



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGIAS
INDUSTRIALES 3

TRABAJO FIN DE GRADO
EVALUACION DE ESTRUCTURAS SOPORTE
EOLICO-MARINAS EN FATIGA.

Autor: Manuel Jimenez Gonzalez

Director: Juan Antonio Talavera Martin

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Evaluación de estructuras soporte eólico-marinas en fatiga en la ETS de Ingeniería - ICAI
de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

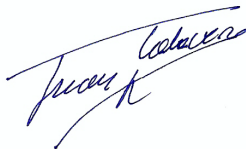
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Manuel Jimenez Gonzalez

Fecha: 23/ 08/ 2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Juan Antonio Talavera Martín

Fecha: 23/08/2023

EVALUACION DE ESTRUCTURAS SOPORTE EOLICO-MARINAS EN FATIGA

Autor: Jimenez Gonzalez, Manuel

Director: Talavera Martin, Juan Antonio

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se va a evaluar la resistencia a fatiga de la torre de un aerogenerador marino mediante los métodos de la curva SN y Strain Life, para ello se utilizaran simulaciones del software Bladed que proporcionaran la distribución de cargas en la base así como el numero de ciclos de las mismas mediante el método de los ciclos de lluvia o Rainflow. Se va a detallar tanto los resultados de las simulaciones como la metodología seguida con el fin de calcular la resistencia a fatiga. Terminando en una comparación de los resultados

Palabras clave: Ciclos de Lluvia, Fatiga, Miner, Curva SN, Strain Life, Monopilote

1. Introducción

El ser humano ha estado aprovechando la energía del viento desde la invención de los primeros molinos de viento en Afganistán en el siglo VII, en un principio los molinos transformaban la energía cinética del viento en energía mecánica con el fin de moler trigo o para extraer agua. El viento siguió siendo aprovechado de esta forma hasta que a principios de la década de 1980 se construyeron las primeras turbinas eólicas que consiguieron transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica, un fin mucho más útil para la época en la que vivimos.

Los aerogeneradores terrestres proporcionan una energía limpia, renovable y eficaz, pero a pesar de su relativa facilidad de construcción tienen un límite intrínseco, la velocidad del viento del que extraen la energía. Ahí es donde entran los aerogeneradores marinos de los que se va a hablar en este proyecto. Estas estructuras, a pesar de ser mucho más difíciles de construir tienen una gran ventaja sobre sus hermanas terrestres, la capacidad de extraer la energía de los mucho más potentes vientos marinos.

Dichos vientos pueden alcanzar velocidades mucho más altas gracias a la inexistencia de relieves que perturben su flujo pero para poder aprovecharlos efectivamente hay que saber responder a dos preguntas: ¿Cómo pueden sujetarse dichos aerogeneradores de una forma segura, duradera y eficaz? Y ¿Cómo podemos asegurarnos de que dichos soportes puedan aguantar los esfuerzos de fatiga provocados por el oleaje y el viento? El objetivo de este TFG consiste en responder a esta segunda pregunta de la mejor manera posible.

2. Definición del Proyecto

El comienzo de este proyecto consiste en una breve explicación teórica de las diversas estructuras soporte de los aerogeneradores marinos así como una definición más detallada de la estructura que se va a estudiar, el monopilote. Una vez hecho esto se definirá el concepto de fatiga. Antes de pasar al análisis de los métodos utilizados se explicará brevemente el software que se va a utilizar así como algunos de los parámetros introducidos necesarios para la simulación.

3. Descripción del modelo

Se van a utilizar 2 modelos diferentes para el análisis, el primero es un modelo simplificado de la torre con forma cilíndrica y espesor constante mientras que el segundo es un modelo más realista con la parte sumergida cilíndrica y con la propia torre teniendo forma de tronco cónico de espesor variable.

4. Resultados

	Modelo A SN	Modelo B SN	Modelo A Strain Life	Modelo B Strain Life
Espesor (mm)	75	75	20	20
Coef Miner	0.76	0.67	0.07	0.08

Tabla 1:Resultados Finales

5. Conclusiones

En el análisis por el método SN se puede observar que el modelo B obtiene un coeficiente de Miner menor, esto se debe a que el número de ciclos que aguanta el material es directamente proporcional a las cargas que soporta la base. Puesto que el modelo B tiene menor superficie de contacto con el viento y la marea, además de ser mas ligero, las cargas en la base son inferiores.

Por otro lado cuando se analiza el problema por el método Strain Life es el modelo A el cual tiene un coeficiente de Miner menor. Esto se debe a que este método tiene en cuenta los esfuerzos medios y por consiguiente el axil. Puesto que el modelo A tiene un peso mayor el esfuerzo medio es menor, es decir, esta mas cerca de ser un esfuerzo de compresión. Como ya se explicó en el apartado 7.4 en este caso el peso extra favorece a la estructura.

FATIGUE EVALUATION OF WIND TURBINE OFF-SHORE SUPPORT STRUCTURES

Author: Jimenez Gonzalez, Manuel

Supervisor: Talavera Martin, Juan

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

Abstract

In this project the fatigue resistance of an offshore wind turbine tower will be evaluated using the SN curve and Strain Life methods. For this purpose, Bladed software simulations will be used to provide the load distribution at the base as well as the number of cycles using the Rainflow method. Both results of the simulations and the methodology followed in order to calculate the fatigue resistance will be detailed. The results will be compared between the different methods and models.

Introduction

Humans have been harnessing the energy of the wind since the invention of the first windmills in Afghanistan in the 7th century, at first the mills transformed the kinetic energy of the wind into mechanical energy in order to grind wheat or to extract water. The wind continued to be harnessed in this way until the first wind turbines were built in the early 1980s to convert the kinetic energy of the wind into electrical energy, a much more useful purpose for the times in which we live.

Onshore wind turbines provide clean, renewable and efficient energy, but despite their relative ease of construction they have an intrinsic limit, the speed of the wind from which they extract energy. This is where the offshore wind turbines that will be discussed in this project come in. These structures, despite being much more difficult to build, have a great advantage over their terrestrial sisters, the ability to extract energy from the much more powerful offshore winds.

These winds can reach much higher speeds thanks to the absence of reliefs that disturb their flow, but in order to take advantage of them effectively, two questions must be answered: How can these wind turbines be attached in a safe, durable and effective way? And how can we ensure that these supports can withstand the fatigue stresses caused by waves and wind? The object of this project is to answer the second question as well as possible.

Project Definition

The beginning of this project consists of a brief theoretical explanation of the various support structures of offshore wind turbines as well as a more detailed definition of the structure to be studied, the monopile. Once this is done, the concept of fatigue will be defined. Before proceeding to the analysis of the methods used, the software to be used will be briefly explained as well as some of the introduced parameters necessary for the simulation.

Once the preliminaries have been carried out, we will proceed to explain the process followed to obtain the fatigue resistance of the structure by means of the SN curve method, starting by explaining the theoretical bases of the rain cycles method as well as its application in the Bladed program to transform the stress diagrams into number of cycles of a certain

amplitude. Once this is done, the moment amplitudes will be transformed into stress amplitudes and then the SN curve will be used to determine how many cycles the material can withstand. Once this is determined, the total cycles to which the material will be exposed will be calculated by means of the wind distribution provided by the director. Finally, once both the cycles that will occur and the cycles that the material will withstand are known, Miner's Rule will be used to determine if the structure will withstand or not.

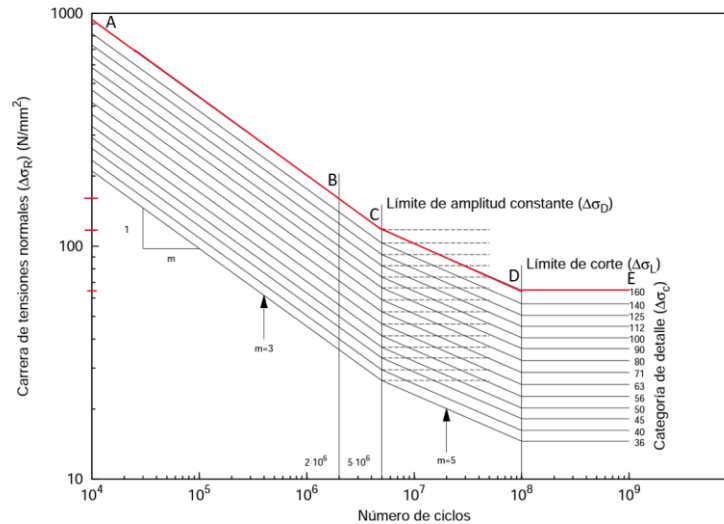


Figura 3: S-N Curve for the S-275 steel

Next, the analysis will be performed by the Strain Life method, this method differs from the first one after using the rainflow method and then it is necessary to transform the stresses into deformations by means of the Ramberg-Oswood equation. Once the deformations are available, the number of cycles that the material withstands will be calculated using the Manson-Coffin-Morrow equation.

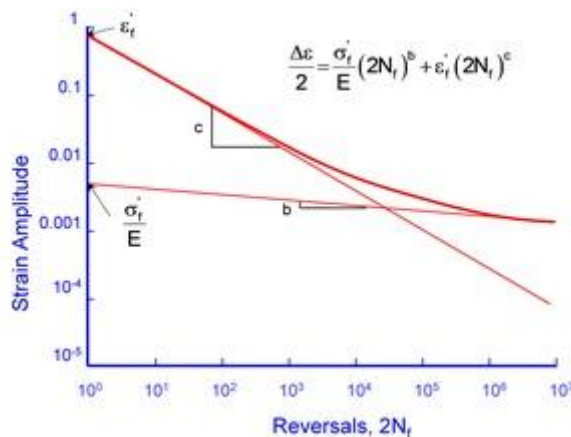


Figura 4: Strain Life Curve

Description of the model

Two different models will be used for the analysis, the first one is a simplified model of the tower with cylindrical shape and constant thickness while the second one is a more realistic

model with the submerged cylindrical part and with the tower itself having the shape of a conical trunk of variable thickness.

Results

	Model A SN	Model B SN	Model A Strain Life	Model B Strain Life
Wall Thickness (mm)	75	75	20	20
Miner Coeff.	0.76	0.67	0.07	0.08

Tabla 2: Final Results

Conclusion

In the analysis by the SN method, it can be observed that model B obtains a lower Miner coefficient, this is due to the fact that the number of cycles that the material withstands is directly proportional to the loads supported by the base. Since model B has less surface area in contact with the wind and tide, in addition to being lighter, the loads on the base are lower.

On the other hand, when the problem is analyzed by the Strain Life method, it is model A which has a lower Miner's coefficient. This is due to the fact that this method takes into account the average stresses and therefore the axial force. Since model A has a higher weight, the mean stress is lower, i.e. it is closer to a compressive stress. As already explained in section 7.4, in this case the extra weight favors the structure.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	9
2.1 Bladed 4.6 Educational.....	9
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	12
3.1 Estructuras soporte	12
3.2 Definición de Fatiga	13
3.3 El Monopilote.....	14
Capítulo 4. Definición del Trabajo	18
4.1 Justificación.....	18
4.2 Objetivos	20
4.3 Metodología.....	20
Capítulo 5. Modelo Simplificado A.....	21
5.1 parámetros iniciales para la simulación.....	21
5.2 El metodo Rainflow o metodo de los ciclos de lluvia	24
5.2.1 Explicación teórica.....	24
5.2.2 Ejemplo.....	26
5.2.3 Aplicación a Bladed	28
5.3 Transformacion de momentos a tensiones:	41
5.3.1 Power Production.....	43
5.3.2 Start	44
5.3.3 Normal Stop.....	44
5.3.4 Parked	45
5.4 Rotura por fatiga.....	46
5.4.1 Numero de ciclos necesarios para la rotura	46
5.5 La distribución del viento.....	49
5.5.1 La distribución de Weibull	49
5.5.2 Calculo de probabilidades	51
5.6 Calculo del daño por fatiga	52

5.6.1 Regla de Miner	52
5.6.2 Calculo de la estructura con categoría de detalle 160.....	53
5.6.3 Calculo de la estructura con categoría de detalle 90.....	53
Capítulo 6. Modelo B.....	56
6.1 CARGAS EN EL MODELO B.....	57
6.1.1 Calculo de los pesos de las torres	57
6.1.2 Power Production Loading	58
6.1.3 START.....	59
6.1.4 STOP	61
6.1.5 Parked	62
Capítulo 7. Modelo B con metodología avanzada.....	64
7.1 Método Strain-Life	64
7.1.1 Introducción	64
7.2 Curva ϵ -N	64
7.3 Calculo de la Amplitud de la deformación.....	65
7.4 Correccion de Morrow	67
7.5 Calculo de la vida a Fatiga	68
Capítulo 8. COMPARACION DE RESULTADOS.....	69
8.1 Comparación de modelos:	70
8.2 Comparación de Metodos:.....	70
Capítulo 9. Bibliografía.....	71
ANEXO I: Sostenibilidad, reciclaje y ods.....	72
ANEXO II: CALCULOS EN EXCEL	76

