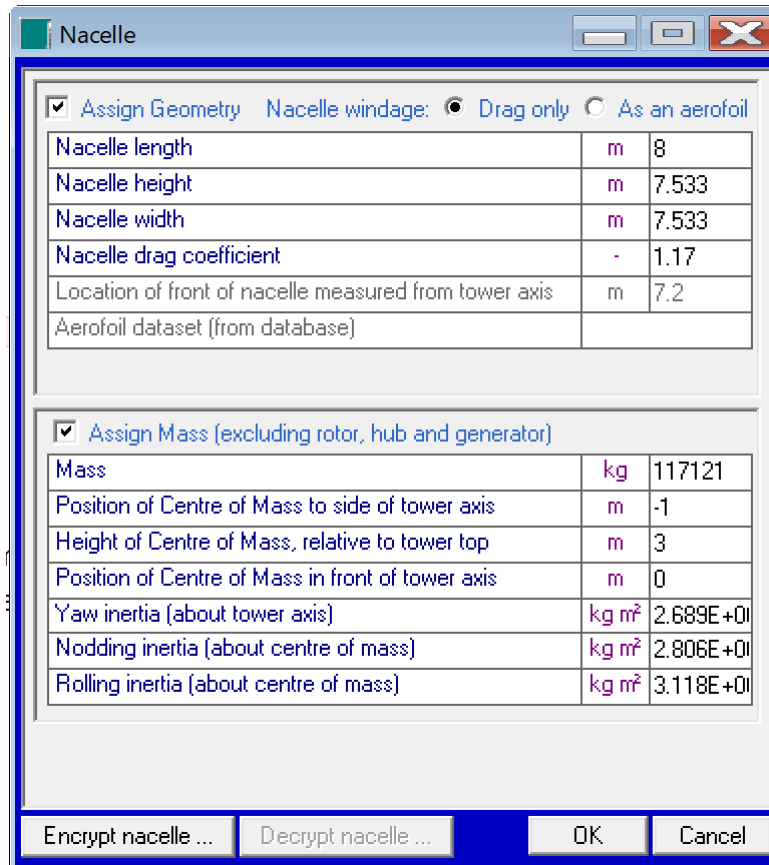
OK Cancel

Ilustración 14: Power Train-Losses – fuente: elaboración propia

A la izquierda de la pestaña se definen las pérdidas mecánicas para diferentes velocidades del rotor. A la derecha se especifican las pérdidas de magnetización (pérdidas sin carga) y el rendimiento del generador.

5.2.6 Góndola

En la siguiente imagen (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) se definen los parámetros relacionados con la góndola del aerogenerador.



Assign Geometry		
Nacelle windage: ☒ Drag only ☐ As an aerofoil		
Nacelle length	m	8
Nacelle height	m	7.533
Nacelle width	m	7.533
Nacelle drag coefficient	-	1.17
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	117121
Position of Centre of Mass to side of tower axis	m	-1
Height of Centre of Mass, relative to tower top	m	3
Position of Centre of Mass in front of tower axis	m	0
Yaw inertia (about tower axis)	kg m²	2.689E+01
Nodding inertia (about centre of mass)	kg m²	2.806E+01
Rolling inertia (about centre of mass)	kg m²	3.118E+01

Ilustración 15: Nacelle – fuente: elaboración propia

En esta ilustración se muestra cómo se marcan las siguientes opciones:

Se marca la casilla “Assign Geometry”, con lo que se pasa a considerar la góndola un cuerpo con ancho, largo y alto, y no únicamente un punto con masa.

Dentro del apartado “Nacelle Windage” se marca la casilla “drag only” con esto al hacer los cálculos se tiene solo en cuenta la fuerza de arrastre de la góndola, despreciando las fuerzas de sustentación generadas por este mismo cuerpo.

En el cuadro superior se especifican los siguientes parámetros:

- **Nacelle length (longitud de la góndola) [m]:** longitud total de la góndola desde la parte delantera (donde se encuentra el buje) hasta la parte trasera.
- **Nacelle height (altura de la góndola) [m]:** longitud vertical de la góndola.
- **Nacelle width (anchura de la góndola) [m]:** longitud transversal de la góndola (de lado a lado).

- **Nacelle drag coefficient (coeficiente de arrastre de la góndola) [-]:** valor adimensional que marca la resistencia aerodinámica del cuerpo de la góndola frente al avance del viento.

En el cuadro inferior se marca la opción “Assign Mass”, esto significa que el programa debe tener en cuenta tanto el peso como las inercias de la góndola para todos los cálculos, esto es necesario porque la masa de la góndola es un valor grande (117 toneladas) por lo que tiene un efecto considerable en fenómenos como la flexión de la torre.

En este mismo cuadro inferior se muestran los siguientes parámetros:

- **Mass (masa) [kg]:** peso total de la góndola.
- **Position of centre of mass to the side of tower axis (posición del centro de masas al lado del eje de la torre) [m]:** desequilibrio lateral de la masa de la góndola respecto al eje vertical de la torre.
- **Height of centre of mass, relative to the tower top (altura del centro de masa, relativa a la cima de la torre) [m]:** altura del centro de gravedad de la góndola con respecto al plano superior de la torre.
- **Position of centre of mass in front of the tower axis (posición del centro de masas frente al eje de la torre) [m]:** desequilibrio longitudinal (hacia delante o hacia atrás) del centro de masas de la góndola respecto al eje vertical de la torre.
- **Yaw inertia (about tower axis) (inercia de guiñada-sobre el eje de la torre) [kgm^2]:** es el momento de inercia que define la resistencia de la masa de la góndola al rotar respecto el eje vertical de la torre, para orientarse hacia la dirección del viento.
- **Nodding inertia (about centre of mass) (inercia de cabeceo-sobre el centro de masas) [kgm^2]:** es el momento de inercia que define la resistencia de la góndola a inclinarse hacia delante y hacia atrás, se calcula respecto al centro de masas de la góndola.
- **Rolling inertia (about centre of mass) (inercia de balanceo-sobre el centro de masas) [kgm^2]:** es el momento de inercia que define la resistencia de la góndola a balancearse lateralmente alrededor de su propio centro de gravedad.

5.2.7 Control

A continuación, se definen los parámetros necesarios para controlar el aerogenerador de manera que permita su correcto funcionamiento

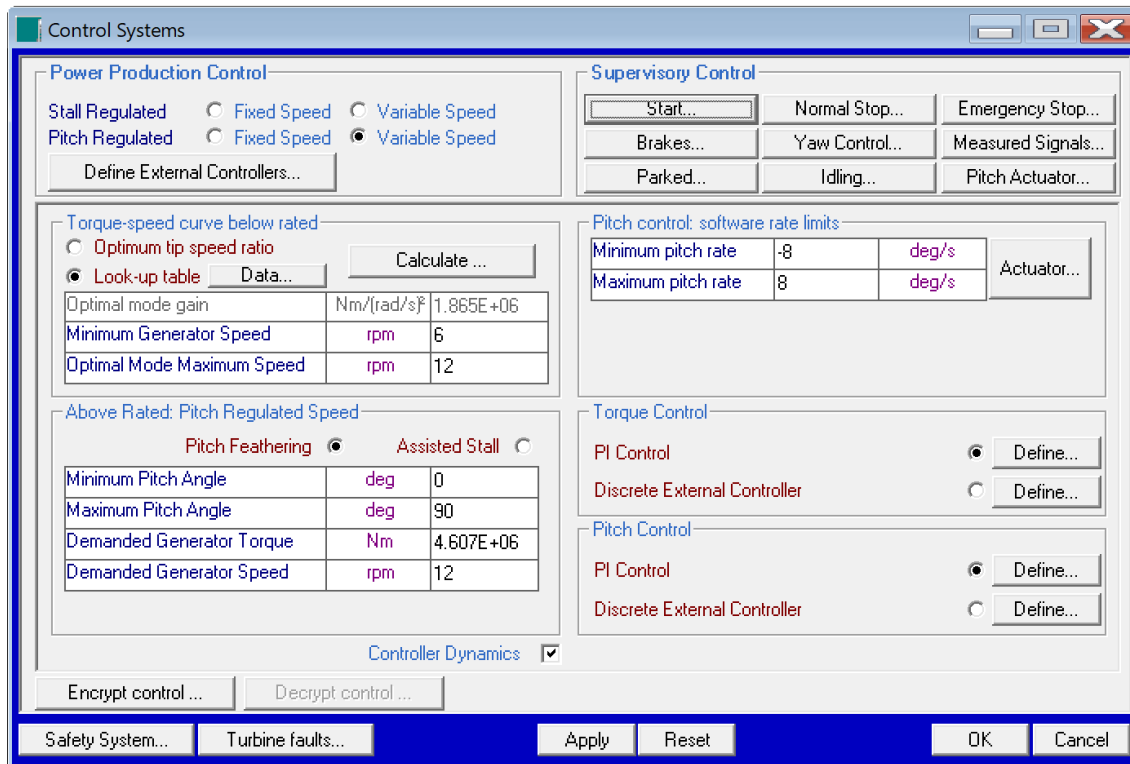


Ilustración 16: Control systems – fuente: elaboración propia

Sobre los parámetros que se muestran en la Ilustración 16 dentro del recuadro llamado “Power Production control” se escoge la opción de velocidad variable para el control de paso (por lo que es el control de paso el que regula la potencia producida), lo que significa que para velocidades bajas del viento el rotor variará la velocidad de las palas para maximizar la eficiencia, y para velocidades altas de viento se controlará la velocidad de las palas para reducir las cargas y mantener potencia eléctrica constante.

En el siguiente recuadro “Torque-speed curve below rated” se definen las características para un funcionamiento por debajo de la potencia nominal. En este recuadro se encuentra marcada la opción “look-up table” la cual en vez de calcular el par ideal en cada instante (“optimum tip speed ratio”) recurre a unos valores ya predeterminados (estos valores se muestran en la Ilustración 17) para reducir la carga y los tiempos de cálculo al simular.

Torque-speed curve

Generator speed, rpm	Generator torque, Nm
0	0
6	720402
8	1.281E+06
10	2.001E+06
11	2.5E+06
12	4.607E+06
25	4.607E+06

Copy: Ctrl+C Paste: Ctrl+V Undo: Ctrl+Z

Add Delete

Show OK Cancel

Ilustración 17: Torque-speed curve – fuente: elaboración propia

- **Minimum Generator Speed (velocidad mínima del generador) [rpm]:** si el rotor gira por debajo de esta velocidad el generador no funciona y la turbina no acelera, también se llama velocidad de acople.
- **Optimal mode maximum speed (máxima velocidad en el modo optimo) [rpm]:** valor máximo de la curva optima.

En el apartado “Above Rated: Pitch Regulated Speed” se marca la opción “pitch feathering”, esto significa que cuando la energía del viento es excesiva se rota el borde de ataque de las palas para reducir gradualmente el valor tanto del ángulo de ataque como el de la sustentación.

- **Minimun pitch angle (ángulo mínimo de paso) [°]:** límite inferior del sistema de control de paso, punto de máxima captación de energía.
- **Maximun pitch angle (ángulo máximo de paso) [°]:** límite superior del sistema de control de paso, punto de mínima captación de energía.
- **Demanded generator torque (par demandado por el generador) [Nm]:** par exigido al generador una vez alcanzado el punto de capacidad máxima del generador.
- **Demanded generator speed (velocidad demandada por el generador) [rpm]:** cuando el viento sea fuerte el control de paso ajustará las palas para que la velocidad del rotor se mantenga en este valor.

- **Minimun/Maximun pitch rate (velocidades máximas y mínimas del control de paso) [°/s]:** límites de velocidad establecidos por el software sobre los mecanismos que rotan las palas.

Se escoge utilizar un control PI tanto en el control de torque como en el de paso para conseguir una reacción instantánea ante perturbaciones y eliminar el error residual, con el objetivo de converger en la velocidad demandada por el generador de manera precisa y eficiente.

5.2.8 Modal

En esta ventana se especifica el análisis modal del aerogenerador, en ella se busca calcular las frecuencias naturales de la estructura para asegurarse de que no coincidan con las de las cargas operativas, de esta manera evitando la resonancia.

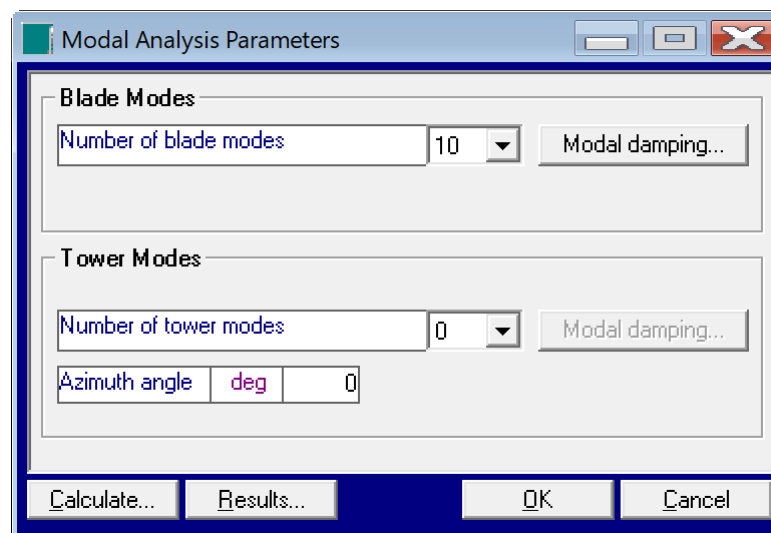


Ilustración 18: Modal analysis parameters – fuente: elaboración propia

- **Number of Blade modes (número de puntos de estudio en las palas):** especifica el número de puntos en los que se va a calcular la frecuencia natural de las palas.

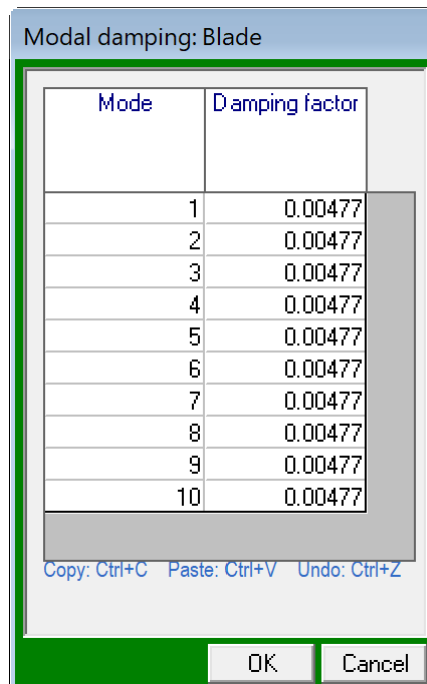


Ilustración 19: Modal damping: Blade – fuente: elaboración propia

Para los 10 puntos de estudio de las palas se especifica un amortiguamiento de 0,00477 (0,477%).

En este modelo no se estudia la vibración natural de la torre por lo que el valor que se introduce en el parámetro “number of tower modes” es 0.

5.2.9 Wind

En este apartado se definen las características del flujo de aire incidente. El apartado se divide en varias ventanas donde se introducen diferentes categorías de parámetros con la intención de poder crear simulaciones precisas y para un amplio abanico de casos.

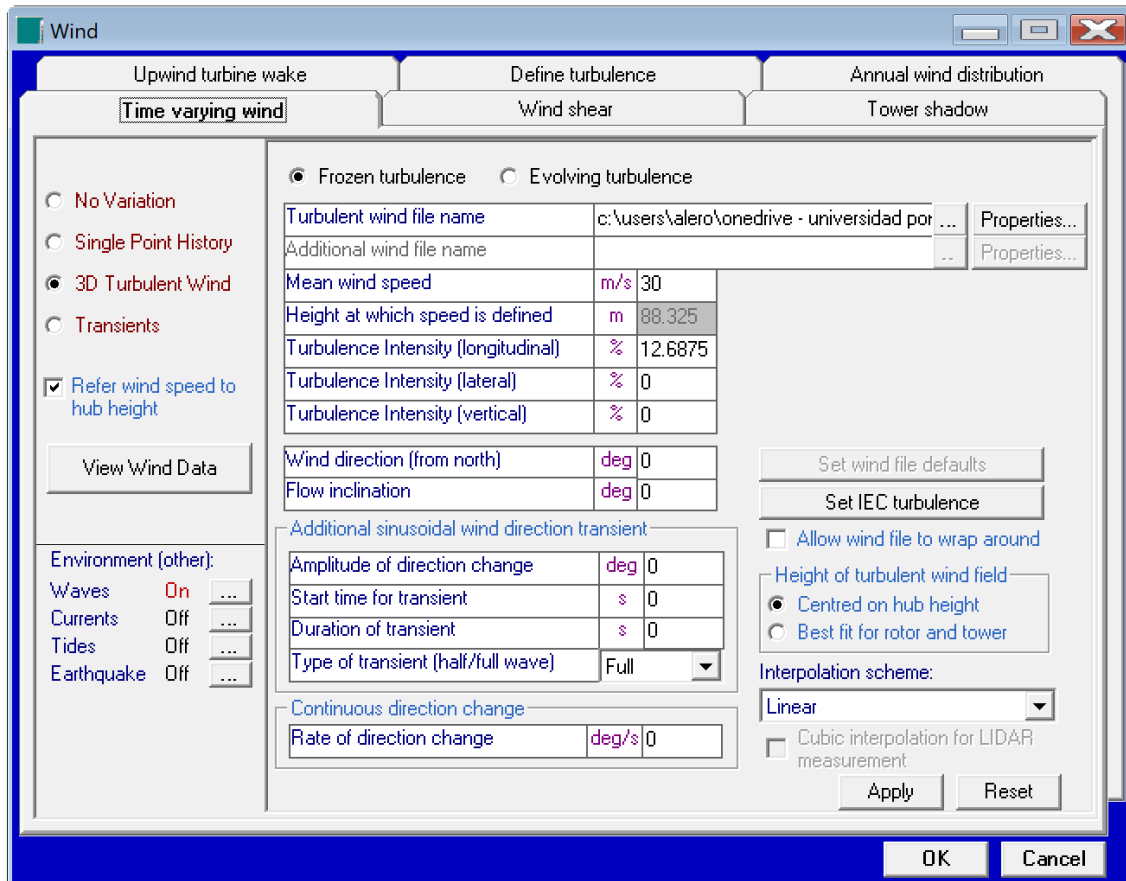


Ilustración 20: Wind: Time varying wind-3D turbulent wind – fuente: elaboración propia

En la ventana que se muestra en la Ilustración 20 se ve como se marca la opción “3D Turbulent Wind” con los parámetros que aparecen en este apartado se consigue un análisis más realista, ya que el viento no es constante ni unidireccional, sino que cambia constantemente de velocidad y dirección. Normativas internacionales como IEC 61400-3.

En esta ventana se definen los siguientes parámetros:

- **Turbulent wind file name (nombre del archive de turbulencia):** aquí se añade el directorio que contiene el archivo que contiene los datos sobre la turbulencia del viento, este archivo se genera en el apartado “Define Turbulence”

- **Mean wind speed (velocidad media del Viento) [m/s]:** valor constante de velocidad base sobre el cual el programa añade una turbulencia, este valor depende de las condiciones meteorológicas del emplazamiento del aerogenerador.
- **Height at which speed is defined (altura a la que se define la velocidad) [m]:** en este apartado se aplica automáticamente la altura del buje, la cual ha sido definida previamente.
- **Turbulence intensity (longitudinal) (intensidad lateral turbulencia longitudinal) [%]:** mide la magnitud de las fluctuaciones de velocidad del viento en la dirección de este mismo.
- **Turbulence intensity (lateral/vertical) (intensidad lateral turbulencia lateral/vertical) [%]:** mide la magnitud de las fluctuaciones de velocidad del viento en las direcciones de los ejes perpendiculares a la dirección del viento.
- **Wind direction (from North) (dirección del viento- desde el norte) [°]:** ángulo de entrada horizontal del viento, con la posición original de la góndola como dirección de referencia.
- **Flow inclination (inclinación del flujo) [°]:** ángulo vertical del viento incidente.

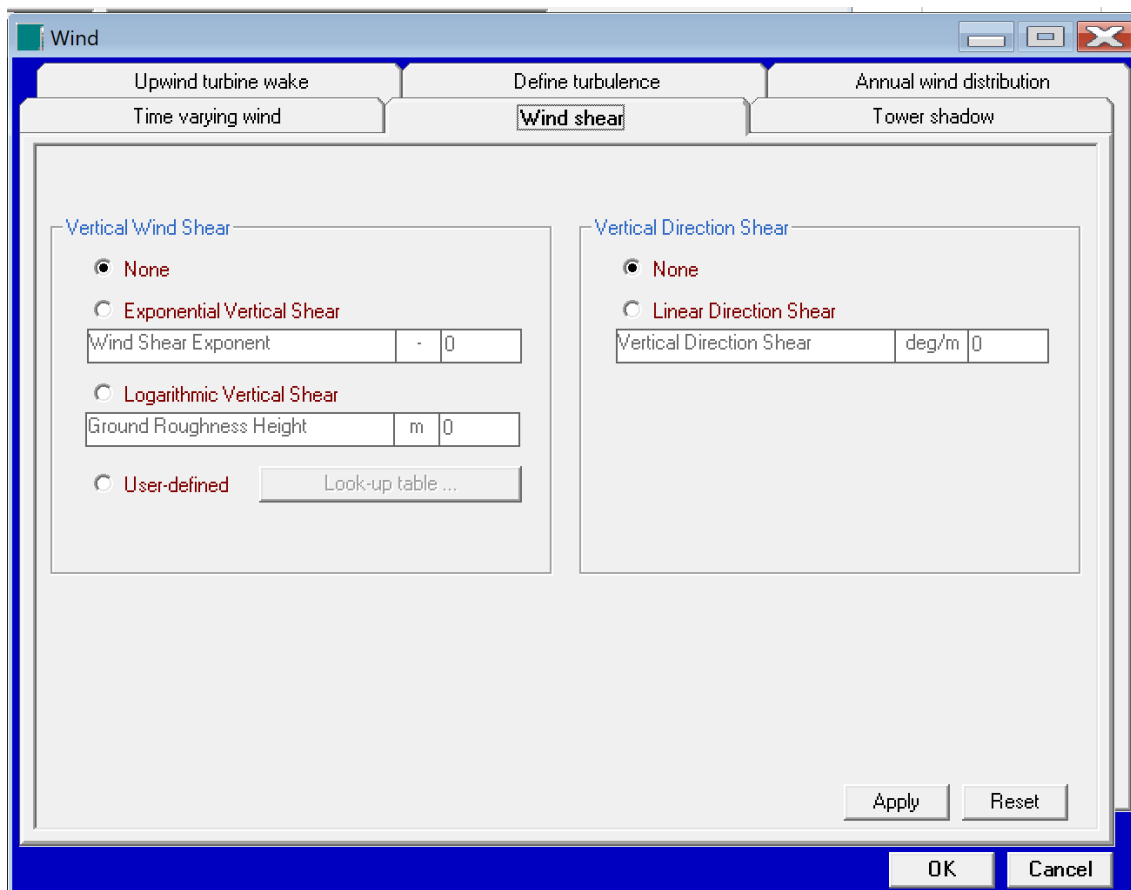


Ilustración 21: Wind: wind shear – fuente: elaboración propia

En esta pestaña se define el perfil vertical del flujo de aire. En los dos recuadros de esta pestaña se encuentran marcadas las casillas “none”, esto implica que el viento es uniforme

en su perfil vertical, por lo tanto, el viento tiene la misma velocidad tanto en la parte más alta del área de barrido del rotor como en la parte más baja, y que el viento incide con el mismo ángulo al nivel del mar y en el punto más alto de la torre.

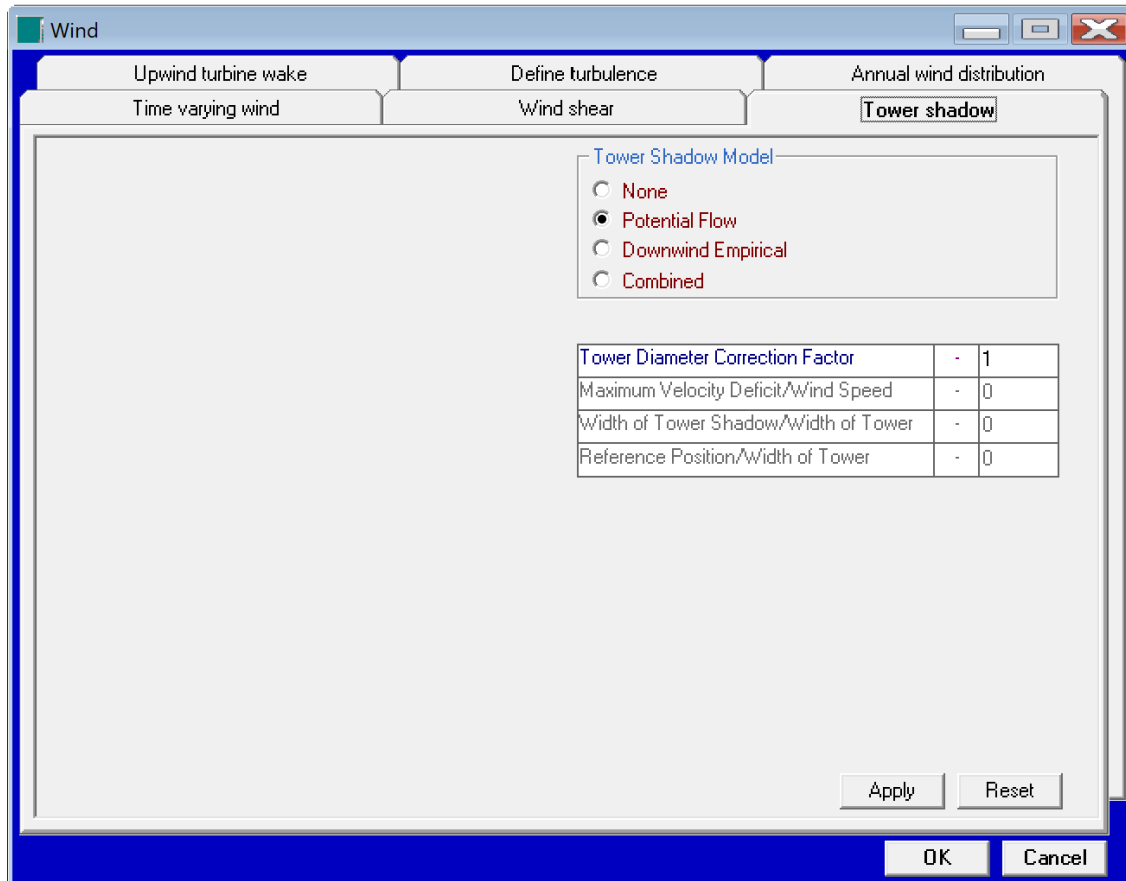
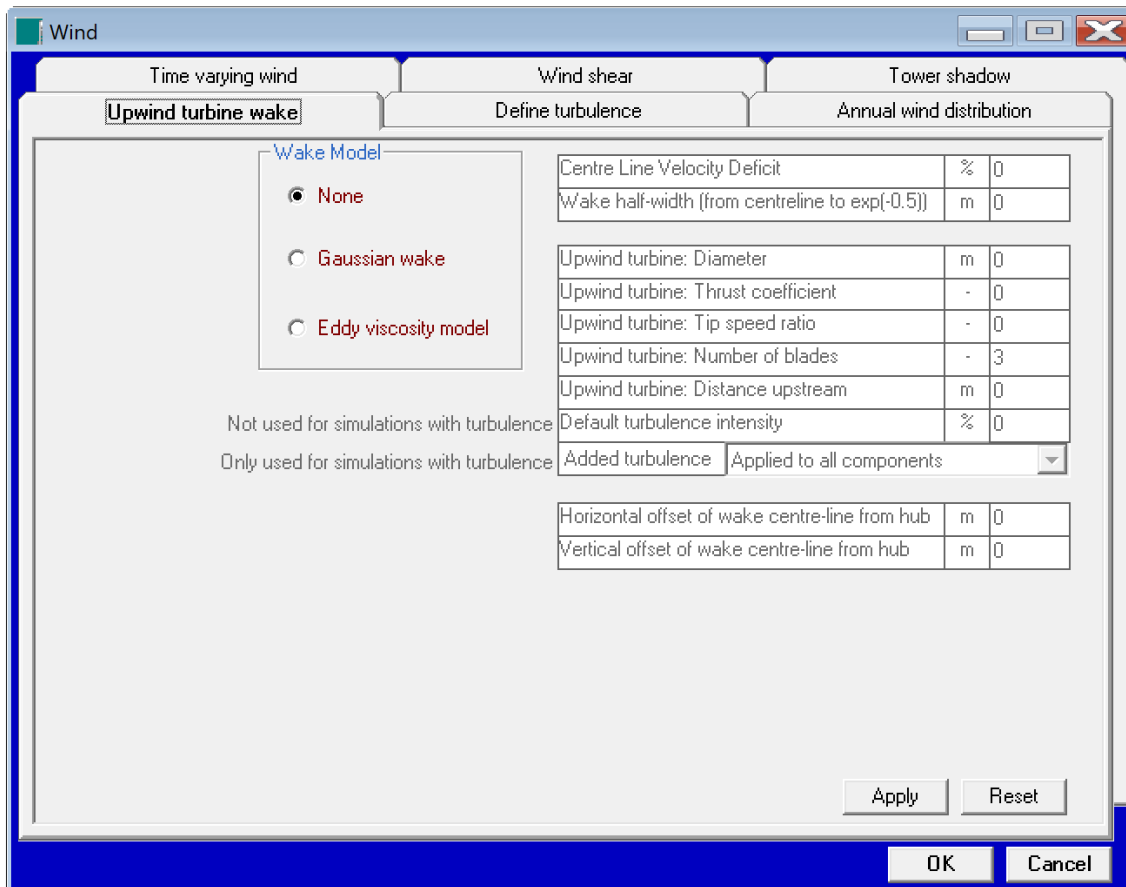


Ilustración 22: Wind: tower shadow – fuente: elaboración propia

Esta pestaña modela la sombra de la torre (la perturbación que provoca la torre en el flujo del viento). El efecto de la sombra de la torre se refleja en la caída de carga que sufren las palas al pasar delante de la torre. Esta es una de las causas principales de fatiga en las palas. Al seleccionar la casilla de “potential flow” se pasa a utilizar el modelo matemático estándar para diseños a barlovento (el aire golpea las palas antes que la torre).

- **Tower diameter correction factor (factor de corrección de diámetro de la torre) [-]:** relación entre el diámetro físico y el diámetro aerodinámico de la torre.



The screenshot shows the 'Wind' software window with the 'Upwind turbine wake' tab selected. The 'Wake Model' section has three radio buttons: 'None' (selected), 'Gaussian wake', and 'Eddy viscosity model'. Below this, there are two lines of text: 'Not used for simulations with turbulence' and 'Only used for simulations with turbulence'. The 'Define turbulence' section contains a table of parameters:

Centre Line Velocity Deficit	%	0
Wake half-width (from centreline to exp(-0.5))	m	0
Upwind turbine: Diameter	m	0
Upwind turbine: Thrust coefficient	-	0
Upwind turbine: Tip speed ratio	-	0
Upwind turbine: Number of blades	-	3
Upwind turbine: Distance upstream	m	0
Default turbulence intensity	%	0
Added turbulence	Applied to all components	
Horizontal offset of wake centre-line from hub	m	0
Vertical offset of wake centre-line from hub	m	0

At the bottom right of the window are 'Apply' and 'Reset' buttons. At the very bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Ilustración 23: Wind: upwind turbine wake – fuente: elaboración propia

Esta pestaña se utiliza para modelar las condiciones de simulación en un parque eólico (con más de un aerogenerador), como en este caso se está modelando un único aerogenerador, se marca la casilla “none”.

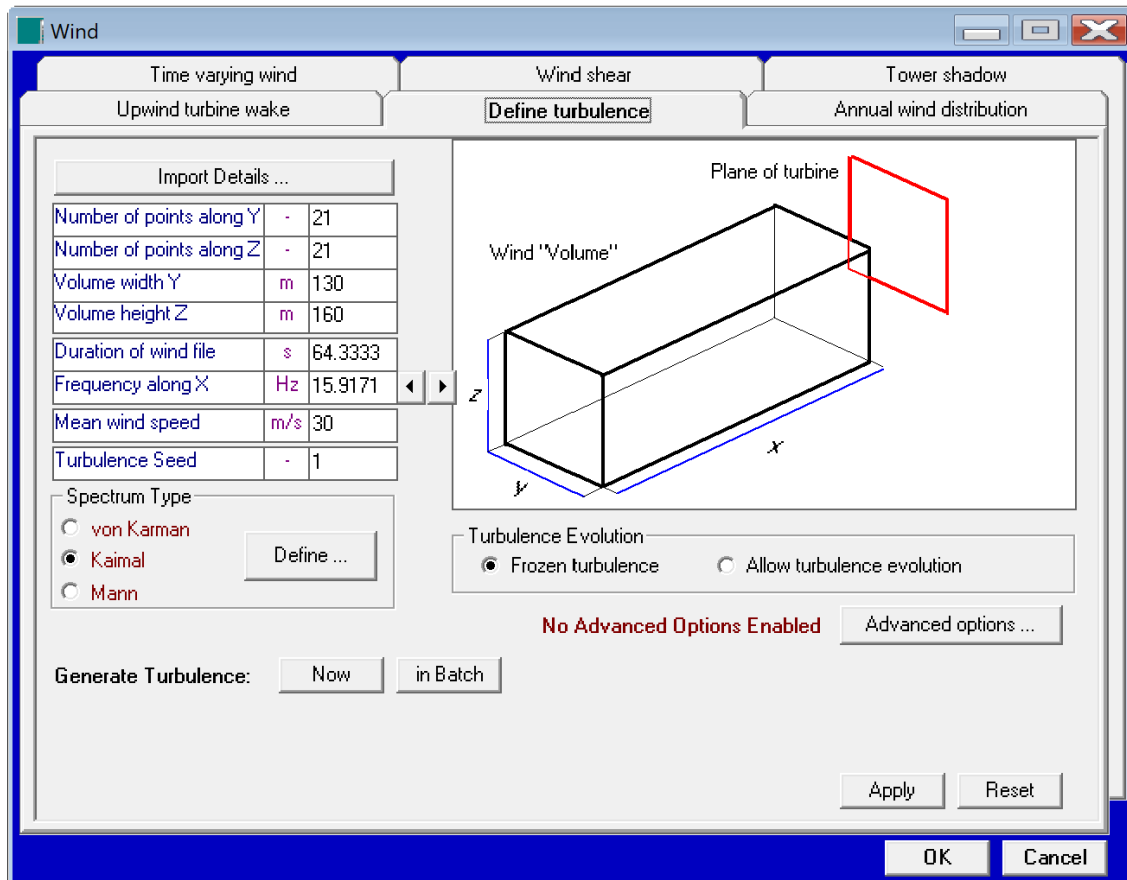


Ilustración 24: Wind: define turbulence – fuente: elaboración propia

En esta ventana se definen los parámetros necesarios para después generar el archivo de turbulencia que se usa en la ventana “Time varying wind” (Ilustración 20)

- **Number of poitns along Y/Z (número de puntos a lo largo de Y/Z) [-]:** define la resolución transversal/vertical de la malla del viento. Se especifican el número de nodos en cada eje.
- **Volume width Y (anchura del volumen Y) [m]:** dimensión transversal de la caja de viento (volumen de aire simulado), debe ser mayor que el diámetro del rotor.
- **Volume height Z (altura del volumen Z) [m]:** dimensión vertical de la caja de viento (volumen de aire simulado), debe ser mayor que el diámetro del rotor.
- **Duration of wind file (duración del archivo de Viento) [s]:** duración máxima que podrá tener la simulación que utilice este archivo.
- **Frequency along X (frecuencia a lo largo de X) [Hz]:** tasa de muestreo temporal del bloque de viento.
- **Mean wind speed (velocidad media del Viento) [m/s]:** valor constante de velocidad base sobre el cual el programa añade una turbulencia, este valor depende de las condiciones meteorológicas del emplazamiento del aerogenerador.