Índice de figuras

Figura 1: Curva S-N del acero S-275	4
Figura 2: Curva Strain Life.....	4
Figura 3: S-N Curve for the S-275 steel	7
Figura 4: Strain Life Curve.....	7
Figura 5: Main Calculations Bladed	10
Figura 6: Post Processing Bladed	11
Figura 7: Esquema del Monopilote (Wind Energy Handbook).....	15
Figura 8: Especificaciones de la torre en Bladed	21
Figura 9: Especificaciones del viento en Bladed.....	22
Figura 10: distribución anual del viento	22
Figura 11: Parámetros relativos al oleaje	23
Figura 12: Parámetros relativos a la corriente	24
Figura 13: Esquema representativo del método Rainflow.....	25
Figura 14: Análisis de picos	26
Figura 15: Análisis de Valles	27
Figura 16: Resultados de ambos análisis	28
Figura 17: Momentos en Power Production Loading.....	29
Figura 18: Grafico Ciclos de Lluvia Power Production Loading.....	30
Figura 19: Fuerzas Power Production Loading	31
Figura 20: Momentos Start	32
Figura 21: Grafico Ciclos de Lluvia Start	33
Figura 22: Momentos Normal Stop	34
Figura 23: Grafico Ciclos de Lluvia Normal Stop	34
Figura 24: Momentos Emergency Stop	35
Figura 25: Grafico Ciclos de Lluvia Emergency Stop	36
Figura 26: Momentos Idle	37

Figura 27: Momentos Parked	38
Figura 28: Momentos Parked con vientos de 35m/s	39
Figura 29: Grafico Ciclos de Lluvia Parked con vientos de 35m/s	39
Figura 30: Aerogenerador con Ejes de Coordenadas	41
Figura 31: Sección de la Torre	42
Figura 32: Categoría de Detalle 160(DBSE-A).....	47
Figura 33: Curva S-N del Acero S-275 (DBSE-A)	47
Figura 34: Efecto de la K en la distribución de Weibull	50
Figura 35: Categoría de detalle 90.....	54
Figura 36: Torre del Modelo B.....	56
Figura 37: Fuerzas en la Base.....	57
Figura 38: Momentos Power Production Loading	58
Figura 39: Grafico Ciclos de Lluvia Power Production Loading	59
Figura 40: Momentos Start.....	59
Figura 41: Grafico Ciclos de Lluvia Start	60
Figura 42: Momentos Stop	61
Figura 43: Grafico Ciclos de Lluvia Stop.....	61
Figura 44: Momentos Parked	62
Figura 45: Grafico Ciclos de Lluvia Parked.....	62
Figura 46: Curva Strain Life.....	65
Figura 47: Curva Tensión Deformación y Bucle de Histeresis	66
Figura 48: Influencia del esfuerzo medio	67
Figura 49: Hoja de Excel PPL Método S-N Modelo A.....	76
Figura 50: Hoja de Excel Stop Método S-N Modelo A	77
Figura 51: Hoja de Excel Start Método S-N Modelo A	78
Figura 52: Hoja de Excel Parked 35 Método S-N Modelo A.....	78
Figura 53: Hoja de Excel PPL Método S-N Modelo B	79
Figura 54: Hoja de Excel Start Método S-N Modelo B	79
Figura 55: Hoja de Excel Stop Método S-N Modelo B.....	80
Figura 56: Hoja de Excel Parked Método S-N Modelo B.....	80

Figura 57: Hoja de Excel PPL Método Strain Life Modelo B	81
Figura 58: Función Goal Seek	82
Figura 59: Macro Bucle Goal Seek	83
Figura 60: Hoja de Excel Start Método Strain Life Modelo B.....	83
Figura 61: Hoja de Excel Stop Método Strain Life Modelo B.....	84
Figura 62: Hoja de Excel Parked Método Strain Life Modelo B	84
Figura 63: Hoja de Excel PPL Método Strain Life Modelo A	85
Figura 64: Hoja de Excel Start Método Strain Life Modelo A	85
Figura 65: Hoja de Excel Stop Método Strain Life Modelo A.....	86
Figura 66: Hoja de Excel Parked Método Strain Life Modelo A.....	86

Índice de tablas

Tabla 1: Resultados Finales	5
Tabla 2: Final Results	8
Tabla 3: Tabla Ciclos de Lluvia Power Production Loading	30
Tabla 4: Tabla Ciclos de Lluvia Start	33
Tabla 5: Tabla Ciclos de Lluvia Normal Stop	35
Tabla 6: Tabla Ciclos de Lluvia Emergency Stop	36
Tabla 7: Tabla Ciclos de Lluvia Parked con vientos de 35m/s	40
Tabla 8: Carreras de Tensiones Power Production Loading	44
Tabla 9: Carreras de Tensiones Start	44
Tabla 10: Carreras de Tensiones Normal Stop	44
Tabla 11: Carreras de Tensiones Parked	45
Tabla 12: Resultados Finales	69

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El ser humano ha estado aprovechando la energía del viento desde la invención de los primeros molinos de viento en Afganistán en el siglo VII, en un principio los molinos transformaban la energía cinética del viento en energía mecánica con el fin de moler trigo o para extraer agua. El viento siguió siendo aprovechado de esta forma hasta que a principios de la década de 1980 se construyeron las primeras turbinas eólicas que consiguieron transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica, un fin mucho más útil para la época en la que vivimos. Los aerogeneradores terrestres proporcionan una energía limpia, renovable y eficaz, pero a pesar de su relativa facilidad de construcción tienen un límite intrínseco, la velocidad del viento del que extraen la energía. Ahí es donde entran los aerogeneradores marinos de los que se va a hablar en este proyecto. Estas estructuras, a pesar de ser mucho más difíciles de construir tienen una gran ventaja sobre sus hermanas terrestres, la capacidad de extraer la energía de los mucho más potentes vientos marinos. Dichos vientos pueden alcanzar velocidades mucho más altas gracias a la inexistencia de relieves que perturben su flujo pero para poder aprovecharlos efectivamente hay que saber responder a dos preguntas: ¿Cómo pueden sujetarse dichos aerogeneradores de una forma segura, duradera y eficaz? Y ¿Cómo podemos asegurarnos de que dichos soportes puedan aguantar los esfuerzos de fatiga provocados por el oleaje y el viento? El objetivo de este TFG consiste en responder a esta segunda pregunta de la mejor manera posible.

La motivación técnica de este proyecto es entender mejor los esfuerzos de fatiga y aprender a contrarrestarlos de una manera eficaz, esto es muy importante por dos motivos. El primero es que las fisuras generadas por dichos esfuerzos son muy difíciles de detectar al principio y, si se permite que dichas fisuras aparezcan debido a un fallo en el diseño, estas pueden terminar dañando la integridad de la estructura. El segundo es que al estar en el mar la fatiga va a estar mucho más presente que en tierra debido al oleaje y a las mareas.

Personalmente, la motivación que tengo para hacer este proyecto es muy similar a la que tengo para convertirme en ingeniero industrial, entender cómo funcionan las cosas. Al realizar este proyecto voy a aprender mucho sobre un tema tanto práctico como interesante que posteriormente me ayudara en mi futuro laboral. También espero que tras realizar la evaluación del comportamiento en fatiga de estas estructuras sea capaz de extrapolar mis conocimientos a otros tipos de estructuras. Mientras realizo el trabajo quiero aprender todo lo que pueda sobre los aerogeneradores marinos en general puesto que es una tecnología en auge con mucho futuro.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 *BLADED 4.6 EDUCATIONAL*

El software Bladed 4.6 Educational es una versión educativa del programa Bladed, que es una herramienta de simulación y análisis para el diseño y evaluación de turbinas eólicas. Bladed es ampliamente utilizado en la industria de la energía eólica para modelar y simular el comportamiento de los aerogeneradores en diferentes condiciones.

La versión educativa proporciona a los estudiantes y académicos la oportunidad de familiarizarse con las características y funcionalidades del software sin tener que adquirir una licencia comercial completa.

Bladed 4.6 Educational ofrece una amplia gama de capacidades y herramientas para simular y analizar el rendimiento de las turbinas eólicas. Permite a los usuarios modelar el comportamiento de las palas, la caja de cambios, los generadores y otros componentes clave de los aerogeneradores. También se pueden tener en cuenta factores como las condiciones del viento, la ubicación geográfica y las características del terreno.

El software proporciona resultados detallados sobre el rendimiento de la turbina, incluyendo la producción de energía, la velocidad del viento, las cargas mecánicas y otros parámetros relevantes. Esto permite a los usuarios evaluar el rendimiento de diferentes diseños de turbinas, realizar análisis de sensibilidad y optimizar los sistemas de energía eólica.

Para este proyecto se ha utilizado un modelo construido a partir de unas especificaciones proporcionadas por el director del trabajo y de la “demo a” que viene incluida en el software. Las 2 funciones básicas para este proyecto son las Main Calculations el Post Processing.

Las Main Calculations permiten estudiar los diferentes momentos y fuerzas a los que está sometido la base de la torre en distintos escenarios, entre ellos : Power Production (generador produciendo potencia eléctrica), Start (generador arrancando), Stop (generador apagándose), Emergency Stop (parada de emergencia en caso de fallo de la red o inclemencias climatológicas), Idling (el aerogenerador no produce energía debido a las condiciones meteorológicas) y Parked (las palas del aerogenerador están colocadas en bandera de forma que no se muevan por el viento).

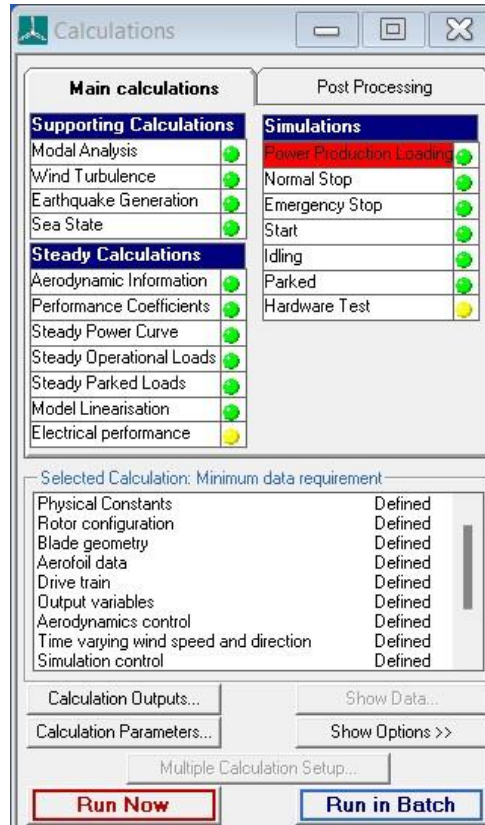


Figura 5: Main Calculations Bladed

En el apartado de Post Processing se encuentran cálculos que se realizan sobre resultados obtenidos en las Main Calculations, para este proyecto se va a utilizar el cálculo denominado Rainflow Cycle Count, que se explicara más adelante.

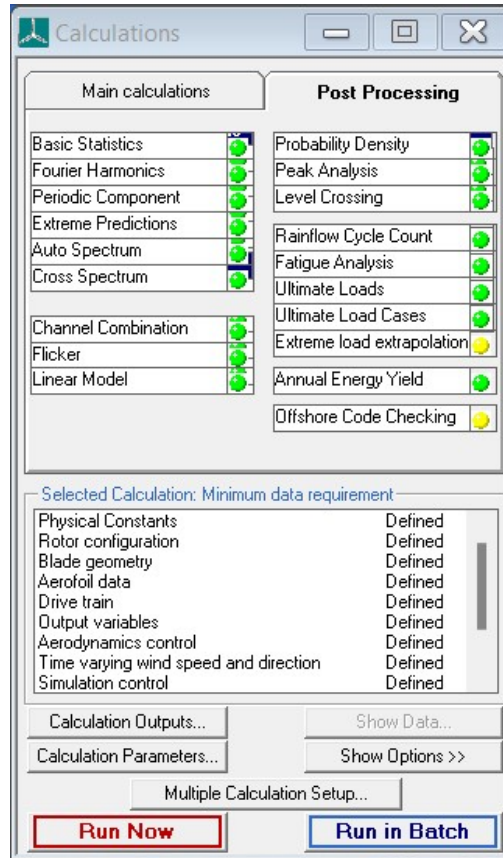


Figura 6: Post Processing Bladed

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 ESTRUCTURAS SOPORTE

Las estructuras soporte de los aerogeneradores marinos son inevitablemente mucho más masivas que sus contrapartes terrestres. Esto es debido a una mayor altura del buje respecto a la cimentación sumado a las cargas producidas por el oleaje. Como resultado una mayor proporción del coste total de la instalación viene dada por estas estructuras, en comparación con las instalaciones terrestres.