- **Turbulence seed (semilla de turbulencia) [-]:** marca el punto de partida para el algoritmo matemático, en este caso al elegir el número 1 cada vez que se ejecute la simulación se generará exactamente el mismo viento.

En el apartado “spectrum type” se escoge un modelo estadístico que será el que defina los valores de la energía cinética en el espacio y el tiempo, para este modelo se ha marcado Kaimal, que es el modelo estadístico exigido por las normativas internacionales de la IEC (International Electrotechnical Commission).

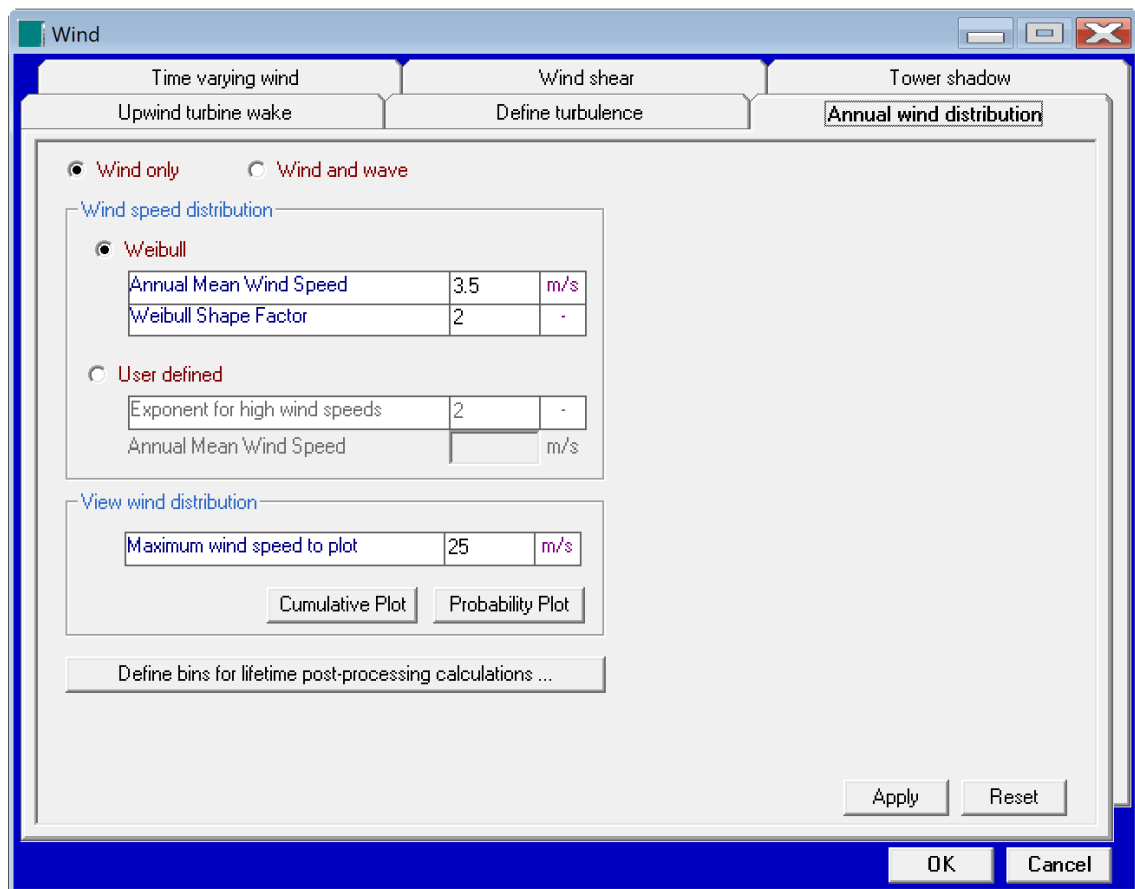


Ilustración 25: wind: 58áxim wind distribution – fuente: elaboración propia

En esta ventana se definen las condiciones del viento a largo plazo. Al marcar la opción “Wind only” se calcula el daño por fatiga teniendo únicamente en cuenta el viento, y no el viento y el oleaje.

Dentro del recuadro “wind speed distribution” se encuentran los siguientes parámetros:

- **Anual mean wind speed (velocidad media anual del viento) [m/s]:** es un parámetro que depende de la localización del aerogenerador.
- **Weibull shape fator (factor de forma de Weibull) [-]:** es un parámetro adimensional que decide la anchura de la curva de probabilidad que decide la velocidad del viento a lo largo del año.

Dentro del recuadro “View wind distribution” se define el siguiente parámetro:

- **Maximun wind speed to plot (velocidad máxima del Viento a graficar) [m/s]:** no tiene ningún efecto en las simulaciones únicamente indica el valor máximo que se muestra en los gráficos en el eje de la velocidad del viento

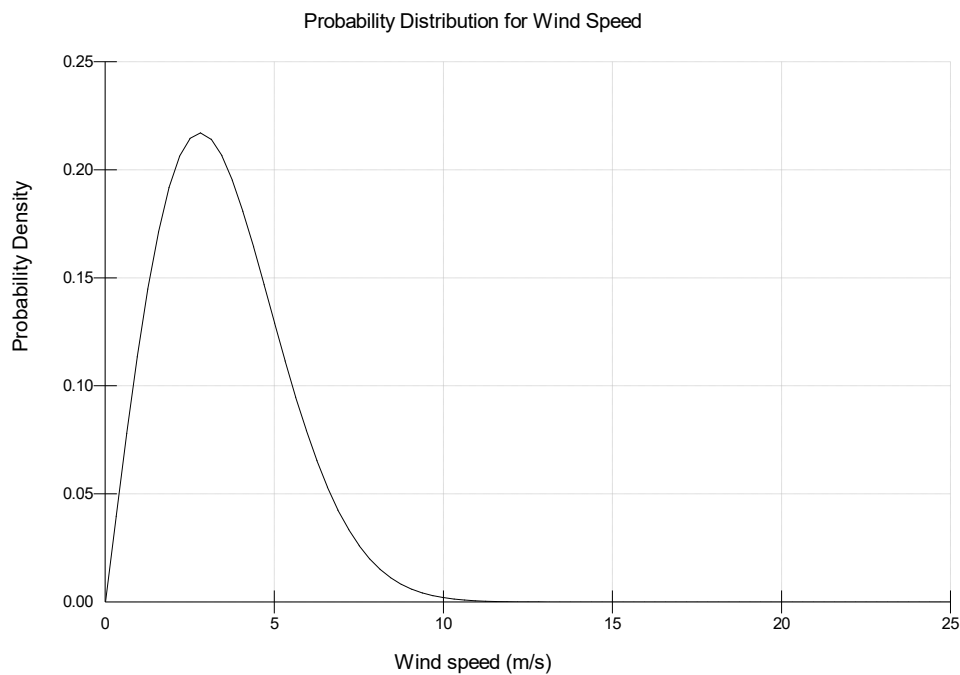


Ilustración 26: grafico de densidad de velocidad del viento – fuente: elaboración propia

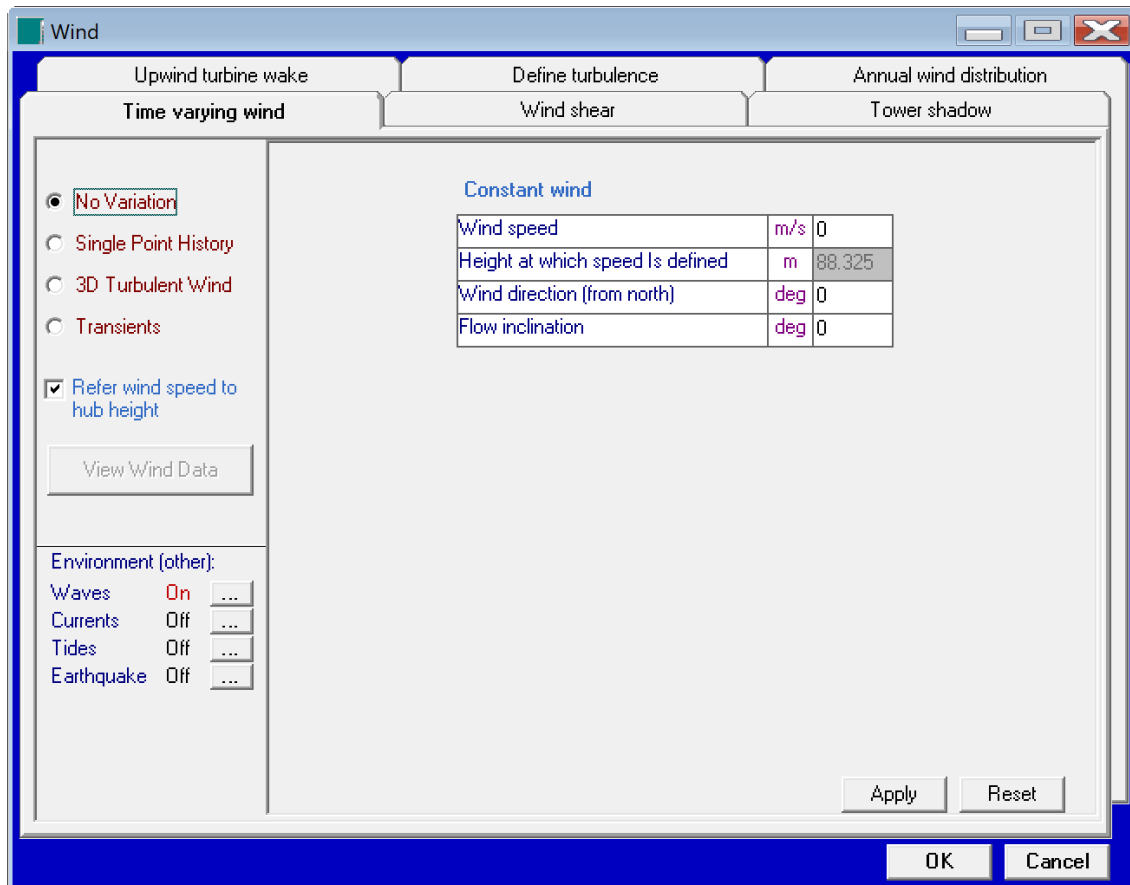
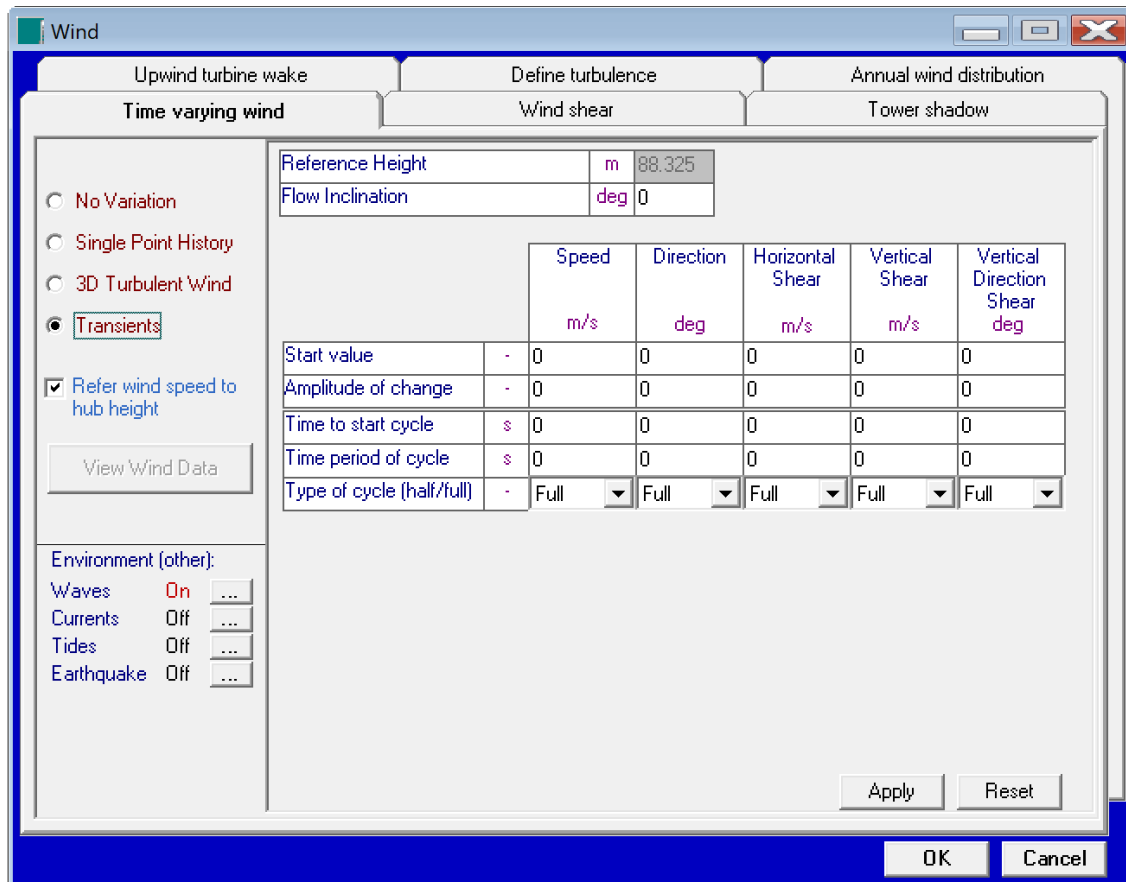


Ilustración 27: Wind:Time varying wind-no variation – fuente: elaboración propia

Volviendo a la ventana de “Time varying wind” esta vez se muestra el apartado “No Variation” donde se definen las características del aire para condiciones de flujo completamente estático. Aquí los parámetros a definir son:

- **Wind speed (velocidad del viento) [m/s]:** velocidad continua y constante del viento que llega a la turbina.
- **Height at which speed is defined (altura a la que se define la velocidad) [m]:** en este apartado se aplica automáticamente la altura del buje, la cual ha sido definida previamente.
- **Wind direction (from North) (dirección del viento- desde el norte) [°]:** ángulo de entrada horizontal del viento, con la posición original de la góndola como dirección de referencia.
- **Flow inclination (inclinación del flujo) [°]:** ángulo vertical del viento incidente.



Wind

Upwind turbine wake Define turbulence Annual wind distribution

Time varying wind Wind shear Tower shadow

☐ No Variation
☐ Single Point History
☐ 3D Turbulent Wind
☒ **Transients**

☒ Refer wind speed to hub height

View Wind Data

Environment (other):

Waves On ...

Currents Off ...

Tides Off ...

Earthquake Off ...

		Speed m/s	Direction deg	Horizontal Shear m/s	Vertical Shear m/s	Vertical Direction Shear deg
Start value	-	0	0	0	0	0
Amplitude of change	-	0	0	0	0	0
Time to start cycle	s	0	0	0	0	0
Time period of cycle	s	0	0	0	0	0
Type of cycle (half/full)	-	Full	Full	Full	Full	Full

Apply Reset

OK Cancel

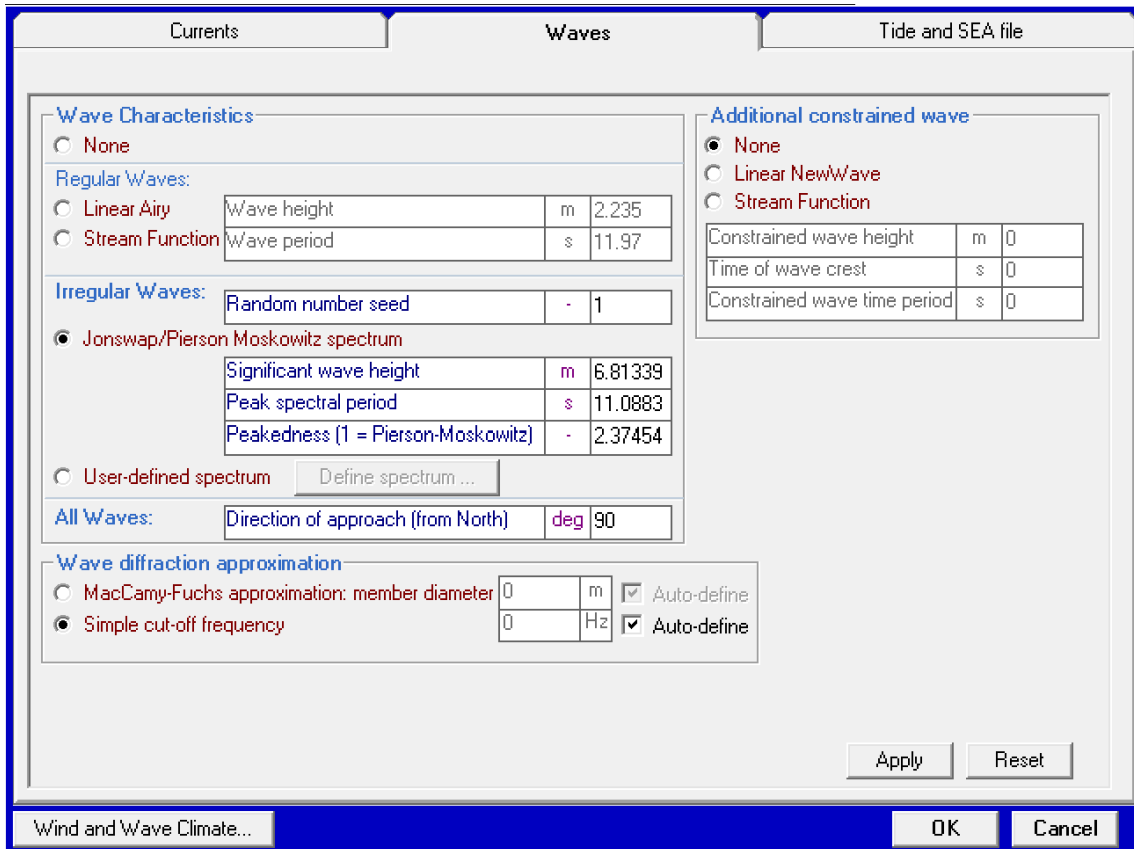
Ilustración 28: Wind: time varying wind-transients – fuente: elaboración propia

Dentro del apartado “Transients” (transitorios) de la ventana “Time varying wind” se definen eventos aislados del viento, que se usan para simular alteraciones bruscas y cambios puntuales en el viento. Los parámetros que se definen en esta ventana son:

- **Reference height (altura de referencia) [m]:** en este apartado se aplica automáticamente la altura del buje, la cual ha sido definida previamente.
- **Flow inclination (inclinación del flujo) [°]:** ángulo vertical del viento incidente.

En la tabla que se muestra en la Ilustración 28 se observa que no hay ningún transitorio definido por el momento.

5.2.10 Sea state



The screenshot shows a software window with three tabs: 'Currents', 'Waves', and 'Tide and SEA file'. The 'Waves' tab is active. It contains several sections:

- Wave Characteristics:**
 - ☐ None
 - Regular Waves:**
 - ☐ Linear Airy: Wave height (m) 2.235, Wave period (s) 11.97
 - ☐ Stream Function
 - Irregular Waves:**
 - ☒ Jonswap/Pierson Moskowitz spectrum: Random number seed (-) 1, Significant wave height (m) 6.81339, Peak spectral period (s) 11.0883, Peakedness (1 = Pierson-Moskowitz) (-) 2.37454
 - ☐ User-defined spectrum: Define spectrum ...
 - All Waves:** Direction of approach (from North) (deg) 90
- Additional constrained wave:**
 - ☒ None
 - ☐ Linear NewWave
 - ☐ Stream Function
 - Constrained wave height (m) 0
 - Time of wave crest (s) 0
 - Constrained wave time period (s) 0
- Wave diffraction approximation:**
 - ☐ MacCamy-Fuchs approximation: member diameter (m) 0, Auto-define (checked)
 - ☒ Simple cut-off frequency: (Hz) 0, Auto-define (checked)

Buttons at the bottom: 'Apply', 'Reset', 'Wind and Wave Climate...', 'OK', 'Cancel'.

Ilustración 29: Sea state: waves – fuente: elaboración propia

En este modelo únicamente se tiene en cuenta el efecto de oleaje mientras que se desprecian las corrientes y la marea, por tanto, esta es la única ventana en la que se definen parámetros dentro del menú “Sea state”. En esta ventana se definen las condiciones hidrodinámicas del oleaje.

En el apartado “Irregular waves” se abandona la idea de las olas senoidales para adoptar un modelo realista, caótico y estadístico del oleaje. Al seleccionar el apartado “Jonswap/Pierson Moskowitz spectrum” se adopta un modelo empírico para la distribución de energía en el oleaje que es el estándar en la industria. El resto de los parámetros definidos en este apartado son:

- **Random number seed (número aleatorio de semilla) [-]:** permite generar diferentes condiciones de oleaje.
- **Significant wave height (altura significativa de la ola) [m]:** valor medio de la altura del tercio más alto de olas.
- **Peak spectral period (periodo espectral de pico) [s]:** periodo con mayor concentración de energía de la onda

Dentro del apartado “Additional constrained waves” se marca la opción “none”, lo que significa que no se añaden de manera artificial eventos extremos dentro del modelo de oleaje.

5.3 Modelo de las condiciones ambientales

Siguiendo las características y especificaciones del aerogenerador entregadas por el tutor del proyecto (las cuales se encuentran en el “Anexo II: Especificaciones del aerogenerador (aportado por el director del TFG)”), se ha decidido como emplazamiento del aerogenerador la costa oeste de Sudáfrica, al norte de Ciudad del Cabo, específicamente en las coordenadas del emplazamiento, latitud -32.997 y longitud 17.750.

Para obtener las condiciones ambientales se han utilizado principalmente dos bases de datos, estas son Global Wind Atlas y Copernicus. [GLOB26], [COPE26]

Los datos más relevantes obtenidos son:

Tabla 3: Datos ambientales del emplazamiento

V_{max} [m/s] (en los últimos 50 años)	28.3251
$V_{average}$ [m/s]	8.57
Periodo de ola [s]	11.97
Altura de la ola [m]	5.08
Dirección de aproximación (desde el norte) [°]	219.4°

En aerogeneradores hay dos parámetros básicos que categorizan los aerogeneradores en función a las condiciones ambientales a las que están expuestos, estos son la clase de viento y la categoría de turbulencia.

La clase de viento se decide según la velocidad máxima de viento registrada y la velocidad media en los últimos 50 años en el emplazamiento. Existen las clases I, II, III y S, en el caso del aerogenerador de este proyecto el viento es clase I (vientos altos) ya que cae dentro de los requisitos de esta clase de viento (velocidades medias de hasta 10 m/s y velocidades extremas de 50m/s).

La categoría de turbulencia se divide en A, B y C, donde A se escoge para emplazamientos con turbulencia alta, por ejemplo, zonas montañosas, y C se escoge para zonas con baja turbulencia. Para este proyecto se escoge la categoría C ya que el aerogenerador se encuentra en el mar alejado de la costa, lo que suele significar que no hay obstáculos en el terreno que generen turbulencia.

6. Simulaciones y Análisis de Cargas (DCLs)

Con el objetivo de hacer un correcto modelado de la estructura soporte y cimentación del aerogenerador para cargas extremas, se van a realizar varias simulaciones, de donde se deben extraer los valores más extremos de cargas que debe soportar el aerogenerador.

Los casos de simulación se han obtenido de la norma GL. Los casos elegidos son los siguientes: operación normal de aerogenerador (DLC 1.1), evento extremo en operación (DLC 1.3), maniobra operativa de parada de emergencia (DLC 5.1) y parada extrema (DLC 6.1). Esta selección cubre las cuatro grandes familias que según la normativa GL son relevantes y necesarias para el dimensionamiento de la subestructura.

Todas las simulaciones que se han llevado a cabo usando como base el modelo de Bladed expuesto en el apartado anterior (5). Por tanto, la única diferencia entre los casos son las condiciones ambientales, el estado de funcionamiento del aerogenerador, así como parámetros propios de cada DCL. Algunos de los parámetros más relevantes de la configuración común se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4: Configuración común a todas las simulaciones

Velocidad nominal del rotor	12rpm (1.2566rad/s)
Velocidad nominal del viento (V_r)	11.633m/s
Velocidad de arranque y corte (V_{in} / V_{out})	3.5 / 30 m/s
Perfil vertical de viento	Ley potencial con exponente $\alpha=0.14$
Flexibilidad de la torre	4 modos con amortiguamiento $\zeta=0.015$
Frecuencia del primer modo de la estructura soporte	0.25Hz
Profundidad y marea	50m + 3.6m (nivel más desfavorable)
Salidas de cargas	Estaciones de torre en mudline (-50m)
Duración de la simulación	60s (límite de licencia educacional)
Factores de seguridad parciales	1.2 para situaciones normales y 1.35 para situaciones extremas.

Debido a la limitación de 60 segundos como tope de tiempo de simulación para la versión educacional de Bladed, los casos que requieren larga duración según la normativa se han adaptado conforme indica la normativa GL, empleando equivalentes deterministas, usando la combinación de viento estacionario y ola regular periódica. Los cálculos que justifican los valores empleados en Bladed para las simulaciones se demuestran en el apartado 7 del proyecto.

6.1 Producción de energía para viento turbulento normal, DCL 1.1

En esta simulación se estudia el funcionamiento normal, conectado a la red, del aerogenerador. Este es el estado de la turbina durante prácticamente toda su vida útil, y sirve principalmente para estudiar la fatiga de la estructura. En esta simulación se aplica un factor de seguridad normal.

El DCL1.1 simula la producción de energía del aerogenerador con un modelo de turbulencia normal (NTM) con un rango de velocidades en el buje de, $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$, con un estado de mar irregular. En la siguiente tabla se muestran los parámetros más relevantes para cada caso de simulación según la velocidad de viento en el buje.

Tabla 5: Correlación metoceánica del emplazamiento: turbulencia y estado de mar asociados a cada velocidad media de viento

V_{hub} [m/s]	σ_1 [m/s]	Intensidad de turbulencia [%]	Hs [m]	Tp [s]	Peakedness γ
8.57	1.4757375	17.2198075	0.9241105	4.29645426	1.84080259
10	1.63125	16.3125	1.25823645	5.01336553	1.84080259
17	2.3925	14.0735294	3.63630335	8.5227214	1.84080259
24	3.15375	13.140625	5.4507092	10.1414855	2.12669615
30	3.80625	12.6875	6.8133865	11.0883156	2.37454298

Aparte de estudiar el efecto de varias velocidades del viento, también se estudia la influencia de la desalineación entre viento y oleaje, para ello las simulaciones se repiten con ángulos de 0°, 45° y 90° entre ambos. En las tablas que se muestran a continuación se muestran los momentos flectores (M_y) y transversales (M_x), junto a la fuerza cortante en la dirección del viento (F_x) todos aplicados en la cimentación.

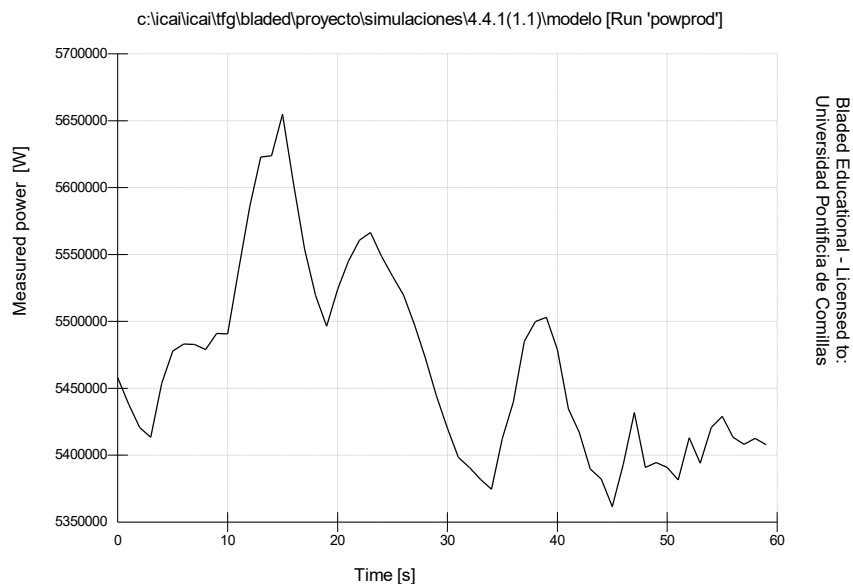


Ilustración 30: Potencia medida, DLC 1.1 - fuente: elaboración propia

Tabla 6: Resultados principales del DLC 1.1 en la cimentación para la combinación colineal viento-oleaje (0°)

V [m/s]	My mín [MN·m]	My máx [MN·m]	Mx mín [MN·m]	Mx máx [MN·m]	Fx mín [kN]	Fx máx [kN]
8.57	24.6	74.2	0.5	9.7	-121	840
10	31.3	99.5	-1.8	15.1	-224	1320
17	-1	94.3	-3.6	16.3	959	1866
24	26.6	73.3	0.8	19.8	-74	936
30	-34	122	-15.2	24.2	-1630	2900

Tabla 7: Efecto de la desalineación viento-oleaje sobre los momentos máximos en la cimentación (DLC 1.1)

V [m/s]	My máx 0° [MN·m]	My máx 45° [MN·m]	My máx 90° [MN·m]	Mx máx 0° [MN·m]	Mx máx 45° [MN·m]	Mx máx 90° [MN·m]
8.57	74.2	72	66.8	9.7	19.2	24
10	99.5	91.3	82.7	15.1	27.2	35.8
17	94.3	84.3	72.2	16.3	44.3	59
24	73.3	68.5	57.1	10.8	17.8	21.7
30	122	-	86.2	24.2	-	86.9

Observando los resultados de las simulaciones se llega a la siguiente conclusión: el máximo momento de vuelco ocurre para $V=30\text{m/s}$ con una dirección del viento colineal, con un valor de $122\text{MN}\cdot\text{m}$. También se aprecia que la desalineación del oleaje reduce el momento en la dirección del viento y genera un crecimiento en el momento transversal, pero la combinación colineal es la más desfavorable.

6.2 Producción de ráfaga coherente extrema con cambio de dirección, DLC 1.3

En esta simulación se estudia la reacción del aerogenerador bajo funcionamiento normal, al ser sometido a una ráfaga determinista extrema que, además, cambia de dirección, combinada con el oleaje. Durante la simulación se utiliza un factor de seguridad extremo. Este tipo de simulación tiende a generar picos de carga muy superiores a los del funcionamiento normal.

La simulación se realiza con la velocidad nominal de aerogenerador ($V_r = 11.633\text{m/s}$) como velocidad base, sobre la que se aplica una ráfaga de viento de 15m/s de amplitud, siguiendo una forma “half wave” con 10 segundos de duración. Se realizan simulaciones con el cambio de dirección en sentido positivo y negativo. Aparte de este cambio de signo la norma exige realizar simulaciones con varias posiciones azimutales del rotor separadas como máximo 30° . Por tanto, se realizan un total de 24 simulaciones para el DCL 1.3.

Tabla 8: Parámetros de la simulación del DLC 1.3

Velocidad nominal del caso	$V_r = 11.633 \text{ m/s}$
Amplitud de la ráfaga, V_{cg}	$+15 \text{ m/s}$
Tiempo de subida, T	10s
Cambio de dirección, θ_{cg}	$\pm 61.89^\circ$
Inicio del transitorio, t_0	20s
Forma del transitorio	Medio coseno ("half wave")
Oleaje	$H=1.649$, $T=4.4817 \text{ s}$
Posiciones azimutales iniciales	0° a 330° , en pasos de 30°
Análisis / Situación / γF	U (últimas) / E (extrema) / 1.35

Los resultados obtenidos muestran que la posición azimutal inicial del rotor tiene un efecto casi despreciable sobre las cargas que sufre la cimentación del aerogenerador, con variaciones inferiores al 1%. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** recoge los resultados de la simulación para las posiciones azimutales más representativas con cambio de dirección en sentido positivo.