La gran mayoría de los diseños de aerogeneradores marinos han evolucionado de aerogeneradores terrestres por lo que es común utilizar el diseño de la torre de un aerogenerador terrestre y situarla por encima de la cresta de la ola en un aerogenerador marino.

Actualmente existen 2 maneras de sustentación de estructuras eólico-marinas, cimentación y flotación.

Dentro de la cimentación existen 3 métodos dependiendo de la profundidad del mar: Monopilote, de gravedad y Jacket.

El Monopilote es la estructura que se va a utilizar en este trabajo y será definida a continuación de una manera más extensiva.

El sistema de cimentación de gravedad se usa para profundidades inferiores a 30 metros y consiste en una plataforma de hormigón o acero de alrededor de 15 metros de diámetro con forma de tronco de cono.

El Jacket se utiliza para profundidades superiores a 30 metros y consiste en una cimentación con armadura de celosía con 3 o 4 puntos de apoyo. En la parte superior del jacket el fuste

de la turbina se sujeta mediante una pieza de transición mientras que en la inferior cada uno de los apoyos se sujeta mediante pilotes.

Por otro lado también existen plataformas flotantes FOWP (Floating Off-shore Wind Platform) basadas en el principio de Arquímedes y que, de según Iberdrola son “la subestructura de hormigón, de acero o híbrida sobre la que se instala el aerogenerador y le proporciona flotabilidad y estabilidad.”

Existen varios tipos de FOWP que se discutirán a continuación: Barge, semi-sumersible, Spar y Tensioned Legs Platform.

Barge, o barcaza en español, consiste en una plataforma con un ancho y largo sensiblemente mayor que la altura. Gracias a su configuración obtiene una gran superficie de contacto con el agua, lo que le da estabilidad.

El semi-sumersible, o semi-sumergible en español, minimiza la superficie de contacto con el agua y maximiza el volumen sumergido con el fin de ganar flotabilidad mediante el uso de cilindros interconectados entre sí.

El Spar consiste en un cilindro hueco estanco con la mayor parte del peso situado en el lado opuesto a la turbina con el fin de aumentar la estabilidad del soporte.

La Tensioned Legs Platform reduce las dimensiones lo máximo posible con el fin de reducir los costes de fabricación y tiene de único que la plataforma en si no flota una vez que se ha montado la turbina, antes de instalar la turbina se colocan unos flotadores temporales para evitar que se desestabilice y una vez instalado se sujeta con cables de acero tensionados.

3.2 DEFINICIÓN DE FATIGA

Sin importar el tipo de estructura que se utilice todas ellas se ven expuestas a la fatiga que, según la ASTM, es “el proceso de un localizado, permanente y progresivo cambio estructural sufrido por un material sujeto a condiciones que le producen tensiones y deformaciones en

uno o varios puntos y que puede conducir a la producción de grietas o a la rotura después de un número suficiente de fluctuaciones” a la hora de diseñar algo a fatiga es fundamental centrarse en los anclajes y las soldaduras puesto que ahí comenzaran las fisuras que terminaran propagándose sobre la estructura.

La velocidad de propagación de la fisura es directamente proporcional a la raíz cuadrada longitud de la misma. Debido a esto durante la mayor parte de su formación las fisuras son muy difíciles de detectar.

Para que se produzca el fallo por fatiga se tienen que dar tres condiciones simultáneamente : Tensiones de tracción elevadas, variación de la tensión con el tiempo, número de ciclos de carga suficientemente largo. Puesto que las dos últimas condiciones se van a dar si o si debido a la localización del aerogenerador, lo único que nos queda es asegurarnos de que no se den altas tensiones de tracción en las soldaduras.

Puesto que la fatiga aumenta con el número de ciclos es muy difícil diseñar algo inmune a estos esfuerzos por lo que resulta muy útil realizar un cálculo de la vida estimada del componente. Esto se hace mediante el uso de software como ANSYS nCode Design Life que utilizan la geometría del componente, las cargas y las propiedades del material para realizar una estimación. Las 3 propiedades mas importantes son: Curva S-N (tensión-ciclos de carga), Curva E-N (deformación local-ciclos de vida) y la Curva CSSC (tensión-deformación cíclica).

<https://www.iberdrola.com/innovacion/eolica-marina-flotante>

<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>

3.3 EL MONOPILOTE

3.3.1 Monopilote: El monopilote consiste en un tubo cilíndrico de acero enterrado en el fondo marino

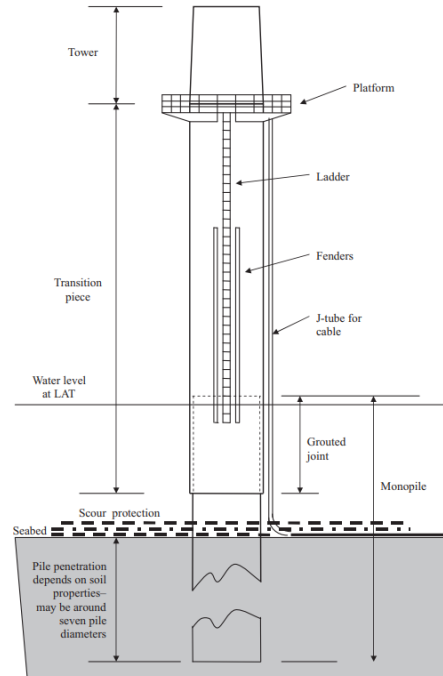


Figura 7: Esquema del Monopilote (Wind Energy Handbook)

3.3.2 Pieza de transición

Debido a la dificultad de mantener perfectamente vertical el monopilote a la hora del enterrado es necesario añadir un tubo cilíndrico adicional, denominado pieza de transición, entre el monopilote y la base de la torre. La torre es después fijada a una brida situada en la parte superior de la pieza de transición. La pieza de transición se suele poner rodeando al monopilote con una superposición de 1.5 veces el diámetro de este. La separación de entre 50mm y 100mm que hay entre ambas piezas permite que la torre quede completamente vertical. Posteriormente dicha separación se rellena con hormigón o similar.

3.3.3 Plataforma

Es común situar una plataforma en la parte superior de la pieza de transición con el fin de facilitar el acceso a la torre mediante un bote. Los operarios deberán de acceder la plataforma a través de unas escaleras que bajan hasta el nivel del mar. La altura de la plataforma debe de escogerse de forma que haya una separación adecuada o *air gap* entre la misma y la cresta de la ola, un valor común suele ser 1.5m.

3.3.4 Cableado

Los cables de potencia de la turbina se pueden colocar tanto en el exterior de la pieza de transición como entre esta y el monopilote y bajan hasta el fondo marino protegidos por unos tubos J. Estos tubos se denominan así puesto que se doblan a 90° con el fin de que los cables salgan horizontalmente.

3.3.5 Protección contra socavación

Las corrientes marinas y el movimiento del agua debido a las olas causan erosión en el fondo marino, esto es especialmente preocupante en los casos en los que el monopilote este enterrado en arena u otros sedimentos granulares. Sumer and Fredsoe (2001) estimaron que la máxima profundidad de socavación se da cuando solo se tienen en cuenta las corrientes marinas y puede llegar a 1.3 veces el diámetro del monopilote. Resulta evidente que esta socavación afecta a la estabilidad de la cimentación y la frecuencia natural de la misma por lo que resulta necesario añadir algún tipo de protección. Dicha protección se consigue gracias a una armadura de roca que puede colocarse en el momento de instalación (protección estática) o al paso de unas semanas cuando ya se ha empezado a formar el pozo debido a la socavación (protección dinámica).

3.3.6 Protección contra corrosión

La protección contra la corrosión varía dependiendo de la altura a la que nos encontremos del monopilote y se distinguen 3 zonas: La zona atmosférica, la zona intermedia o *splash zone* y la zona sumergida, que incluye la parte enterrada. La normativa requiere que el monopilote este protegido por un recubrimiento multicapa de alta calidad en la zona

atmosférica. En la zona intermedia se requiere un grosor mayor además del recubrimiento para soportar la corrosión, es de esperar una tasa de corrosión de entre 0.3 y 0.5 milímetros anuales. En la zona sumergida se requiere protección catódica, normalmente mediante el uso de ánodos de sacrificio que pueden llegar a pesar 5 toneladas para la protección de un monopilote de 5m de diámetro sumergido a 20m.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

Justificación para el proyecto de estudio de la resistencia a fatiga de la base de la torre de un aerogenerador marino:

Desde un punto técnico, este proyecto de estudio de la resistencia a fatiga de la base de la torre de un aerogenerador marino tiene una importancia significativa. Los aerogeneradores marinos desempeñan un papel crucial en la generación de energía renovable, ya que aprovechan la potencia del viento en alta mar para producir electricidad de manera sostenible. Sin embargo, la exposición constante a las condiciones marinas hostiles y las cargas cíclicas del viento pueden generar fatiga en las estructuras, especialmente en la base de la torre, lo que podría afectar su integridad y durabilidad a largo plazo.

Realizar un estudio exhaustivo de la resistencia a fatiga de la base de la torre permitirá identificar los posibles puntos débiles y mejorar el diseño y la construcción de las estructuras de los aerogeneradores marinos. Al comprender mejor los factores que contribuyen a la fatiga y al desarrollar soluciones técnicas innovadoras para mitigar este problema, se logrará una mayor fiabilidad y vida útil de los aerogeneradores marinos, lo que a su vez conducirá a una producción de energía más eficiente y una reducción de los costos de mantenimiento.

Desde un punto de vista de mercado, este proyecto tiene un potencial atractivo para los inversores y desarrolladores de parques eólicos marinos. La energía eólica marina se está convirtiendo en una fuente de energía cada vez más importante a nivel global, con un crecimiento significativo en los últimos años. La demanda de aerogeneradores marinos está en aumento, y los principales actores de la industria buscan constantemente mejorar la tecnología y reducir los costos operativos.

Al invertir en este proyecto, los actores de la industria podrán obtener los siguientes beneficios:

Mejora de la confiabilidad y durabilidad: Al comprender y abordar los desafíos relacionados con la resistencia a fatiga de la base de la torre, se logrará una mayor confiabilidad y durabilidad de los aerogeneradores marinos. Esto reducirá los costos asociados con el mantenimiento y reparación de las estructuras, lo que a su vez mejorará la rentabilidad de los proyectos eólicos marinos.

Diferenciación y ventaja competitiva: Los desarrolladores de parques eólicos marinos que implementen mejores prácticas y soluciones innovadoras para mitigar la fatiga de la base de la torre podrán diferenciarse en el mercado. La capacidad de ofrecer aerogeneradores marinos más fiables y eficientes les dará una ventaja competitiva significativa al participar en licitaciones y negociaciones con clientes y socios comerciales.

Cumplimiento de regulaciones y estándares: Con el crecimiento de la industria eólica marina, los gobiernos y organismos reguladores están implementando normativas más estrictas en cuanto a la seguridad y el rendimiento de los aerogeneradores. Al realizar este proyecto de estudio, los inversores y desarrolladores podrán asegurarse de cumplir con los requisitos normativos y garantizar que sus proyectos cumplan con los estándares más rigurosos de calidad y seguridad.

En resumen, el proyecto de estudio de la resistencia a fatiga de la base de la torre de un aerogenerador marino ofrece una oportunidad valiosa tanto desde un punto técnico como de mercado. Al invertir en este proyecto, los actores de la industria podrán mejorar la confiabilidad de los aerogeneradores marinos, diferenciarse en el mercado y cumplir con las regulaciones y estándares en constante evolución. Esto resultará en una mayor rentabilidad, una mejor reputación y una posición sólida en el creciente mercado de la energía eólica marina.

4.2 OBJETIVOS

1. Estudiar las diferentes estructuras de soporte en el mar
2. Diseño de las estructuras de soporte simplificadas de referencia A
3. Desarrollar el procedimiento de análisis con metodología básica para el modelo de referencia.
4. Estudiar metodología de análisis de fatiga avanzada
5. Aplicar al modelo de referencia A las nuevas metodologías de análisis de fatiga.
6. Aplicar al modelo no simplificado B
7. Evaluar el impacto diferencial entre metodologías

4.3 METODOLOGÍA

A la hora de decidir como progresar con el trabajo voy a basarme en el orden en el que están dispuestos los objetivos del proyecto puesto que cada punto está apoyado en lo que se haya aprendido de los anteriores. También debo de complementar el desarrollo de los objetivos con un entendimiento del manual de GL sobre la normativa pertinente. Esto es muy importante puesto que este proyecto se va a basar en la construcción de un aerogenerador en un emplazamiento real en la costa de México. Debido a esto debo de asegurarme que mi diseño cumple con los estándares requeridos. También es importante estudiar las condiciones meteorológicas del emplazamiento final puesto que esto dictara los estándares que debe de alcanzar la estructura.