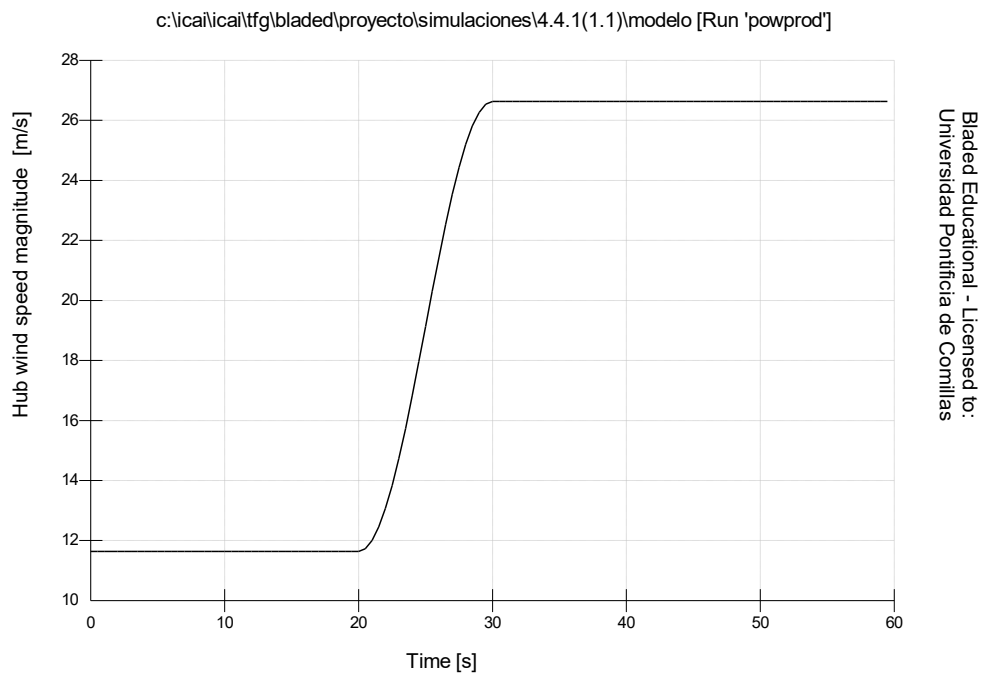


Ilustración 31: Velocidad del viento en el buje DLC 1.3

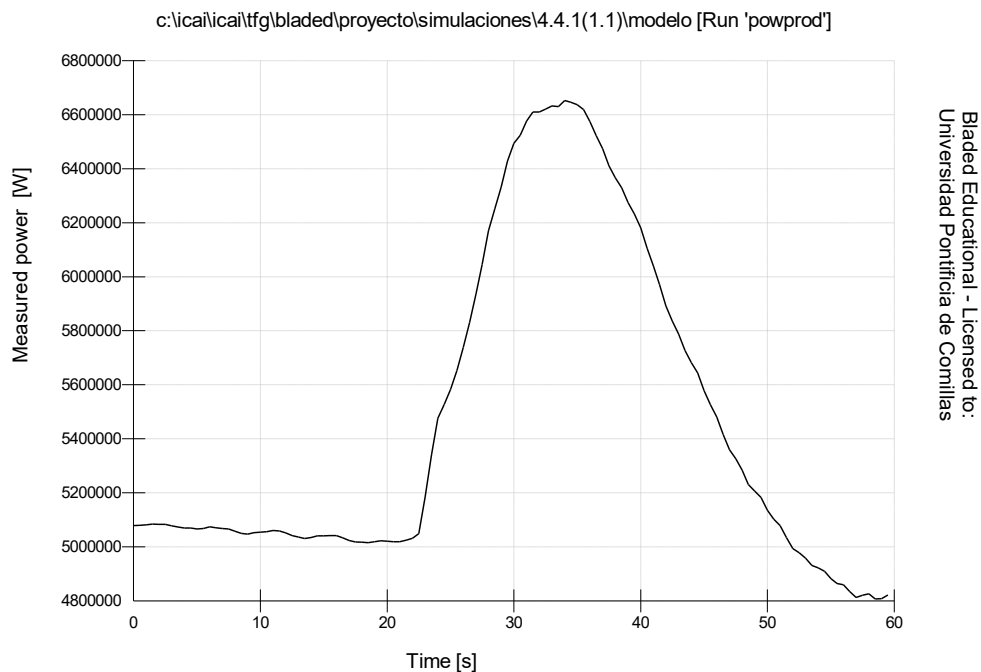


Ilustración 32: Potencia medida DLC 1.3

Tabla 9: Resultados principales del DLC 1.3 en la cimentación (+ θ_{cg} , velocidad nominal)

Azimut inicial	My mín [MN·m]	My máx [MN·m]	Mx máx [MN·m]	Mxy máx [MN·m]	Fx máx [kN]	Potencia máx [MW]
0°	-15.6	182.2	38.2	186.2	2014	6.66
30°	-15.6	182.2	38.2	186.2	2014	6.64
60°	-14.9	181.6	36.3	185.2	2005	6.64
90°	-17.3	182.7	38	186.6	2018	6.65
Envolvente	-17.3	182.7	38.2	186.6	2018	6.66

El valor máximo para el momento en la dirección del viento es de 182.7MN·m, muy superior a los valores alcanzados en el DCL1.1 para el mismo valor de velocidad del viento.

6.3 Parada de emergencia, DLC 5.1

Para este caso se simula la parada de emergencia del aerogenerador. Esta simulación es diferente de las anteriores, ya que la carga principal no proviene del viento, sino de la maniobra de frenado en sí.

La parada se ha programado en Bladed para ocurrir a los 20 segundos de simulación cuando el régimen estacionario ya se ha alcanzado. La acción de la parada incluye la puesta en bandera de las palas (90°) a máxima velocidad ($8^\circ/\text{s}$), la desconexión del generador y la pérdida de conexión a la red. La simulación se ha llevado a cabo para V_r y para V_{out} .

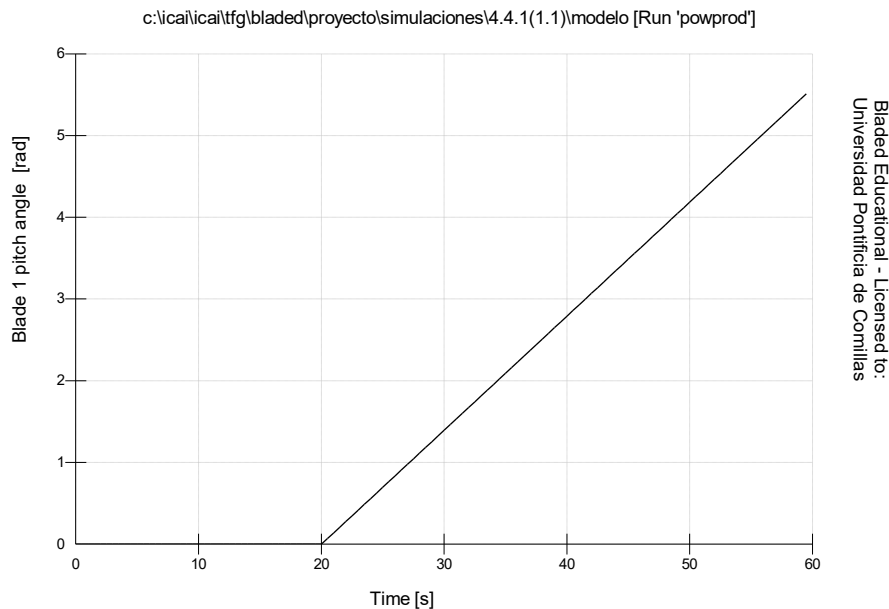


Ilustración 33: ángulo de paso en la pala 1, DLC 5.1

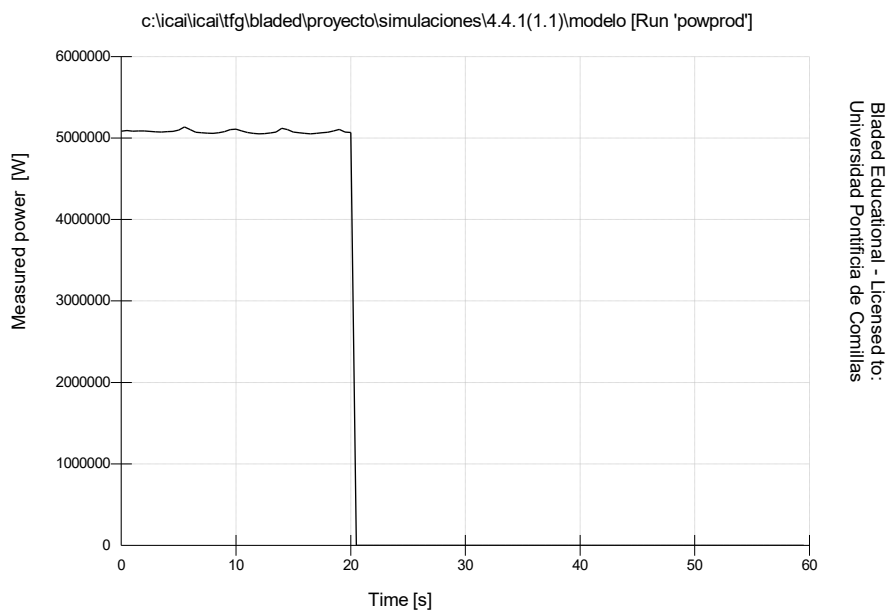


Ilustración 34: Potencia medida, DCL 5.1

Tabla 10: Parámetros de la simulación del DLC 5.1

Parámetro	Caso Vr	Caso Vout
Viento (NWP estacionario, $\alpha = 0.14$)	11.633m/s	30m/s
Instante de disparo	20s	20s
Secuencia de parada	Pitch a 90° a 8°/s y desconexión de generador y red	Pitch a 90° a 8°/s y desconexión de generador y red
Ola regular asociada, H / T	1.574m / 4.807s	10.464m / 12.394s
Duración del recorrido del pitch	11.25s (desde 0°)	7.8s (desde pitch de operación)
Análisis / situación / γF	γFU / N / 1.2	γFU / N / 1.2

Tabla 11: Resultados principales del DLC 5.1 en la cimentación

Magnitud	Vr			Vout		
	min	media	max	min	media	max
Mx [MN·m]	-95.4	-0.6	105	-126.8	0.8	113.4
My [MN·m]	-181.1	26.7	92.2	-81.7	46.1	158
Mxy [MN·m]	204.7	-	139.7	150.9	-	194.5
Fx [kN]	-1560	243	873	-621	402	1268
Fy [kN]	-1578	26	1575	-3145	48	3258

El valor Mxy corresponde a la combinación de los extremos de Mx y My.

$$M_{xy} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$$

El resultado más relevante que se observa en la simulación es la alta magnitud del momento negativo para la velocidad nominal del viento (-181.1MN·m), que prácticamente duplica en magnitud el máximo momento positivo de ese mismo caso (92.2MN·m). A través de este número se aprecia el empuje inverso, el momento en el que el rotor aún gira a velocidad nominal con las palas camino de bandera, comienza a frenar aerodinámicamente en lugar de empujar la torre, provocando que la torre revote más allá de su posición de equilibrio.

6.4 Parada extrema: tormenta de 50 años, DLC 6.1

El DCL 6.1 representa el caso de supervivencia de un aerogenerador marino. El aerogenerador se encuentra aparcado (rotor en molinete y palas en bandera, 90°) y se ve expuesto a una tormenta con periodo de retorno de 50 años, combinando el viento extremo (EWM) con estado de mar extremo de 50 años. Al no ser posible realizar simulaciones con una hora de duración los valores del viento y el oleaje se adaptan acorde con la normativa GL para realizar dos combinaciones deterministas de eventos extremos.

La combinación a) se compone de viento extremo de 1 minuto con ola máxima de 3 horas. El periodo de esta ola de diseño se barre con 3 valores dentro de la banda normativa ($T_{D1} = 7.99s$, $T_{D2} = 9.14s$, $T_{D3} = 10.29s$).

La combinación b) se compone de una ráfaga extrema de 3 segundos con ola reducida de probabilidad 0.03. Para esta combinación se utilizan 3 momentos de entrada de la ráfaga, correspondientes a 3 instantes igualmente espaciados de una unidad de periodo de la ola ($T_D = 7.99s$).

Ambas combinaciones presentan un desalineamiento medio de guiñada de $\pm 8^\circ$, esto duplica la batería de simulaciones. Para inducir el estado “aparcado” del aerogenerador se ha anulado la tabla par de generador y se ha fijado el pitch a 90°.

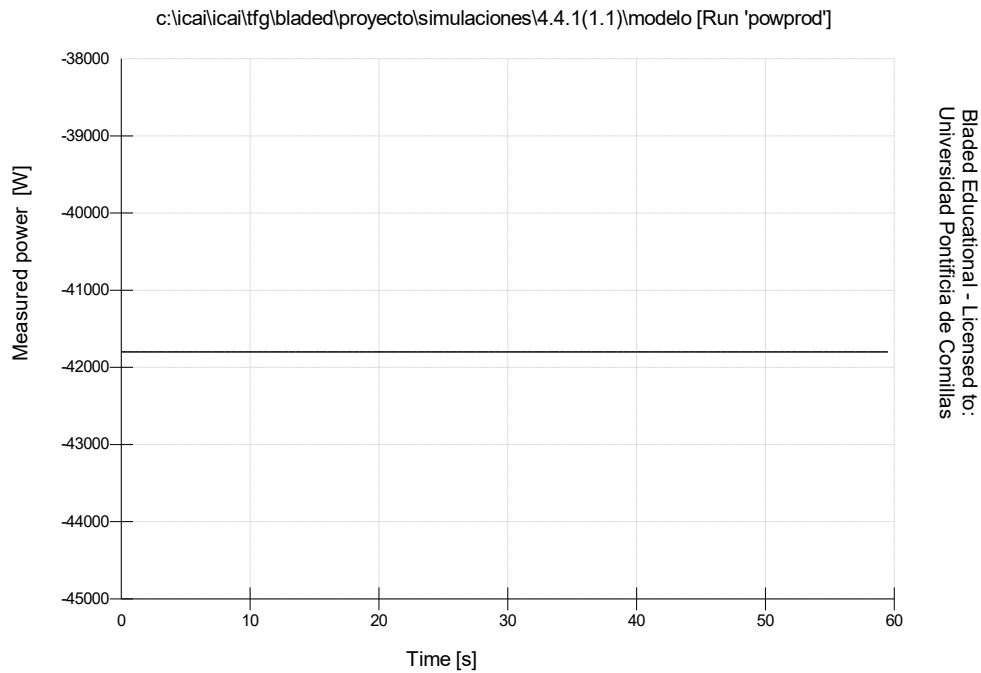


Ilustración 35: potencia medida, DCL 6.1

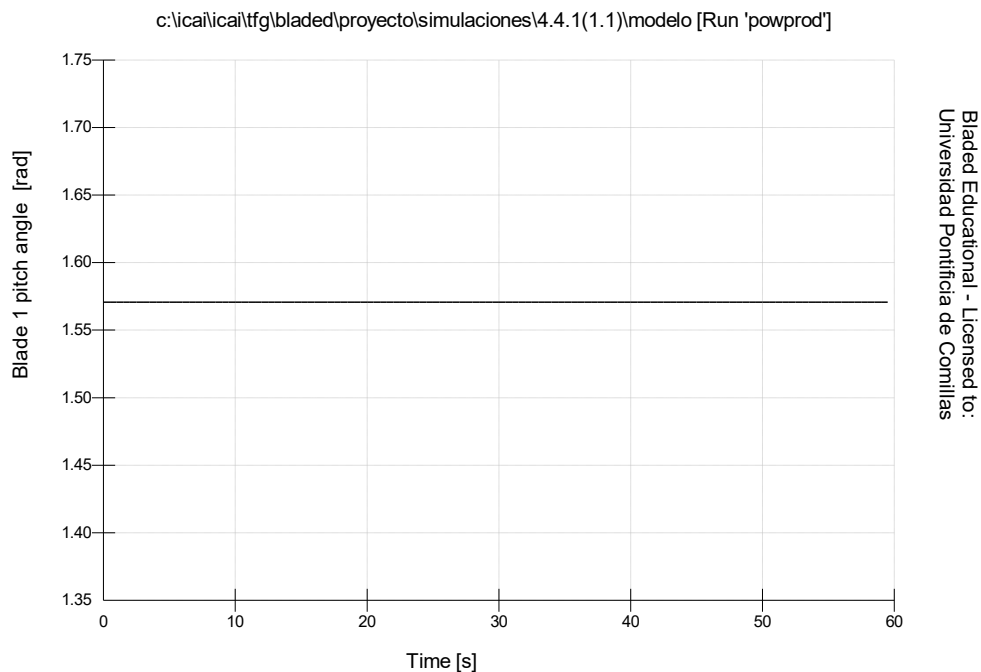


Ilustración 36: ángulo de paso pala 1, DCL 6.1

Tabla 12: Parámetros de la simulación del DLC 6.1

Parámetro	Combinación (a)	Combinación (b)
Viento	55m/s constante (V 1 min, 50 años)	Transitorio 55 → 62.5 → 55m/s (ráfaga 3s, onda completa 6s, inicio en t=30s)
Ola regular, H	Hmax50 = 9.45m	Hred = 6.706m
Periodo de ola, T	Td1=7.99s / Td2 =9.14s / Td3 =10.29s	T =7.99s
Desalineamiento de guiñada	+8° y -8°	+8° y -8°
Estado de la máquina	Aparcado: pitch 90°, generador desconectado, rotor en molinete	Aparcado: pitch 90°, generador desconectado, rotor en molinete
Análisis / situación / γF	U / E / 1.35	U / E / 1.35

Tabla 13: Resultados principales del DLC 6.1, combinación (a), en la cimentación

Caso	Mx mín [MN·m]	Mx máx [MN·m]	My máx [MN·m]	Mxy máx [MN·m]	Fy mín/máx [kN]
+8°, Td1	-191.8	209.8	108	236	-4112 / 4188
+8°, Td2	-1127.2	184.5	93.6	206.9	-3798 / 3442
+8°, Td3	-105.9	170.2	97.8	196.3	-3632 / 3044
-8°, Td1	-304.5	123.6	102.5	308.5	-3491 / 5103
-8°, Td2	-440.8	93.8	98	4445.6	-3184 / 4320
-8°, Td3	-212.5	77.5	93.3	221.6	-2911 / 3792

Tabla 14: Resultados principales del DLC 6.1, combinación (b), en la cimentación

Caso	Mx mín [MN·m]	Mx máx [MN·m]	My máx [MN·m]	Mxy máx [MN·m]	Fy mín/máx [kN]
+8°, t0	-160.6	156.6	144.2	212.9	-2860 / 3150
+8°, t0+Td/3	-163.2	156.6	127.4	201.9	-2860 / 3180
+8°, t0+Td*2/3	-165.6	156.6	113.8	193.6	-2860 / 3200
-8°, t0	-274.7	69.2	142.9	158.8	-2180 / 4020
-8°, t0+Td/3	-268.1	69.2	123.7	141.8	-2180 / 3950
-8°, t0+Td*2/3	-266	69.2	107.7	128	-2180 / 3940

Adicionalmente se ha realizado una simulación de la combinación a) con el valor de la velocidad del viento reducido a 20m/s y con la función nativa de Bladed “parked” y el freno mecánico activado.

Tabla 15: Estudio de sensibilidad del DLC 6.1: velocidad de viento y método de simulación (combinación a, +8°, Td1)

Caso	Mx mín [MN·m]	Mx máx [MN·m]	My máx [MN·m]	My máx [MN·m]
v = 20 m/s (emulación)	-241.1	158.1	-4.2	4.9
Parked nativo con freno (v = 20 m/s)	-241.6	140.7	-5.1	5.7
v = 55 m/s (emulación)	-191.8	209.8	27.6	108

El caso pésimo de entre todas las simulaciones es la combinación a) con guiñada de -8° y periodo Td2, en esta simulación el momento transversal alcanza -440.8MN·m y el momento resultante es de 445.6MN·m. Estos valores son muy superiores a los de cualquier otro caso de carga simulado.

6.5 Comparativa de casos y carga de diseño de la cimentación

Para obtener las cargas de diseño le aplicamos a los momentos resultantes el factor de seguridad parcial que les corresponde, estos momentos de diseño son los que se utilizarán para el dimensionamiento de la cimentación.

Tabla 16: Comparativa de momentos característicos y de diseño en la cimentación por caso de carga

DLC	Situación	γF	Momento resultante característico máx [MN·m]	Momento de diseño $\gamma F \cdot M$ [MN·m]
1.1 (producción, NMT)	N	1.2	122	146.4
1.3 (ECD)	E	1.35	186	251.9
5.1 (parada de emergencia)	N	1.2	204.7	245.6
6.1 (tormenta 50 años)	E	1.35	445.6	601.6

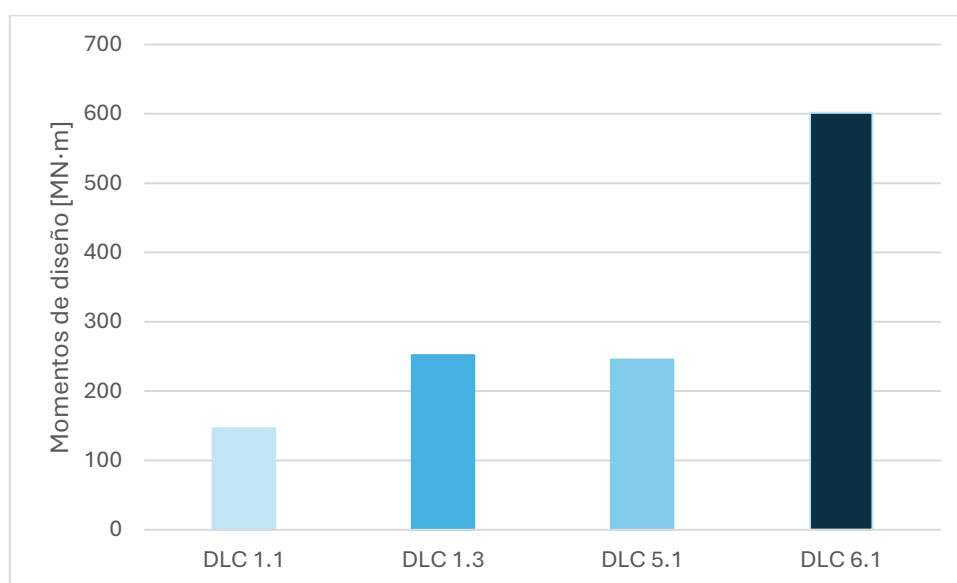


Ilustración 37: Gráfica comparativa de momentos de diseño

El valor más alto de momento de diseño se obtiene del DLC 6.1, con 601.6 MN·m, siendo más del doble que el segundo caso más extremo, el DLC 1.3 cuyo momento de diseño es muy similar al del DLC 5.1. Se debe tener en cuenta a la hora del diseño de la cimentación que el mayor valor de M_y (-181.1 MN·m característicos, -217.3 MN·m de diseño) se obtiene en el DLC 5.1.

7. Cálculos justificativos

En este apartado se muestran los cálculos que justifican los valores de los parámetros utilizados en Bladed durante los casos de carga. Estos cálculos se realizan utilizando las ecuaciones que se muestran en la GL 2012 [GLRC12].

7.1 Velocidad nominal del generador

La velocidad nominal del generador se refiere a la velocidad del viento a la altura del buje para la cual el generador ofrece máximas prestaciones, sin necesidad de activar el control de paso. Para el cálculo se emplea la siguiente ecuación.

$$P_{rated} = 0.5 \times \rho \times A \times C_{pmax} \times V_r^3$$

$$5.5MW = 0.5 \times \frac{1.225kg}{m^3} \times \pi \times \frac{126.761^2}{4} \times 0.452 \times V_r^3$$

$$V_r = 11.633m/s$$

7.2 Condiciones de la ola en el DLC 1.3

Para el cálculo de la altura y periodo de la ola en función de la velocidad del viento, se hace uso del espectro de mar completamente desarrollado (Pierson-Moskowitz), tomando el valor de la velocidad del viento a 10 metros de altura sobre el mar ($z = 10m$).

$$U_{10} = V_{hub} \times \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \approx 0.737 \times V_{hub}$$

Para la velocidad nominal (V_r , la que se emplea en el DCL 1.3):

$$U_{10} \approx 0.737 \times 11.633 = 8.575m/s$$

A partir del valor de la velocidad se obtienen la altura y el periodo de la ola con las siguientes fórmulas:

$$H_s = 0.22 \times \frac{U_{10}^2}{g} = 0.22 \times \frac{8.575^2}{9.81} = 1.649m$$

$$T_p = 0.877 \times \frac{2\pi \times U_{10}}{g} = 0.877 \times \frac{2\pi \times 8.575}{9.81} = 4.817s$$

7.3 Clase de turbulencia y desviación típica del viento

La turbulencia en el emplazamiento es de categoría C ($I_{15} = 0.145$, $a = 3$). Por tanto, la desviación típica del viento longitudinal del modelo de turbulencia normal (NTM) se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_1 = I_{15} \times (15 \frac{m}{s} + a \times V_{hub}) / (a + 1)$$

Los valores correspondientes para cada valor de V_{hub} , obtenidos utilizando la fórmula expuesta, se encuentran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

7.4 Cambio simultáneo de dirección del DLC 1.3

La magnitud del cambio simultáneo de dirección se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\theta_{cg}(V_{hub}) = 7V_{hub}^0 \times \frac{\frac{m}{s}}{V_{hub}} = \frac{720}{11.633} = 61.89^\circ$$

7.5 Viento extremo de 50 años (EWM) del DLC 6.1

Al tener el emplazamiento clase I de viento, se toma como valor de $V_{ref} = 50$ m/s, que por normativa coincide con la velocidad media de 10 minutos con periodo de retorno de 50 años a la altura del buje. La ventana útil de la simulación es de un minuto (debido a las limitaciones de la versión estudiantil de Bladed), por lo que se deben usar los valores de conversión que exige la normativa para los diferentes periodos de tiempo (1h: 0.91, 10min:1.00, 1min:1.10, 3s:1.25).

$$V(1min, 50 años) = 1.10 \times V_{50} = 1.10 \times 50 = 55m/s$$

Este es el valor de la velocidad constante en el caso a). Para el caso b), esta es también la velocidad constante y sobre ella se aplica una ráfaga extrema de 3 segundos (factor 1.25).

$$V_{e50} = 1.25 \times 50 = 62.5m/s$$

Por tanto, el caso b) consiste en un viento constante de 55m/s sobre el que se aplica una ráfaga extrema con la que se alcanza 62.5m/s. Es decir que la ráfaga tiene una amplitud de 7.5m/s.

7.6 Ola extrema de 50 años del DLC 6.1

De los datos sobre condiciones marítimas que se incluyen en las especificaciones del aerogenerador (Anexo II: Especificaciones del aerogenerador (aportado por el director del TFG)), se obtiene que la altura significativa de la ola con periodo de retorno de 50

años $H_{s50} = 5.08m$. La altura máxima de la ola del temporal extremo de 3 horas se ha calculado con el factor Rayleigh habitual:

$$H_{max50} = 1.86 \times H_{s50} = 1.86 \times 5.08 = 9.45m$$

El periodo de la ola de diseño se define con la siguiente ecuación:

$$11.1 \times \sqrt{H_{s50}/g} \leq T_D \leq 14.3 \times \sqrt{H_{s50}/g}$$

Al sustituir los valores ($H_{s50} = 5.08m$, $g = 9.81m/s^2$) se obtiene el intervalo $7.99s \leq T_D \leq 10.29s$. Durante la simulación se analizan los dos extremos y el punto medio de este intervalo ($T_{D1} = 7.99s$, $T_{D2} = 9.14s$, $T_{D3} = 10.29s$).

Para el caso b) del DLC 6.1 la ola reducida asociada a la ráfaga se define con la siguiente ecuación:

$$H_{red} = 1.32 \times H_{s50} = 1.32 \times 5.08 = 6.706m$$

7.7 Comprobaciones de vuelco, deslizamiento y hundimiento

A continuación, se realizan los cálculos que justifican las comprobaciones de vuelco, deslizamiento y hundimiento siguiendo los criterios y factores de seguridad indicados por el DB-SE-C [BOE_21].

7.7.1 Vuelco

Con este cálculo se verifica que el peso de la propia cimentación genera suficiente momento para contrarrestar el momento de vuelco generado por las cargas externas que sufre el aerogenerador.

$$FS_{vuelco} = \frac{M_{estabilizador}}{M_{volcador}} = \frac{N_{Ed} \times D/2}{M_{ed}} = \frac{269.28 \times 26.75}{1090.58} = 6.60$$

7.7.2 Deslizamiento

Con este cálculo se verifica que la fricción entre el suelo de la losa de cimentación y el suelo marino resista el empuje de la solas y el viento sobre el aerogenerador para que la base de la cimentación no deslice por el suelo marino.

$$FS_{desliz} = \frac{N_{Ed} \times \tan(\delta')}{\gamma_R \times H_{Ed}} = \frac{269.28 \times \tan(27^\circ)}{1.35 \times 17.512} = 5.80$$

7.7.3 Hundimiento

Con este calculo se verifica que la capacidad portante última del suelo marino soporte la presión ejercida por la cimentación sobre él. Al asumir que el suelo esta formado por arena sin cohesión ($c'=0$), toda la capacidad portante del suelo viene del término friccional del suelo.

$$q_h = 0.5 \times \gamma_K \times B^* \times N_\gamma \times d_\gamma \times s_\gamma \times i_\gamma$$

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \times \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi'}{2} \right) = 37.35$$

$$N_\gamma = 1.5 \times (N_q - 1) \times \tan(\varphi') = 1.5 \times 36.75 \times \tan(36^\circ) = 40.05$$

$$s_\gamma = 0.60$$

$$q_h = 0.5 \times 10.5 \times 45.5 \times 40.05 \times 0.60 = 5.728 kPa$$

$$q_{adm} = \frac{q_h}{\gamma_R} = \frac{5.728}{3} = 1.909 kPa$$

$$FS_{hund} = \frac{1.909}{119.8} = 15.94$$

8. Diseño y Dimensionamiento de la Cimentación

En este apartado se lleva a cabo el diseño y dimensionamiento de la cimentación por gravedad del aerogenerador de 5MW, utilizando como base las cargas obtenidas a partir de las simulaciones realizadas en el apartado 6. Usando como origen el momento de vuelco de diseño, 601.6MN·m obtenido del caso límite del DLC 6.1 (apartado 6.5) y de los valores de cortante y axil correspondientes a la “mudline”, ha habido una serie de procesos iterativos de dimensionamiento. Con esto se ha decidido los valores finales de la geometría, armado y sistema de postensado que se presentan durante este apartado.

8.1 Introducción y Metodología

Para este proyecto se ha elegido emplear una cimentación por gravedad (Gravity Based Structure, GBS) que usa hormigón armado como material principal. Esta estructura se apoya directamente en el suelo marino y al contrario que alternativas como el proyecto ELISA/ELICAN [ESTE16] (citado en el apartado 2), esta cimentación GBS es una estructura monolítica dividida principalmente en 3 partes: una losa de cimentación, un fuste hueco (cilíndrico en su tramo inferior y troncocónico en la splash zone) lastrado con material granular en su interior, para aumentar el peso de la estructura, y un anillo embebido postensado en la parte superior del fuste, que actúa como transición entre la estructura de hormigón y la torre metálica del aerogenerador. Este tipo de cimentación depende únicamente de su peso para prevenir el vuelco, el deslizamiento y el hundimiento.

El dimensionamiento se ha llevado a cabo utilizando un proceso iterativo y paramétrico, a través del uso de MATLAB, en el cual se partía de una geometría base, y se iban aumentando sus dimensiones hasta que se cumpliese con los criterios geotécnicos, para después verificar si la estructura cumple con los requisitos de resistencia estructural requeridos por el Eurocódigo 2 [CEN_04]. Por ejemplo, en el dimensionado de la losa de cimentación se partió con un diámetro inicial de $D=13\text{m}$ y este se fue incrementando con saltos de 0.1 metros, hasta converger tras 404 iteraciones con $D=53.3\text{m}$, más tarde este valor se redondeó a 53.5m.

Los pasos seguidos durante el proceso de diseño y dimensionado se dividen en:

1. Obtención de las cargas críticas en la mudline ($z=-50\text{m}$)
2. Corrección del valor de las cargas (Delta-Morison) para adaptar los valores según el ancho real del fuste (más ancho que la torre).
3. Aplicación de los factores de seguridad acorde a la normativa GL2012 [GLRC12] (tabla 4.46), obteniendo como producto las cargas de diseño.
4. Predimensionamiento geotécnico de la losa de cimentación según el criterio de no tracción y comprobar los estados límite de vuelco, deslizamiento y hundimiento según el DB-SE-C [BOE_21] (normativa publicada en el BOE el 27 de diciembre de 2019).

5. Comprobación estructural de la losa frente a punzonamiento, cortante y flexión y del fuste frente a flexo-compresión, fatiga y presión hidrostática según el Eurocódigo 2 [CEN_04].
6. Diseño de la transición superior compuesta por una losa de coronación, un anillo embebido con postensado, mecanismo de bielas y tirantes, utilizando las cargas obtenidas de Bladed en la coronación del fuste ($z=+11.6\text{m}$).

8.2 Propiedades de los materiales y del suelo

8.2.1 Hormigón y acero pasivo

Para el tipo de hormigón se escoge C35/45 siguiendo la nomenclatura del Eurocódigo 2 [CEN_04]. En cuanto al acero, se escoge acero corrugado B500S para toda la armadura pasiva de la cimentación, este es un estándar en España para armadura pasiva. La siguiente tabla recoge los parámetros relevantes de estos dos materiales.

Tabla 17: Propiedades del hormigón y del acero pasivo

Parámetro	Valor	Unidad
Resistencia característica a compresión del hormigón	35	MPa
Resistencia característica del acero	500	MPa
Coeficiente parcial de seguridad del hormigón/ Coeficiente parcial de seguridad del acero	1.5/1.15	-
Resistencia de diseño del hormigón	23.33	MPa
Resistencia de diseño del acero	434.8	MPa
Resistencia media a tracción del hormigón, EC2, Tabla3.1	3.21	MPa
Resistencia a tracción de cálculo del hormigón, EC2, Tabla3.1	1.498	MPa
Coeficiente de reducción de cortante, EC2 6.2.2	0.516	-
Coeficiente de reducción, bielas y tirantes, EC2 6.5	0.86	-
Densidad del hormigón EN 1991-1, Anexo A	25	kN/m ³
Densidad del hormigón sumergido	14.95	kN/m ³

Para la elección de cemento que se utilizará en el hormigón, se debe tener en cuenta la alta agresividad de la exposición que tiene el fuste en la zona troncocónica frente al agua, ya que debido al oleaje y a la marea está expuesto a ciclos de humectación y secado. Se ha elegido un cemento CEM III/B (alto contenido de escoria de alto horno), esta elección se justifica principalmente por dos razones. En primer lugar, porque el alto contenido en escoria de este tipo de cemento lo convierte en altamente resistente al ataque de sulfatos y penetración de cloruros, lo que hace que tenga una muy alta durabilidad en entornos con exposición agresiva al mar. La otra razón es el calor de hidratación, al tener que construir estructuras con un espesor muy elevado (4m para la losa y 0.70m para el fuste),

un calor de hidratación elevado supone altas temperaturas en el interior mientras el exterior ya se encuentra enfriado por el aire, lo que puede producir fisuración durante el fraguado, el CEM III/B tiene un calor de hidratación muy bajo comparado con otros cementos, lo que previene este tipo de fisuración.

En todas las partes que conforman la estructura de cimentación, construidas con hormigón como material principal, se utilizan 75mm de recubrimiento de la armadura, este valor es superior al mínimo mostrado en la tabla 4.4 del Eurocódigo 2 [CEN_04]. Este incremento se justifica por ser esta estructura un elemento crítico del aerogenerador, y por su difícil inspección o reparación una vez en servicio.

De cara a la construcción del proyecto se debe diseñar una fórmula de trabajo del hormigón cuya consistencia y tamaño máximo de árido sean los adecuados para la densidad de armadura diseñada, de forma que el hormigón se pueda colocar y vibrar adecuadamente y evitar de esa manera la aparición de bolsas de aire o coqueras.

8.2.2 Acero activo de postensado

Se utiliza un sistema de postensado para unir la torre metálica del aerogenerador a la cimentación de hormigón, para este sistema de postensado se fabrica con un acero activo con las siguientes características:

Tabla 18: Propiedades del acero activo de postensado

Parámetro	Valor	Unidad
Cordones de acero pretensado de Y1860	19 × 0.6 “	-
Área transversal del tendón	2850	mm ²
Límite elástico característico	1860	MPa
Tensión que produce 0.1% de deformación plástica	1674	MPa
Tensado inicial	1395	MPa
Pérdidas diferidas estimadas	15	%

8.2.3 Parámetros geotécnicos

Debido a la falta de un sondeo real en el suelo marino del emplazamiento, siguiendo la normativa GL2012, apartado 6.8.7.1, se debe asumir un perfil de suelo coherente con la localización. La costa atlántica de Sudáfrica tiene una geología marina compleja y altamente documentada, ya que aquí se encuentra la plataforma continental Namaqualand donde se practica la minería marina de diamantes y minerales pesados desde hace décadas. En esta zona se encuentran tanto afloramientos de granito como depósitos de arenas finas a medias de origen calcáreo. Debido a las propiedades de suelo que requieren las estructuras por gravedad (GBS), como lo son la necesidad de un suelo regular y con

capacidad de reparto uniforme de cargas, se evitará instalar el aerogenerador en una zona con afloramientos rocosos. [PHIL15], [GARN95], [SCHN20]

En consecuencia, para este proyecto se asume un perfil de suelo homogéneo de arena densa, con las especificaciones que se muestran en la tabla que a continuación se muestra, siguiendo los valores característicos de este tipo de suelo.

Tabla 19: Parámetros geotécnicos del emplazamiento

Parámetro	Valor	Unidad
Ángulo de rozamiento interno, ϕ'	36	°
Cohesión, c'	0	kPa
Peso específico sumergido, γ'	10.5	kN/m ³
Fricción losa suelo, δ'	27	°
Empuje al reposo, lastre del fuste, K_0	0.412	-
Coefficiente de seguridad a deslizamiento	1.5	-
Coefficiente de seguridad a hundimiento	1	-
Factor de seguridad mínimo exigido a vuelco	2 (=1.8/0.9)	-
Profundidad del agua (lámina + marea máxima)	53.6	m

8.3 Definición de la geometría

La cimentación nace en el suelo marino (mudline) para $z=-50$ m y termina con la coronación del fuste en $z=+11.6$ m, donde conecta con la torre metálica del aerogenerador. Por tanto, la altura total del fuste es de 61.6m, formando los primeros 48.6m la parte cilíndrica, y los últimos 13 m (en la splash zone) formando la parte troncocónica.

CIMENTACION GBS -- SECCIÓN LONGITUDINAL COMPLETA (base geométrica para plano, escala 1:1, unidades m)

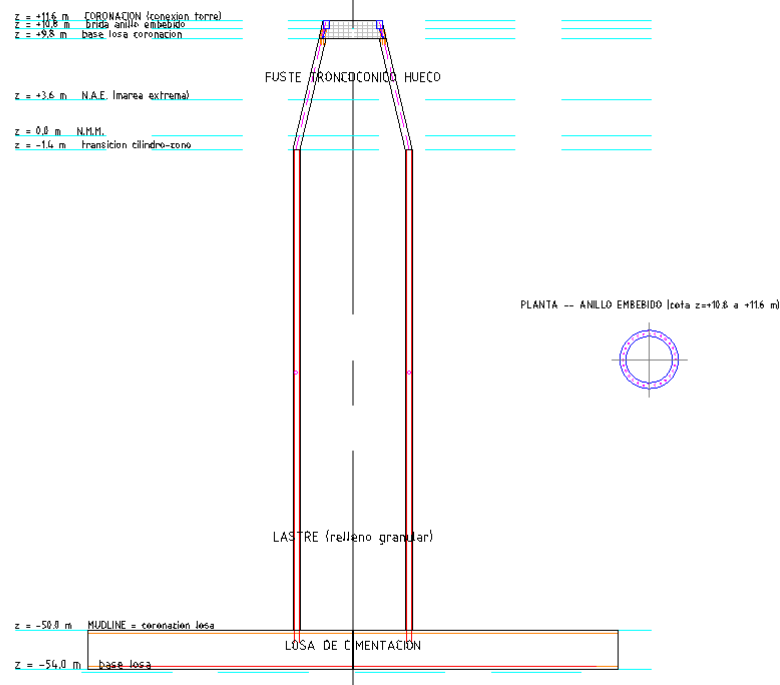


Ilustración 38: Croquis de la cimentación

Tabla 20: Dimensiones generales de la cimentación por gravedad (geometría definitiva)

Elemento	Parámetro	Valor	Unidad
Losa de cimentación	Diámetro, D	53.5	m
Losa de cimentación	Canto, h	4.00	m
Losa de cimentación	Volumen de hormigón	8992	m ³
Fuste cilíndrico	Diámetro exterior	12.0	m
Fuste cilíndrico	Diámetro interior	10.6	m
Fuste cilíndrico	Espesor de pared	0.70	m
Fuste cilíndrico	Altura (z=-50 a z=-1.4m)	48.6	m
Fuste troncocónico	Diámetro base (=fuste cilíndrico)	12.0	m
Fuste troncocónico	Diámetro superior (=brida de la torre)	5.91	m
Fuste troncocónico	Altura (z=-1.4m a z=+11.6m)	13.0	m
Fuste troncocónico	Semiángulo del cono, θ	13.18	m
Losa de coronación (tapón)	Canto (últimos 1.8m del cono)	1.80	m
Losa de coronación (tapón)	Diámetro en la base	6.75	m

La armadura que se aplica en la losa de coronación siguiendo la normativa del Eurocódigo 2 [CEN_04], es una parrilla general a 2 caras en 2 direcciones de características $\phi 25\text{mm}$, 170mm de separación, 28.9 cm²/m por cara y dirección.

8.3.1 Cargas de diseño en la mudline

En las siguientes tablas se recogen las cargas de diseño en la mudline. En la tabla 19 se recogen las cargas características y de diseño, mientras que la tabla 20 recoge la corrección incremental de Morison, esta se usa en las cargas extremas para tener en cuenta la diferencia de diámetro del fuste (12m) respecto al de la torre (5.91m), que es el que utilizan las simulaciones de Bladed.

Tabla 21: Cargas características y de diseño en el mudline ($z = -50,0 \text{ m}$)

DLC	$M_{char} [\text{MN} \cdot \text{m}]$	$H_{char} [\text{M N}]$	$F_{z-char} [\text{MN}]$	γF	$M_{ed} [\text{MN} \cdot \text{m}]$	$H_{ed} [\text{M N}]$	$F_{z-ed} [\text{M N}]$
6.1, -8° Td2 (gobernante)	445.6	3.226	8.336	1.35	1090.58	17.512	11.254
5.1, Vr (contraste, flexión inversa)	181.1	2.219	9.378	1.20	349.89	5.447	11.254

Tabla 22: Corrección Delta-Morison de las cargas extremas por el ancho real del fuste

DCL	H ola [m]	T [s]	d/L	$\Delta M [\text{MN} \cdot \text{m}]$	$\Delta H [\text{MN}]$
6.1 (gobernante)	9.45	9.14	0.415	362.24	9.746
5.1 (contraste)	1.574	4.807	1.486	110.48	2.320

8.4 Conexión Torre-Cimentación

La conexión de la torre metálica del aerogenerador y la cimentación de hormigón se consigue a través de un anillo de acero embebido postensado alojado en la losa de coronación, en la cima del fuste. Este anillo embebido transmite la carga de la torre al hormigón a través de contacto físico y fricción. El postensado garantiza que el anillo permanezca comprimido contra el hormigón bajo cargas de diseño.

8.4.1 Cargas de diseño en la conexión

Para el diseño de la conexión torre-cimentación se realiza una nueva simulación del caso crítico de Bladed esta vez obteniendo las cargas en $z=+11.6\text{m}$. Para el axil se hace una envolvente dinámica desde donde se calculan los casos favorable y desfavorable. En la siguiente tabla se muestran las cargas de diseño para la coronación del fuste.

Tabla 23: Cargas de diseño en la coronación del fuste ($z = +11,6 \text{ m}$)

Magnitud	Valor	Coefficiente de seguridad	Carga de diseño
M (Mxy)	83.94 MN·m	1.35	113.32 MN·m
H (Fxy)	1.842MN	1.35	2.487 MN
Mz (Torsor)	4.623MN·m	1.35	6.241 MN·m
N desfavorable	-	-	19.18 MN
N favorable	-	-	12.13 MN

8.4.2 Geometría del anillo embebido y del postensado

El anillo es una virola embebida 0.80m en la parte superior de la losa de coronación, esta virola tiene un ancho radial de 0.6m y sobre ella se sostiene la torre del aerogenerador.

Tabla 24: Geometría del anillo embebido y parámetros del postensado

Parámetro	Valor	Unidad
Profundidad embebida	0.80	m
Ancho radial del apoyo	0.60	m
D_{ext} anillo	5.91	m
D_{int} anillo	4.71	m
Área de apoyo anular	10.0009	m ²
Núcleo del anillo	1.208	m
Postensado mínimo requerido	81.68	MN
Tendones adoptados	28	×19T0,6” Y1860
Postensado tras pérdidas diferidas	94.62	MN

El anillo embebido es una pieza de acero estructural, y parámetros como su profundidad de embebido no provienen de fórmulas de normativas como el Eurocódigo 2 [CEN_04] sino que se obtienen a través de comprobaciones de aplastamiento, punzonamiento diferido a bielas y tirantes y descompresión que se muestran en el apartado 8.4.3.

8.4.3 Mecanismo resistente: bielas y tirantes y aplastamiento

No se puede llevar a cabo una comprobación mediante punzonamiento siguiendo el Eurocódigo 2, artículo 6.4 [CEN_04], debido a la geometría, ya que el radio del perímetro de control (4.78m) es mayor que el radio de la base del tapón (3.38m). Por tanto, la carga descende mediante una biela desde la brida hasta la pared de la parte cónica del fuste, este modelo se ha verificado a través del artículo 6.5 del Eurocódigo 2 [CEN_04]. El ángulo de la biela es $\theta=20.4^\circ$. Para resolver el equilibrio de la componente horizontal se

emplean 8 zunchos $\phi 25\text{mm}$. En la tabla a continuación se exponen las diferentes comprobaciones de esta unión.

Tabla 25: Comprobaciones del anillo embebido, el postensado y el mecanismo de bielas y tirantes

Comprobación	Solicitación	Resistencia/armado	FS	Estado
Descompresión del postensado	$(P_{\infty} + N_{\text{fav}}) \cdot e_{\text{lim}} / M_{\text{Ed}} \geq 1,00$	-	1.14	Cumple
Aplastamiento bajo la brida	20.74MPa	23,33 MPa	1.13	Cumple
Aplastamiento EC2 6.7	20.74MPa	34,26 MPa	1.65	Cumple
Aplastamiento en transferencia	14.56MPa	23,33 MPa	1.60	Cumple
Tirante de anillo	1.248MN	8 zunchos $\phi 25$ (39,3 cm^2)	1.37	Cumple
Compresión, cabeza de pared	8.69MPa	23,33 MPa	2.68	Cumple
Compresión biela inclinada	9.89MPa	12,04 MPa (0,6v'fcd)	1.22	Cumple
Bursting radial bajo la brida	1.668MN/m	Cercos $\phi 20$, 2R separación 125 mm (50,3 cm^2/m)	1.31	Cumple
Bursting en anclajes de postensado	0.492MN/anclaje	6cercos $\phi 12$ 2R (13,6 cm^2)	1.20	Cumple

8.5 Comprobaciones y Factores de Seguridad

8.5.1 Estabilidad geotécnica de la losa de cimentación

Para el inicio del predimensionamiento geotécnico, se parte de la condición de que la excentricidad de la losa de cimentación no debe salir del núcleo central de esta misma, para que la base permanezca comprimida (criterio de no tracción GL2012 6.8.9.3 [GLRC12]), esta condición se define con la fórmula:

$$e = \frac{M_{\text{Ed}}}{N_{\text{Ed}}} \leq D/8$$

Si se realiza este cálculo con las cargas de diseño finales (incluyendo la corrección Delta-Morison) y las dimensiones definitivas ($D=53.5\text{m}$, $h=4.00\text{m}$), se obtiene un valor de excentricidad de $e=4.05\text{m}$, siendo el límite superior $0.95 \cdot D/8=6.35\text{m}$, por tanto, se cumple

el criterio de no tracción. Tras esta comprobación inicial se han verificado los tres estados límite según el DB-SE-C [BOE_21], vuelco, deslizamiento y hundimiento.

Tabla 26: Criterio de no tracción (GL2012 6.8.9.3 [GLRC12]) y estados límite últimos geotécnicos de la losa de cimentación (DB-SE-C [BOE_21])

Modo de fallo	Expresión	FS obtenido	FS exigido	Estado
Núcleo central	$e \leq \text{margen} \cdot D/8$	$4.05\text{m} \leq 6.35\text{m}$	Margen=0.95	Cumple
Vuelco	$M_{\text{estabilizador}}/M_{\text{volcador}}$	6.60	2	Cumple
Deslizamiento	$N \cdot \tan(\delta')/(\gamma R, d \cdot H)$	5.80	1	Cumple
Hundimiento	$q_{h,adm}/q_{Ed}$	15.94	1	Cumple

8.5.2 Losa de cimentación: punzonamiento, cortante flexión

Siguiendo la normativa del Eurocódigo 2 [CEN_04] se ha verificado la losa de cimentación a punzonamiento (artículo 6.4), a cortante de viga ancha (artículo 6.2), para ambos casos no hay necesidad de una armadura específica de cortante. Con un canto de 4.00m las dos comprobaciones se cumplen. La flexión a la que se somete la losa durante el DLC 6.1 es la que gobierna la cantidad y tipo de armadura que se deben aplicar a la losa.

Tabla 27: Comprobaciones de punzonamiento, cortante y flexión de la losa de cimentación ($h = 4,00 \text{ m}$)

Comprobación	DLC 6.1	DLC 5.1	Resistencia	Estado
Punzonamiento	132.5kPa	87.4kPa	406.6kPa	Cumple
Cortante viga ancha	47.76 MN	28.91MN	78.68MN	Cumple
Flexión, M_{Ed}	37.44 MN·m/m	-	-	-

En el centro de la losa se requiere una armadura de $\rho = 0,602 \%$ ($A_s = 234,4 \text{ cm}^2/\text{m}$), con $\phi 40 \text{ mm}$ de dos capas y 107 mm de separación, siendo la cuantía mínima según el artículo 9.2.1.1 del Eurocódigo 2 $\rho_{\min} = 0,167 \%$ ($A_{s_{\min}} = 65,0 \text{ cm}^2/\text{m}$) [CEN_04]. Esta armadura se mantiene únicamente en el centro entre $r=0\text{m}$ y $r=24.14\text{m}$, mientras que en el borde de la losa ($r \geq 24.14\text{m}$) basta con la cuantía mínima, ya que el momento resistente último de esta (10,83 MN·m/m) supera con facilidad el momento envolvente en el borde de la losa (7,17 MN·m/m).

Adicionalmente se añade una armadura secundaria con la cuantía mínima permitida por el artículo 9.2.1.1 del Eurocódigo 2 [CEN_04] en la cara superior de la losa de cimentación, para evitar fisuraciones debido a esfuerzos de tracción generados por el proceso de transporte y fondeo de la estructura.

8.5.3 Fuste: flexo-compresión, fatiga y presión hidrostática.

El fuste es una sección anular de hormigón armado con un diámetro exterior de 12.0m y un diámetro interior de 10.6m (espesor de 0.70m). Siguiendo el artículo 6.1 del Eurocódigo 2 [CEN_04], debido al esfuerzo a flexo-compresión la armadura del fuste debe ser la siguiente: 444 barras $\phi 32$ mm, divididas en dos capas (222 barras por capa, con 167mm de separación en la capa exterior y 153mm de separación en la capa interior), con $\rho = 1,437$ %. La tabla expuesta a continuación muestra la comprobación del funcionamiento de esta armadura.

Tabla 28: Comprobación a flexo-compresión del fuste y armadura longitudinal

DCL	N_{Ed} [MN]	M_{Ed} [MN·m]	M_{Rd} [MN·m]	FS	Estado
6.1 (gobernante)	74.07	1090.6	1148.9	1.05	Cumple
5.1	74.07	349.9	1148.9	3.28	Cumple

Se aplica el criterio de exención respecto a la fatiga según el artículo 6.8.7(2) del Eurocódigo 2 [CEN_04] para el DCL1, ya que es el que estudia el comportamiento del aerogenerador durante la mayor parte de su vida útil, calculando según este criterio se obtiene un valor de 0.7395 (siendo el límite de exención de 1.0). Respecto al daño acumulado (regla de Miner, con distribución de Rayleigh del viento conforme a la norma IEC 61400-1) se obtiene un daño total de $D=1.47 \times 10^{-2}$ para una vida útil de 20 años, muy inferior al límite unitario. En la tabla a continuación se muestran las comprobaciones del comportamiento a fatiga:

Tabla 29: Comprobaciones de fatiga del fuste (DLC 1.1)

Comprobación	Valor obtenido	Límite	Estado
Exención simplificada (EC2 6.8.7(2))	0.7395	1.00	Cumple (margen 26.1%)
Daño acumulado, regla de Miner	1.47×10^{-2}	1.00	Cumple (margen 98.5%)

Para terminar con el fuste, se comprueba su comportamiento frente a presión hidrostática exterior y el empuje del lastre saturado interior. La compresión generada por el agua en el exterior del fuste (5.870MPa) queda a gran distancia de la resistencia de cálculo del hormigón a compresión (FS=3.98). Sin embargo, la tracción generada por el lastre en el interior del fuste (2.390MPa, calculada con el coeficiente de empuje al reposo $K_0=0.412$, calculado con la fórmula de Jaky, con el ángulo de rozamiento especificado en el apartado

8.2.3) supera la resistencia de cálculo a tracción del hormigón, por lo que el fuste necesita una armadura de anillo de $38,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ (superior al mínimo exigido por el artículo 9.6.3 del Eurocódigo 2 [CEN_04], $25,1 \text{ cm}^2/\text{m}$), para solventar esta necesidad se aplica una armadura de anillo con $\phi 20 \text{ mm}$ cada 163 mm en ambas caras.

8.5.4 Conexiones entre partes: anclajes y solapes

La cimentación cuenta con tres conexiones entre sus componentes, las dos primeras son empalmes por solape de armadura pasiva, y la tercera (ya nombrada en 8.4.2 Geometría del anillo embebido y del postensado) pertenece al anillo embebido y no es un solape de armadura. Las características principales de estas conexiones se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 30: Conexiones entre partes: longitudes de anclaje y solape

Conexión	Armadura/elemento	Longitud adoptada	FS asociado
1. Losa de cimentación → Fuste	444 $\phi 32 \text{ mm}$ (verticales del fuste, prolongadas en la losa)	$l_0=1.25\text{m}$	3.06
2. Fuste (pared del cono) → losa de coronación	254 $\phi 25 \text{ mm}$, esperas (127/cara, ambas caras)	$l_0=1.25\text{m}$	4.57
3. Losa de coronación → Anillo embebido	Virola de acero estructural	$e_{emb}=0.80\text{m}$	Ver tabla 23

La conexión 2 (Fuste (pared del cono) → losa de coronación) se ha comprobado a cortante según el artículo 6.2.5 del Eurocódigo 2 [CEN_04], teniendo también en cuenta el momento torsor M_z , se obtiene un factor de seguridad $FS=17.6$. La misma comprobación se lleva a cabo para la conexión 1 (Losa de cimentación → Fuste) obteniéndose un factor de seguridad $FS=8.54$.

8.5.5 Coherencia del diseño y aspectos pendientes

Para comprobar la validez del diseño final, una vez dimensionadas todas las partes de la cimentación se ha realizado una revisión de toda la cimentación comprobando la coherencia de las partes, continuidad geométrica y de los materiales entre las partes del modelo. Junto a esto se han recogido todos los factores de seguridad, de las comprobaciones realizadas durante el apartado 8 en la siguiente tabla:

Tabla 31: Resumen global de los coeficientes de seguridad de la cimentación

Comprobación	FS	Estado
Núcleo central (losa)	$e=4.05\text{m} \leq 6.35\text{m}$	Cumple
Vuelco (losa)	6.60	Cumple
Deslizamiento (losa)	5.80	Cumple
Hundimiento (losa)	15.94	Cumple
Cortante viga ancha (losa)	1.65	Cumple
Flexo-compresión (fuste)	1.05	Cumple
Fatiga, exención (fuste)	margen 26.1%	Cumple
Interfase a cortante losa-fuste	8.54	Cumple
Descompresión del postensado (anillo embebido)	1.14	Cumple
Tirante de anillo, bielas y tirantes (losa de coronación)	1.37	Cumple

Los aspectos específicos que quedan fuera del alcance de este TFG, ya sea por complejidad, o porque quedan fuera del título al que responde el proyecto (“Cimentación y estructura soporte de hormigón para aerogenerador marino dimensionado para cargas extremas”) son: estudio de la fatiga del acero pasivo, estudio en profundidad de la respuesta del hormigón a fatiga, el trazado y las pérdidas de fricción detalladas de los 28 tendones de postensado, estudio a detalle de la virola de acero embebido (espesores, rigidizadores y soldaduras). Sin embargo, estos detalles no son de vital importancia para la funcionalidad del modelo que se presenta en este proyecto, como queda demostrado con las comprobaciones expuestas dentro de este apartado. Sin embargo, se recomienda desarrollar estos puntos de cara a una continuación del proyecto sobre este trabajo.

9. Conclusión del proyecto

Repasando los objetivos del proyecto definidos en el apartado “3.2 Objetivos principales y secundarios”, se puede afirmar que el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado, “diseñar, dimensionar y validar la cimentación y estructura soporte de un aerogenerador marino de 5 MW para cargas extremas usando hormigón como material principal”, queda cubierto.

Si analizamos los objetivos secundarios uno por uno comprobamos lo siguiente: la creación de un modelo base de aerogenerador marino de 5 MW en base a los parámetros obtenidos ha sido completada, tal y como se muestra en el apartado “5. Definición y Diseño de Bladed”; la obtención de los valores clave de las cargas extremas del aerogenerador para diferentes casos a través de la realización de simulaciones se ha completado, y queda reflejada en el apartado “6. Simulaciones y Análisis de Cargas (DCLs)”; el diseño y dimensionado de la cimentación y estructura soporte también se cumple a lo largo del apartado “8. Diseño y Dimensionamiento de la Cimentación”; y el análisis de la viabilidad técnica y económica del proyecto queda completado por la parte técnica con las comprobaciones que se muestran en el apartado “8.5.5 Coherencia del diseño y aspectos pendientes” mientras que el análisis económico superficial del proyecto, queda reflejado en el Anexo IV: Estudio Económico/Presupuesto.

La geometría final de la cimentación consta principalmente de una losa de cimentación de $D=53.5\text{m}$ y $h=4.00\text{m}$, y de un fuste de $D=12.0\text{m}$ cilíndrico a lo largo de 48.6m y cónico en los 13.0m superiores, terminando en $D=5.91\text{m}$, coronado con un anillo embebido postensado.

Durante las validaciones del diseño se obtienen en general factores de seguridad altos, alcanzando valores como $FS=20.45$ en el caso del hundimiento, de entre las comprobaciones realizadas la que presenta un margen de seguridad más reducido es flexo-compresión del fuste con $FS=1.05$.

A lo largo del proyecto se han tomado decisiones de cambio en el diseño para satisfacer los estados límites últimos, estos cambios suelen fomentar el aprendizaje y ayudan a profundizar el conocimiento del autor en el campo de las cimentaciones por gravedad.

Un ejemplo sería, un cambio en el diseño del fuste, en el que se pasó de utilizar un fuste macizo a fuste hueco lastrado, este cambio aumentó en gran medida la estabilidad global de la estructura, pero también multiplicó por 6.6 el axil en el fuste, por lo que hubo que reforzar la armadura de manera considerable (se pasó de 286 barras a las actuales 444 barras).

En otra ocasión se tuvo que aplicar la corrección Delta-Morison lo que supuso un incremento del 81% en el momento de diseño y la cortante en la mudline se multiplicó 5.4 veces, a través de esto se entendió que no se debe asumir la esbeltez de la estructura, así como el gran impacto que tiene el volumen de la estructura en sus cargas de diseño.

Aunque el proyecto se considera ya finalizado, quedan abiertas posibles líneas de trabajo futuro, estas podrían ser: un estudio económico y de presupuesto detallado y contrastado con fuentes dentro de la industria, un sondeo real en el suelo marino del emplazamiento que permita conocer las propiedades exactas del perfil de suelo, uso de CFD (Computational Fluid Dynamics) para la validación de las cargas hidrodinámicas en el fuste, o la extrapolación de este mismo proyecto para aerogeneradores de mayor envergadura.

Al final de este proyecto se puede afirmar que en este Trabajo de Fin de Grado se presenta una cimentación por gravedad para aerogenerador de 5MW utilizando hormigón como estructura soporte cuya viabilidad ha sido validada a 50 metros de profundidad.

Como se expone al principio de este proyecto en los apartados “2. Estado del Arte” y “3.1 Justificación del proyecto” la industria de los aerogeneradores marinos está viviendo un crecimiento acelerado, en el que cada vez se presentan más proyectos de campos eólicos marinos, con turbinas de mayor potencia. Sin embargo, la fabricación en masa de las cimentaciones de acero para aerogeneradores de potencias altas presenta una serie de problemas que no existen al utilizar hormigón como material principal en la estructura de cimentación. Esto justifica la necesidad de proyectos como el que aquí se presenta, que a pesar de estar diseñado para un aerogenerador de tan solo 5 MW es un modelo extrapolable a aerogeneradores de mayor potencia.

Sin embargo, cabe destacar que este tipo de cimentaciones son mucho más pesadas que las metálicas, lo que conlleva mayores costes y dificultades técnicas durante los procesos de transporte y fondeo. Por tanto, se podría llegar a la conclusión de que este modelo de cimentación por gravedad si bien tiene una serie de ventajas técnicas innegables sobre los modelos que emplean acero como material principal, también tiene la desventaja de que a profundidades considerables (>30m), por lo general suele resultar costoso.

Bibliografía

[IEA_25] International Energy Agency (IEA), "Renewables 2025: Renewable Electricity", IEA, París, 2025. Disponible en:

<https://www.iea.org/reports/renewables-2025/renewable-electricity>

[EMBE25] Ember, "Yearly Electricity Data", Ember, Londres, 2025. Disponible en:

[OURW25] Our World in Data (H. Ritchie, M. Roser y P. Rosado), "Electricity from Renewables", 2025. Disponible en:

<https://ember-energy.org/data/yearly-electricity-data/>

<https://ourworldindata.org/grapher/electricity-renewables?tab=discrete-bar&time=latest>

[IREN25] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Power Generation Costs in 2024", IRENA, Abu Dabi, junio 2025. Disponible en:

<https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>

[ESTE16] Esteyco, "Cimentación por gravedad para la instalación de aerogeneradores offshore y torres meteorológicas", Patente WO2016042173A1, Madrid. Marzo 2016.

[IEC_09] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61400-3: Wind Turbines – Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines", 1ª ed., Ginebra, 2009.

[GLOB26] Global Wind Atlas, Technical University of Denmark (DTU) / Banco Mundial / Vortex, [en línea]. Disponible en: <https://globalwindatlas.info/en/>. [Consultado: 2026].

[COPE26] Copernicus Marine Service, "Global Ocean Physics Analysis and Forecast (GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024)", E.U. Copernicus Marine Service, [en línea]. Disponible en: https://data.marine.copernicus.eu/es/product/GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024/services. [Consultado: 2026].

[GLRC12] GL Renewables Certification (Germanischer Lloyd), "Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines", Hamburgo, 2012.

[CEN_04] Comité Europeo de Normalización (CEN), "Eurocódigo 2: Proyecto de Estructuras de Hormigón (UNE-EN 1992-1-1)", Bruselas, 2004.

[BOUY26] Bouygues Construction, "Offshore Wind Farms" (documentación técnica sobre ingeniería, construcción e instalación de GBS de hormigón pretensado, preparación

de lechos de grava y operaciones de lastrado), Bouygues Construction, [en línea]. [Consultado: 2026].

[AFGR26] AF Gruppen, "Gravity Based Structure for Offshore Wind – Status and Development" (informe sobre el estado de las cimentaciones por gravedad, su evolución comercial, diseño simplificado de fuste central y ausencia de necesidad de pilotaje), AF Gruppen, [en línea]. [Consultado: 2026].

[ESTE19] Esteves, R., et al., "Wind Energy in the Mediterranean Spanish ARC: The Application of Gravity Based Solutions", *Frontiers in Energy Research*, 2019 (artículo científico que detalla la fabricación de cajones y el proceso de remolque mediante barcos).

[PATE16] Oficina Europea de Patentes, Patente WO2016042173A1: "Cimentación por Gravedad para la Instalación de Aerogeneradores Offshore y Torres Meteorológicas", 2016 (documento técnico sobre el diseño de cajones autoflotantes de hormigón y el sistema de celdas para el fondeo por lastrado de agua).

[PHIL15] Philander, C. y Rozendaal, A., "Geology of the Cenozoic Namakwa Sands Heavy Mineral Deposit, West Coast of South Africa: A World-Class Resource of Titanium and Zircon", *Economic Geology*, vol. 110, No. 6, pp. 1577-1623, 2015.

[GARN95] Garnett, R.H.T., "Offshore Diamond Mining in Southern Africa", *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, mayo 1995.

[SCHN20] Schneider, G.I.C., "Marine Diamond Mining in the Benguela Current Large Marine Ecosystem: The Case of Namibia", *Environmental Development*, vol. 36, art. 100579, 2020.

[BOE_21] Gobierno de España, "Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural" (BOE-A-2021-13681), BOE, Madrid, 2021.

[MINI06] Ministerio de Fomento, "Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C: Seguridad Estructural – Cimientos", Madrid, 2006 (consultado en codigotecnico.org).

(Anexo III)

[WIND11] WINDnovation Engineering Solutions GmbH, "LZ62-5.0 Design Description Specification" (Rev. 01), documento técnico preparado para Lianyungang Zhongfu Lianzhong, 2011.

(Anexo IV)

[ORDE22] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Dirección General de Carreteras, "Orden Circular 2/2022: Actualización de la Base de Precios de Referencia", Madrid, 2022.

[CUAD23] Autoridad Portuaria de Valencia, "Cuadro de Precios N° 1: Proyecto Constructivo del Muelle de Contenedores de la Ampliación Norte del Puerto de Valencia", Valencia, 2023.

[ENER26] Energy Solutions Intelligence, "Offshore Wind Vessel Day Rates and Market Intelligence", Energy Solutions Intelligence, [en línea]. [Consultado: 2026].

[BEIT26] Beiter, P., et al., "Offshore Wind Market Report", National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, EE. UU., [en línea]. [Consultado: 2026].

[BVGA26] BVG Associates, "Guide to an Offshore Wind Farm", The Crown Estate y Offshore Renewable Energy Catapult, Reino Unido, [en línea]. [Consultado: 2026].

[FIDI16] Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils (FIDIC) / International Association of Dredging Companies (IADC), "Form of Contract for Dredging and Reclamation Works" (Blue Book), 2ª ed., La Haya, 2016.

[MARK24] Market.us, "Offshore Wind Turbine Installation Vessel Market Size, Share, Forecast", Market.us, 2024. Disponible en: <https://market.us/report/offshore-wind-turbine-installation-vessel-market/>. [Accedido: 13-jul-2026].

[HZ__25] HZ Containers, "Daily Rates in Maritime Shipping", hz-containers.com, 2025. Disponible en: <https://hz-containers.com/en/news/daily-rates-in-maritime-shipping/>. [Accedido: 13-jul-2026]

[BOSK26] Royal Boskalis Westminster N.V., "Offshore Installation and Heavy Marine Transport: Technical Specifications and Day Rates", Informe Técnico, Papendrecht, Países Bajos. 2026.

[HEER26] Heerema Marine Contractors, "Float-over Installations and Auxiliary Buoyancy Tanks (ABTs) Capabilities", Informe Técnico, Leiden, Países Bajos. 2026.

[SAIP26] Saipem S.p.A., "Offshore Construction and GBS Transportation Systems", Informe Técnico, Milán, Italia. 2026.

[SUBS26] Subsea 7 S.A., "Subsea Support Vessels (DSV/AHTS) and Marine Operations Pricing Guide", Luxemburgo. 2026.

Anexos

Anexo I: Alineación con los ODS

Este proyecto fomenta el alcance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de diversas maneras, pero se alinea de manera especialmente apreciable con 5 ODS en concreto:

ODS 7: Energía asequible y no contaminada

Este es el más obvio ya que con los aerogeneradores marinos no solo se genera energía limpia, sino que además al utilizar estructuras de hormigón con los métodos explicados previamente se reduce el LCOE (Coste Nivelado de la Energía).

ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico

Este argumento se aplica a nivel local ya que, a diferencia de los pilares de acero que son generalmente fabricados lejos del lugar de instalación, la cimentación de hormigón se hace en el mismo puerto, lo que implica la creación de nuevos empleos en este lugar.

ODS 12: Producción y consumo responsables

Las estructuras de hormigón en estos casos tienen una vida útil más larga que la del acero.

ODS 13: Acción por el clima

Aparte de proporcionar energía verde también se reduce la huella del carbono durante la producción, transporte y montaje del aerogenerador.

ODS 14: Vida submarina

Protege la vida submarina ya que durante la fase de montaje de la cimentación no genera vibraciones dañinas en el fondo marino, a diferencia de las estructuras monopilote.

Anexo II: Especificaciones del aerogenerador (aportado 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: 50 m

Condiciones de viento (emplazamiento B): 10,8 m/s de velocidad media, K Weibull 1,985

Profundidad emplazamiento B: 100 m

-Potencia eléctrica generada: 5 MW+10%

-Diámetro rotor aerodinámico: 126 m

-Rango de viento operativo: 3,5m/s-30m/s

-Tipo generador: síncrono a imanes permanentes

-Tipo de transmisión: directa.

-Revoluciones mínimas/nominales/máximas: 6 rpm/12 rpm/ 20rpm

-Ángulo de inclinación eje principal: +6 grados.

-Ángulo de conicidad de las palas: -3 grados.

-Longitud de las palas: 61,5m

-Diámetro del buje: 3m

-Altura buje sobre el nivel medio del mar: 92m

Clase sistema de control: control de paso

Velocidad máxima giro palas: 8 grados/segundo

Tiempo de aceleración giro: 0,2 segundos.

-Coordenadas del centro geométrico del buje: X=-5213; Z=3148mm

-Masa del buje (sin incluir las palas): 4E4 kg (en el centro geométrico)

-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.