Capítulo 5. MODELO SIMPLIFICADO A

5.1 PARÁMETROS INICIALES PARA LA SIMULACIÓN

Para este primer modelo se va a utilizar un aerogenerador con torre cilíndrica hueca con las dimensiones que se pueden observar a continuación:

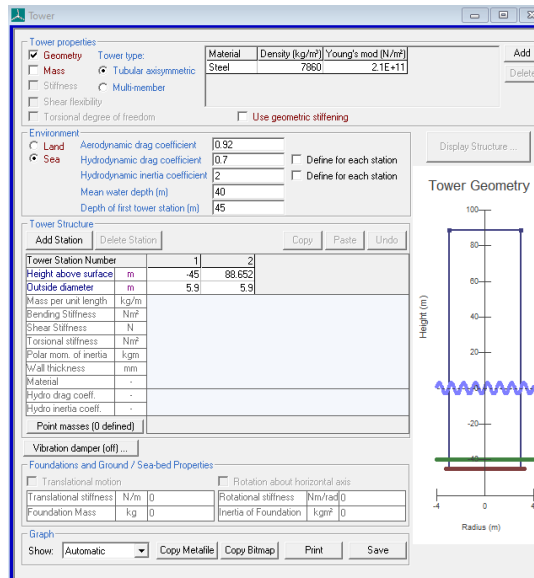


Figura 8: Especificaciones de la torre en Bladed

El viento que se va a utilizar para realizar las simulaciones se modela en la siguiente pestaña:

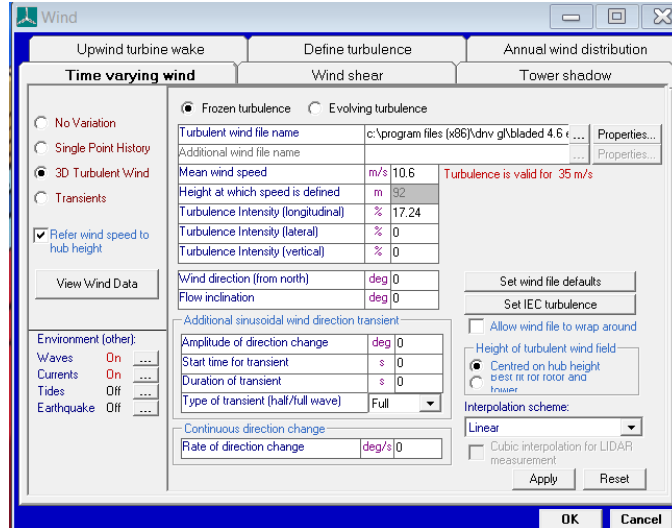


Figura 9: Especificaciones del viento en Bladed

Nota: El aviso que aparece en rojo a la derecha de Mean Wind Speed es debido a que el archivo de turbulencia se calcula en otra pestaña aparte y en este caso para la última simulación que se realizó se necesitaba un archivo de turbulencia con viento a 35 m/s.

La distribución anual del viento también se puede modelar en la siguiente pestaña, este tema se discutirá más adelante en el apartado de distribución del viento.

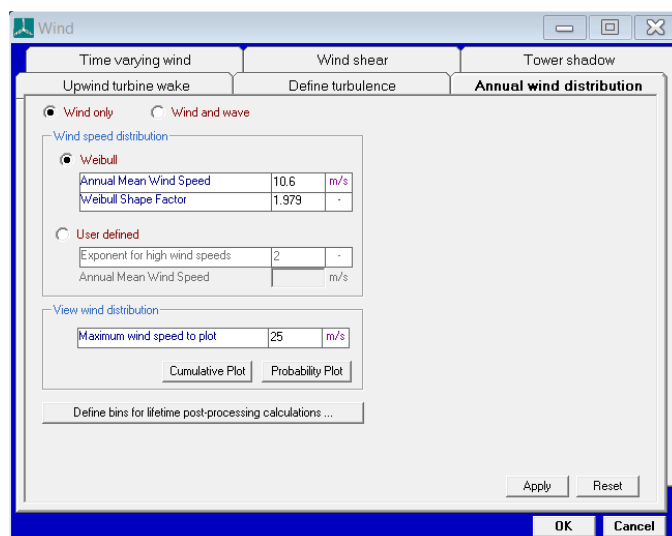


Figura 10: distribución anual del viento

El estado del mar se puede dividir en olas y corrientes, Bladed ofrece la posibilidad de definir el oleaje mediante la altura de ola significativa (altura media del tercio de las olas más altas) y el periodo (tiempo medio entre olas) entre otros factores como se puede ver a continuación.

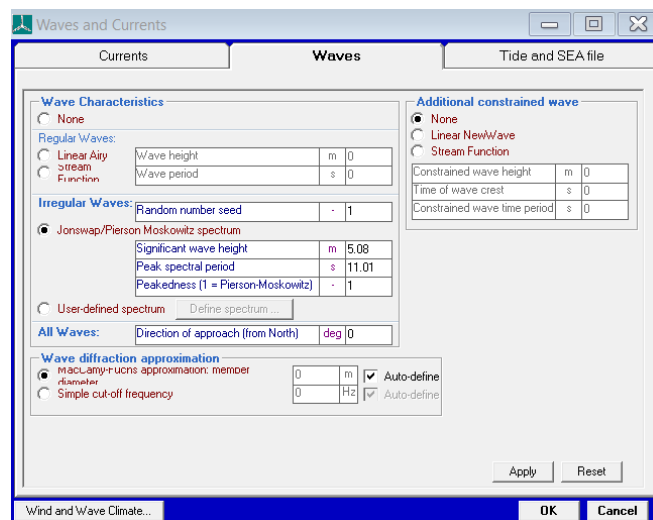


Figura 11: Parámetros relativos al oleaje

Las corrientes por otro lado se mediante la velocidad del agua en la superficie y la profundidad a la que deja de haber corrientes significativas.

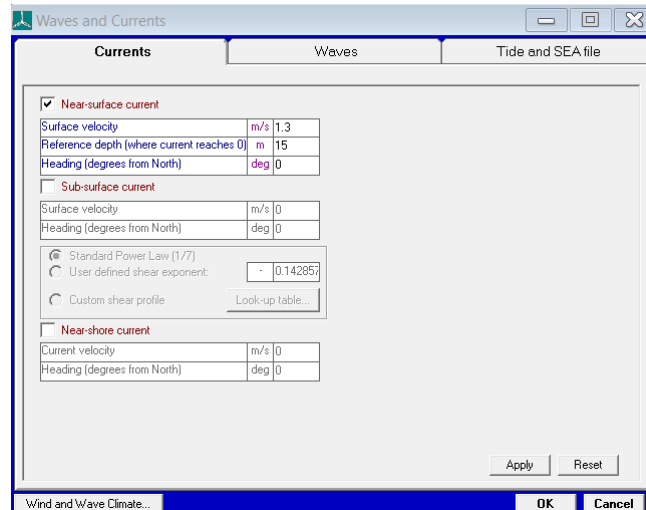


Figura 12: Parámetros relativos a la corriente

Nótese que se ha considerado la dirección de todos los factores climatológicos alineada con el norte con el propósito de simular el peor caso posible para el estudio de la fatiga.

Con estos parámetros introducidos Bladed puede simular las cargas que se producirán en la torre en distintos escenarios y son dichas simulaciones las que se utilizarán para el estudio del daño por fatiga.

5.2 EL METODO RAINFLOW O METODO DE LOS CICLOS DE LLUVIA

5.2.1 EXPLICACIÓN TEÓRICA

El método rainflow es un algoritmo desarrollado por Tatsuo Endo and M. Matsuishi en 1968 y recibe su nombre por la similitud que tiene gráficamente con el agua de lluvia fluyendo por el techo de una pagoda. Este algoritmo es el más popular para el conteo de ciclos a la hora de determinar el daño por fatiga debido a su simplicidad y a que sigue el bucle de histéresis de la curva tensión-deformación del material.

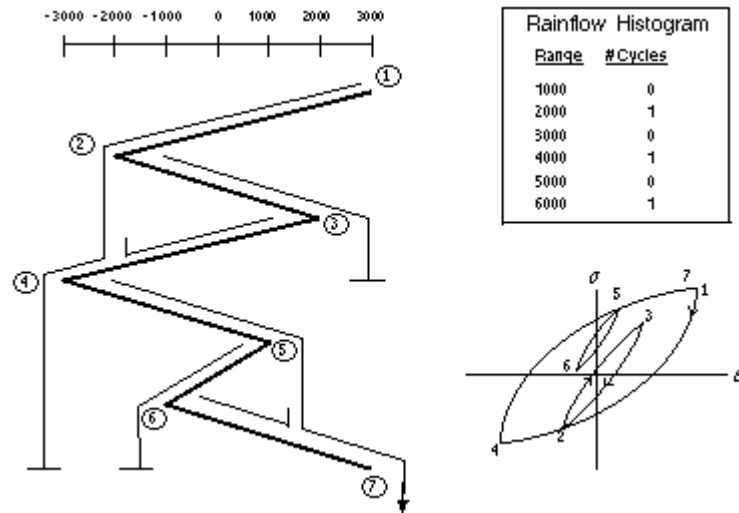


Figura 13: Esquema representativo del método Rainflow

El método se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Lo primero es identificar los picos y los valles, los picos son puntos en los que el diagrama de tensiones alcanza un máximo mientras que en los valles alcanza un mínimo.
2. Una vez que se sabe esto se del primer pico y se traza una línea hasta el primer valle, dicha línea no terminara hasta que se den uno de dos posibles casos, que el ciclo se cierre o que la lluvia se pare.
3. En el caso que el segundo pico sea menor que el primero la línea continua pero si no se considera que el ciclo se cierra. Lo mismo ocurre con los valles, un ciclo termina cuando el siguiente valle tiene un valor inferior al valle de partida.
4. La lluvia se para cuando se encuentra con un flujo que cae de un tejado superior. Una vez se termina con un punto se pasa al siguiente hasta haber estudiado todos los puntos.

5.2.2 EJEMPLO

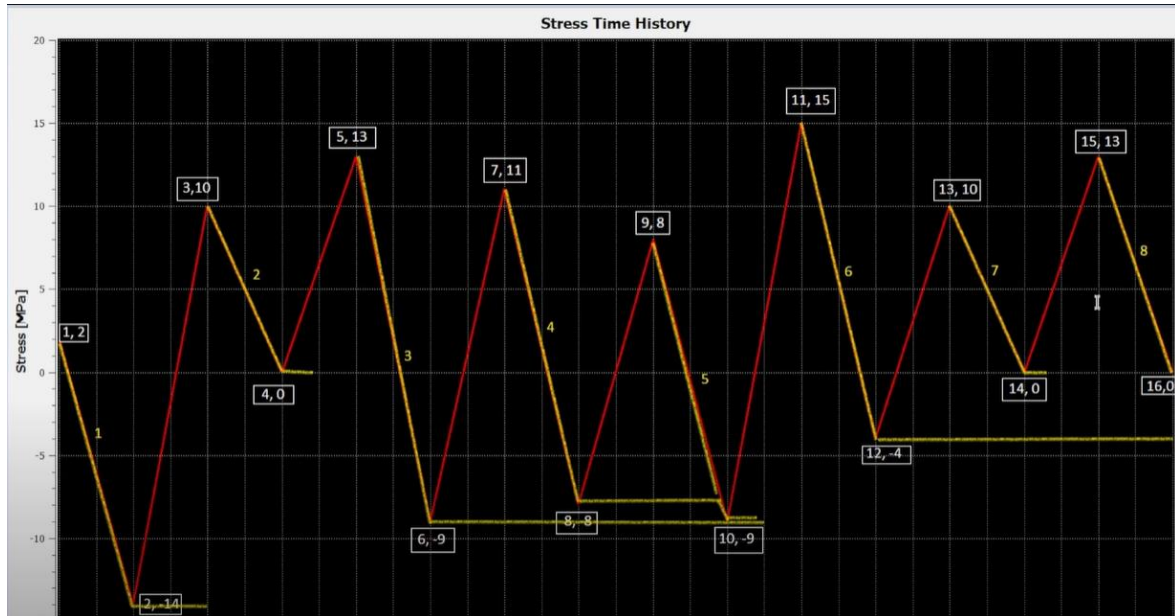


Figura 14: Análisis de picos

En esta grafica se representa un historial de tensiones en el eje y frente al tiempo en el eje x

Como se puede observar los tramos 1-2-7 terminan inmediatamente puesto que el siguiente pico tiene un valor superior. El tramo 3 va desde el punto 5 hasta el punto 10 ya que el pico del punto 11 tiene un valor de 15MPa, superior a los 13Mpa del punto 5. El tramo 4 continua hasta el punto 11 pero antes de terminar choca contra la recta que une los puntos 9 y 10, esto es importante puesto que el tramo 5 es cortado por la lluvia que parte del punto 7.