Amortiguamiento de los modos de resonancia de la pala (todos los modos):
0,477%

-Posición del cojinete anterior: $X_A = -3197$; $Z_A = 2936$ mm

-Posición del cojinete posterior: $X_B = 950$; $Z_B = 2500$ mm

-Diámetro interno del rotor en el generador: 6800 mm

-Masas rotóricas de la transmisión más generador: $5 \cdot 10^4$ kg

Masas no rotóricas de transmisión+generador: $5,5 \cdot 10^4$ kg

-Centro de masas de la transmisión más generador: $X = -1340$, $Z = 2710$ mm

Pérdidas mecánicas de la transmisión (incluido rotor generador): 4%

Dimensiones de la góndola: cilindro con diámetro 8,5 m, longitud 8 m

Masa global de la góndola (no incluido rotor aerodinámico): $2 \cdot 10^5$ kg

Centro de masas de la góndola: $X = -1000$; $Z = +3000$ mm

Diámetro interior torre: 5700 mm

Altura sumergida flotante: 45 m

-Altura entrada acoplamiento cables: 62 m

Altura total torre A: 130 m

Masa total torre en espera del diseño: $1,9 \cdot 10^6$ kg

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): 18 mm/42,5 mm

Clase de los imanes: N3616

Altura de yugos rotórico/estático: 15 mm/13 mm

Altura y anchura de las ranuras estáticas: 83 mm/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/m³

Máxima variación del nivel del mar (50 años): 3,6 m

Máxima velocidad de corriente marina (50 años): 1,3 m/s

Anexo III: Especificaciones palas

Tabla 32: Especificaciones geométricas de la pala LZ62-5.0. Fuente: WINDnovation Engineering Solutions GmbH (2011). [WIND11]

6.2 Chord, Twist and Thickness Distribution

The geometric shape of the rotor blade is to be determined from the local chord length, the twist, the thickness and the position of the reference point (quarter chord, t/4-point) of the airfoil cross section. Table 2 shows the distribution of these parameters.

Radius L	Chord	Twist	Rel. Thickness	x-t/4-point	y-t/4-point
[m]	[m]	[°]	[%]	[m]	[m]
0.00	3.30	0.00	100.00	0.00	-0.83
2.50	3.41	7.21	95.43	-0.10	-0.79
5.00	3.79	16.14	79.48	-0.19	-0.67
7.50	4.25	15.63	61.55	-0.16	-0.56
10.00	4.57	14.15	48.02	-0.12	-0.48
12.50	4.64	11.76	40.07	-0.09	-0.45
15.00	4.44	9.14	35.89	-0.06	-0.45
17.50	4.15	7.10	33.40	-0.04	-0.45
20.00	3.86	5.80	31.68	-0.03	-0.44
22.50	3.57	4.97	30.46	-0.02	-0.43
25.00	3.31	4.33	29.42	-0.02	-0.42
27.50	3.06	3.76	28.40	-0.02	-0.41
30.00	2.84	3.26	27.39	-0.02	-0.41
32.50	2.64	2.83	26.41	-0.02	-0.41
35.00	2.46	2.46	25.49	-0.02	-0.42
37.50	2.30	2.13	24.63	-0.02	-0.42
40.00	2.16	1.81	23.85	-0.01	-0.43
42.50	2.03	1.49	23.12	-0.01	-0.44
45.00	1.92	1.17	22.38	-0.01	-0.45
47.50	1.81	0.85	21.60	-0.02	-0.46
50.00	1.72	0.49	20.69	-0.07	-0.47
52.50	1.63	0.12	19.66	-0.18	-0.48
55.00	1.53	-0.24	18.68	-0.36	-0.49
56.00	1.48	-0.38	18.40	-0.46	-0.49
57.00	1.41	-0.50	18.22	-0.58	-0.49
58.00	1.32	-0.58	18.13	-0.72	-0.49
59.00	1.21	-0.60	18.03	-0.88	-0.48
60.00	1.04	-0.47	18.00	-1.06	-0.48
61.00	0.74	0.07	17.99	-1.27	-0.49
62.00	0.01	1.30	18.00	-1.51	-0.45

Tabla 33: Propiedades mecánicas de la sección de las palas LZ62-5.0. Fuente: WINDnovation Engineering Solutions GmbH (2011). [WIND11]

12.4.1 Mechanical properties in sections

Table 10 shows the mechanical properties of the blade body.

Blade Radius L	Centre of mass	Mass per unit length	Flapwise stiffness	Edgewise stiffness	Elastic axis	Torsional rigidity	Inertia per unit length
[m]	[%]	[kg/m]	[Nm ²]	[Nm ²]	[%]	[Nm ²]	[kgm]
0.00	50.2	1939.9	3.87E+10	3.87E+10	50.2	2.07E+10	5048.5
2.50	49.6	732.8	1.26E+10	1.22E+10	49.6	7.03E+09	1879.8
5.00	49.2	515.5	7.63E+09	7.00E+09	48.4	4.04E+09	1300.1
7.50	45.5	481.0	5.78E+09	7.41E+09	45.0	2.55E+09	1147.0
10.00	45.3	480.3	4.12E+09	8.04E+09	44.0	1.65E+09	1093.0
12.50	45.3	464.6	3.22E+09	7.01E+09	42.3	9.61E+08	956.8
15.00	45.2	423.3	2.39E+09	5.85E+09	42.7	6.75E+08	712.6
17.50	45.0	380.2	1.74E+09	4.08E+09	42.2	4.05E+08	508.1
20.00	44.7	379.5	1.31E+09	3.48E+09	42.1	3.32E+08	432.0
22.50	45.0	342.9	1.01E+09	2.86E+09	42.2	2.15E+08	315.0
25.00	44.7	328.9	7.86E+08	2.38E+09	42.1	1.64E+08	249.4
27.50	44.2	322.0	6.20E+08	1.90E+09	41.6	1.26E+08	198.0
30.00	43.6	315.9	4.89E+08	1.52E+09	41.2	9.77E+07	155.2
32.50	43.5	302.6	3.72E+08	1.21E+09	41.1	7.56E+07	122.8
35.00	43.0	288.0	2.81E+08	9.75E+08	41.1	6.55E+07	99.2
37.50	43.6	270.1	2.12E+08	7.71E+08	41.3	4.56E+07	77.8
40.00	42.7	238.4	1.56E+08	5.81E+08	41.1	3.27E+07	56.7
42.50	43.8	223.4	1.10E+08	4.80E+08	41.8	3.25E+07	50.3
45.00	44.0	178.6	7.48E+07	3.37E+08	42.1	2.06E+07	35.2
47.50	44.6	148.9	4.95E+07	2.45E+08	42.4	1.62E+07	27.1
50.00	44.6	122.8	3.28E+07	1.70E+08	42.5	1.24E+07	20.2
52.50	45.0	100.9	2.03E+07	1.10E+08	42.1	9.28E+06	15.2
55.00	46.0	85.5	1.25E+07	8.62E+07	43.2	6.91E+06	11.7
56.00	46.6	78.5	9.67E+06	7.50E+07	43.7	5.92E+06	10.3
57.00	47.3	76.5	7.54E+06	8.04E+07	44.9	5.49E+06	10.0
58.00	48.0	63.6	5.26E+06	6.88E+07	46.0	3.60E+06	7.5
59.00	48.2	58.8	3.50E+06	6.04E+07	47.2	2.99E+06	6.3
60.00	48.8	34.6	1.06E+06	2.33E+07	48.0	1.41E+06	3.0
61.00	52.5	17.6	2.93E+05	8.01E+06	49.4	4.06E+05	1.0
62.00	52.5	1.8	2.93E+04	8.01E+05	49.4	4.06E+04	0.1

Anexo IV: Estudio Económico/Presupuesto

Para este apartado se va a realizar un presupuesto aproximado de la construcción e instalación de la cimentación por gravedad diseñada en el proyecto. Los precios de hormigón y acero se basan en la Orden Circular 2/2022 [ORDE22] y en el Cuadro de Precios de referencia del Puerto de Valencia [CUAD23]; las tarifas diarias de los buques de transporte, instalación y apoyo (remolcador AHTS, barco grúa HLV, embarcaciones SOV y plataforma semisumergible HTV) se han estimado a partir de fuentes de inteligencia de mercado [ENER26], [BEIT26], [BVGA26], [MARK24], [HZ__25]; las condiciones contractuales de dragado siguen el modelo FIDIC/IADC [FIDI16]; y los precios de los flotadores metálicos, el sistema de monitorización y los carriles empotrados se obtienen de [BOSK26], [HEER26], [SAIP26], [SUBS26].

Tabla 34: Cuadro de precios

Cuadro de precios			
Número de precio	unidad	Descripción	Precio [€]
P1	m ³	Hormigón para armar HA-35/F/20/IIIC+Qb con cemento SR-MR en cimentación completamente terminada, incluso encofrado y desencofrado, fabricación en planta de hormigón, transporte, bombeo y compactación, parte proporcional de instalaciones auxiliares para fabricación de cimentación, preparación del lugar de fabricación y su posterior restitución, recocado, encofrado de ventanas o posterior demolición de las mismas si fuesen necesarios.	190.00
P2	kg	Acero corrugado en redondos, tipo B 500 S para armar, incluso suministro, colocación, ferrallado y parte proporcional de despuntes, mermas, alambre de atar, separadores, rigidizadores y solapes	1.67
P3	m ³	Lastre compuesto por material granular obtenido mediante dragado del fondo marino colocado en el interior del fuste	17.17
P4	m	carriles empotrados en losas corridas de hormigón mediante un sistema de vía en placa	5,000.00
P5	día	Remolcador de altura (AHTS), para el transporte de la plataforma semisumergible	30,000.00
P6	día	Barco grúa (HLV), para colocación del anillo embebido y asistencia en el fondeo	300,000.00
P7	día	Embarcaciones de apoyo (SOV), para transporte de personal	10,000.00
P8	día	Plataforma semisumergible (HTV) de al menos 63 metros de manga, para transporte de la cimentación hasta el emplazamiento	230,000.00
P9	día	Flotadores metálicos, Tanques ABTs	45,000.00
P10	día	Sistema de monitorización	12,000.00

Tabla 35: Presupuesto

Presupuesto					
Número de precio	unidad	Descripción	Precio [€]	Medición	Presupuesto [€]
P1	m ³	Hormigón para armar HA-35/F/20/IIIC+Qb con cemento SR-MR en cimentación completamente terminada, incluso encofrado y desencofrado, fabricación en planta de hormigón, transporte, bombeo y compactación, parte proporcional de instalaciones auxiliares para fabricación de cimentación, preparación del lugar de fabricación y su posterior restitución, recredido, encofrado de ventanas o posterior demolición de las mismas si fuesen necesarios.	190.00	10,482.00	1,991,580.00
P2	kg	Acero corrugado en redondos, tipo B 500 S para armar, incluso suministro, colocación, ferrallado y parte proporcional de despuntes, mermas, alambre de atar, separadores, rigidizadores y solapes	1.67	509,857.50	851,462.03
P3	m ³	Lastre compuesto por material granular obtenido mediante dragado del fondo marino colocado en el interior del fuste	17.17	4,289.00	73,642.13
P4	m	carriles empotrados en losas corridas de hormigón mediante un sistema de vía en placa	5,000.00	75.00	375,000.00

P5	día	Remolcador de altura (AHTS), para el transporte de la plataforma semisumergible	30,000.00	6.00	180,000.00
P6	día	Barco grúa (HLV), para colocación del anillo embebido y asistencia en el fondeo	300,000.00	2.00	600,000.00
P7	día	Embarcaciones de apoyo (SOV), para transporte de personal	10,000.00	6.00	60,000.00
P8	día	Plataforma semisumergible (HTV) de al menos 63 metros de manga, para transporte de la cimentación hasta el emplazamiento	230,000.00	3.00	690,000.00
P9	día	Flotadores metálicos, Tanques ABTs	45,000.00	4.00	180,000.00
P10	día	Sistema de monitorización	12,000.00	4.00	48,000.00
		Total			5,049,684.16

Anexo V: Croquis acotado

A continuación, se muestran dos ilustraciones de la estructura de cimentación diseñada simplificada, donde se reflejan las dimensiones principales que rigen la estructura.

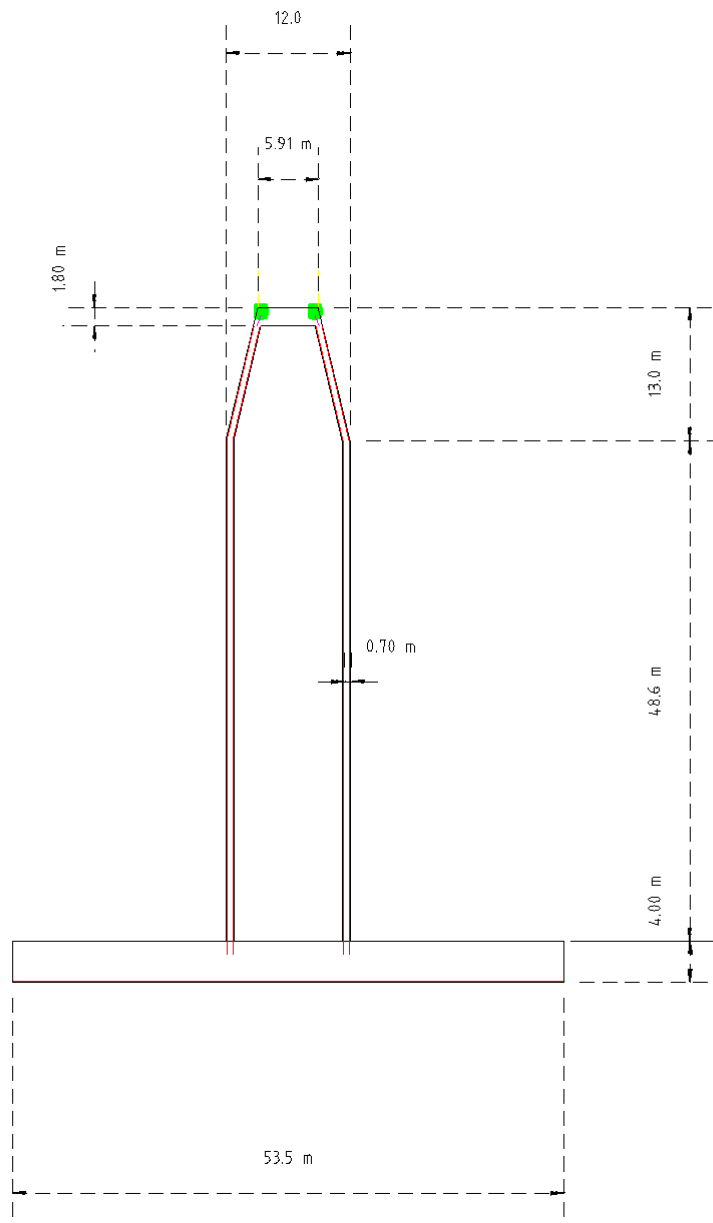


Ilustración 39: Croquis de la sección longitudinal completa acotada de la cimentación

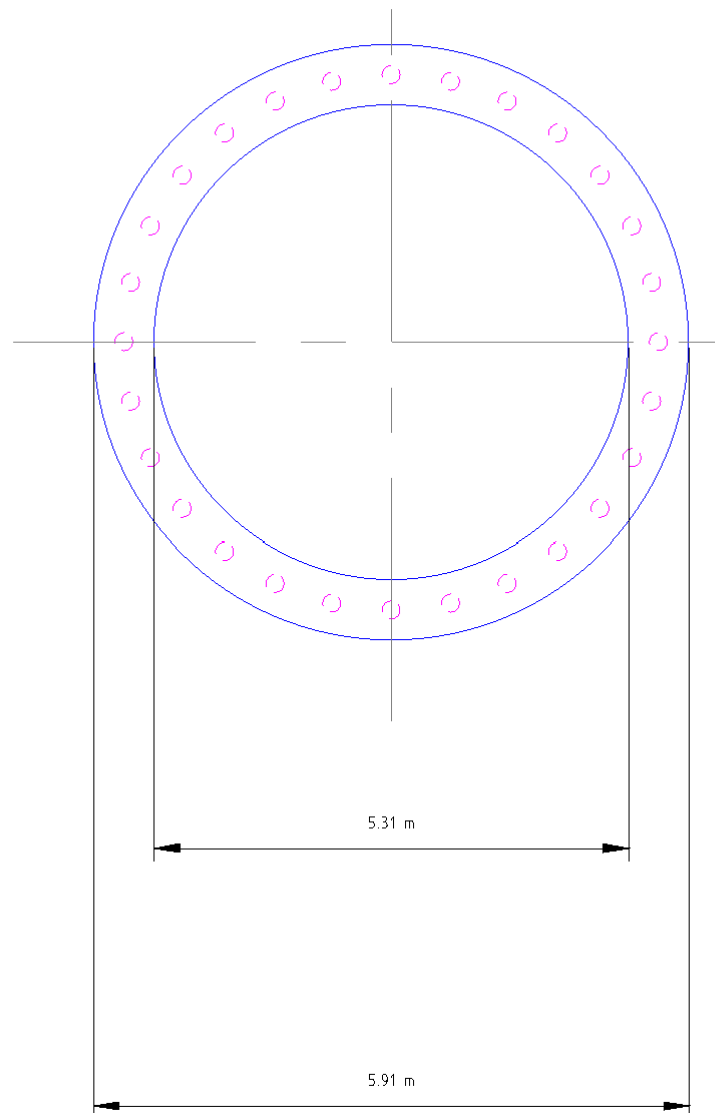


Ilustración 40: Croquis de la planta acotada del anillo embebido

Anexo VI: Códigos utilizados (MATLAB)

Código 1: Fuste_Losa_Excentricidad

```
%%
=====
=====
% PREDIMENSIONADO DEL DIAMETRO DE LA LOSA DE CIMENTACION POR EL
CRITERIO
% DE EXCENTRICIDAD  $e = M_{Ed}/N_{Ed} \leq D/8$  (base circular, nucleo
central)
%
% Determina el diametro D de la losa que garantiza que la
resultante de
% las acciones cae dentro del nucleo central de la base (D/8 para
una
% seccion circular, frente a D/6 de una zapata rectangular), de
modo que
% la totalidad de la base quede comprimida bajo las cargas de
diseno,
% sin despegue del terreno.
%
% El fuste se modela como una columna hueca (cilindrica en
profundidad,
% troncoconica en la zona de carrera de marea/splash) rellena de
lastre
% granular en el tramo cilindrico, de forma analoga a una
cimentacion de
% gravedad real (tipo Condeep/Sleipner). Las cargas
caracteristicas
%  $M_{char}/H_{char}$  de Bladed estan calculadas en el mudline modelando
toda
% la subestructura como un cilindro esbelto de diametro
D_torre=5.91 m;
% como el fuste real es mucho mas ancho, se anade la diferencia de
% fuerza de Morison entre el fuste real  $D_{ext}(z)$  y ese cilindro
esbelto
% (correccion incremental Delta-Morison, teoria lineal de Airy).
%
% TFG: Cimentacion y estructura soporte de hormigon para
aerogenerador
% marino -- Anejo de calculo.
%%
=====
=====
clear; clc; close all;
```

```
%% -----
--
% 1. CARGAS CARACTERISTICAS EN EL MUDLINE (z=-50 m), POR DLC
% -----
--
DLC(1).nombre = 'DLC 6.1 (tormenta de 50 años, -8 grados Td2)';
DLC(1).M_char = 445.6; % MN*m, en z_base=-50 m (mudline)
DLC(1).H_char = 3.226; % MN
DLC(1).Fz_char = 8.336; % MN
DLC(1).gammaF = 1.35; % GL2012 Tabla 4.4.6, situacion de carga
Extrema
DLC(1).H_ola = 9.45; % m, altura de ola de calculo (Hmax50)
DLC(1).T_ola = 9.14; % s, periodo asociado (Td2)

DLC(2).nombre = 'DLC 5.1 (parada de emergencia, Vr, flexion
inversa)';
DLC(2).M_char = 181.1;
DLC(2).H_char = 2.219;
DLC(2).Fz_char = 9.378;
DLC(2).gammaF = 1.20; % situacion de carga Normal
DLC(2).H_ola = 1.574;
DLC(2).T_ola = 4.807;

nCasos = numel(DLC);

fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' FUSTE HUECO (cilindro+cono) + LASTRE -- PREDIMENSIONADO
DE LA LOSA POR e = M_Ed/N_Ed <= D/8\\n');
fprintf('=====
=====\\n\\n');

%% -----
--
% 2. GEOMETRIA Y PESO DEL FUSTE (fijos: no dependen del diametro D
de
% la losa, que es la incognita de este apartado)
% -----
--
P.z_base = -50.0; % m, mudline = base del fuste (referencia de
Bladed)
P.SWL_ext = 3.6; % m, nivel de agua de calculo mas
desfavorable (marea)
P.d_agua = 53.6; % m, profundidad total de calculo
P.H_fuste = 61.6; % m, altura total del fuste, desde el
mudline a la coronacion
P.z_top = P.z_base + P.H_fuste;
```

```
P.z_trans = P.SWL_ext - 5.0;      % m, inicio del tramo troncoconico
(splash zone)

P.D_fuste = 12.0;      % m, diametro exterior del tramo cilindrico
P.D_torre = 5.91;      % m, diametro exterior en la coronacion
(conexion con la torre)
P.t_wall = 0.70;      % m, espesor de pared

% Canto de predimensionado de la losa: se emplea aqui unicamente
para
% estimar el peso propio de la losa en el criterio de
excentricidad. El
% canto definitivo (h=4.00 m) se obtiene en el apartado siguiente a
% partir de punzonamiento, cortante y flexion propia. Como un mayor
canto
% solo incrementa N_Ed y por tanto reduce e=M_Ed/N_Ed, el diametro
D aqui
% obtenido resulta conservador frente al diseno definitivo.
P.h_losa = 3.0;      % m

P.gamma_hormigon = 25.0;      % kN/m3
P.gamma_agua_mar = 10.05;      % kN/m3
P.gamma_horm_sub = (P.gamma_hormigon - P.gamma_agua_mar)/1000;
% MN/m3
P.gamma_horm_seco = P.gamma_hormigon/1000;
% MN/m3
P.gamma_lastre_sat = 21.0;      % kN/m3, lastre granular
saturado
P.gamma_lastre_sub = (P.gamma_lastre_sat - P.gamma_agua_mar)/1000;
% MN/m3
P.gamma_fav = 0.90;      % coeficiente de accion
favorable sobre el peso propio

P.rho_agua = 1.025;      % t/m3
P.g = 9.81;
P.Cd = 0.70;
P.Cm = 2.00;

fprintf('z_base=%.1f m  z_trans=%.1f m  z_top=%.1f m  (H_fuste=%.1f
m)\n', ...
        P.z_base, P.z_trans, P.z_top, P.H_fuste);
fprintf('D_fuste=%.2f m  D_torre=%.2f m  t_wall=%.2f m\n\n',
P.D_fuste, P.D_torre, P.t_wall);

% --- Volúmenes de hormigon (cascara), formula cerrada:
A(z)=pi*t*(D_ext(z)-t) ---
V_cil = V_cascara(P.z_base, P.z_trans, P);
V_cono_sub = V_cascara(P.z_trans, P.SWL_ext, P);
```

```

V_cono_emer = V_cascara(P.SWL_ext, P.z_top, P);
V_horm_fuste = V_cil + V_cono_sub + V_cono_emer;

D_int_cyl = P.D_fuste - 2*P.t_wall;
V_lastre = (pi/4)*D_int_cyl^2*(P.z_trans - P.z_base);

W_horm_sub = (V_cil + V_cono_sub)*P.gamma_horm_sub;      % MN
(empuje de Arquimedes activo)
W_horm_emer = V_cono_emer*P.gamma_horm_seco;              % MN
(peso completo, emergido)
W_lastre = V_lastre*P.gamma_lastre_sub;                  % MN
(sumergido)
W_fuste_lastre = W_horm_sub + W_horm_emer + W_lastre;     % MN,
caracteristico
P.W_fuste_lastre = W_fuste_lastre;

fprintf('--- Geometria y pesos del fuste ---\n');
fprintf('V_hormigon cilindro          = %8.1f m3\n', V_cil);
fprintf('V_hormigon cono (sumergido)    = %8.1f m3\n', V_cono_sub);
fprintf('V_hormigon cono (emergido)        = %8.1f m3\n', V_cono_emer);
fprintf('V_hormigon FUSTE TOTAL             = %8.1f m3\n', V_horm_fuste);
fprintf('V_lastre (D_int=%0.2f m)          = %8.1f m3\n', D_int_cyl,
V_lastre);
fprintf('W_hormigon sumergido = %6.2f MN   W_hormigon emergido =
%5.2f MN\n', W_horm_sub, W_horm_emer);
fprintf('W_lastre (sumergido) = %6.2f MN\n', W_lastre);
fprintf('W_FUSTE+LASTRE (caracteristico) = %6.2f MN\n\n',
W_fuste_lastre);

%% -----
--
% 3. CORRECCION INCREMENTAL DE MORISON (Delta M, Delta H) POR DLC
% -----
--
% Diferencia de fuerza de Morison entre el fuste real (D_ext(z),
variable)
% y el cilindro esbelto D_torre que Bladed ya considero en toda la
altura
% sumergida, barriendo la fase theta de la ola (arrastre e inercia
% desfasados 90 grados). Se integra hasta la cresta de la ola
% (SWL_ext+H/2, teoria lineal), no hasta el nivel medio de calculo,
para
% no infravalorar la franja mojada por la cresta.
fprintf('--- Correccion incremental de Morison (ancho real del
fuste vs. cilindro esbelto) ---\n');
n_theta = 360; n_z = 400;
for k = 1:nCasos
    r = delta_morison(DLC(k).H_ola, DLC(k).T_ola, P, n_theta, n_z);

```

```

    DLC(k).dM = r.dM;
    DLC(k).dH = r.dH;
    DLC(k).theta_crit = r.theta_crit;
    DLC(k).sweep = r;
    fprintf('%s:\n', DLC(k).nombre);
    fprintf('  H=%0.3f m  T=%0.3f s  ->  k=%0.5f 1/m  L=%0.1f m
d/L=%0.3f\n', ...
        DLC(k).H_ola, DLC(k).T_ola, r.k, r.L_onda,
P.d_agua/r.L_onda);
    fprintf('  theta_crit=%0.1f grados  Delta_M=%7.2f MN*m
Delta_H=%6.3f MN\n\n', ...
        rad2deg(r.theta_crit), r.dM, r.dH);
end

%% -----
--
% 4. CARGAS DE DISEÑO POR DLC (con la corrección Delta ya
incluida)
% -----
--
fprintf('--- Cargas de diseño (M_Ed, H_Ed, Fz_Ed), incluyendo Delta
Morison ---\n');
for k = 1:nCasos
    DLC(k).M_Ed = DLC(k).gammaF*(DLC(k).M_char + DLC(k).dM);
    DLC(k).H_Ed = DLC(k).gammaF*(DLC(k).H_char + DLC(k).dH);
    DLC(k).Fz_Ed = DLC(k).gammaF*DLC(k).Fz_char;
    incremento_pct = (DLC(k).M_Ed/(DLC(k).gammaF*DLC(k).M_char) -
1)*100;
    fprintf('%s:\n', DLC(k).nombre);
    fprintf('  M_Ed = %0.2f*(%0.1f+%0.2f) = %7.2f MN*m  (sin Delta:
%6.2f MN*m -> +%0.1f%%)\n', ...
        DLC(k).gammaF, DLC(k).M_char, DLC(k).dM, DLC(k).M_Ed,
...
        DLC(k).gammaF*DLC(k).M_char, incremento_pct);
    fprintf('  H_Ed = %6.3f MN  Fz_Ed = %6.3f MN\n\n',
DLC(k).H_Ed, DLC(k).Fz_Ed);
end

%% -----
--
% 5. INCREMENTO PROGRESIVO DE D HASTA e = M_Ed/N_Ed <= D/8 (AMBOS
DLC)
% -----
--
D = P.D_fuste + 1.0;    % arranque: diametro de losa ligeramente
mayor que el fuste
paso = 0.10;            % m, incremento del bucle
it = 0;

```

```

cumple = false;

fprintf('--- Búsqueda de D (incremento progresivo) ---\n');
while ~cumple
    it = it + 1;
    cumple = true;
    e_vec = zeros(1, nCasos);
    for k = 1:nCasos
        N_Ed = N_Ed_total(D, DLC(k), P);
        e_vec(k) = DLC(k).M_Ed / N_Ed;
        if e_vec(k) > D/8
            cumple = false;
        end
    end
    if it <= 3 || mod(it, 40) == 0
        fprintf('  it=%4d   D=%6.2f m   e_6.1=%6.3f m   e_5.1=%6.3f\n', ...
            it, D, e_vec(1), e_vec(2), D/8);
    end
    if ~cumple
        D = D + paso;
    end
    if D > 500
        error('Fuste_Losa:noConverge', 'No se ha encontrado
convergencia en el rango explorado.');
```

end

D_continuo = D;

```

fprintf('\n-> Converge en la iteracion %d: D_continuo = %.2f
m\n\n', it, D_continuo);

% Redondeo a un valor practico de obra (multiplo de 0.5 m, hacia
arriba):
D_practico = ceil(D_continuo*2)/2;

%% -----
--
% 6. RESULTADO ADOPTADO
% -----
--
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' RESULTADO\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
for Dcheck = [D_continuo, D_practico]
    if Dcheck == D_continuo
        fprintf('--- Con D_continuo = %.2f m ---\\n', Dcheck);
```

```

else
    fprintf('--- Con D practico (redondeado a 0.5 m), ADOPTADO
= %.2f m ---\n', Dcheck);
end
for k = 1:nCasos
    N_Ed = N_Ed_total(Dcheck, DLC(k), P);
    e = DLC(k).M_Ed/N_Ed;
    fprintf('  %s:\n', DLC(k).nombre);
    fprintf('      N_Ed=%7.2f MN    M_Ed=%7.2f MN*m    e=%.3f m
D/8=%.3f m    -> %s\n', ...
            N_Ed, DLC(k).M_Ed, e, Dcheck/8,
texto_ok(e<=Dcheck/8));
end
end
V_losa_final = (pi/4)*D_practico^2*P.h_losa;
fprintf('\nD_losa (adoptado) = %.2f m    V_losa (con h=%.2f m de
predimensionado) = %.1f m3\n', ...
        D_practico, P.h_losa, V_losa_final);
fprintf('D_losa/D_fuste = %.2f    V_fuste+lastre/V_losa = %.2f\n',
...
        D_practico/P.D_fuste,
(V_horm_fuste+V_lastre)/V_losa_final);

%% -----
--
% 7. GRAFICAS
% -----
--
% (a) Perfil del fuste: diametro exterior/interior frente a la cota
z
figure('Name', 'Geometria del fuste');
z_plot = linspace(P.z_base, P.z_top, 500);
Dext_plot = arrayfun(@(z) D_ext_fuste(z, P), z_plot);
Dint_plot = Dext_plot - 2*P.t_wall;
plot(Dext_plot/2, z_plot, 'b-', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(-Dext_plot/2, z_plot, 'b-', 'LineWidth', 1.5,
'HandleVisibility', 'off');
plot(Dint_plot/2, z_plot, 'b--', 'LineWidth', 1.0);
plot(-Dint_plot/2, z_plot, 'b--', 'LineWidth', 1.0,
'HandleVisibility', 'off');
plot([-P.D_fuste/2*1.15, P.D_fuste/2*1.15], [0 0], 'k:',
'LineWidth', 1.0);
plot([-P.D_fuste/2*1.15, P.D_fuste/2*1.15], [P.SWL_ext P.SWL_ext],
'r:', 'LineWidth', 1.0);
xlabel('Radio [m]'); ylabel('Cota z [m] (0 = nivel medio del
mar)');
title('Perfil del fuste: cilindro + tronco de cono hueco, con
lastre en el tramo cilindrico');

```

```

legend('Contorno exterior', 'Contorno interior (hueco)', 'NMM
(z=0)', 'Nivel de agua extremo (+3.6 m)', ...
      'Location', 'eastoutside');
grid on; axis equal;

% (b) Delta M(theta) para el DLC gobernante
figure('Name', 'Barrido de fase -- Delta M(theta)');
plot(rad2deg(DLC(1).sweep.theta_v), DLC(1).sweep.dM_v, 'LineWidth',
1.5); hold on;
plot(rad2deg(DLC(1).theta_crit), DLC(1).dM, 'ro',
'MarkerFaceColor', 'r');
xlabel('Fase de la ola, \theta [grados]'); ylabel('\Delta M(\theta)
[MN\cdot m]');
title(sprintf('%s: maximo en \theta=%.0f grados (regimen dominado
por inercia)', ...
      DLC(1).nombre, rad2deg(DLC(1).theta_crit)));
grid on;

% (c) Convergencia de la busqueda: e(D) y D/8
D_hist = P.D_fuste+1.0 : paso : D_continuo;
e_hist = zeros(size(D_hist));
for i = 1:numel(D_hist)
    N_Ed_i = N_Ed_total(D_hist(i), DLC(1), P);
    e_hist(i) = DLC(1).M_Ed/N_Ed_i;
end
figure('Name', 'Convergencia de la busqueda de D');
plot(D_hist, e_hist, 'b-', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(D_hist, D_hist/8, 'r--', 'LineWidth', 1.5);
plot(D_continuo, DLC(1).M_Ed/N_Ed_total(D_continuo, DLC(1), P),
'ko', 'MarkerFaceColor', 'k');
xlabel('D [m]'); ylabel('[m]');
legend('e(D) = M_{Ed}/N_{Ed}(D) (DLC 6.1)', 'D/8', 'Punto de
convergencia', 'Location', 'best');
title('e(D) decrece, D/8 crece: cruce unico garantizado');
grid on;

%%
=====
=====
% FUNCIONES LOCALES
%
=====
=====
function Dz = D_ext_fuste(z, P)
% Diametro exterior del fuste en la cota z: constante en el tramo
% cilindrico, lineal (tronco de cono) en la zona de carrera de
marea.