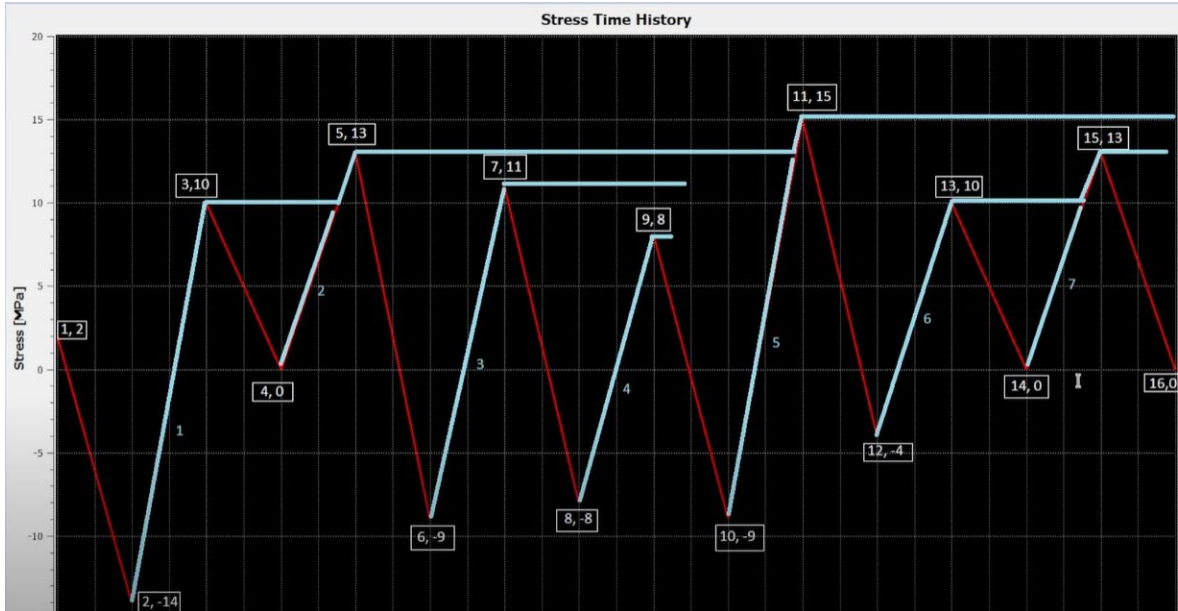


Figura 15: Análisis de Valles

El análisis de los valles es muy similar al de los picos, si el próximo valle tiene un valor más alto se continúa con la línea y si no se para. Cabe destacar que en el caso de que haya dos valles o picos con el mismo valor también se para, esto se puede observar en el tramo 3. También es importante explicar que el rango de los ciclos se ve afectado si la lluvia se corta debido a un flujo superior, por ejemplo, mientras que el rango del tramo 1 sería de 29MPa (15 - -14) el rango del tramo 5 solo sería de 22MPa (13 - -9) en vez de 24MPa (15 - -9) debido a su corte con el tramo 1.

Peaks				
Segment	From (MPa)	To (MPa)	Stress Range (MPa)	Cycles
1	2	-14	16	0.5
2	10	0	10	0.5
3	13	-9	22	0.5
4	11	-9	20	0.5
5	8	-8	16	0.5
6	15	-4	19	0.5
7	10	0	10	0.5
8	13	0	13	0.5

Peaks Cycle Count	
Stress Range (MPa)	Cycles
10	1
13	0.5
16	1
19	0.5
20	0.5
22	0.5

Valleys				
Segment	From (MPa)	To (MPa)	Stress Range (MPa)	Cycles
1	-14	15	29	0.5
2	0	10	10	0.5
3	-9	11	20	0.5
4	-8	8	16	0.5
5	-9	13	22	0.5
6	-4	13	17	0.5
7	0	10	10	0.5

Valleys Cycle Count	
Stress Range (MPa)	Cycles
10	1
16	0.5
17	0.5
20	0.5
22	0.5
29	0.5

Total Cycle Count	
Stress Range (MPa)	Cycles
10	2
13	0.5
16	1.5
17	0.5
19	0.5
20	1
22	1
29	0.5

Figura 16: Resultados de ambos análisis

Una vez se han evaluado todos los puntos se pasan los datos a una hoja de Excel. Cada segmento se considera como medio ciclo. Una vez sumados los ciclos de los picos a los de los valles hemos terminado.

5.2.3 APLICACIÓN A BLADED

5.2.3.1 Power Production Loading

Aprender a como utilizar el algoritmo Rainflow de manera grafica es importante puesto que permite entender el transfondo del programa mucho mejor pero para este proyecto se necesita de un software que realice dicho calculo debido a la complejidad del historial de tensiones.

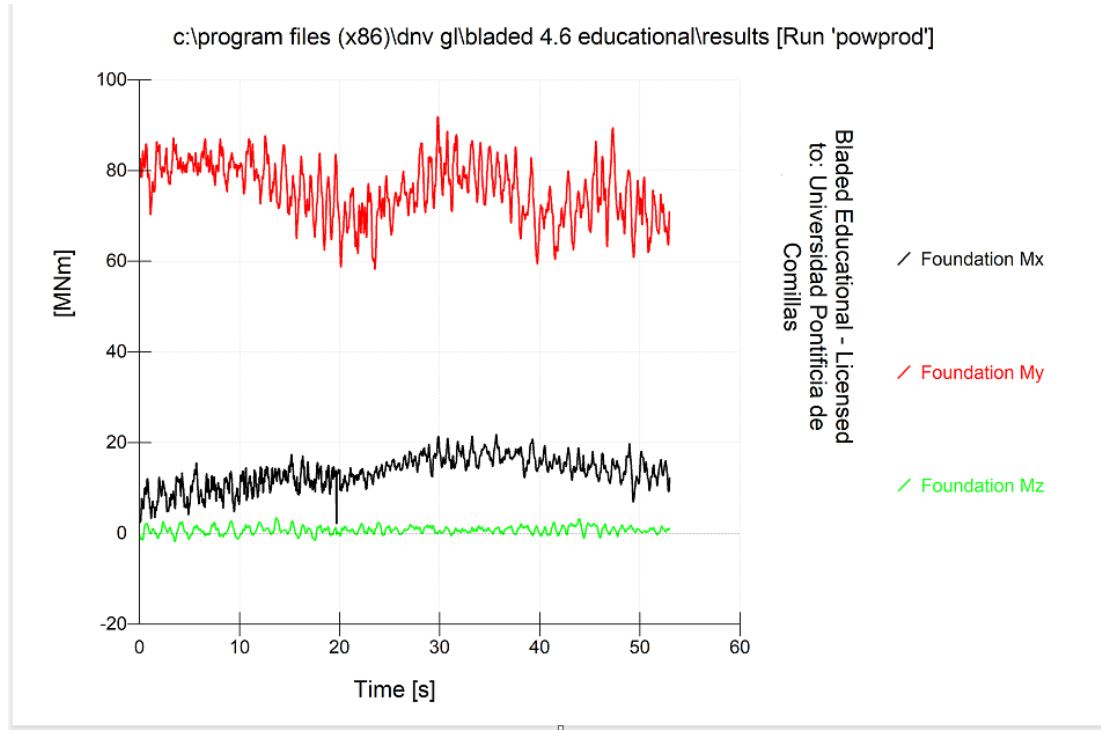


Figura 17: Momentos en Power Production Loading

Al hacer una simulación de las cargas de la torre en el ensayo de generación de potencia se obtiene esto. Como se puede observar realizar el método Rainflow de manera grafica sería demasiado laborioso, pero afortunadamente el programa Bladed tiene una funcionalidad incluida para calcular el número de ciclos.

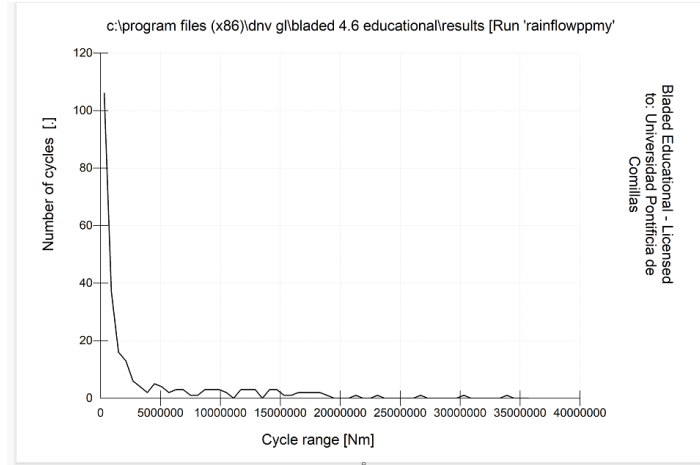


Figura 18: Grafico Ciclos de Lluvia Power Production Loading

El resultado que se obtiene una vez pasado a Excel es algo así:

c:\program files (x86)\dnv gl\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowppmy']	
Number of cycles [.]	
Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]
300000	106
900000	37
1.50E+06	16
2.10E+06	13
2.70E+06	6
3.30E+06	4
3.90E+06	2
4.50E+06	5
5.10E+06	4
5.70E+06	2
6.30E+06	3
6.90E+06	3
7.50E+06	1
8.10E+06	1
8.70E+06	3
9.30E+06	3
9.90E+06	3
1.05E+07	2
1.17E+07	3
1.23E+07	3
1.29E+07	3
1.41E+07	3
1.47E+07	3
1.53E+07	1
1.59E+07	1
1.65E+07	2
1.71E+07	2
1.77E+07	2

Tabla 3: Tabla Ciclos de Lluvia Power Production Loading

Aquí se muestra el número de ciclos y sus amplitudes de el Momento en el eje Y cuando el aerogenerador se encuentra en el modo de generación de potencia. Al estar realizándose un análisis de fatiga, de todos los momentos solo interesa el My puesto que el resto al ser de magnitudes inferiores no tendrán efecto a fatiga. Una cosa que si que es de interés es el diagrama de fuerzas puesto que si alguna tiene una magnitud significativa puede sumarse al momento flector en y e incrementar las tensiones.

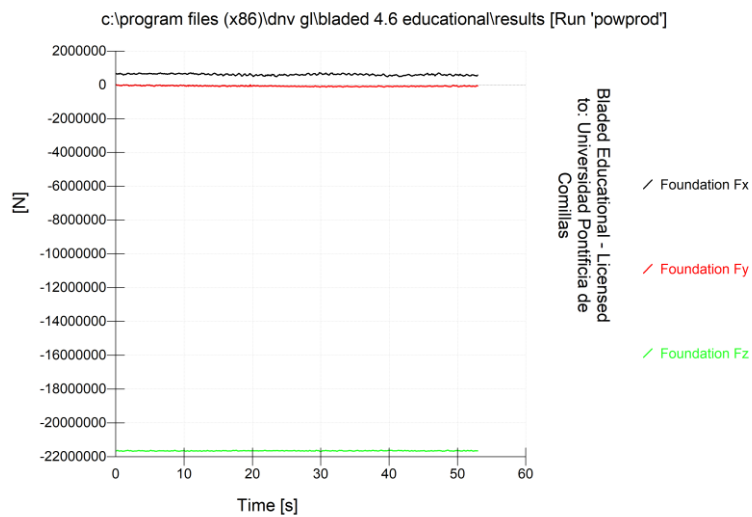


Figura 19: Fuerzas Power Production Loading

Después de simular las fuerzas se puede observar que la fuerza en el eje Z es mucho más significativa que las de los otros ejes por lo que se tendrá en cuenta a la hora de calcular las tensiones. Cabe destacar que dicha fuerza es resultado del peso por lo que prácticamente no varía entre ensayos y se puede asumir constante.

5.2.3.2 Start

Al simular las cargas en el arranque se obtiene este diagrama:

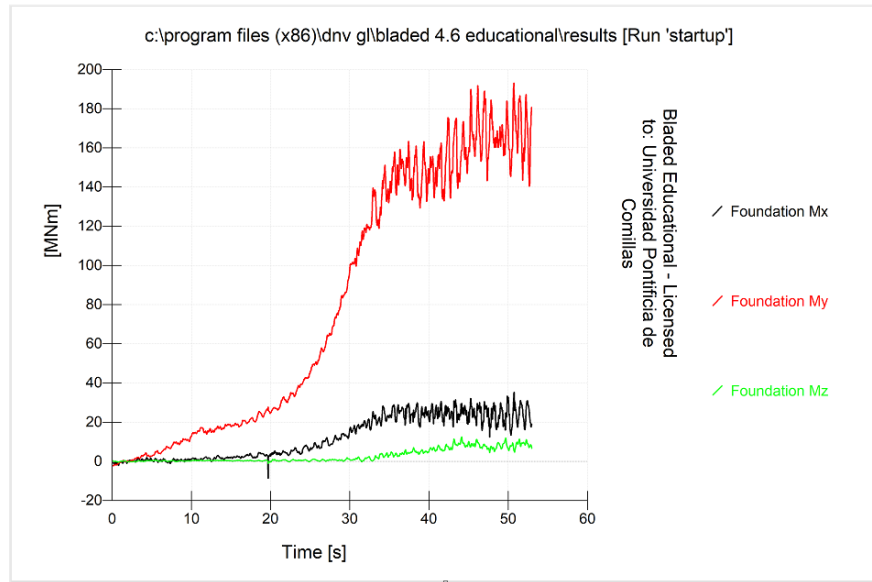


Figura 20: Momentos Start

Al analizar este diagrama se puede ver el efecto que tiene el ángulo de paso en los momentos flectores. Al inicio las palas se encuentran en bandera o lo que es lo mismo con ángulo de paso 90° . El ángulo de paso es el ángulo que hay entre la cuerda de la pala y el plano de rotación, que este sea 90° implica que ambos son perpendiculares, o lo que es lo mismo, que la cuerda esta alineada con el eje del viento (ángulo de ataque de 0°). En este caso inicial las palas ofrecen una resistencia mínima al viento además de ser paralelas con respecto a su eje, de esta forma no puede darse sustentación y las palas no se mueven. Como es de esperar, si las palas ofrecen la menor resistencia posible al viento, los momentos flectores en la base serán de baja magnitud e irán incrementando conforme se modifique el ángulo de paso para ofrecer mayor resistencia al viento. En este caso el My es también el de mayor magnitud, esto se debe a que el eje Y es el perpendicular a la dirección del viento por lo que en todos los ensayos es el que se va a considerar. Una vez calculado el Rainflow obtenemos los siguientes valores:

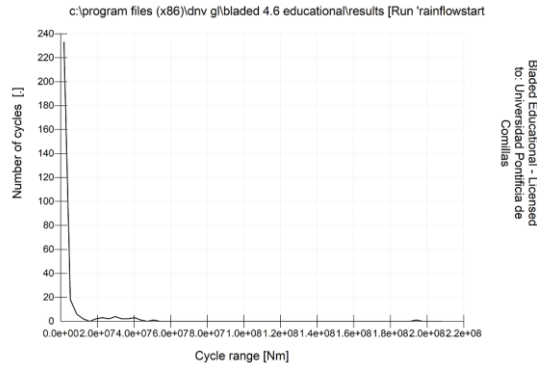


Figura 21: Grafico Ciclos de Lluvia Start

c:\program files (x86)\dnv gl\bladed 4.6 educ	
Number of cycles [.]	
Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]
1.75E+06	233
5.25E+06	18
8.75E+06	6
1.23E+07	2
1.93E+07	2
2.28E+07	3
2.63E+07	2
2.98E+07	4
3.33E+07	2
3.68E+07	2
4.03E+07	3
4.38E+07	1
5.08E+07	1
1.94E+08	1

Tabla 4: Tabla Ciclos de Lluvia Start

5.2.3.3 Normal Stop

En las paradas normales se asume que el aerogenerador esta funcionando normalmente hasta que se empieza a cambiar el angulo de paso poco a poco. Dichas paradas pueden ocurrir debido a que se necesita hacer mantenimiento a la turbina (Según GL se deben de hacer 2 paradas anuales por mantenimiento) o porque el viento salga del rango establecido (3.5m/s – 30m/s).

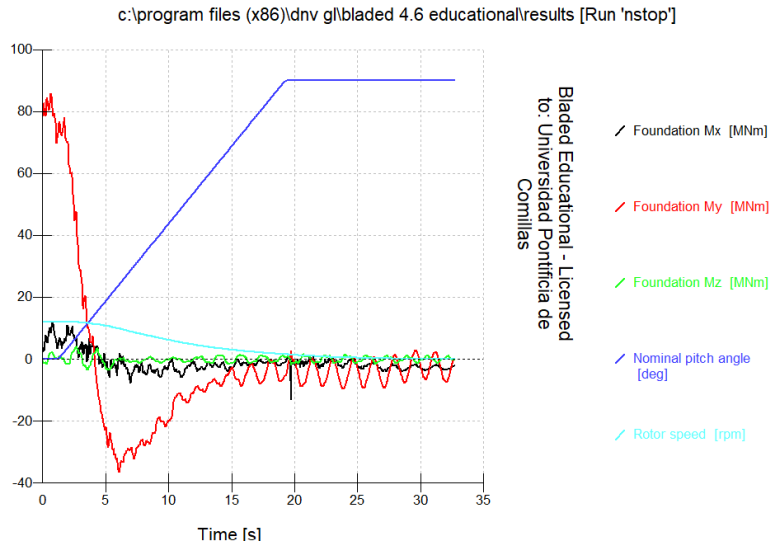


Figura 22: Momentos Normal Stop

En este caso se han incluido el ángulo de paso y la velocidad del rotor para que el lector pueda observar cómo interactúan con las cargas. Al inicio el aerogenerador está funcionando normalmente con un ángulo de paso de 0° y conforme dicho ángulo aumenta la velocidad del rotor y las cargas disminuyen.

Una vez realizado el Rainflow obtenemos estos datos:

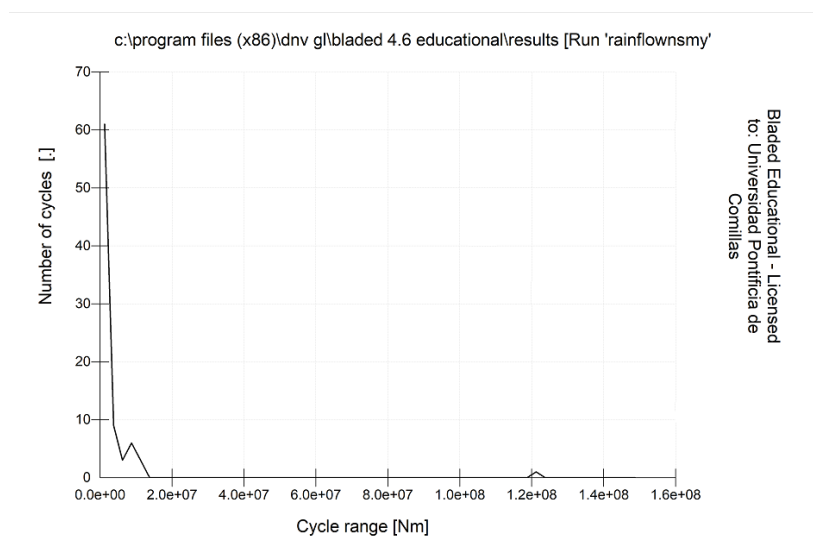


Figura 23: Grafico Ciclos de Lluvia Normal Stop

c:\program files (x86)\dnv gl\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowsmy']

Number of cycles [.]	
Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]
1.25E+06	61
3.75E+06	9
6.25E+06	3
8.75E+06	6
1.13E+07	3
1.21E+08	1

Tabla 5: Tabla Ciclos de Lluvia Normal Stop

5.2.3.4 Emergency Stop

Las paradas de emergencia ocurren cuando hay algún fallo en la red eléctrica o algún fallo mecánico o eléctrico en el aerogenerador. En estos casos se para cuanto antes para evitar daños innecesarios en la estructura.

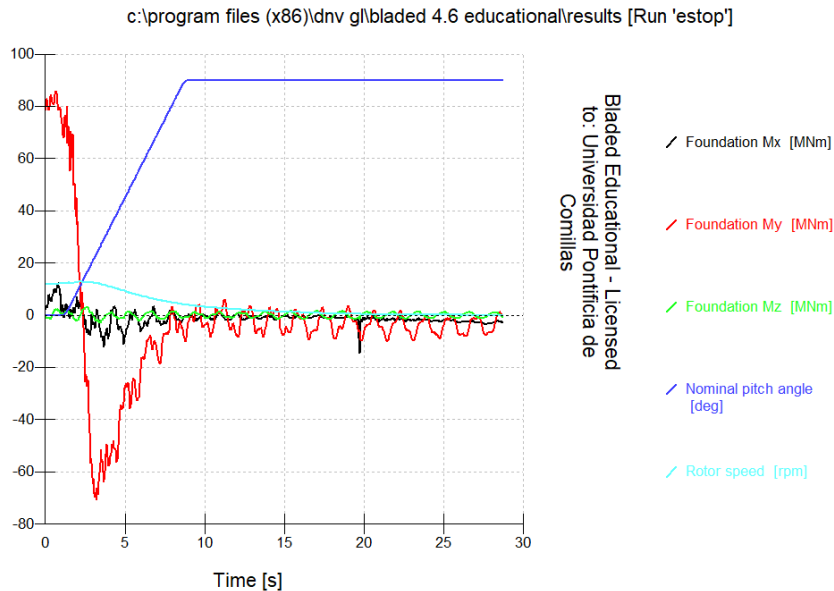


Figura 24: Momentos Emergency Stop

Se puede observar un diagrama muy similar al anterior por lo que los ciclos obtenidos a través del rainflow serán parecidos.

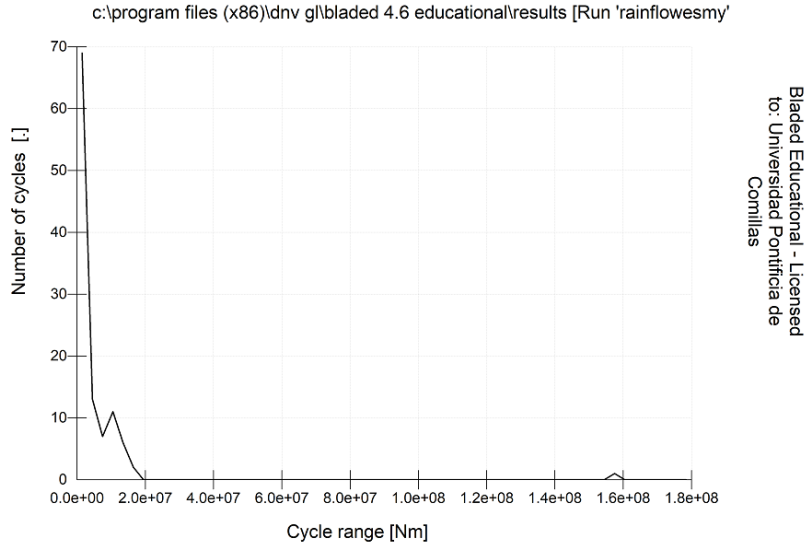


Figura 25: Gráfico Ciclos de Lluvia Emergency Stop

c:\program files (x86)\dnv gl\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowesmy']

Number of cycles [.]	
Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]
1.50E+06	69
4.50E+06	13
7.50E+06	7
1.05E+07	11
1.35E+07	6
1.65E+07	2
1.58E+08	1

Tabla 6: Tabla Ciclos de Lluvia Emergency Stop

Como era de esperar, los rangos de los ciclos que aparecen son similares, aunque aquí aparecen un mayor numero de ciclos, algo entendible puesto que la parada de emergencia implica mayor inestabilidad y por lo tanto mayor oscilación. Aunque estas paradas muestran ciclos que pueden afectar a la resistencia a fatiga es muy difícil de prever cuantas paradas de emergencia van a ocurrir a lo largo de la vida útil del aerogenerador, pero se espera que sea un numero bajo. Puesto que estas amplitudes necesitan de un elevado numero de ciclos para

causar un daño significativo a fatiga el propio manual de GL especifica que las paradas de emergencia no se deben de considerar al hacer un estudio del daño por fatiga.

5.2.3.5 Idle

El aerogenerador se considera que se encuentra en marcha de vacío cuando las condiciones del viento no son optimas para su funcionamiento, normalmente por la ausencia del mismo o por su orientación.

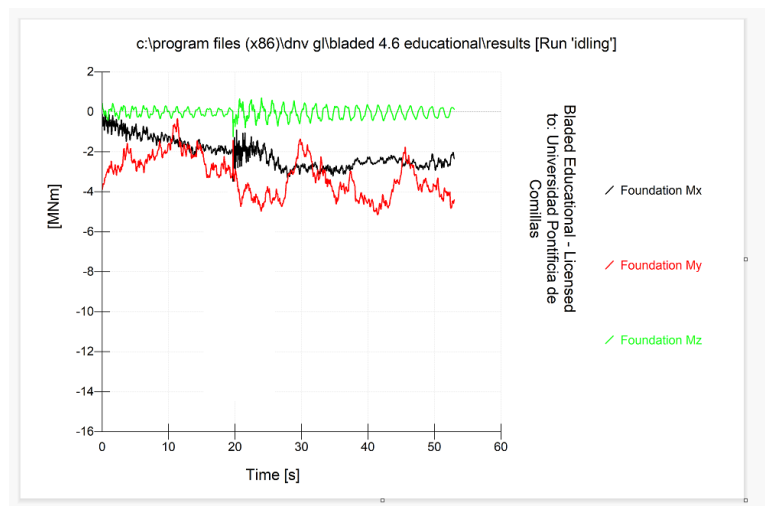


Figura 26: Momentos Idle

En este caso con solo ver la magnitud de los momentos se puede determinar que las cargas van a ser insignificativas en fatiga por lo que no es necesario calcular el número de ciclos.