```

```

    if z <= P.z_trans
        Dz = P.D_fuste;
    else
        Dz = P.D_fuste - (P.D_fuste-P.D_torre)*(z-
P.z_trans)/(P.z_top-P.z_trans);
    end
end

function V = V_cascara(z1, z2, P)
% Volumen de hormigon de la cascara (espesor de pared t_wall) entre
las
% cotas z1<z2. Como A(z)=pi*t*(D_ext(z)-t) y D_ext(z) es lineal en
cada
% tramo, la integral cerrada es la longitud por el promedio de los
% valores de D_ext en los extremos.
    D1 = D_ext_fuste(z1, P);
    D2 = D_ext_fuste(z2, P);
    Davg = 0.5*(D1+D2);
    V = pi*P.t_wall*(z2-z1)*(Davg - P.t_wall);
end

function k = resolver_numero_onda(T, d, g)
% Relacion de dispersion lineal omega^2 = g*k*tanh(k*d), resuelta
por
% Newton-Raphson (arranque con la aproximacion de aguas profundas).
    omega = 2*pi/T;
    k = omega^2/g;
    for it = 1:100
        fk = g*k*tanh(k*d) - omega^2;
        dfk = g*tanh(k*d) + g*k*d*(1-tanh(k*d)^2);
        k_new = k - fk/dfk;
        if abs(k_new-k) < 1e-12
            k = k_new;
            return;
        end
        k = k_new;
    end
    error('resolver_numero_onda:noConverge', 'Newton no convergio
para T=%.3f s', T);
end

function r = delta_morison(H_ola, T_ola, P, n_theta, n_z)
% Correccion incremental de Morison: diferencia de fuerza
horizontal
% entre el fuste real (D_ext(z), variable) y el cilindro esbelto
D_torre
% ya considerado por Bladed en toda la altura sumergida. Barre la
fase

```

```
% theta de la ola y devuelve el maximo de |Delta M| junto con el
Delta H
% correspondiente a esa misma fase.
k = resolver_numero_onda(T_ola, P.d_agua, P.g);
L_onda = 2*pi/k;

z_crest = P.SWL_ext + H_ola/2;
z_v = linspace(P.z_base, z_crest, n_z);
Dz = arrayfun(@(z) D_ext_fuste(z, P), z_v);
coshkzd = cosh(k*(z_v + P.d_agua));
sinhkd = sinh(k*P.d_agua);

theta_v = linspace(0, 2*pi, n_theta+1);
theta_v(end) = [];
dM_v = zeros(size(theta_v));
dH_v = zeros(size(theta_v));
for i = 1:numel(theta_v)
    th = theta_v(i);
    u = (pi*H_ola/T_ola)*(coshkzd/sinhkd)*cos(th);
    a = (2*pi^2*H_ola/T_ola^2)*(coshkzd/sinhkd)*sin(th);
    dF = 0.5*P.rho_agua*P.Cd*(Dz-P.D_torre).*u.*abs(u) ...
        + P.rho_agua*P.Cm*(pi/4)*(Dz.^2-P.D_torre^2).*a;
    dH_v(i) = trapz(z_v, dF)/1000; % MN
    dM_v(i) = trapz(z_v, dF.*(z_v-P.z_base))/1000; % MN*m
end
[~, i_crit] = max(abs(dM_v));

r = struct('k', k, 'L_onda', L_onda, 'theta_crit',
theta_v(i_crit), ...
'dM', dM_v(i_crit), 'dH', dH_v(i_crit), ...
'theta_v', theta_v, 'dM_v', dM_v, 'dH_v', dH_v);
end

function N_Ed = N_Ed_total(D, caso, P)
% Carga axial total de diseno sobre la losa: reaccion de la turbina
mas
% peso propio (fuste+lastre, fijo, mas losa, que si depende de D),
con
% gamma_fav=0.90 sobre la totalidad del peso propio.
V_losa = (pi/4)*D^2*P.h_losa;
W_losa = V_losa*P.gamma_horm_sub;
N_Ed = caso.Fz_Ed + P.gamma_fav*(P.W_fuste_lastre + W_losa);
end

function out = texto_ok(cond)
if cond
    out = 'CUMPLE';
else
```

```
        out = 'NO CUMPLE';  
    end  
end
```

Código 2: Comprobaciones Eurocódigo 2

```
%%
=====
=====
% COMPROBACIONES EC2 -- LOSA DE CIMENTACION Y FUSTE HUECO (ESTADOS
% LIMITE ULTIMOS Y FATIGA SIMPLIFICADA)
%
% Con el diametro de losa D=53.5 m obtenido en el apartado de
% predimensionado geotecnico (criterio de excentricidad), se
determinan
% aqui: el canto de la losa por punzonamiento (EC2 6.4), cortante
de
% viga ancha (EC2 6.2) y flexion propia (placa circular
axisimetrica);
% la armadura vertical del fuste hueco por flexo-compresion (EC2
6.1,
% metodo de fibras en seccion anular); y la exencion de fatiga
% simplificada del hormigon (EC2 6.8.7(2)) para el DLC 1.1,
incluyendo
% la correccion incremental de Morison por el ancho real del
fuste.
%
% TFG: Cimentacion y estructura soporte de hormigon para
aerogenerador
% marino -- Anejo de calculo.
%%
=====
=====
clear; clc; close all;

%% -----
--
% 1. DATOS DE PARTIDA (diametro de losa y cargas de diseno, con la
% correccion Delta-Morison ya incluida)
% -----
--
D = 53.5;          % m, diametro de la losa
D_fuste = 12.0;    % m, diametro exterior del fuste
D_int_fuste = 10.6; % m, diametro interior (t_wall=0.70 m)

DLC(1).nombre = 'DLC 6.1 (tormenta 50 anios, -8 Td2, gobernante)';
DLC(1).M_Ed = 1090.58; % MN*m
DLC(1).Fz_Ed = 11.254; % MN

DLC(2).nombre = 'DLC 5.1 (parada de emergencia, Vr, flexion
inversa)';
DLC(2).M_Ed = 349.89;
```

```

DLC(2).Fz_Ed    = 11.254;

nCasos = numel(DLC);

W_fuste_lastre = 69.80;    % MN, caracteristico (hormigon+lastre del
fuste)
gamma_fav = 0.90;

c_nom = 0.075; phi_bar_losa = 0.032;
fck = 35.0; fyk = 500.0; gamma_c = 1.5; gamma_s = 1.15;
fcd = fck/gamma_c; fyd = fyk/gamma_s;
fctm = 0.30*fck^(2/3);
rho_min_losa = max(0.26*fctm/fyk, 0.0013);

gamma_hormigon = 25.0; gamma_agua_mar = 10.05;
gamma_sub = (gamma_hormigon-gamma_agua_mar)/1000;    % MN/m3

A_total = pi/4*D^2;
I_total = pi/64*D^4;

fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' COMPROBACIONES EC2 -- LOSA DE CIMENTACION Y FUSTE HUECO,
D=%.1f m, D_fuste=%.1f/%.1f m (ext/int)\\n', D, D_fuste,
D_int_fuste);
fprintf('=====
=====\\n\\n');

N_Ed_fuste = DLC(1).Fz_Ed + gamma_fav*W_fuste_lastre;
fprintf('N_Ed,fuste = Fz_Ed + gamma_fav*W_fuste+lastre = %.3f +
%.2f*%.2f = %.2f MN (igual en ambos DLC)\\n\\n', ...
        DLC(1).Fz_Ed, gamma_fav, W_fuste_lastre, N_Ed_fuste);

%% -----
--
% 2. PUNZONAMIENTO (EC2 6.4) Y CORTANTE DE VIGA ANCHA (EC2 6.2)
% -----
--

fprintf('=== PUNZONAMIENTO + CORTANTE: busqueda del canto
(rho=rho_min_losa) ===\\n');
h_vec = 3.00:0.25:5.00;
for i = 1:numel(h_vec)
    [ok, ~] = comprobar_punz_cortante(D, D_fuste, h_vec(i),
rho_min_losa, DLC, N_Ed_fuste, ...
                                fck, gamma_c, gamma_fav,
gamma_sub, A_total, I_total, false);
    fprintf(' h=%.2f m -> %s\\n', h_vec(i), texto_ok(ok));

```

```

end
fprintf('\n');

%% -----
--
% 3. FLEXION PROPIA DE LA LOSA (placa circular axisimetrica, 2
zonas)
% -----
--
fprintf('=== FLEXION PROPIA DE LA LOSA ===\n');
a = D_fuste/2; R = D/2;
M_Ed_losa = M_Ed_losa_gobernante(D, D_fuste, DLC, N_Ed_fuste,
A_total);
fprintf('M_Ed,losa (gobernante, independiente de h) = %.2f
MN*m/m\n\n', M_Ed_losa);

fprintf('%8s %8s %10s %10s %8s\n', 'h_losa', 'd_losa', 'rho_nec',
'As cm2/m', 'x/d');
h_test = [3.00 3.25 3.50 3.75 4.00];
rho_h = zeros(size(h_test));
for i = 1:numel(h_test)
    d_losa = h_test(i)-c_nom-phi_bar_losa;
    [rho_nec, As, xd] = rho_necesaria_flexion(M_Ed_losa, d_losa,
fcd, fyd);
    rho_h(i) = rho_nec;
    fprintf('%8.2f %8.3f %9.3f%% %10.1f %8.3f\n', h_test(i),
d_losa, rho_nec*100, As*1e4, xd);
end
fprintf('\n-> la flexion de la losa es mas exigente que
punzonamiento/cortante (rho_min ya bastaba\n');
fprintf('    alli para h>=3.53 m). Esta comprobacion gobierna el
canto.\n\n');

%% -----
--
% 4. CANTO Y CUANTIA ADOPTADOS
% -----
--
h_losa = 4.00;    % m, ADOPTADO
d_losa = h_losa - c_nom - phi_bar_losa;
[rho_losa, As_losa, xd_losa] = rho_necesaria_flexion(M_Ed_losa,
d_losa, fcd, fyd);
fprintf('=== ADOPTADO: h_losa=%.2f m, rho_losa=%.3f%% (As=%.1f
cm2/m, x/d=%.3f) ===\n', ...
    h_losa, rho_losa*100, As_losa*1e4, xd_losa);
for phi_mm = [32 40]
    As_barra = pi/4*(phi_mm/1000)^2*1e4;
    sep_lcapa = As_barra/(As_losa*1e4)*1000;

```

```

    fprintf(' phi%dm: separacion 1 capa=%.0f mm | 2 capas (mitad
de As cada una)=%.0f mm\n', ...
        phi_mm, sep_1capa, sep_1capa*2);
end
fprintf('\n');
[ok_final, det_final] = comprobar_punz_cortante(D, D_fuste, h_losa,
rho_losa, DLC, N_Ed_fuste, ...

                                                fck, gamma_c,
gamma_fav, gamma_sub, A_total, I_total, true);
fprintf('\n-> Con h=%.2f m y rho=%.3f%%: %s
(punzonamiento+cortante, con la cuantia de flexion,\n', ...
        h_losa, rho_losa*100, texto_ok(ok_final));
fprintf(' que es mayor que rho_min y por tanto solo mejora esos
margenes)\n\n');

%% -----
--
% 5. FLEXO-COMPRESION DEL FUSTE HUECO (metodo de fibras, seccion
anular)
% -----
--
fprintf('=== FLEXO-COMPRESION DEL FUSTE (seccion ANULAR, EC2 6.1)
===\n');
phi_estribo_fuste = 0.016; phi_bar_fuste = 0.032;
Es = 200000; eps_c2 = 0.0020; eps_cu2 = 0.0035;

R_ext = D_fuste/2; R_int = D_int_fuste/2;
r_s_ext = R_ext - c_nom - phi_estribo_fuste - phi_bar_fuste/2;
r_s_int = R_int + c_nom + phi_estribo_fuste + phi_bar_fuste/2;
Ac_fuste = pi/4*(D_fuste^2-D_int_fuste^2);
fprintf('D_ext=%.1f m D_int=%.1f m Ac=%.2f m2 r_s_ext=%.3f m
r_s_int=%.3f m\n', ...
        D_fuste, D_int_fuste, Ac_fuste, r_s_ext, r_s_int);

As_min_EC2 = max(0.10*N_Ed_fuste/fyd, 0.002*Ac_fuste);
fprintf('As_min EC2 9.5.2(2) = %.1f cm2\n', As_min_EC2*1e4);

n_strips = 800; n1 = 900; n2 = 400; nbins = 300;
MARGEN = 1.05;
n0 = ceil(As_min_EC2/2/(pi/4*phi_bar_fuste^2));
if mod(n0,2)~=0, n0 = n0+1; end
n_bar = max(n0, 8);
cumple_todo = false;
while ~cumple_todo
    [resultados, As_tot] = diagrama_NM_anular(D_fuste, D_int_fuste,
r_s_ext, r_s_int, n_bar, n_bar, ...

                                                phi_bar_fuste, fcd,
fyd, Es, eps_c2, eps_cu2, n_strips, n1, n2);

```

```

    cumple_todo = (As_tot >= As_min_EC2);
    MRd_list = zeros(1,nCasos);
    for k = 1:nCasos
        MRd_list(k) = MRd_envolvente(resultados, N_Ed_fuste,
nbins);
        if MRd_list(k) < MARGEN*DLC(k).M_Ed
            cumple_todo = false;
        end
    end
    if ~cumple_todo
        n_bar = n_bar + 2;
    end
    if n_bar > 2000
        error('FusteHueco:noConverge', 'No converge en 2000
barras/capa');
    end
end
rho_fuste = As_tot/Ac_fuste;
fprintf('\n-> %d barras phi%.0fmm por capa (2 capas, %d barras en
total)\n', n_bar, phi_bar_fuste*1000, 2*n_bar);
fprintf('    As_tot=%.1f cm2    rho=%.3f%%\n', As_tot*1e4,
rho_fuste*100);
fprintf('    separacion capa exterior = %.0f mm    capa interior =
%.0f mm\n', ...
        2*pi*r_s_ext/n_bar*1000, 2*pi*r_s_int/n_bar*1000);
for k = 1:nCasos
    fprintf('    %s: M_Rd=%.1f MN*m    M_Ed=%.1f MN*m    FS=%.3f ->
%s\n', ...
            DLC(k).nombre, MRd_list(k), DLC(k).M_Ed,
MRd_list(k)/DLC(k).M_Ed, texto_ok(MRd_list(k)>=DLC(k).M_Ed));
end
fprintf('\n');

%% -----
--
% 6. FATIGA (EXENCION SIMPLIFICADA, EC2 6.8.7(2), DLC 1.1, SECCION
% ANULAR, CON CORRECCION DELTA-MORISON)
% -----
--
% El momento caracteristico del DLC 1.1 (V=30 m/s, Hs=6.813 m,
% Tp=11.09 s) esta calculado por Bladed con el mismo cilindro
esbelto
% D_torre que en el resto del proyecto: se le anade la misma
correccion
% incremental de Morison por el ancho real del fuste, antes de
aplicar
% el criterio de exencion.

```

```
fprintf('== FATIGA (exencion EC2 6.8.7(2), DLC1.1, seccion anular,
con Delta-Morison) ==\n');
M_max_fat = 122.0; M_min_fat = -34.0; Fz_fat = 8.3;
Hs_fat = 6.813; Tp_fat = 11.09;

Pfat.z_base = -50.0; Pfat.SWL_ext = 3.6; Pfat.z_trans = -1.4;
Pfat.z_top = 11.6;
Pfat.D_fuste = D_fuste; Pfat.D_torre = 5.91; Pfat.d_agua =
Pfat.SWL_ext - Pfat.z_base;
Pfat.rho_agua = 1.025; Pfat.g = 9.81; Pfat.Cd = 0.70; Pfat.Cm =
2.00;

r_fat = delta_morison(Hs_fat, Tp_fat, Pfat);
fprintf('delta_morison: k=%.5f 1/m L=%.1f m d/L=%.3f
theta_crit=%.1f grados Delta_M=%.2f MN*m\n', ...
        r_fat.k, r_fat.L_onda, Pfat.d_agua/r_fat.L_onda,
        rad2deg(r_fat.theta_crit), r_fat.dM);

M_max_corr = M_max_fat + r_fat.dM;
M_min_corr = M_min_fat - r_fat.dM;
fprintf('M_max: %.1f -> %.2f MN*m M_min: %.1f -> %.2f MN*m
(correccion Delta-Morison incluida)\n', ...
        M_max_fat, M_max_corr, M_min_fat, M_min_corr);

W_fuste_anular = pi/32*(D_fuste^4-D_int_fuste^4)/D_fuste;
k1_fat = 0.85; beta_cc = 1.0;
fcd_fat = k1_fat*beta_cc*fcd*(1-fck/250);
sigma_max = Fz_fat/Ac_fuste + M_max_corr/W_fuste_anular;
sigma_min = max(Fz_fat/Ac_fuste + M_min_corr/W_fuste_anular, 0);
Ecd_max = sigma_max/fcd_fat; Ecd_min = sigma_min/fcd_fat;
criterio = Ecd_max + 0.43*sqrt(max(1-Ecd_min,0));
fprintf('A_fuste=%.2f m2 W_fuste=%.2f m3\n', Ac_fuste,
W_fuste_anular);
fprintf('sigma_max=%.1f kPa sigma_min=%.1f kPa criterio=%.4f
(<=1) -> %s (margen %.1f%%)\n\n', ...
        sigma_max*1000, sigma_min*1000, criterio, ...
        merge_texto(criterio<=1, 'EXENTO', 'REQUIERE VERIFICACION
DETALLADA'), (1-criterio)*100);

%% -----
--
% 7. RESUMEN
% -----
--

fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' RESUMEN\\n');
```

```
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' Losa: D=%.1f m h=%.2f m\\n', D, h_losa);
fprintf(' rho_losa=%.3f%% (gobierna flexion; punzonamiento
y cortante quedan con margen)\\n', rho_losa*100);
fprintf(' Fuste: D_ext=%.1f/D_int=%.1f m (pared 0.70 m), %d+%d =
%d barras phi%.0fmm (rho=%.3f%%)\\n', ...
D_fuste, D_int_fuste, n_bar, n_bar, 2*n_bar,
phi_bar_fuste*1000, rho_fuste*100);
fprintf(' Fatiga (DLC1.1, con Delta-Morison): %s (margen
%.1f%%)\\n', ...
merge_texto(criterio<=1, 'EXENTO', 'REQUIERE VERIFICACION
DETALLADA'), (1-criterio)*100);

%%
=====
=====
% FUNCIONES LOCALES
%
=====
=====
function M_Ed_losa = M_Ed_losa_gobernante(D, D_fuste, DLC,
N_Ed_fuste, A_total)
a = D_fuste/2; R = D/2;
W_total = pi/32*D^3;
nu = 0.20;
vals = zeros(1, numel(DLC));
for k = 1:numel(DLC)
q2 = N_Ed_fuste/A_total + DLC(k).M_Ed/W_total;
q1 = q2*(1-(R/a)^2);
sol = resolver_placa(a, R, q1, q2, 1.0, nu);
r_scan = linspace(0.01, R-0.001, 3000);
[Mr_s, Mt_s] = Mr_Mtheta(sol, r_scan, nu);
vals(k) = max(max(abs(Mr_s)), max(abs(Mt_s)));
end
M_Ed_losa = max(vals);
end

function sol = resolver_placa(a, R, q1, q2, Dp, nu)
B4 = (q1-q2)*a^2/(8*Dp);
M = zeros(3,3); rhs = zeros(3,1);
M(1,:) = [2*a, -2*a, -1/a];
rhs(1) = (q2-q1)*a^3/(16*Dp) + B4*(2*a*log(a)+a);
M(2,:) = [-2*Dp*(1+nu), 2*Dp*(1+nu), -Dp*(1-nu)/a^2];
rhs(2) = (q1-q2)*a^2*(3+nu)/16 - Dp*B4*(2*(1+nu)*log(a)+3+nu);
M(3,:) = [0, -2*Dp*(1+nu), Dp*(1-nu)/R^2];
rhs(3) = q2*R^2*(3+nu)/16 + Dp*B4*(2*(1+nu)*log(R)+3+nu);
```

```

    sol_vec = M\rhs;
    sol =
struct('A2',sol_vec(1),'B2',sol_vec(2),'B3',sol_vec(3),'B4',B4,'Dp'
,Dp,'a',a,'R',R,'q1',q1,'q2',q2);
end

function [Mr, Mt] = Mr_Mtheta(sol, r, nu)
    a=sol.a; q1=sol.q1; q2=sol.q2; Dp=sol.Dp;
    A2=sol.A2; B2=sol.B2; B3=sol.B3; B4=sol.B4;
    Mr = zeros(size(r)); Mt = zeros(size(r));
    inner = r<=a; outer = ~inner;
    Mr(inner) = -2*Dp*A2*(1+nu) - q1*r(inner).^2*(3+nu)/16;
    Mt(inner) = -2*Dp*A2*(1+nu) - q1*r(inner).^2*(1+3*nu)/16;
    ro = r(outer);
    Mr(outer) = -2*Dp*B2*(1+nu) + Dp*B3*(1-nu)./ro.^2 -
Dp*B4*(2*(1+nu)*log(ro)+3+nu) - q2*ro.^2*(3+nu)/16;
    Mt(outer) = -2*Dp*B2*(1+nu) - Dp*B3*(1-nu)./ro.^2 -
Dp*B4*(2*(1+nu)*log(ro)+1+3*nu) - q2*ro.^2*(1+3*nu)/16;
end

function [rho, As, xd] = rho_necesaria_flexion(M_Ed, d, fcd, fyd)
% Búsqueda por escaneo: para cuantías muy altas, M_Rd(rho) deja de
ser
% monotona (pasado el punto balanceado) y puede haber dos cruces
con
% M_Ed -- se toma el primero (rama ascendente, menor cuantía, mas
% ductil), que es el físicamente adecuado.
    rhos = linspace(0.0003, 0.20, 20000);
    for i = 1:numel(rhos)
        [MRd, As_i, x_i] = M_Rd_losa(rhos(i), d, fcd, fyd);
        if MRd >= M_Ed
            rho = rhos(i); As = As_i; xd = x_i/d;
            return;
        end
    end
    error('rho_necesaria_flexion:noConverge', 'Ni con rho=20%% se
alcanza M_Ed=%.1f', M_Ed);
end

function [MRd, As, x] = M_Rd_losa(rho, d, fcd, fyd)
    As = rho*1.0*d;
    x = As*fyd/(0.8*1.0*fcd);
    MRd = As*fyd*(d-0.4*x);
end

function [ok, detalle] = comprobar_punz_cortante(D, D_fuste,
h_losa, rho_l, DLC, N_Ed_fuste, ...

```

```

fck, gamma_c,
gamma_fav, gamma_sub, A_total, I_total, verbose)
    c_nom = 0.075; phi_bar_losa = 0.032;
    d_losa = h_losa - c_nom - phi_bar_losa;
    ok = true;
    detalle = struct([]);
    for k = 1:numel(DLC)
        Wc_losa = (pi/4)*D^2*h_losa*gamma_sub;
        N_total_Ed = N_Ed_fuste + gamma_fav*Wc_losa;
        rp = punzonamiento(D_fuste, d_losa, rho_l, fck, gamma_c,
N_Ed_fuste, DLC(k).M_Ed, N_total_Ed, A_total);
        rc = cortante_viga(D_fuste, D, d_losa, rho_l, fck, gamma_c,
N_total_Ed, DLC(k).M_Ed, A_total, I_total, ...
            gamma_fav, gamma_sub, h_losa);
        if ~rp.cumple || ~rc.cumple
            ok = false;
        end
        if verbose
            fprintf('  %s:\n', DLC(k).nombre);
            fprintf('    Punzonamiento: v_Ed=%.1f kPa  v_Rd,c=%.1f
kPa -> %s\n', ...
                rp.v_Ed*1000, rp.v_Rd_c*1000,
texto_ok(rp.cumple));
            fprintf('    Cortante:      V_Ed=%.2f MN  V_Rd,c=%.2f
MN  FS=%.3f -> %s\n', ...
                rc.V_beam, rc.V_Rd_c_total, rc.FS,
texto_ok(rc.cumple));
        end
    end
end

function r = punzonamiento(D_fuste, d, rho_l, fck, gamma_c,
N_Ed_fuste, M_Ed, N_total_Ed, A_total)
    r_c = (D_fuste+4*d)/2;
    A_control = pi*r_c^2;
    ul = pi*(D_fuste+4*d);
    DeltaV = N_total_Ed*(A_control/A_total);
    V_Ed_net = N_Ed_fuste - DeltaV;
    d_mm = d*1000;
    k = min(1+sqrt(200/d_mm), 2.0);
    CRd_c = 0.18/gamma_c;
    v_min = 0.035*k^1.5*sqrt(fck);
    v_Rd_c = max(CRd_c*k*(100*rho_l*fck)^(1/3), v_min);
    if V_Ed_net <= 0
        r = struct('v_Ed',0,'v_Rd_c',v_Rd_c,'cumple',true);
        return;
    end
    e_punch = M_Ed/N_Ed_fuste;

```

```

    beta = 1+0.6*pi*e_punch/(D_fuste+4*d);
    v_Ed = beta*V_Ed_net/(u1*d);
    r = struct('v_Ed',v_Ed,'v_Rd_c',v_Rd_c,'cumple',v_Ed<=v_Rd_c);
end

function r = cortante_viga(D_fuste, D_slab, d, rho_l, fck, gamma_c,
N_total_Ed, M_Ed, A_total, I_total, gamma_fav, gamma_sub, h)
    R = D_slab/2;
    x_crit = D_fuste/2+d;
    qnet = @(x) (N_total_Ed/A_total + (M_Ed/I_total).*x) -
gamma_fav*gamma_sub*h;
    integrand = @(x) qnet(x).*2.*sqrt(max(R^2-x.^2,0));
    V_beam = integral(integrand, x_crit, R);
    L_chord = 2*sqrt(max(R^2-x_crit^2,0));
    d_mm = d*1000;
    k = min(1+sqrt(200/d_mm), 2.0);
    CRd_c = 0.18/gamma_c;
    v_min = 0.035*k^1.5*sqrt(fck);
    v_Rd_c = max(CRd_c*k*(100*rho_l*fck)^(1/3), v_min);
    V_Rd_c_total = v_Rd_c*d*L_chord;
    r =
struct('V_beam',V_beam,'V_Rd_c_total',V_Rd_c_total,'cumple',V_beam<
=V_Rd_c_total,'FS',V_Rd_c_total/V_beam);
end

function sigma = sigma_concrete(eps, fcd, eps_c2)
    sigma = zeros(size(eps));
    m1 = (eps>=0) & (eps<=eps_c2);
    sigma(m1) = fcd*(1-(1-eps(m1)/eps_c2).^2);
    sigma(eps>eps_c2) = fcd;
end

function sigma = sigma_steel(eps, fyd, Es)
    sigma = max(min(Es*eps, fyd), -fyd);
end

function [resultados, As_tot] = diagrama_NM_anular(D_ext, D_int,
r_s_ext, r_s_int, n_bar_ext, n_bar_int, ...
phi_bar, fcd,
fyd, Es, eps_c2, eps_cu2, n_strips, n1, n2)
% Metodo de fibras para seccion ANULAR con 2 capas de armadura.
    R_ext = D_ext/2; R_int = D_int/2;
    theta_ext = 2*pi*(0:n_bar_ext-1)/n_bar_ext;
    theta_int = 2*pi*(0:n_bar_int-1)/n_bar_int;
    y_bar = [r_s_ext*cos(theta_ext), r_s_int*cos(theta_int)]';
    As_bar1 = pi/4*phi_bar^2;
    As_bar_vec = [repmat(As_bar1,n_bar_ext,1);
repmat(As_bar1,n_bar_int,1)];

```

```

h_sec = 2*R_ext;
s_bar = h_sec/2 - y_bar;

s_edges = linspace(0, h_sec, n_strips+1)';
s_mid = 0.5*(s_edges(1:end-1)+s_edges(2:end));
ds = s_edges(2)-s_edges(1);
y_mid = h_sec/2 - s_mid;

w_ext = 2*sqrt(max(R_ext^2-y_mid.^2, 0));
w_int = 2*sqrt(max(R_int^2-y_mid.^2, 0));
w_ring = w_ext - w_int;
dA = w_ring*ds;

bar_idx = min(max(discretize(s_bar, s_edges), 1), n_strips);
steel_per_strip = accumarray(bar_idx, As_bar_vec,
[n_strips,1]);
dA_net = max(dA-steel_per_strip, 0);

s_C = (1-eps_c2/eps_cu2)*h_sec;
res = zeros(n1+n2, 2);
idx = 1;
for c_na = linspace(0.005*h_sec, h_sec, n1)
    eps_s = eps_cu2*(c_na-s_mid)/c_na;
    eps_b = eps_cu2*(c_na-s_bar)/c_na;
    sc = sigma_concrete(eps_s, fcd, eps_c2);
    ss = sigma_steel(eps_b, fyd, Es);
    N = sum(sc.*dA_net) + sum(ss.*As_bar_vec);
    M = sum(sc.*dA_net.*y_mid) + sum(ss.*As_bar_vec.*y_bar);
    res(idx,:) = [N, M]; idx = idx+1;
end
for eps_top5 = linspace(eps_cu2, eps_c2, n2)
    eps_s = eps_c2 + (eps_top5-eps_c2)*(s_C-s_mid)/s_C;
    eps_b = eps_c2 + (eps_top5-eps_c2)*(s_C-s_bar)/s_C;
    sc = sigma_concrete(eps_s, fcd, eps_c2);
    ss = sigma_steel(eps_b, fyd, Es);
    N = sum(sc.*dA_net) + sum(ss.*As_bar_vec);
    M = sum(sc.*dA_net.*y_mid) + sum(ss.*As_bar_vec.*y_bar);
    res(idx,:) = [N, M]; idx = idx+1;
end
resultados = res;
As_tot = sum(As_bar_vec);
end

function MRd = MRd_envolvente(res, Nq, nbins)
    N = res(:,1); M = abs(res(:,2));
    Nmin = min(N); Nmax = max(N);
    if Nq <= Nmin || Nq >= Nmax

```

```

        MRd = 0.0;
        return;
    end
    edges = linspace(Nmin, Nmax, nbins+1);
    idx = min(max(discretize(N, edges), 1), nbins);
    Mbin = -inf(nbins,1);
    for i = 1:numel(N)
        if M(i) > Mbin(idx(i))
            Mbin(idx(i)) = M(i);
        end
    end
    centers = 0.5*(edges(1:end-1)+edges(2:end));
    valid = isfinite(Mbin');
    MRd = interp1(centers(valid), Mbin(valid)', Nq);
end

function Dz = D_ext_fuste(z, P)
    if z <= P.z_trans
        Dz = P.D_fuste;
    else
        Dz = P.D_fuste - (P.D_fuste-P.D_torre)*(z-
P.z_trans)/(P.z_top-P.z_trans);
    end
end

function k = resolver_numero_onda(T, d, g)
    omega = 2*pi/T; k = omega^2/g;
    for it = 1:100
        fk = g*k*tanh(k*d) - omega^2;
        dfk = g*tanh(k*d) + g*k*d*(1-tanh(k*d)^2);
        k_new = k - fk/dfk;
        if abs(k_new-k) < 1e-12, k = k_new; return; end
        k = k_new;
    end
    error('resolver_numero_onda:noConverge','no convergio');
end

function r = delta_morison(H_ola, T_ola, P)
% Correccion incremental de Morison (ver apartado de
predimensionado de
% la losa): integra hasta la cresta de la ola (SWL_ext+H/2), barre
la
% fase theta y devuelve el maximo de |Delta M|.
    n_theta = 360; n_z = 400;
    k = resolver_numero_onda(T_ola, P.d_agua, P.g);
    z_crest = P.SWL_ext + H_ola/2;
    z_vals = linspace(P.z_base, z_crest, n_z);
    Dz = arrayfun(@(z) D_ext_fuste(z, P), z_vals);

```

```

coshkzd = cosh(k*(z_vals+P.d_agua));
sinhkd = sinh(k*P.d_agua);
thetas = linspace(0, 2*pi, n_theta+1); thetas(end) = [];
dM_theta = zeros(1,n_theta);
for i = 1:n_theta
    th = thetas(i);
    u = (pi*H_ola/T_ola)*(coshkzd/sinhkd)*cos(th);
    a = (2*pi^2*H_ola/T_ola^2)*(coshkzd/sinhkd)*sin(th);
    dF = 0.5*P.rho_agua*P.Cd*(Dz-P.D_torre).*u.*abs(u) +
P.rho_agua*P.Cm*(pi/4)*(Dz.^2-P.D_torre^2).*a;
    dM_theta(i) = trapz(z_vals, dF.*(z_vals-P.z_base))/1000;
end
[dM_max, i_crit] = max(abs(dM_theta));
r =
struct('k',k,'L_onda',2*pi/k,'theta_crit',thetas(i_crit),'dM',sign(
dM_theta(i_crit))*dM_max);
end

function out = texto_ok(cond)
    if cond, out = 'CUMPLE'; else, out = 'NO CUMPLE'; end
end

function out = merge_texto(cond, txt_true, txt_false)
    if cond, out = txt_true; else, out = txt_false; end
end