5.2.3.6 Parked

El caso de aparcado es similar al de marcha de vacío, en este caso el rotor tampoco está girando solo que es por voluntad del operador, ya sea para hacer mantenimiento o por seguridad. En el manual de GL se especifica que en el estudio a fatiga hay que tener en cuenta las horas de operación en las que a pesar de estar parado la estructura pueda sufrir daños. El único caso en el que pueden darse cargas de una magnitud lo suficientemente alta como para dañar la estructura es cuando el viento supera la velocidad máxima y el

aerogenerador tiene que detenerse por seguridad. Si realizamos la simulación con el mismo archivo de viento que hasta ahora obtendríamos estos valores:

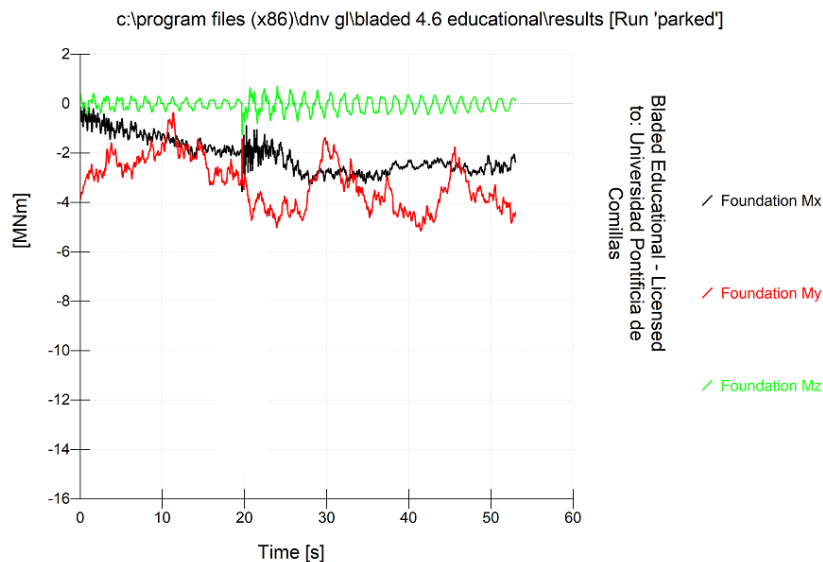


Figura 27: Momentos Parked

Estos momentos son demasiado bajos para causar ningún tipo de daño a fatiga y su estudio no aportaría nada al computo global.

Por eso para esta simulación no se va a utilizar la velocidad media del viento de 10.6 m/s que se ha utilizado en las anteriores si no que se va a utilizar una velocidad de 35 m/s para simular el caso buscado.

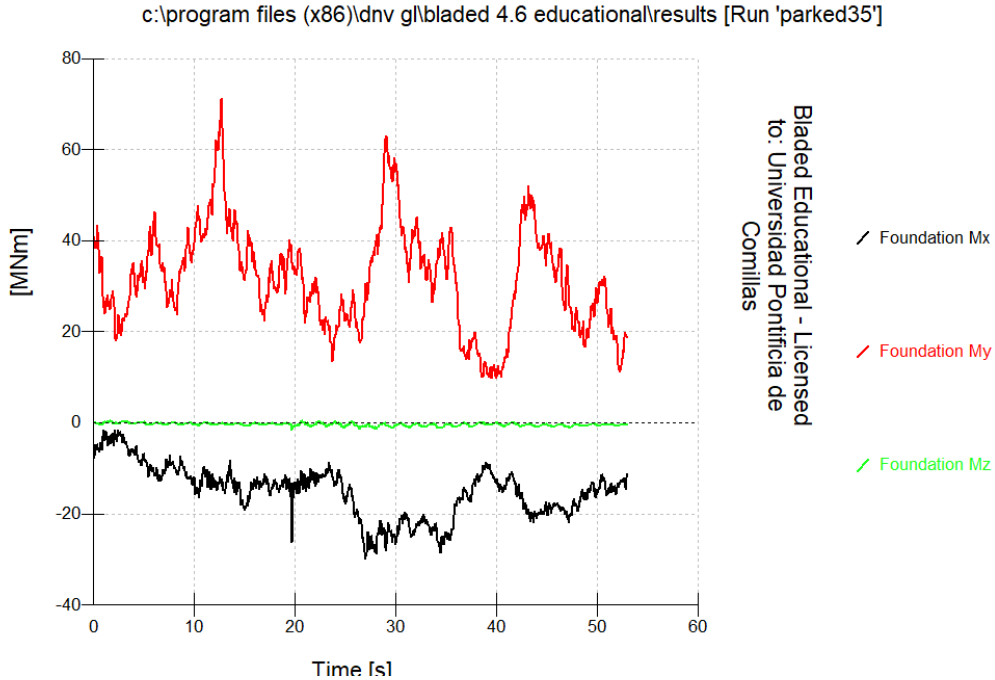


Figura 28: Momentos Parked con vientos de 35m/s

En este caso al aumentar la velocidad del viento el archivo de turbulencia que se ha usado previamente se queda corto por lo que hay que generar otro antes de hacer la simulación. Véase como ahora los momentos si que tienen valores significativos y merecen ser estudiados. Calculando el numero de ciclos con el Rainflow obtenemos la siguiente información.

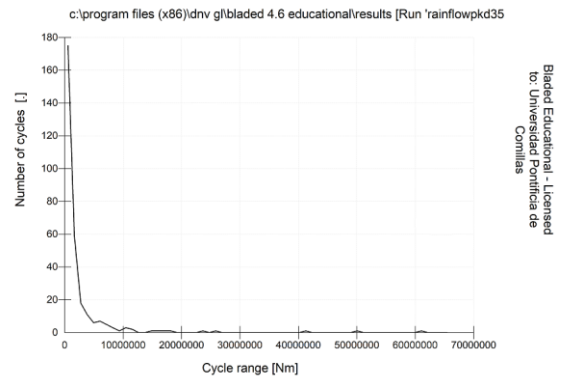


Figura 29: Grafico Ciclos de Lluvia Parked con vientos de 35m/s

c:\program files (x86)\dnv g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowpkl35']	
Number of cycles [.]	
Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]
550000	175
1.65E+06	59
2.75E+06	18
3.85E+06	11
4.95E+06	6
6.05E+06	7
7.15E+06	5
8.25E+06	3
9.35E+06	1
1.05E+07	3
1.16E+07	2
1.49E+07	1
1.60E+07	1
1.71E+07	1
1.82E+07	1
2.37E+07	1
2.59E+07	1
4.13E+07	1
5.01E+07	1
6.11E+07	1

Tabla 7: Tabla Ciclos de Lluvia Parked con vientos de 35m/s

5.3 TRANSFORMACION DE MOMENTOS A TENSIONES:

Una vez que se han obtenido el número de ciclos y sus amplitudes en las siguientes simulaciones hay que transformar los momentos y fuerzas en tensiones para poder calcular el daño a fatiga. Para hacer esto se utilizaran las ecuaciones de la flexión compuesta:

Es importante indicar cuales son los ejes con los que se va a trabajar tanto en la torre como en la propia sección de la base.

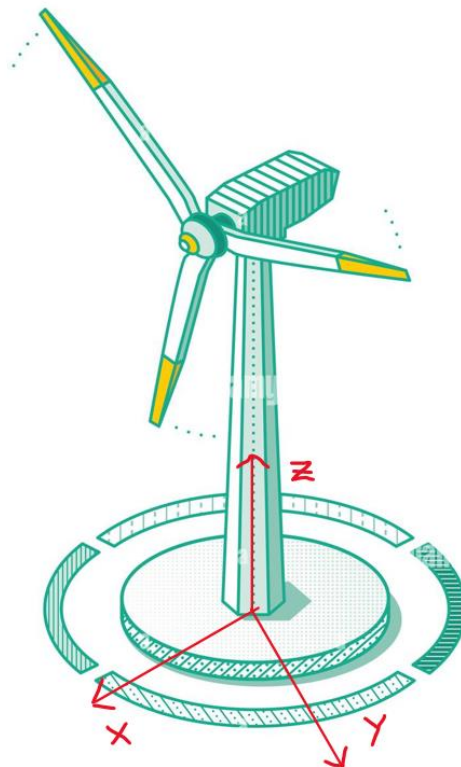


Figura 30: Aerogenerador con Ejes de Coordenadas

El propósito de este modelo es simplemente enseñar la colocación de los ejes puesto que la torre que se ha usado para los cálculos es cilíndrica hueca con una sección como la que se muestra a continuación.

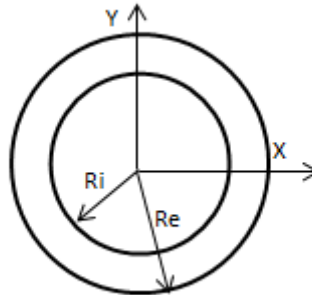


Figura 31: Sección de la Torre

Para este primer ensayo se han tomado unos valores de $R_i = 2.42\text{m}$ $R_e = 2.5\text{m}$, de acuerdo con el libro de texto Wind Energy Handbook por Tony Burton et al un grosor de 80mm es algo común en este tipo de estructuras, aunque se ira ajustando conforme a los resultados obtenidos.

Como se van a calcular las tensiones resultantes de la suma del momento flector en Y y la compresión en Z debe de estudiarse el punto en el la circunferencia exterior corta con el eje X puesto que va a ser el punto de mayor compresión.

La formula genérica para calcular la tensión total es la siguiente:

$$\sigma = \frac{M_y}{I_y} x + \frac{N}{A}$$

En este caso se están buscando las amplitudes de tensión, puesto que el axil es constante no se debe de considerar aquí.

Al buscarse la tensión en el punto mas exterior $x = d_e$,sustituyendo los momentos de inercia y las áreas queda así:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta M_y}{\frac{\pi(d_e^4 - d_i^4)}{64}} \frac{d}{2} = \frac{32\Delta M_y \cdot d_e}{\pi(d_e^4 - d_i^4)} N/mm^2$$

Esta formula puede introducirse en el Excel extraído de Bladed para así sacar las tensiones en N/m^2 (Pa) y posteriormente transformarlas a N/mm^2 (MPa) que se muestran a continuación.

5.3.1 POWER PRODUCTION

Cycle range [Nm]	Cycle range(N/m ²)	Cycle range(N/mm ²)
3.00E+05	1.75E+07	17.52
9.00E+05	1.75E+07	17.52
1.50E+06	1.75E+07	17.52
2.10E+06	1.75E+07	17.52
2.70E+06	1.75E+07	17.52
3.30E+06	1.75E+07	17.52
3.90E+06	1.75E+07	17.52
4.50E+06	1.75E+07	17.52
5.10E+06	1.75E+07	17.52
5.70E+06	1.75E+07	17.52
6.30E+06	1.75E+07	17.52
6.90E+06	1.75E+07	17.52
7.50E+06	1.75E+07	17.52
8.10E+06	1.75E+07	17.52
8.70E+06	1.75E+07	17.52
9.30E+06	1.75E+07	17.52
9.90E+06	1.75E+07	17.52
1.05E+07	1.75E+07	17.52
1.17E+07	1.75E+07	17.52
1.23E+07	1.75E+07	17.52
1.29E+07	1.75E+07	17.52
1.41E+07	1.75E+07	17.52
1.47E+07	1.75E+07	17.52
1.53E+07	1.75E+07	17.52
1.59E+07	1.75E+07	17.52
1.65E+07	1.75E+07	17.52
1.71E+07	1.75E+07	17.52
1.77E+07	1.75E+07	17.52
1.83E+07	1.75E+07	17.52
1.89E+07	1.75E+07	17.52
2.13E+07	1.75E+07	17.52

2.31E+07	1.75E+07	17.52
2.67E+07	1.75E+07	17.52
3.03E+07	1.75E+07	17.52
3.39E+07	1.75E+07	17.52

Tabla 8: Carreras de Tensiones Power Production Loading

5.3.2 START

Cycle range [Nm]	Cycle range(N/m ²)	Cycle range(N/mm ²)
1.75E+06	1.87E+07	18.69
5.25E+06	2.10E+07	21.03
8.75E+06	2.34E+07	23.37
1.23E+07	2.57E+07	25.71
1.93E+07	3.04E+07	30.38
2.28E+07	3.27E+07	32.72
2.63E+07	3.51E+07	35.06
2.98E+07	3.74E+07	37.40
3.33E+07	3.97E+07	39.74
3.68E+07	4.21E+07	42.07
4.03E+07	4.44E+07	44.41
4.38E+07	4.68E+07	46.75
5.08E+07	5.14E+07	51.43
1.94E+08	1.47E+08	147.32