```

Código 3: Comprobaciones Eurocódigo 2, 2ª parte

```
%%
=====
=====
% COMPROBACIONES EC2 -- DETALLES CONSTRUCTIVOS DE LA LOSA Y EL
FUSTE
%
% Con la geometria y armadura principal ya fijadas (apartado
anterior),
% se resuelven aqui tres comprobaciones de detalle: el recorte
% (curtailment) de la armadura de flexion de la losa hacia el
borde
% exterior; el empalme por solape entre la armadura vertical del
fuste
% y la losa (esperas, EC2 8.7); y la comprobacion de la pared del
fuste
% frente a la presion hidrostatica exterior y el empuje horizontal
del
% lastre interior (compresion y traccion de anillo).
%
% TFG: Cimentacion y estructura soporte de hormigon para
aerogenerador
% marino -- Anejo de calculo.
%%
=====
=====
clear; clc; close all;

%% -----
--
% 1. DATOS DE PARTIDA (diseno adoptado en el apartado anterior)
% -----
--
D = 53.5; D_fuste = 12.0; D_int_fuste = 10.6; t_wall = 0.70;
h_losa = 4.00;
c_nom = 0.075; phi_bar_losa = 0.032;
d_losa = h_losa - c_nom - phi_bar_losa;

DLC(1).nombre = 'DLC 6.1 (tormenta 50 anios, -8 Td2, gobernante)';
DLC(1).M_Ed = 1090.58;
DLC(2).nombre = 'DLC 5.1 (parada emergencia, Vr, flexion inversa)';
DLC(2).M_Ed = 349.89;
nCasos = numel(DLC);

W_fuste_lastre = 69.80; gamma_fav = 0.90; Fz_Ed = 11.254;
N_Ed_fuste = Fz_Ed + gamma_fav*W_fuste_lastre; % = 74.07 MN,
igual para ambos DLC
```

```
fck = 35.0; fyk = 500.0; gamma_c = 1.5; gamma_s = 1.15;
fcd = fck/gamma_c; fyd = fyk/gamma_s;
fctm = 0.30*fck^(2/3); fctk005 = 0.7*fctm; fctd =
1.0*fctk005/gamma_c;

a_fuste = D_fuste/2; R_losa = D/2;
A_total = pi/4*D^2; W_total = pi/32*D^3;

M_Ed_losa = M_Ed_losa_gobernante(D, D_fuste, DLC, N_Ed_fuste,
A_total);
[rho_losa, As_losa, xd_losa] = rho_necesaria_flexion(M_Ed_losa,
d_losa, fcd, fyd);

fprintf('=====\n');
fprintf(' COMPROBACIONES EC2 -- DETALLES CONSTRUCTIVOS DE LA LOSA Y
EL FUSTE\n');
fprintf('=====\n');
fprintf('Losa adoptada: D=%.1f m h=%.2f m rho=%.3f%% (As=%.1f
cm2/m) M_Ed_losa=%.2f MN*m/m\n\n', ...
D, h_losa, rho_losa*100, As_losa*1e4, M_Ed_losa);

%% -----
--
% 2. CURTAILMENT DE LA ARMADURA DE LA LOSA
% -----
--
% El momento decrece con el radio pero, por ser un borde libre
(Mr(R)=0
% pero Mtheta(R) no), nunca llega a anularse del todo: se busca el
radio
% donde la envolvente cae a la capacidad de rho_min_losa, y desde
ahi al
% borde basta esa cuantia minima. El punto de corte real de las
barras se
% situa ademas una distancia al=d (EC2 9.2.1.3, regla del
desplazamiento,
% valida sin armadura de cortante especifica) mas lbd (EC2 8.4,
anclaje)
% mas alla de ese radio teorico.
fprintf('=== CURTAILMENT DE LA ARMADURA DE LA LOSA ===\n');
rho_min_losa = max(0.26*fctm/fyk, 0.0013);
[MRd_min, As_min, ~] = M_Rd_losa(rho_min_losa, d_losa, fcd, fyd);
fprintf('rho_min_losa=%.4f%% As_min=%.1f cm2/m M_Rd(rho_min)=%.3f
MN*m/m\n', ...
rho_min_losa*100, As_min*1e4, MRd_min);
```

```
[r_scan, M_env] = envolvente_momentos(D, h_losa, DLC, D_fuste,
N_Ed_fuste, A_total, 20000);
M_en_borde = M_env(end);
fprintf('Envolvente en r=R=%.2f m (borde libre, Mr=0 pero Mtheta
no): %.2f MN*m/m -> rho_min %s\n', ...
    R_losa, M_en_borde, texto_ok(MRd_min>=M_en_borde));

idx = find(M_env <= MRd_min, 1, 'first');
r1 = r_scan(idx);
fprintf('Radio teorico r1 (envolvente = M_Rd(rho_min)) = %.3f m\n',
r1);

phi_losa_mm = 32;
sep_losa_mm = (pi/4*(phi_losa_mm/1000)^2*1e4)/(As_losa*1e4)*1000;
lb_buena = lbd_calc(phi_losa_mm, c_nom*1000, sep_losa_mm, 1.0,
fctd, fyd);
lb_mala = lbd_calc(phi_losa_mm, c_nom*1000, sep_losa_mm, 0.7,
fctd, fyd);
al = d_losa;
r_corte_buena = r1 + al + lb_buena.lbd;
r_corte_mala = r1 + al + lb_mala.lbd;
fprintf('lbd (adherencia buena/mala) = %.3f / %.3f m    al=d=%.3f
m\n', lb_buena.lbd, lb_mala.lbd, al);
fprintf('Radio de corte real (buena/mala adherencia) = %.2f / %.2f
m    (borde en R=%.2f m, margen %.2f/%.2f m)\n', ...
    r_corte_buena, r_corte_mala, R_losa, R_losa-r_corte_buena,
R_losa-r_corte_mala);
fprintf(['-> armadura completa (rho=%.3f%%, phi%dmm@%.0fmm) de r=0
a r~%.2f m; ' ...
    'armadura minima (rho=%.4f%%) de ahi al borde R=%.2f
m.\n\n'], ...
    rho_losa*100, phi_losa_mm, sep_losa_mm, r_corte_mala,
rho_min_losa*100, R_losa);

%% -----
--
% 3. ESPERAS LOSA-FUSTE (EMPALME POR SOLAPE, EC2 8.7)
% -----
--
% La excentricidad en la base del fuste es enorme frente al tamaño
de la
% sección (e=M_Ed/N_Ed=14.7 m frente a R_ext=6.0 m): un cálculo
elástico
% sin fisurar ya da tracción muy por encima de fctm en la fibra
extrema,
% confirmando (igual que el método de fibras del apartado anterior)
que
```

```
% las barras del lado traccionado trabajan a fyd en ELU -- el
solape debe
% dimensionarse a traccion completa.
fprintf('=== ESPERAS LOSA-FUSTE (solape a traccion, EC2 8.7)
===\n');
R_ext = D_fuste/2; R_int = D_int_fuste/2;
Ac_fuste = pi/4*(D_fuste^2-D_int_fuste^2);
W_fuste_anular = pi/32*(D_fuste^4-D_int_fuste^4)/D_fuste;
sigma_elastica = N_Ed_fuste/Ac_fuste - DLC(1).M_Ed/W_fuste_anular;
fprintf('sigma elastica extrema = N/A-M/W = %.2f MPa
(|.|>>fctm=%.2f MPa) -> seccion fisurada, solape a fyd\n', ...
        sigma_elastica, fctm);

phi_bar_fuste = 0.032; sep_ext_mm = 167.0; sep_int_mm = 153.0;
lb_ext = lbd_calc(phi_bar_fuste*1000, c_nom*1000, sep_ext_mm, 1.0,
fctd, fyd);
lb_int = lbd_calc(phi_bar_fuste*1000, c_nom*1000, sep_int_mm, 1.0,
fctd, fyd);
lbd_gob = max(lb_ext.lbd, lb_int.lbd);
alpha6_esc = 1.4; alpha6_cota = 1.5;
l0_esc = max(alpha6_esc*lbd_gob,
max([0.3*alpha6_esc*max(lb_ext.lbrqd,lb_int.lbrqd),
15*phi_bar_fuste, 0.200]));
l0_cota = max(alpha6_cota*lbd_gob,
max([0.3*alpha6_cota*max(lb_ext.lbrqd,lb_int.lbrqd),
15*phi_bar_fuste, 0.200]));
fprintf('lbd (capas ext/int) = %.3f / %.3f m\n', lb_ext.lbd,
lb_int.lbd);
fprintf('l0 (escalonado, alpha6=1.4) = %.3f m   l0 (cota superior,
alpha6=1.5) = %.3f m\n', l0_esc, l0_cota);
margen_disponible = h_losa - 2*(c_nom+phi_bar_losa);    % hueco
libre entre las dos parrillas de la losa
fprintf('Canto libre disponible (entre parrillas sup./inf. de la
loso) = %.3f m -> %s (FS=%.2f frente a l0 cota superior)\n\n', ...
        margen_disponible, texto_ok(l0_cota<margen_disponible),
margen_disponible/l0_cota);

%% -----
--
% 4. PARED DEL FUSTE FRENTE A PRESION HIDROSTATICA Y EMPUJE DEL
LASTRE
% (ANILLO, EC2)
% -----
--
% Se comprueban dos escenarios: (A) compresion maxima de anillo por
la
% presion hidrostatica exterior (cota superior conservadora, ignora
```

```
% cualquier contrapresion del lastre); (B) traccion neta de anillo
por el
% empuje horizontal del lastre saturado, con el coeficiente de
empuje al
% reposo  $K_0 = 1 - \sin(\phi')$  (formula de Jaky) y el mismo angulo de
rozamiento
%  $\phi' = 36$  grados de la arena del lecho marino ya empleado en las
% comprobaciones geotecnicas de la losa.
fprintf('=== PARED DEL FUSTE FRENTE A PRESION HIDROSTATICA Y EMPUJE
DEL LASTRE (ANILLO, EC2) ===\n');
r_medio = (R_ext+R_int)/2;
z_base = -50.0; z_trans = -1.4; SWL_ext = 3.6;
d_agua = SWL_ext - z_base; h_lastre = z_trans - z_base;
gamma_agua_mar = 10.05; gamma_lastre_sat = 21.0; gamma_lastre_sub =
gamma_lastre_sat-gamma_agua_mar;
gamma_unfav = 1.35;
fprintf('r_medio=%.3f m r_medio/t_wall=%.2f (>>1: no gobierna
pandeo de lamina, solo resistencia)\n', ...
        r_medio, r_medio/t_wall);

% Escenario A: compresion maxima (presion hidrostatica exterior)
p_ext_k = gamma_agua_mar*d_agua; p_ext_Ed = gamma_unfav*p_ext_k;
N_hoop_compresion = p_ext_Ed*r_medio; % kPa*m = kN/m
sigma_compresion = N_hoop_compresion/t_wall; % kPa
FS_compresion = fcd/(sigma_compresion/1000);
fprintf('(A) Compresion: p_ext,Ed=%.1f kPa sigma_hoop=%.3f MPa
fcd=%.2f MPa FS=%.2f -> %s\n', ...
        p_ext_Ed, sigma_compresion/1000, fcd, FS_compresion,
texto_ok(FS_compresion>=1));

% Escenario B: traccion neta por empuje del lastre,  $K_0$  de Jaky con
 $\phi' = 36$  grados
phi_lastre = 36;
K0 = 1-sind(phi_lastre);
[p_Ed, sigma_traccion, As_hoop_nec] = escenario_B_hoop(K0,
gamma_lastre_sub, h_lastre, gamma_unfav, r_medio, t_wall, fyd);
fprintf('(B) Traccion ( $K_0 = 1 - \sin(\phi)$ )=%.4f, arena del lecho marino):
p_neta,Ed=%.1f kPa sigma_hoop=%.3f MPa fctd=%.3f MPa -> %s\n',
...
        phi_lastre, K0, p_Ed, sigma_traccion, fctd,
merge_texto(sigma_traccion>fctd, ...
        'fisura, hace falta armadura', 'no fisura'));

As_v_total = 3570.9; % cm2, 444 barras phi32mm verticales del
fuste (apartado anterior)
As_v_por_metro = As_v_total/(2*pi*r_medio);
As_h_min = max(0.25*As_v_por_metro, 0.001*t_wall*1e4);
As_hoop_dis = max(As_hoop_nec, As_h_min);
```

```
fprintf('As_hoop necesaria (ELU) = %.1f cm2/m; minimo EC2 9.6.3 =
%.1f cm2/m -> gobierna %s (%.1f cm2/m)\n', ...
    As_hoop_nec, As_h_min, merge_texto(As_hoop_nec>As_h_min, 'la
demanda', 'el minimo EC2'), As_hoop_dis);
for phi_mm = [20 25]
    As_barra = pi/4*(phi_mm/1000)^2*1e4;
    sep_cara = As_barra/(As_hoop_dis/2)*1000;
    fprintf(' phi%dmm, 2 caras: separacion por cara = %.0f mm\n',
phi_mm, sep_cara);
end
fprintf('\n');

%% -----
--
% 5. RESUMEN
% -----
--
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' RESUMEN\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf('Curtailment: armadura completa hasta r~%.1f m, minima
(rho=%.3f%%) desde ahi hasta el borde.\\n', ...
    r_corte_mala, rho_min_losa*100);
fprintf('Esperas: solape recto de %.2f m (phi32mm, escalonado),
sobra frente a h_losa=%.2f m.\\n', l0_cota, h_losa);
fprintf('Pared del fuste: a compresion sobra (FS=%.1f); a traccion
(K0=%.3f) requiere armadura de\\n', ...
    FS_compresion, K0);
fprintf(' anillo, %.1f cm2/m (p.ej. phi20mm cada %.0f mm por
cara).\\n', As_hoop_dis, ...
    (pi/4*0.020^2*1e4)/(As_hoop_dis/2)*1000);

%%
=====
=====
% FUNCIONES LOCALES
%
=====
=====
function M_Ed_losa = M_Ed_losa_gobernante(D, D_fuste, DLC,
N_Ed_fuste, A_total)
    a = D_fuste/2; R = D/2; W_total = pi/32*D^3; nu = 0.20;
    vals = zeros(1, numel(DLC));
    for k = 1:numel(DLC)
        q2 = N_Ed_fuste/A_total + DLC(k).M_Ed/W_total;
```

```

    q1 = q2*(1-(R/a)^2);
    sol = resolver_placa(a, R, q1, q2, 1.0, nu);
    r_scan = linspace(0.01, R-0.001, 3000);
    [Mr_s, Mt_s] = Mr_Mtheta(sol, r_scan, nu);
    vals(k) = max(max(abs(Mr_s)), max(abs(Mt_s)));
end
M_Ed_losa = max(vals);
end

function [r_scan, M_env] = envolvente_momentos(D, h_losa, DLC,
D_fuste, N_Ed_fuste, A_total, n)
    a = D_fuste/2; R = D/2; W_total = pi/32*D^3; nu = 0.20;
    r_scan = linspace(0.001, R-0.0001, n);
    Mr_max = zeros(1,n); Mt_max = zeros(1,n);
    for k = 1:numel(DLC)
        q2 = N_Ed_fuste/A_total + DLC(k).M_Ed/W_total;
        q1 = q2*(1-(R/a)^2);
        sol = resolver_placa(a, R, q1, q2, 1.0, nu);
        [Mr_s, Mt_s] = Mr_Mtheta(sol, r_scan, nu);
        Mr_max = max(Mr_max, abs(Mr_s));
        Mt_max = max(Mt_max, abs(Mt_s));
    end
    M_env = max(Mr_max, Mt_max);
end

function sol = resolver_placa(a, R, q1, q2, Dp, nu)
    B4 = (q1-q2)*a^2/(8*Dp);
    M = zeros(3,3); rhs = zeros(3,1);
    M(1,:) = [2*a, -2*a, -1/a];
    rhs(1) = (q2-q1)*a^3/(16*Dp) + B4*(2*a*log(a)+a);
    M(2,:) = [-2*Dp*(1+nu), 2*Dp*(1+nu), -Dp*(1-nu)/a^2];
    rhs(2) = (q1-q2)*a^2*(3+nu)/16 - Dp*B4*(2*(1+nu)*log(a)+3+nu);
    M(3,:) = [0, -2*Dp*(1+nu), Dp*(1-nu)/R^2];
    rhs(3) = q2*R^2*(3+nu)/16 + Dp*B4*(2*(1+nu)*log(R)+3+nu);
    sol_vec = M\rhs;
    sol =
    struct('A2',sol_vec(1),'B2',sol_vec(2),'B3',sol_vec(3),'B4',B4,'Dp'
,Dp,'a',a,'R',R,'q1',q1,'q2',q2);
end

function [Mr, Mt] = Mr_Mtheta(sol, r, nu)
    a=sol.a; R=sol.R; q1=sol.q1; q2=sol.q2; Dp=sol.Dp;
    A2=sol.A2; B2=sol.B2; B3=sol.B3; B4=sol.B4;
    Mr = zeros(size(r)); Mt = zeros(size(r));
    inner = r<=a; outer = ~inner;
    Mr(inner) = -2*Dp*A2*(1+nu) - q1*r(inner).^2*(3+nu)/16;
    Mt(inner) = -2*Dp*A2*(1+nu) - q1*r(inner).^2*(1+3*nu)/16;
    ro = r(outer);

```

```

Mr(outer) = -2*Dp*B2*(1+nu) + Dp*B3*(1-nu)./ro.^2 -
Dp*B4*(2*(1+nu)*log(ro)+3+nu) - q2*ro.^2*(3+nu)/16;
Mt(outer) = -2*Dp*B2*(1+nu) - Dp*B3*(1-nu)./ro.^2 -
Dp*B4*(2*(1+nu)*log(ro)+1+3*nu) - q2*ro.^2*(1+3*nu)/16;
end

function [MRd, As, x] = M_Rd_losa(rho, d, fcd, fyd)
    As = rho*1.0*d;
    x = As*fyd/(0.8*1.0*fcd);
    MRd = As*fyd*(d-0.4*x);
end

function [rho, As, xd] = rho_necesaria_flexion(M_Ed, d, fcd, fyd)
% Escaneo denso (M_Rd(rho) no es monotona mas alla del punto
balanceado);
% se toma la primera solucion (rama ascendente, menor cuantia, mas
ductil).
    rhos = linspace(0.0003, 0.20, 20000);
    for i = 1:numel(rhos)
        [MRd, As_i, x_i] = M_Rd_losa(rhos(i), d, fcd, fyd);
        if MRd >= M_Ed
            rho = rhos(i); As = As_i; xd = x_i/d;
            return;
        end
    end
    error('rho_necesaria_flexion:noConverge', 'Ni con rho=20%% se
alcanza M_Ed=%.1f', M_Ed);
end

function r = lbd_calc(phi_mm, cover_mm, spacing_mm, eta1, fctd,
fyd)
% EC2 8.4.4, longitud de anclaje de calculo.
alpha1=alpha3=alpha4=alpha5=1
% (sin credito por gancho, confinamiento, barras soldadas ni
presion
% transversal -- hipotesis simple y conservadora).
    phi = phi_mm/1000;
    sigma_sd = fyd;
    if phi_mm <= 32, eta2 = 1.0; else, eta2 = (132-phi_mm)/100; end
    fbd = 2.25*eta1*eta2*fctd;
    lbrqd = (phi/4)*(sigma_sd/fbd);
    cd = min(cover_mm, spacing_mm/2)/1000;
    alpha2 = min(max(1-0.15*(cd-phi)/phi, 0.7), 1.0);
    lbd = max(alpha2*lbrqd, max([0.3*lbrqd, 10*phi, 0.100]));
    r = struct('fbd',fbd,'lbrqd',lbrqd,'alpha2',alpha2,'lbd',lbd);
end

```

```
function [p_Ed, sigma, As_nec] = escenario_B_hoop(K0,
gamma_lastre_sub, h_lastre, gamma_unfav, r_medio, t_wall, fyd)
    p_k = K0*gamma_lastre_sub*h_lastre;
    p_Ed = gamma_unfav*p_k;
    N_hoop = p_Ed*r_medio;          % kN/m
    sigma = N_hoop/t_wall/1000;    % MPa
    As_nec = (N_hoop/1000)/fyd*1e4; % cm2/m
end

function out = texto_ok(cond)
    if cond, out = 'CUMPLE'; else, out = 'NO CUMPLE'; end
end

function out = merge_texto(cond, txt_true, txt_false)
    if cond, out = txt_true; else, out = txt_false; end
end
```

Código 4: Comprobaciones Eurocódigo 2, 3ª parte

```
%%
=====
=====
%  COMPROBACIONES EC2 -- INTERFAZ A CORTANTE LOSA-FUSTE Y FATIGA
ESPECTRAL
%
%  Se completan aqui dos comprobaciones del fuste: la transmision
de
%  cortante horizontal en la junta fria losa-fuste (EC2 6.2.5), y
una
%  verificacion de fatiga mas exigente que la exencion simplificada
del
%  apartado anterior, extendiendo la correccion Delta-Morison a los
5
%  estados de mar representativos disponibles (DLC 1.1) y estimando
el
%  dano acumulado con la regla de Miner.
%
%  LIMITACION: un analisis espectral de fatiga riguroso (recuento
%  rainflow sobre una serie temporal continua de decadas) no se
%  reproduce
%  duran 60 s, y solo se dispone de un maximo/minimo puntual por
%  velocidad de viento, no de un historial de tensiones. Se realiza
por
%  ello lo maximo defendible con esos datos: el criterio de
exencion EC2
%  6.8.7(2) aplicado a los 5 estados de mar, y una estimacion
secundaria
%  tipo Miner con una curva S-N de hormigon de la bibliografia
%  (CEB-FIP/Model Code), presentada con confianza reducida al no
haberse
%  podido contrastar letra a letra con el texto oficial de la
norma. La
%  fatiga del acero pasivo (EC2 6.8.4) queda fuera del alcance de
este
%  TFG, al requerir el brazo de palanca de la seccion fisurada en
%  servicio.
%
%  TFG: Cimentacion y estructura soporte de hormigon para
aerogenerador
%  marino -- Anejo de calculo.
%%
=====
=====
clear; clc; close all;
```

```

%% -----
--
% 1. DATOS DE PARTIDA
% -----
--
D_fuste = 12.0; D_int_fuste = 10.6; t_wall = 0.70;
R_ext = D_fuste/2; R_int = D_int_fuste/2;
Ac_fuste = pi/4*(D_fuste^2-D_int_fuste^2);
W_fuste_anular = pi/32*(D_fuste^4-D_int_fuste^4)/D_fuste;
r_medio = (R_ext+R_int)/2;

N_Ed_fuste = 74.07; % MN
As_v_total_cm2 = 3570.9; % cm2, 444 barras phi32mm
verticales del fuste, prolongadas como esperas

fck = 35.0; fyk = 500.0; gamma_c = 1.5; gamma_s = 1.15;
fcd = fck/gamma_c; fyd = fyk/gamma_s;
fctm = 0.30*fck^(2/3); fctk005 = 0.7*fctm; fctd =
1.0*fctk005/gamma_c;
nu_ec2 = 0.6*(1-fck/250);

z_base = -50.0; z_trans = -1.4; SWL_ext = 3.6;
d_agua = SWL_ext-z_base; h_lastre = z_trans-z_base;
gamma_agua_mar = 10.05; gamma_lastre_sat = 21.0; gamma_lastre_sub =
gamma_lastre_sat-gamma_agua_mar;
gamma_unfav = 1.35;

k1_fat = 0.85; beta_cc = 1.0;
fcd_fat = k1_fat*beta_cc*fcd*(1-fck/250);

fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' COMPROBACIONES EC2 -- INTERFAZ A CORTANTE LOSA-FUSTE Y
FATIGA ESPECTRAL\\n');
fprintf('=====
=====\\n\\n');

%% -----
--
% 2. INTERFAZ A CORTANTE, JUNTA FRIA LOSA-FUSTE (EC2 6.2.5)
% -----
--
% Adaptacion de v_Edi=beta*V_Ed/(z*b_i) (formato viga/2D) a esta
geometria
% axisimetrica: v_Edi=H_Ed/Ac_fuste (toda la fuerza horizontal
cruza esta
% unica interfaz; Ac_fuste es el area de contacto real, el lastre
no

```

```
% transmite cortante por continuidad de material). El resto es
literal de
% EC2 6.2.5.
fprintf('=== INTERFAZ A CORTANTE, JUNTA FRIA LOSA-FUSTE (EC2 6.2.5)
===\n');
rho_interfase = As_v_total_cm2*1e-4/Ac_fuste;
sigma_n = N_Ed_fuste/Ac_fuste;
H_Ed_61 = 17.512; H_Ed_51 = 5.447; % MN
fprintf('Ac_fuste=%.2f m2 rho=%.3f%% sigma_n=%.3f MPa\n',
Ac_fuste, rho_interfase*100, sigma_n);

acabados = {'muy lisa', 0.025, 0.5; 'lisa', 0.20, 0.6; 'rugosa',
0.40, 0.7; 'indentada', 0.50, 0.9};
vRdi = zeros(size(acabados,1),1);
for i = 1:size(acabados,1)
    c = acabados{i,2}; mu = acabados{i,3};
    raw = c*fctd + mu*sigma_n + rho_interfase*fyd*mu; % alpha=90
    grados: sin(90)=1, cos(90)=0
    cap = 0.5*nu_ec2*fcd;
    vRdi(i) = min(raw, cap);
    fprintf(' %10s: c=%.3f mu=%.2f v_Rdi_bruto=%.3f MPa
tope=%.3f MPa v_Rdi=%.3f MPa\n', ...
        acabados{i,1}, c, mu, raw, cap, vRdi(i));
end
v_Rdi_dis = vRdi(3); % rugosa, acabado de diseno adoptado
v_Edi_61 = H_Ed_61/Ac_fuste; v_Edi_51 = H_Ed_51/Ac_fuste;
fprintf('\nDLC 6.1: v_Edi=%.1f kPa v_Rdi(rugosa)=%.1f kPa FS=%.2f
-> %s\n', ...
    v_Edi_61*1000, v_Rdi_dis*1000, v_Rdi_dis/v_Edi_61,
texto_ok(v_Edi_61<=v_Rdi_dis));
fprintf('DLC 5.1: v_Edi=%.1f kPa v_Rdi(rugosa)=%.1f kPa FS=%.2f -
> %s\n', ...
    v_Edi_51*1000, v_Rdi_dis*1000, v_Rdi_dis/v_Edi_51,
texto_ok(v_Edi_51<=v_Rdi_dis));
fprintf('Incluso con acabado muy liso, v_Rdi=%.1f kPa sigue
superando el v_Edi mas exigente (%.1f kPa):\n', ...
    vRdi(1)*1000, v_Edi_61*1000);
fprintf('conclusion robusta frente al acabado superficial (gran
sigma_n y cuantia ya dispuesta).\n\n');

%% -----
--
% 3. FATIGA ESPECTRAL (5 ESTADOS DE MAR + REGLA DE MINER)
% -----
--
fprintf('=== FATIGA ESPECTRAL (5 estados de mar, DLC1.1) ===\n');
V = [8.57, 10, 17, 24, 30];
Hs = [0.924, 1.258, 3.636, 5.451, 6.813];
```

```

Tp = [4.296, 5.013, 8.523, 10.14, 11.09];
Mmin= [24.6, 31.3, -1.0, 26.6, -34.0];
Mmax= [74.2, 99.5, 94.3, 73.3, 122.0];
Fz_fat = 8.3;
nBins = numel(V);

P.z_base=z_base; P.SWL_ext=SWL_ext; P.z_trans=z_trans;
P.z_top=11.6;
P.D_fuste=D_fuste; P.D_torre=5.91; P.d_agua=d_agua;
P.rho_agua=1.025; P.g=9.81; P.Cd=0.70; P.Cm=2.00;

dM = zeros(1,nBins); dL = zeros(1,nBins); Mmax_c = zeros(1,nBins);
Mmin_c = zeros(1,nBins);
criterio = zeros(1,nBins);
fprintf('%6s%8s%8s%8s%9s%11s%11s%10s\n','V','Hs','Tp','d/L','DeltaM',
'Mmax_c','Mmin_c','criterio');
for i = 1:nBins
    r = delta_morison(Hs(i), Tp(i), P);
    dM(i) = r.dM; dL(i) = P.d_agua/r.L_onda;
    Mmax_c(i) = Mmax(i)+r.dM; Mmin_c(i) = Mmin(i)-r.dM;
    [~,~,~,~,criterio(i)] = criterio_fatiga(Mmax_c(i), Mmin_c(i),
Fz_fat, Ac_fuste, W_fuste_anular, fcd_fat);
    fprintf('%6.2f%8.3f%8.3f%8.3f%9.2f%11.2f%11.2f%10.4f\n', V(i),
Hs(i), Tp(i), dL(i), dM(i), ...
        Mmax_c(i), Mmin_c(i), criterio(i));
end
[crit_gob, i_gob] = max(criterio);
fprintf('\nBin gobernante: V=%0f m/s, criterio=%.4f -> %s\n\n',
V(i_gob), crit_gob, texto_ok(crit_gob<=1));

% --- Estimacion secundaria: regla de Miner (confianza reducida,
ver cabecera) ---
fprintf('--- Estimacion secundaria: regla de Miner (confianza
reducida) ---\n');
T_vida_anios = 20; T_vida_s = T_vida_anios*365.25*24*3600;
Vave = 8.57; Vin = 3.5; Vout = 30.0;
edges = [Vin, 0.5*(V(1:end-1)+V(2:end)), Vout];
fprintf('T_vida=%d anios (%.3e s) Vave=%.2f m/s (Rayleigh,
IEC61400-1 por defecto)\n', ...
        T_vida_anios, T_vida_s, Vave);

D_total = 0;
fprintf('%6s%9s%9s%15s%14s%13s\n','V','Scmax','Scmin','log10(Nfallo)
','n_i','D_i=n_i/N_i');
for i = 1:nBins
    P_i = F_rayleigh(edges(i+1),Vave) - F_rayleigh(edges(i),Vave);
    n_i = P_i*T_vida_s/Tp(i);

```

```
[smax,smin,~,~,~] = criterio_fatiga(Mmax_c(i), Mmin_c(i),
Fz_fat, Ac_fuste, W_fuste_anular, fcd_fat);
Scmax = smax/fcd_fat; Scmin = smin/fcd_fat;
Nfallo = N_fallo_hormigon(Scmax, Scmin);
Di = n_i/Nfallo;
D_total = D_total + Di;
fprintf('%6.2f%9.3f%9.3f%15.2f%14.3e%13.3e\n', V(i), Scmax,
Scmin, log10(Nfallo), n_i, Di);
end
fprintf('\nDano total de Miner, D=suma(n_i/N_i) = %.4e -> %s
(margen %.1f%% de vida util admisible)\n\n', ...
D_total, texto_ok(D_total<1), (1-D_total)*100);
fprintf('Fatiga del acero pasivo (EC2 6.8.4) fuera del alcance de
este TFG (ver cabecera).\n\n');

%% -----
--
% 4. RESUMEN
% -----
--
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' RESUMEN\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf('Interfaz losa-fuste: CUMPLE con margen amplio (FS>=%.1f),
acabado rugoso adoptado.\\n', ...
min(v_Rdi_dis/v_Edi_61, v_Rdi_dis/v_Edi_51));
fprintf('Fatiga espectral (5 estados de mar): el bin V=30 m/s
gobierna (criterio=%.3f, EXENTO).\\n', crit_gob);
fprintf('Estimacion de Miner: dano=%.1e sobre 20 anios (margen
amplio).\\n', D_total);

%%
=====
=====
% FUNCIONES LOCALES
%
=====
=====
function k = resolver_numero_onda(T, d, g)
omega = 2*pi/T; k = omega^2/g;
for it = 1:100
fk = g*k*tanh(k*d) - omega^2;
dfk = g*tanh(k*d) + g*k*d*(1-tanh(k*d)^2);
k_new = k - fk/dfk;
if abs(k_new-k) < 1e-12, k = k_new; return; end
```

```

        k = k_new;
    end
    error('resolver_numero_onda:noConverge','no convergio');
end

function Dz = D_ext_fuste(z, P)
    Dz = zeros(size(z));
    m1 = z <= P.z_trans;
    Dz(m1) = P.D_fuste;
    Dz(~m1) = P.D_fuste - (P.D_fuste-P.D_torre).*(z(~m1)-
P.z_trans)/(P.z_top-P.z_trans);
end

function r = delta_morison(H_ola, T_ola, P)
    n_theta = 360; n_z = 400;
    k = resolver_numero_onda(T_ola, P.d_agua, P.g);
    z_crest = P.SWL_ext + H_ola/2;
    z_vals = linspace(P.z_base, z_crest, n_z);
    Dz = D_ext_fuste(z_vals, P);
    coshkzd = cosh(k*(z_vals+P.d_agua));
    sinhkd = sinh(k*P.d_agua);
    thetas = linspace(0, 2*pi, n_theta+1); thetas(end) = [];
    dM_theta = zeros(1,n_theta);
    for i = 1:n_theta
        th = thetas(i);
        u = (pi*H_ola/T_ola)*(coshkzd/sinhkd)*cos(th);
        a = (2*pi^2*H_ola/T_ola^2)*(coshkzd/sinhkd)*sin(th);
        dF = 0.5*P.rho_agua*P.Cd*(Dz-P.D_torre).*u.*abs(u) +
P.rho_agua*P.Cm*(pi/4)*(Dz.^2-P.D_torre^2).*a;
        dM_theta(i) = trapz(z_vals, dF.*(z_vals-P.z_base))/1000;
    end
    [dM_max, i_crit] = max(abs(dM_theta));
    r =
struct('k',k,'L_onda',2*pi/k,'theta_crit',thetas(i_crit),'dM',sign(
dM_theta(i_crit))*dM_max);
end

function [smax, smin, Ecd_max, Ecd_min, crit] =
criterio_fatiga(Mmax, Mmin, Fz, Ac, W, fcd_fat)
    smax = Fz/Ac + Mmax/W;
    smin = max(Fz/Ac + Mmin/W, 0);
    Ecd_max = smax/fcd_fat;
    Ecd_min = smin/fcd_fat;
    crit = Ecd_max + 0.43*sqrt(max(1-Ecd_min,0));
end

function F = F_rayleigh(v, Vave)
    F = 1-exp(-(pi/4)*(v/Vave)^2);

```

end

```
function N = N_fallo_hormigon(Scmax, Scmin)
    if Scmax >= 1
        N = 0; return;
    end
    if Scmin >= Scmax, Scmin = 0.0; end
    if Scmin >= 1
        N = 0; return;
    end
    log10N = 12*(1-Scmax)/(1-Scmin);
    N = 10^log10N;
end
```

```
function out = texto_ok(cond)
    if cond, out = 'CUMPLE'; else, out = 'NO CUMPLE'; end
end
```

```
function out = merge_texto(cond, txt_true, txt_false)
    if cond, out = txt_true; else, out = txt_false; end
end
```

Código 5: Diseño transición superior

```
%%
=====
=====
% TRANSICION SUPERIOR DEL FUSTE -- PREDIMENSIONADO DEL CANTO DE LA
LOSA
% DE CORONACION POR PUNZONAMIENTO (EC2 6.4)
%
% MODELO: verificada en el apartado de geometria del cono que la
% transicion troncoconica es tendida (theta=13.18 grados, dentro
del
% rango 5-15), el mecanismo dominante de transferencia de carga a
lo
% largo del cono es de membrana/lamina (compresion meridional y de
% anillo), no de flexion de placa: un cono hueco de pared
constante que
% se estrecha suavemente no genera un "punzonamiento" en su
desarrollo,
% igual que un fuste cilindrico no lo genera. El punto donde si
aparece
% un problema de punzonamiento/aplastamiento local es la conexion
con la
% torre de acero: la pared del tubo (y el anillo embebido que la
recibe)
% introducen una reaccion concentrada en una huella mucho menor
que la
% seccion de hormigon disponible.
%
% Por ello, la losa de coronacion se modela como un tapon macizo
de
% hormigon que ocupa el tramo superior del cono, desde la
coronacion
% hacia abajo una altura h (el canto a determinar). Por debajo de
esa
% altura, el fuste vuelve a ser hueco y lastrado. Se emplea la
geometria
% real del cono (que ensancha al descender desde la coronacion)
para el
% perimetro de control de punzonamiento, en vez de fijar
arbitrariamente
% un disco plano del diametro de la torre.
%
% TFG: Cimentacion y estructura soporte de hormigon para
aerogenerador
% marino -- Anejo de calculo.
```

```
%%
=====
=====
clear; clc; close all;

fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' TRANSICION SUPERIOR DEL FUSTE -- PREDIMENSIONADO DE LA
LOSA DE CORONACION (PUNZONAMIENTO EC2 6.4)\\n');
fprintf('=====
=====\\n\\n');

%% -----
--
% 1. DATOS DE PARTIDA
% -----
--
D_torre = 5.91; D_bot_cono = 12.0; H_cono = 13.0;
N_Ed = 11.254;

fck = 35.0; fyk = 500.0; gamma_c = 1.5; gamma_s = 1.15;
fcd = fck/gamma_c; fyd = fyk/gamma_s;
fctm = 0.30*fck^(2/3);
rho_min = max(0.26*fctm/fyk, 0.0013);
nu_ec2 = 0.6*(1-fck/250);
c_nom = 0.075; phi_bar = 0.032;

D_carga = 4.00;

fprintf('D_torre=%.2f m   D_bot_cono=%.1f m   H_cono=%.1f m\\n',
D_torre, D_bot_cono, H_cono);
fprintf('N_Ed (Fz_Ed, RNA+torre) = %.3f MN   (identico en DLC 6.1 y
DLC 5.1)\\n', N_Ed);
fprintf('D_carga (anillo, hipotesis de predimensionado) = %.2f
m\\n\\n', D_carga);

%% -----
--
% 2. BARRIDO DE CANTO h (perimetro de control u1, rho=rho_min)
% -----
--
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf(' BARRIDO DE CANTO h (perimetro de control u1,
rho=rho_min)\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
```

```
fprintf('%7s%8s%13s%15s%13s%7s    u0 (aplastamiento)\n', 'h (m)', 'd
(m)', 'D_local (m)', ...
        'v_Ed,u1 (kPa)', 'v_Rd,c (kPa)', 'FS');
hs = [0.80, 1.00, 1.20, 1.273, 1.50, 1.60, 1.70, 1.80, 2.00];
for i = 1:numel(hs)
    r = punzonamiento(hs(i), D_carga, rho_min, N_Ed, D_torre,
D_bot_cono, H_cono, c_nom, phi_bar, ...
                    gamma_c, fck, nu_ec2, fcd);
    fs = r.v_Rd_c/r.v_Ed_u1;
    fs_u0 = r.v_Rd_max/r.v_Ed_u0;
    fprintf('%7.3f%8.3f%13.3f%15.1f%13.1f%7.3f    v_Ed=%7.1f kPa
v_Rd,max=%7.1f kPa    FS=%.2f\n', ...
            hs(i), r.d, r.Dloc, r.v_Ed_u1*1000, r.v_Rd_c*1000, fs,
r.v_Ed_u0*1000, r.v_Rd_max*1000, fs_u0);
end

f_h = @(h) diferencia_vRdc(h, D_carga, rho_min, N_Ed, D_torre,
D_bot_cono, H_cono, c_nom, phi_bar, ...
                    gamma_c, fck, nu_ec2, fcd);
h_min = fzero(f_h, [0.9, 2.5]);
fprintf('\nh_min (perimetro u1 = v_Rd,c exactamente) = %.3f m\n',
h_min);

%% -----
--
% 3. CANTO ADOPTADO: h = 1.80 m
% -----
--
h_dis = 1.80;
r_dis = punzonamiento(h_dis, D_carga, rho_min, N_Ed, D_torre,
D_bot_cono, H_cono, c_nom, phi_bar, ...
                    gamma_c, fck, nu_ec2, fcd);
FS_u1 = r_dis.v_Rd_c/r_dis.v_Ed_u1;
FS_u0 = r_dis.v_Rd_max/r_dis.v_Ed_u0;
fprintf('\n=====
=====\\n');
fprintf(' CANTO ADOPTADO: h = %.2f m    (FS=%.2f frente al minimo
estricto %.3f m,\\n', h_dis, FS_u1, h_min);
fprintf(' margen reservado para la excentricidad/momento en la
coronacion que no se ha podido acotar)\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf('d = %.3f m    D_local (base del tapon) = %.3f m\\n',
r_dis.d, r_dis.Dloc);
fprintf('Perimetro u1: v_Ed=%.1f kPa    v_Rd,c=%.1f kPa    FS=%.2f -
> %s\\n', ...
        r_dis.v_Ed_u1*1000, r_dis.v_Rd_c*1000, FS_u1,
texto_ok(r_dis.ok_u1));
```

```
fprintf('Aplastamiento u0: v_Ed=%.1f kPa    v_Rd,max=%.1f kPa
FS=%.2f  -> %s (margen amplio, no gobierna)\n', ...
        r_dis.v_Ed_u0*1000, r_dis.v_Rd_max*1000, FS_u0,
texto_ok(r_dis.ok_u0));
fprintf('\nEl diseno admite un margen equivalente a beta<=%.2f
antes de dejar de cumplir el perimetro u1,\n', FS_u1);
fprintf('es decir, soporta cierta excentricidad moderada sin fallar
aunque no se haya cuantificado el\n');
fprintf('M_Ed real en la coronacion con los datos aqui
disponibles.\n');

%% -----
--
% 4. SENSIBILIDAD A D_carga (hipotesis del anillo)
% -----
--

fprintf('\n=====
=====\\n');
fprintf(' SENSIBILIDAD: h_min necesario segun la hipotesis de
D_carga (anillo)\n');
fprintf('=====
=====\\n');
Dcs = [3.0, 3.5, 4.0, 4.5];
for i = 1:numel(Dcs)
    f_hd = @(h) diferencia_vRdc(h, Dcs(i), rho_min, N_Ed, D_torre,
D_bot_cono, H_cono, c_nom, phi_bar, ...
                                gamma_c, fck, nu_ec2, fcd);
    hm = fzero(f_hd, [0.9, 3.0]);
    fprintf(' D_carga=%.1f m -> h_min=%.3f m\\n', Dcs(i), hm);
end
fprintf('El canto adoptado, h=%.2f m, cubre con margen incluso la
hipotesis mas conservadora,\n', h_dis);
fprintf('D_carga=3.0 m: la conclusion es robusta frente a esta
hipotesis.\n');

%% -----
--
% 5. RESUMEN
% -----
--

fprintf('\n=====
=====\\n');
fprintf(' RESUMEN\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf('- Losa de coronacion: tapon macizo bajo la coronacion,
canto adoptado h=%.2f m (diametro real\\n', h_dis);
```

```
fprintf(' de la base del tapon, %.2f m, de la geometria del
cono).\n', r_dis.Dloc);
fprintf('- Punzonamiento (EC2 6.4): CUMPLE con FS=%.2f en el
perimetro de control u1 (rho_min); el\n', FS_u1);
fprintf(' aplastamiento en u0 no gobierna (FS=%.2f).\n', FS_u0);
fprintf('- Limitaciones: (1) punzonamiento concentrico (beta=1),
sin poder acotar el M_Ed real en la\n');
fprintf(' coronacion con los datos aqui disponibles; (2)
D_carga=4.00 m es una hipotesis de\n');
fprintf(' predimensionado. Ambas se resuelven en el apartado
siguiente con las cargas reales de\n');
fprintf(' Bladed y la geometria fisica del anillo embebido.\n');

%%
=====
=====
% FUNCIONES LOCALES
%
=====
=====
function Dz = D_local_fn(h, D_torre, D_bot_cono, H_cono)
    Dz = D_torre + (D_bot_cono-D_torre)*h/H_cono;
end

function r = punzonamiento(h, D_carga, rho_l, N_Ed, D_torre,
D_bot_cono, H_cono, c_nom, phi_bar, ...
                        gamma_c, fck, nu_ec2, fcd)
    d = h - c_nom - phi_bar/2;
    Dloc = D_local_fn(h, D_torre, D_bot_cono, H_cono);
    u0 = pi*D_carga;
    u1 = pi*(D_carga+4*d);
    v_Ed_u0 = N_Ed/(u0*d);
    v_Ed_u1 = N_Ed/(u1*d);
    d_mm = d*1000;
    k = min(1+sqrt(200/d_mm), 2.0);
    CRd_c = 0.18/gamma_c;
    v_min = 0.035*k^1.5*sqrt(fck);
    v_Rd_c = max(CRd_c*k*(100*rho_l*fck)^(1/3), v_min);
    v_Rd_max = 0.5*nu_ec2*fcd;
    r =
struct('d',d,'Dloc',Dloc,'u0',u0,'u1',u1,'v_Ed_u0',v_Ed_u0,'v_Ed_u1',
v_Ed_u1, ...

'v_Rd_c',v_Rd_c,'v_Rd_max',v_Rd_max,'ok_u1',(v_Ed_u1<=v_Rd_c),'ok_u
0',(v_Ed_u0<=v_Rd_max));
end
```

```
function diff = diferencia_vRdc(h, D_carga, rho_l, N_Ed, D_torre,  
D_bot_cono, H_cono, c_nom, phi_bar, ...  
                                gamma_c, fck, nu_ec2, fcd)  
    r = punzonamiento(h, D_carga, rho_l, N_Ed, D_torre, D_bot_cono,  
H_cono, c_nom, phi_bar, ...  
                                gamma_c, fck, nu_ec2, fcd);  
    diff = r.v_Ed_u1 - r.v_Rd_c;  
end  
  
function out = texto_ok(cond)  
    if cond, out = 'CUMPLE'; else, out = 'NO CUMPLE'; end  
end
```

Código 6: Diseño transición superior, Cargas reales

```
%%
=====
=====
%  DISEÑO DEFINITIVO DE LA TRANSICIÓN SUPERIOR DEL FUSTE
%
%  Losa de coronación, anillo embebido postensado y conexión losa-
fuste,
%  calculados con las cargas de Bladed en la propia sección de la
%  coronación del fuste (z=+11.6 m, base de la torre metálica), en
lugar
%  de las cargas del mudline empleadas para la losa y el fuste
largo.
%
%  Con la geometría física del anillo embebido (ligada a la virola
de la
%  torre), la fuerza de postensado dimensionada por descompresión,
el
%  mecanismo real de transferencia de carga (bielas y tirantes, EC2
6.5)
%  y las armaduras resultantes, se obtiene un diseño cerrado que
sustituye
%  la verificación aproximada de punzonamiento concéntrico del
apartado
%  anterior (plantada con un diámetro de carga
%  hipotético) por el mecanismo que realmente se desarrolla con las
%  cargas y la geometría definitivas.
%
%  CARGAS: Mxy_max=83.94 MN*m, Fxy_max=1.842 MN, obtenidos de las
%  simulaciones aeroelásticas en Bladed para el caso -8 grados Td2
en la
%  sección z=+11.6 m
%
%  TFG: Cimentación y estructura soporte de hormigón para
aerogenerador
%  marino -- Anejo de cálculo.
%%
=====
=====
clear; clc; close all;

%%  -----
--
%  MATERIALES Y GEOMETRÍA
%  -----
--
fck = 35.0; fyk = 500.0; gamma_c = 1.5; gamma_s = 1.15;
```

```
fcd = fck/gamma_c; fyd = fyk/gamma_s;
fctm = 0.30*fck^(2/3);
fctd = 1.0*0.7*fctm/gamma_c;
nu_ec2 = 0.6*(1-fck/250);
nu_prima = 1-fck/250;

D_torre = 5.91; D_bot_cono = 12.0; H_cono = 13.0; t_wall = 0.70;
h_tapon = 1.80;
pend_D = (D_bot_cono-D_torre)/H_cono;

D_base_tapon = D_torre + pend_D*h_tapon;
A_wall_base = pi/4*(D_base_tapon^2-(D_base_tapon-2*t_wall)^2);
r_wall_c = (D_base_tapon-t_wall)/2;

fprintf('=====\n');
fprintf(' TRANSICION SUPERIOR -- DISEÑO DEFINITIVO CON LAS CARGAS
REALES EN LA CORONACION (z=+11.6 m)\n');
fprintf('=====\n');

%% -----
--
% 1. CARGAS EN LA CORONACION DEL FUSTE Y DERIVACION DE Fz
% -----
--

fprintf('\n=====\n');
fprintf(' 1. CARGAS EN LA CORONACION DEL FUSTE (z=+11.6 m, caso -8
grados Td2) Y DERIVACION DE Fz\n');
fprintf('=====\n');

Mxy_max = 83.94;      % MN*m
Fxy_max = 1.842;      % MN
Mz_char = 4.623;      % MN*m (torsor, del bloque del mudline del
mismo caso; constante en altura)
gammaF = 1.35;        % GL2012 Tabla 4.4.6, situacion de carga
Extrema

M_Ed = gammaF*Mxy_max;
H_Ed = gammaF*Fxy_max;
Mz_Ed = gammaF*Mz_char;
fprintf('M_char=Mxy_max=%.2f MN*m    H_char=Fxy_max=%.3f MN
Mz_char=%.3f MN*m\n', Mxy_max, Fxy_max, Mz_char);
fprintf('M_Ed=%.2f MN*m    H_Ed=%.3f MN    Mz_Ed=%.3f MN*m
(gammaF=%.2f)\n', M_Ed, H_Ed, Mz_Ed, gammaF);
```

```
% --- Derivacion de Fz en la coronacion (no incluido en el bloque
de cargas anterior) ---
g = 9.81;
w_torre = 15031.8*g/1e6;           % MN/m (masa lineal de la torre,
modelo Bladed)
Fz_mudline_mean = 8.138;          % MN (valor medio en el mudline,
caso -8 Td2)
Fz_mudline_min = 8.336; Fz_mudline_max = 7.907; % MN (envolvente)
d_agua_sim = 53.6; rho_w_sim = 1027.0; L_torre_bladed = 135.0;
z_corte = 11.6;

B_flot = pi/4*D_torre^2*d_agua_sim*rho_w_sim*g/1e6;
W_torre_total = w_torre*L_torre_bladed;
W_RNA = Fz_mudline_mean + B_flot - W_torre_total;
W_torre_sobre_corte = w_torre*(85.0-z_corte);
Fz_static = W_RNA + W_torre_sobre_corte;

Fz_char_max = Fz_static*(Fz_mudline_min/Fz_mudline_mean);
Fz_char_min = Fz_static*(Fz_mudline_max/Fz_mudline_mean);
fprintf('\nDerivacion de Fz en la coronacion (no incluido en el
bloque de cargas de partida):\n');
fprintf('  w_torre (modelo Bladed) = 15031.8 kg/m = %.5f MN/m
W_torre(-50,+85) = %.2f MN\n', w_torre, W_torre_total);
fprintf('  Flotabilidad del tubo sustituto (d=%.1f m, rho=%.1f
kg/m3): B = %.2f MN\n', d_agua_sim, rho_w_sim, B_flot);
fprintf('  Equilibrio en el mudline (Fz_medio=%.3f MN): W_RNA =
%.3f+%.2f-%.2f = %.2f MN (%.0f t)\n', ...
    Fz_mudline_mean, Fz_mudline_mean, B_flot, W_torre_total,
W_RNA, W_RNA/g*1e3);
fprintf('  Fz en la coronacion (estatico) = W_RNA + w*(85-11.6) =
%.2f+%.2f = %.2f MN\n', W_RNA, W_torre_sobre_corte, Fz_static);
fprintf('  Envolvente dinamica (proporcion del mudline): compresion
max = %.2f MN, min = %.2f MN\n', Fz_char_max, Fz_char_min);
fprintf('  En la coronacion no hay flotabilidad (cota emergida): el
axil real en la conexion es mayor\n');
fprintf('  que el del mudline, donde la flotabilidad del tubo
sustituto enmascara parte del peso.\n');

gamma_fav = 0.90;
N_unfav = gammaF*Fz_char_max;
N_fav = gamma_fav*Fz_char_min;
W_tapon_char =
(pi*h_tapon/3*((D_torre/2)^2+(D_torre/2)*(D_base_tapon/2)+(D_base_t
apon/2)^2))*25.0/1000;
fprintf('\nN_Ed desfavorable = %.2f*%.2f = %.2f MN\n', gammaF,
Fz_char_max, N_unfav);
fprintf('N_Ed favorable      = %.2f*%.2f = %.2f MN\n', gamma_fav,
Fz_char_min, N_fav);
```

```
fprintf('Peso propio del tapon (tronco de cono %.2f->%.2f m, h=%.1f
m, emergido): W_tapon = %.3f MN (caracteristico)\n', ...
    D_torre, D_base_tapon, h_tapon, W_tapon_char);

%% -----
--
% 2. ANILLO EMBEBIDO, POSTENSADO Y APLASTAMIENTO
% -----
--
fprintf('\n=====
=====\\n');
fprintf(' 2. ANILLO EMBEBIDO (GEOMETRIA FISICA), POSTENSADO Y
APLASTAMIENTO\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
e_emb = 0.80; b_anillo = 0.60;
D_ext_an = D_torre;
D_int_an = D_torre - 2*b_anillo;
D_med_an = 0.5*(D_ext_an+D_int_an);
r0 = D_med_an/2;

A0 = pi/4*(D_ext_an^2-D_int_an^2);
I0 = pi/64*(D_ext_an^4-D_int_an^4);
W0 = I0/(D_ext_an/2);
e_lim = W0/A0;
D_local_emb = D_torre + pend_D*e_emb;
recub_ext_brida = D_local_emb/2 - D_ext_an/2;
fprintf('Anillo = virola embebida e_emb=%.1f m + brida interior
b=%.1f m:\\n', e_emb, b_anillo);
fprintf('  D_ext=%.2f m  D_int=%.2f m  D_medio=%.2f m\\n', D_ext_an,
D_int_an, D_med_an);
fprintf('  A0=%.3f m2    W0=%.3f m3    e_lim=W0/A0=%.4f m\\n', A0, W0,
e_lim);
fprintf('  recubrimiento radial exterior de hormigon a la cota de
la brida = %.0f mm\\n', recub_ext_brida*1000);
fprintf('  (el cono ensancha %.3f m de diametro por m de
profundidad: el borde exterior de la brida\\n', pend_D);
fprintf('  queda embebido; en la base del tapon el recubrimiento
sube a %.0f mm)\\n', ...
    (D_base_tapon/2-D_ext_an/2)*1000);

% --- Postensado por descompresion ---
fprintf('\\n--- Postensado vertical (criterio de descompresion,
e=M/(N+P) <= e_lim, cargas ULS) ---\\n');
P_req = M_Ed/e_lim - N_fav;
fprintf('P_req = M_Ed/e_lim - N_fav = %.2f/%.4f - %.2f = %.2f
MN\\n', M_Ed, e_lim, N_fav, P_req);
```

```

Ap_tendon = 2850e-6;
fpk = 1860.0; fp01k = 1674.0;
sigma_pm0 = min(0.75*fpk, 0.85*fp01k);
perdidas_dif = 0.15;
P0_tendon = Ap_tendon*sigma_pm0;
Pinf_tendon = P0_tendon*(1-perdidas_dif);
n_tendones = ceil(P_req/Pinf_tendon);
n_tendones = max(n_tendones, 28);
P_inf = n_tendones*Pinf_tendon;
P_0 = n_tendones*P0_tendon;
sep_tendones = pi*D_med_an/n_tendones;
FS_descomp = (P_inf+N_fav)*e_lim/M_Ed;
fprintf('Tendon 19x0.6" Y1860:
sigma_pm0=min(0.75fpk,0.85fp01k)=%.0f MPa -> P0=%.3f MN/tendon;
perdidas diferidas %.0f%% -> Pinf=%.3f MN/tendon\n', ...
    sigma_pm0, P0_tendon, perdidas_dif*100, Pinf_tendon);
fprintf('n_min = %.2f/%.3f = %.1f -> ADOPTADO n=%d tendones
(separacion %.0f mm sobre el anillo)\n', ...
    P_req, Pinf_tendon, P_req/Pinf_tendon, n_tendones,
    sep_tendones*1000);
fprintf('P_inf = %.2f MN    P_0 = %.2f MN\n', P_inf, P_0);
fprintf('FS descompresion = (P_inf+N_fav)*e_lim/M_Ed =
(%.2f+%.2f)*%.4f/%.2f = %.3f -> %s\n', ...
    P_inf, N_fav, e_lim, M_Ed, FS_descomp,
    texto_ok(FS_descomp>=1));
fprintf('Los tendones se anclan en el anillo y descienden por la
pared del fuste, como en las torres de\n');
fprintf('hormigon postensado reales; su desvio hacia la pared es
autoequilibrado en la zona de desvio\n');
fprintf('(la vaina curva aprieta hacia dentro exactamente lo que la
biela empuja hacia fuera), por lo\n');
fprintf('que no anade demanda al tirante de anillo del apartado
siguiente.\n');

% --- Aplastamiento bajo la brida ---
fprintf('\n--- Aplastamiento del hormigon bajo la brida (presion de
contacto anular, N+M) ---\n');
sigma_max_uls = (N_unfav+P_inf)/A0 + M_Ed/W0;
FS_plain = fcd/sigma_max_uls;
ensanche_ext = (D_base_tapon/2-0.075) - D_ext_an/2;
b1 = b_anillo + 2*ensanche_ext;
ratio_A = b1/b_anillo;
sigma_Rd_67 = min(sqrt(ratio_A), 3.0)*fcd;
FS_67 = sigma_Rd_67/sigma_max_uls;
fprintf('ULS (N_unfav+P_inf, M_Ed): sigma_max = (%.2f+%.2f)/%.3f +
%.2f/%.3f = %.2f MPa\n', ...
    N_unfav, P_inf, A0, M_Ed, W0, sigma_max_uls);

```

```
fprintf(' sin mejora: fcd=%.2f MPa          -> FS=%.3f  %s\n',
fcd, FS_plain, texto_ok(FS_plain>=1));
fprintf(' EC2 6.7 (Ac1/Ac0=%.2f, b1=%.2f m disponible en la base
del tapon): sigma_Rd=%.2f MPa -> FS=%.3f  %s\n', ...
ratio_A, b1, sigma_Rd_67, FS_67, texto_ok(FS_67>=1));

gamma_P_unfav = 1.2;
sigma_transf = (gamma_P_unfav*P_0 + N_fav)/A0;
FS_transf = fcd/sigma_transf;
fprintf('Transferencia (tesado, gamma_P=1.2, sin momento): sigma =
(1.2*%.2f+%.2f)/%.3f = %.2f MPa -> FS=%.3f  %s\n', ...
P_0, N_fav, A0, sigma_transf, FS_transf,
texto_ok(FS_transf>=1));

a_placa = 0.35;
T_burst_ancl = 0.25*gamma_P_unfav*P0_tendon*(1-
a_placa/sep_tendones);
As_burst_ancl = T_burst_ancl/fyd*1e4;
n_cercos12 = ceil(As_burst_ancl/(2*pi/4*1.2^2));
fprintf('Bursting por anclaje (EC2 6.5.3): T =
0.25*1.2*P0_tendon*(1-a/s) = 0.25*1.2*%.2f*(1-%.2f/%.3f) = %.3f
MN\n', ...
P0_tendon, a_placa, sep_tendones, T_burst_ancl);
fprintf(' As = %.1f cm2/anclaje -> %d cercos phi12 de 2 ramas bajo
cada anclaje (%.1f cm2, FS=%.2f)\n', ...
As_burst_ancl, n_cercos12, n_cercos12*2*pi/4*1.2^2,
n_cercos12*2*pi/4*1.2^2/As_burst_ancl);

%% -----
--
% 3. LOSA DE CORONACION: MECANISMO DE BIELAS Y TIRANTES
% -----
--
fprintf('\n=====
=====\\n');
fprintf(' 3. LOSA DE CORONACION: MECANISMO REAL DE TRANSFERENCIA DE
CARGA\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
d_punz = h_tapon - e_emb - 0.075 - 0.025/2;
r_u1 = D_ext_an/2 + 2*d_punz;
fprintf('(a) Punzonamiento EC2 6.4: canto disponible bajo la brida
d = %.3f m ->\\n', d_punz);
fprintf(' radio del perimetro de control u1 = r_brida+2d =
%.3f+2*%.3f = %.3f m\\n', D_ext_an/2, d_punz, r_u1);
fprintf(' frente al radio disponible en la base del tapon = %.3f
m\\n', D_base_tapon/2);
```

```

fprintf('    -> u1 se sale del hormigon (%.2f > %.2f): el cono de
punzonamiento no puede\n', r_u1, D_base_tapon/2);
fprintf('    desarrollarse; la carga baja en biela directa a la
pared del cono (region D).\n');
fprintf('    El chequeo pertinente pasa a ser EC2 6.5 (bielas y
tirantes) mas apoyo (EC2 6.7).\n');

Dz_biela = h_tapon - e_emb;
tan_theta = (r_wall_c - r0)/Dz_biela;
theta_biela = atand(tan_theta);
V_no_pret = N_unfav + gammaF*W_tapon_char;
T_hoop = V_no_pret*tan_theta/(2*pi);
As_hoop = T_hoop/fyd*1e4;
n_zunchos25 = ceil(As_hoop/(pi/4*2.5^2));
n_zunchos25 = max(n_zunchos25, 8);
As_zunchos = n_zunchos25*pi/4*2.5^2;
fprintf('\n(b) Biela: de la brida (r0=%.3f m, cota -%.1f m) a la
pared (r=%.3f m, cota -%.1f m)\n', ...
        r0, e_emb, r_wall_c, h_tapon);
fprintf('    tan(theta) = (%.3f-%.3f)/%.2f = %.4f -> theta = %.1f
grados\n', r_wall_c, r0, Dz_biela, tan_theta, theta_biela);
fprintf('    Tirante de anillo (cargas sin trazado propio,
N_Ed+tapon; el pretensado se autoequilibra\n');
fprintf('    en su desvio): T = V*tan(theta)/(2*pi) =
(%.2f+%.2f)*%.4f/(2*pi) = %.3f MN\n', ...
        N_unfav, gammaF*W_tapon_char, tan_theta, T_hoop);
fprintf('    As = %.1f cm2 -> ADOPTADO %d zunchos phi25 (%.1f cm2,
FS=%.2f) en el fondo del tapon/cabeza de pared\n', ...
        As_hoop, n_zunchos25, As_zunchos, As_zunchos/As_hoop);

V_total = N_unfav + gammaF*W_tapon_char + P_inf;
sigma_wall = V_total/A_wall_base;
sigma_biela = sigma_wall/cosd(theta_biela)^2;
sigma_Rd_max_biela = 0.6*nu_prima*fcd;
fprintf('\n(c) Compresion: V_total (con pretensado) =
%.2f+%.2f+%.2f = %.2f MN\n', ...
        N_unfav, gammaF*W_tapon_char, P_inf, V_total);
fprintf('    Cabeza de pared (A=%.2f m2): sigma_v = %.2f MPa (<
fcd=%.2f, FS=%.2f)\n', ...
        A_wall_base, sigma_wall, fcd, fcd/sigma_wall);
fprintf('    Biela inclinada: sigma = sigma_v/cos^2(theta) = %.2f
MPa vs sigma_Rd,max=0.6*nu''*fcd=%.2f MPa -> FS=%.2f %s\n', ...
        sigma_biela, sigma_Rd_max_biela,
        sigma_Rd_max_biela/sigma_biela,
        texto_ok(sigma_biela<=sigma_Rd_max_biela));

n_linea_max = sigma_max_uls*b_anillo;
T_burst_rad = n_linea_max/4*(1-b_anillo/b1);

```

```

As_burst_rad = T_burst_rad/fyd*1e4;
As_prov_burst = 2*pi/4*2.0^2/0.125;
fprintf('\n(d) Bursting radial bajo la brida: n_max = sigma_max*b =
%.2f*%.1f = %.2f MN/m\n', ...
    sigma_max_uls, b_anillo, n_linea_max);
fprintf('    T = n/4*(1-b/b1) = %.2f/4*(1-%.1f/%.2f) = %.3f
MN/m\n', n_linea_max, b_anillo, b1, T_burst_rad);
fprintf('    As = %.1f cm2/m -> ADOPTADO cercos phi20 de 2 ramas
cada 125 mm (%.1f cm2/m, FS=%.2f), en una banda de ~1 m bajo la
brida\n', ...
    As_burst_rad, As_prov_burst, As_prov_burst/As_burst_rad);

d_parrilla = h_tapon - 0.075 - 0.025/2;
rho_min = max(0.26*fctm/fyk, 0.0013);
As_min_parrilla = rho_min*d_parrilla*1e4;
As_parrilla = (pi/4*2.5^2)/0.170;
fprintf('\n(e) Parrilla general (2 caras, 2 direcciones): minimo
EC2 9.2.1.1 = %.1f cm2/m\n', As_min_parrilla);
fprintf('    ADOPTADO phi25 cada 170 mm = %.1f cm2/m (FS=%.2f)\n',
...
    As_parrilla, As_parrilla/As_min_parrilla);

%% -----
--
% 4. CONEXION LOSA-FUSTE: INTERFAZ Y ESPERAS
% -----
--
fprintf('\n=====
=====\\n');
fprintf(' 4. CONEXION LOSA-FUSTE: INTERFAZ A CORTANTE (EC2 6.2.5) Y
ESPERAS ENTRELAZADAS\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
phi_esp = 25; s_esp = 0.150;
n_esp_cara = round(pi*(D_base_tapon-t_wall)/s_esp);
n_esp = 2*n_esp_cara;
As_esp = n_esp*pi/4*(phi_esp/10)^2;
rho_interfase = As_esp*1e-4/A_wall_base;
As_esp_m = 2*(pi/4*(phi_esp/10)^2)/s_esp;
As_min_muro = 0.002*t_wall*1e4;
fprintf('(a) Esperas phi%d cada %.0f mm en ambas caras de la pared
(t=%.1f m):\\n', phi_esp, s_esp*1000, t_wall);
fprintf('    n = %d/cara -> %d esperas en total    As = %.0f cm2
rho_interfase = %.3f%%\\n', ...
    n_esp_cara, n_esp, As_esp, rho_interfase*100);
fprintf('    (minimo EC2 9.6.2 muros: 0.002*Ac = %.1f cm2/m;
dispuesto = %.1f cm2/m -> FS=%.2f)\\n', ...
    As_min_muro, As_esp_m, As_esp_m/As_min_muro);

```

```

fbd = 2.25*1.0*1.0*fctd;
lb_rqd = (phi_esp/1000/4)*(fyd/fbd);
alpha6 = 1.5;
l0 = alpha6*lb_rqd;
l0_min = max([0.3*alpha6*lb_rqd, 15*phi_esp/1000, 0.200]);
l0_adopt = 1.25;
fprintf('      Solape (EC2 8.7): fbd=2.25*fctd=%.3f MPa
lb,rqd=(phi/4)*(fyd/fbd)=%.0f mm\n', fbd, lb_rqd*1000);
fprintf('      l0 = alpha6*lb,rqd = 1.5*%.0f = %.0f mm (>=
l0,min=%.0f mm) -> ADOPTADO %.0f mm (cabe en el tapon de %.1f
m)\n', ...
      lb_rqd*1000, l0*1000, l0_min*1000, l0_adopt*1000, h_tapon);

v_H = H_Ed/A_wall_base;
A_m = pi*r_wall_c^2;
q_T = Mz_Ed/(2*A_m);
tau_T = q_T/t_wall;
v_Edi = v_H + tau_T;
sigma_n_int = (N_fav + P_inf + gamma_fav*W_tapon_char)/A_wall_base;
sigma_n_int_lim = min(sigma_n_int, 0.6*fcd);
c_rug = 0.40; mu_rug = 0.7;
v_raw = c_rug*fctd + mu_rug*sigma_n_int_lim +
rho_interfase*fyd*mu_rug;
v_cap = 0.5*nu_ec2*fcd;
v_Rdi = min(v_raw, v_cap);
FS_int = v_Rdi/v_Edi;
fprintf('\n(b) Interfaz tapon-pared (junta de hormigonado, acabado
rugoso c=0.40 mu=0.7):\n');
fprintf('      v_Edi = H_Ed/A + Mz_Ed/(2*Am*t) = %.3f/%.2f +
%.3f/(2*%.2f*%.1f) = %.0f+%.0f = %.0f kPa\n', ...
      H_Ed, A_wall_base, Mz_Ed, A_m, t_wall, v_H*1000,
tau_T*1000, v_Edi*1000);
fprintf('      sigma_n = (N_fav+P_inf+0.9*W_tapon)/A = %.2f MPa
(<=0.6fcd=%.1f OK)\n', sigma_n_int, 0.6*fcd);
fprintf('      v_Rdi = min(c*fctd+mu*sigma_n+rho*fyd*mu, 0.5*nu*fcd)
= min(%.2f, %.2f) = %.2f MPa\n', ...
      v_raw, v_cap, v_Rdi);
fprintf('      FS = %.1f -> %s (la compresion del postensado hace
que la junta no sea critica)\n', ...
      FS_int, texto_ok(v_Edi<=v_Rdi));

%% -----
--
% RESUMEN -- PARAMETROS DE DISEÑO DEFINITIVOS
% -----
--

```

```
fprintf('\n=====
=====\\n');
fprintf(' RESUMEN -- PARAMETROS DE DISEÑO DEFINITIVOS (cargas
reales en la coronación, z=+11.6 m)\\n');
fprintf('=====
=====\\n');
fprintf('CARGAS (-8 grados Td2, z=11.6 m): M_Ed=%.1f MN*m
H_Ed=%.2f MN  Mz_Ed=%.2f MN*m\\n', M_Ed, H_Ed, Mz_Ed);
fprintf('  Fz derivado del modelo Bladed: %.2f MN estático
(N_unfav=%.2f, N_fav=%.2f)\\n', Fz_static, N_unfav, N_fav);
fprintf('LOSA DE CORONACIÓN: tronco de cono D=%.2f->%.2f m, h=%.1f
m.\\n', D_torre, D_base_tapon, h_tapon);
fprintf('  Parrilla phi25@170 mm (2 caras, 2 direcciones; FS=%.2f
vs mínimo EC2).\\n', As_parrilla/As_min_parrilla);
fprintf('  Tirante de anillo: %d zunchos phi25 (FS=%.2f); biela
FS=%.2f; cabeza de pared FS=%.2f.\\n', ...
    n_zunchos25, As_zunchos/As_hoop,
sigma_Rd_max_biela/sigma_biela, fcd/sigma_wall);
fprintf('  Bursting bajo brida: cercos phi20 de 2 ramas cada 125 mm
(FS=%.2f).\\n', As_prov_burst/As_burst_rad);
fprintf('ANILLO EMBEBIDO: virola de 5.91 m embebida %.1f m + brida
interior b=%.1f m (D_int=%.2f m).\\n', ...
    e_emb, b_anillo, D_int_an);
fprintf('  Postensado: %d tendones 19x0.6" Y1860 (P_inf=%.1f MN);
FS descompresión=%.2f.\\n', ...
    n_tendones, P_inf, FS_descomp);
fprintf('  Aplastamiento: FS=%.2f (directo) / %.2f (EC2 6.7);
transferencia FS=%.2f.\\n', FS_plain, FS_67, FS_transf);
fprintf('  Bursting en anclajes: %d cercos phi12 de 2 ramas por
anclaje.\\n', n_cercos12);
fprintf('CONEXIÓN LOSA-FUSTE: %d esperas phi25@150 (2 caras),
solape l0=%.0f mm;\\n', n_esp, l0_adopt*1000);
fprintf('  interfaz EC2 6.2.5: v_Edi=%.0f kPa vs v_Rdi=%.0f kPa
(FS=%.1f).\\n', v_Edi*1000, v_Rdi*1000, FS_int);
fprintf('\\nQuedan fuera del alcance de este TFG: el trazado y las
perdidas de fricción/penetración de\\n');
fprintf('cuna detalladas del postensado; el diseño de detalle del
acero del anillo (espesores,\\n');
fprintf('rigidizadores, soldaduras); la fatiga de la conexión; y la
comprobación del par de apriete/\\n');
fprintf('inyección de la unión.\\n');

%%
=====
=====

%  FUNCIONES LOCALES
```

```
%  
=====
```

```
=====
```

```
function out = texto_ok(cond)  
    if cond, out = 'CUMPLE'; else, out = 'NO CUMPLE'; end  
end
```