Tabla 9: Carreras de Tensiones Start

5.3.3 NORMAL STOP

Cycle range [Nm]	Cycle range(N/m ²)	Cycle range(N/mm ²)
1.25E+06	1.84E+07	18.36
3.75E+06	2.00E+07	20.03
6.25E+06	2.17E+07	21.70
8.75E+06	2.34E+07	23.37
1.13E+07	2.50E+07	25.04
1.21E+08	9.86E+07	98.55

Tabla 10: Carreras de Tensiones Normal Stop

5.3.4 PARKED

Cycle range [Nm]	Cycle range(N/m ²)	Cycle range(N/mm ²)
5.50E+05	1.79E+07	17.89
1.65E+06	1.86E+07	18.63
2.75E+06	1.94E+07	19.36
3.85E+06	2.01E+07	20.10
4.95E+06	2.08E+07	20.83
6.05E+06	2.16E+07	21.57
7.15E+06	2.23E+07	22.30
8.25E+06	2.30E+07	23.04
9.35E+06	2.38E+07	23.77
1.05E+07	2.45E+07	24.51
1.16E+07	2.52E+07	25.24
1.49E+07	2.74E+07	27.44
1.60E+07	2.82E+07	28.18
1.71E+07	2.89E+07	28.91
1.82E+07	2.96E+07	29.65
2.37E+07	3.33E+07	33.32
2.59E+07	3.48E+07	34.79
4.13E+07	4.51E+07	45.08
5.01E+07	5.10E+07	50.96
6.11E+07	5.83E+07	58.31

Tabla 11: Carreras de Tensiones Parked

5.4 ROTURA POR FATIGA

Una vez calculadas las amplitudes en MPa de los ciclos solo queda saber el número de ciclos que van a ocurrir a lo largo de la vida útil del aerogenerador (nótese que las simulaciones nos dan el número de ciclos en un intervalo de 60s) y el número de ciclos que serian necesarios para romper la estructura a cada una de las amplitudes. Una vez conocidos estos 2 datos se puede aplicar la Regla de Miner que se explicara a continuación para ver si la estructura rompe o no.

5.4.1 NUMERO DE CICLOS NECESARIOS PARA LA ROTURA

Esta información se puede sacar fácilmente a partir de la amplitud de los ciclos y la curva S-N

5.4.1.1 Curva S-N

Las curvas S-N son obtenidas experimentalmente al someter a varillas de prueba a esfuerzos cíclicos de distintas amplitudes. Para obtener la curva de un material se requieren un mínimo de 15 varillas de prueba pero cuantas mas se usen más preciso será el resultado final.

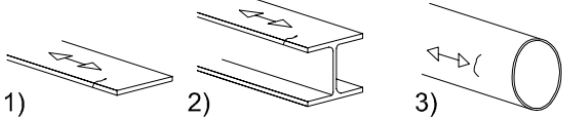
Categoría del detalle	Detalles constructivos	Descripción
160	<p>Nota: la curva de resistencia a la fatiga correspondiente a la categoría 160 es la más alta. Ningún detalle puede alcanzar una resistencia a la fatiga mayor para ningún número de ciclos</p> 	<p>Productos laminados y extruidos: 1/ Placas y planos 2/ Perfiles laminados 3/ Secciones huecas circulares o rectangulares sin soldadura</p>

Figura 32: Categoría de Detalle 160(DBSE-A)

Para este proyecto se va a utilizar la curva SN del acero S-275 con categoría de detalle 160 debido a que para este análisis preliminar se asume una superficie lisa sin soldaduras ni remaches.

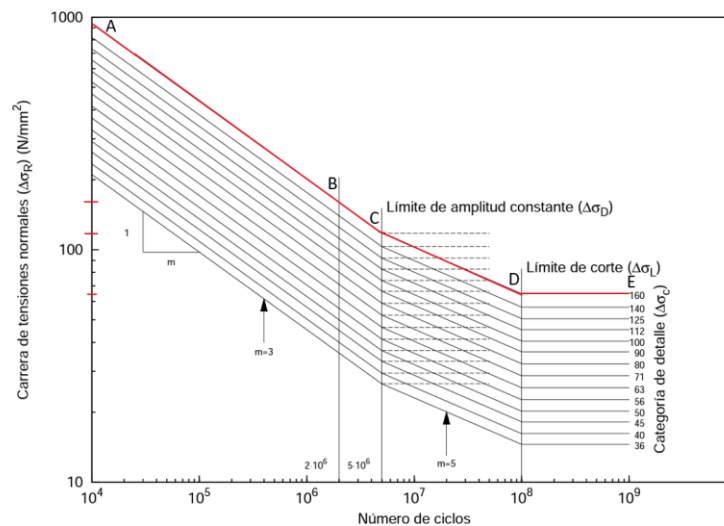


Figura 33: Curva S-N del Acero S-275 (DBSE-A)

Para esta categoría se puede observar que los ciclos con amplitud inferior a 65MPa no se deben de considerar puesto que el material aguanta un numero infinito de ciclos, o lo que es lo mismo, el valor se encuentra por debajo del límite de truncamiento.

Para calcular el número de ciclos que aguanta el material se necesitan las pendientes y los puntos de corte de ambos segmentos de la curva

Tramo A-B-C

Al ser una escala logarítmica no es tan fácil relacionar el número de ciclos con la carrera de tensiones a través de la m , afortunadamente en el Documento Básico de Seguridad Estructural del CTE, del cual se ha sacado dicha curva, aparecen las ecuaciones que los relacionan.

La ecuación por la que se rige el primer tramo es la siguiente:

$$\Delta\sigma_c^m \cdot 2 \cdot 10^6 = \Delta\sigma_R^m \cdot N_R \quad \text{con } m = 3 \quad \text{para } N \leq 5 \cdot 10^6$$

Para calcular el número de ciclos a los que rompe el material a cierta carrera de tensiones solo hace falta despejar N_R y sustituir $\Delta\sigma_c$ por 160

Despejando y sustituyendo la ecuación queda así:

$$N_R = \frac{160^3 \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_R^3} = \frac{8.192 \cdot 10^{12}}{\Delta\sigma_R^3}$$

Tramo C-D

En este caso hay con 2 ecuaciones:

$$\Delta\sigma_D^m \cdot 5 \cdot 10^6 = \Delta\sigma_R^m \cdot N_R \quad \text{con } m = 5 \quad \text{para } 5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$$

$$\Delta\sigma_D = \left[\frac{2}{5} \right]^{1/m} \cdot \Delta\sigma_c$$

Sustituyendo $\Delta\sigma_D$ por $\Delta\sigma_c$ en la primera ecuación, sustituyendo por los valores conocidos y despejando se llega a la siguiente ecuación:

$$N_R = \frac{160^5 \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_R^5} = \frac{2.097152 \cdot 10^{17}}{\Delta\sigma_R^5}$$

5.5 LA DISTRIBUCIÓN DEL VIENTO

Lo único que falta para determinar el daño a fatiga es saber el numero de ciclos que se van a dar a lo largo de la vida útil de la estructura, para eso es necesario conocer la distribución del viento de modo que se conozca cuantas horas va a estar funcionando y parado con vientos mayores de 30m/s a la vez que cuantas veces se va a parar con el fin de cuantificar las paradas y arranques.

En las especificaciones previas que fueron proporcionadas por el tutor aparece que el viento en el emplazamiento tiene una velocidad media de 10.6 m/s y que su distribución se puede modelar a través de una distribución de Weibull con parámetro de forma K=1.979

5.5.1 LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

La distribución de Weibull recibe su nombre del ingeniero y matemático sueco quien la describió en 1951, Waloddi Weibull. En su versión más general viene definida por 3 parámetros: El parámetro de forma K, el de escala λ y otro de localización γ .

El parámetro de forma determina como de alta es la probabilidad de que los valores se encuentren cerca de la media, como se puede observar en la siguiente figura, cuanto mayor sea este parámetro mas ‘picuda’ será la distribución.

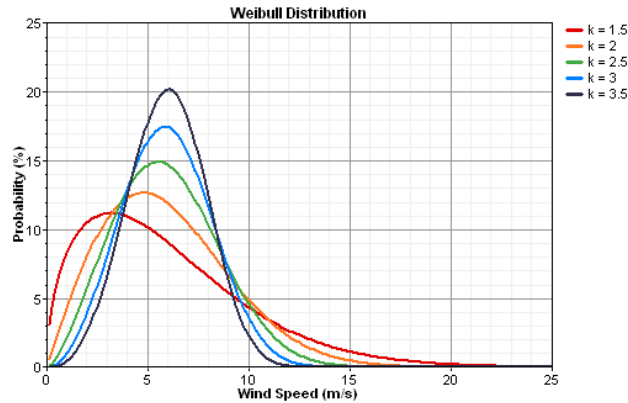


Figura 34: Efecto de la K en la distribución de Weibull

El parámetro de escala dicta el ‘tamaño’ de la distribución, o lo que es lo mismo, donde se encuentra su media.

El parámetro de localización se debe de asumir 0 cuando la distribución no pueda contener valores negativos como es el caso.

La función de densidad es la siguiente:

$$f(x) = \frac{K}{\lambda} \cdot x^{K-1} \cdot e^{-(x/\lambda)^K}$$

Nota: Esta fórmula esta sacada del libro de texto de estadística de ICAI y difiere con la que aparece en internet. A efectos prácticos no hay problema puesto que las funciones que se van a utilizar son la de la esperanza y la función de distribución y esas dos sí que coinciden.

La función de distribución es la siguiente:

$$F_x(x) = 1 - e^{-(x/\lambda)^K}$$

Y por ultimo la función de la esperanza es esta:

$$E(X) = \lambda \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)$$

5.5.2 CALCULO DE PROBABILIDADES

Como en este caso se conoce tanto la media como la K se puede despejar λ de la ultima ecuación para tener totalmente definida nuestra distribución conociendo la siguiente identidad:

$$\Gamma(n + 1) = n!$$

Despejando y sustituyendo se obtiene que:

$$\lambda = \frac{10.6}{\left(\frac{1}{1.979}\right)!} = 11.28$$

Una vez que se ha definido por completo la distribución solo falta calcular las probabilidades que interesan para este análisis.

Probabilidad de que el viento sobrepase los 30m/s

$$1 - F_x(30) = e^{-(30/11.28)^{1.979}} = 0.0978\%$$

Nota: Las funciones de distribución dan la probabilidad de que un valor aleatorio se encuentre a la izquierda de la x, por eso en este caso se esta utilizando $1-F_x(30)$

Esto significa que en 20 años o 7305 dias se van a dar 7.14 dias en los que el viento alcance valores superiores a 30 m/s (se asumirán 8 dias por seguridad) y que en 175320 horas se van a dar 172h con dicho viento.

La probabilidad de que el viento baje por debajo de 3.5 m/s es la siguiente:

$$F_x(3.5) = 1 - e^{-(3.5/11.28)^{1.979}} = 9.396\%$$

Esto implica que de 7305 dias van a darse 687 dias en los que el generador pare

Por ultimo la probabilidad de que el viento se encuentre entre los valores admisibles es de 1 menos la suma de las 2 probabilidades anteriores, es decir, de un 90.5%. Asumir que el generador estará funcionando todo el tiempo no es realista puesto que habrá veces que el

viento sople del lado opuesto de las palas, puesto que el software utilizado solo utiliza la componente longitudinal de la turbulencia es imposible estimar mediante simulaciones la variación en dirección del viento por lo que se asumirá que un 60% del tiempo el viento sopla en una dirección captable por las palas del aerogenerador. Esto nos deja con unas 4757h anuales de generación de potencia o 95134h totales.

5.6 CALCULO DEL DAÑO POR FATIGA

5.6.1 REGLA DE MINER

Para calcular el daño por fatiga se utiliza la Regla de Miner, esta regla es una ecuación de daño acumulativo en la que se asume que cada carrera de tensiones repetida un cierto numero de ciclos ‘gasta’ una parte de la resistencia a fatiga de el material. El porcentaje gastado es proporcional a la vida útil que tendría el material si solo se le aplicase esa carrera de tensiones. Por ejemplo si tuviese 2 carreras diferentes denominadas a y b con la carrera a repitiéndose 10^6 veces y la b repitiéndose 10^8 veces para estimar el danio que causa la carrera a debería de dividir 10^6 por el numero de ciclos que aguantaría el material de estar solamente expuesto a la carrera a, supongamos que es 4×10^6 . En este caso la carrera a habría gastado un 25% de la resistencia a fatiga del material y en el caso de que la b gastase mas del 75% restante el material rompería a fatiga.

Expresandolo como ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C$$

Siendo k el número de diferentes carreras de tensiones, n el número de ciclos que se dan a lo largo de la vida útil de cierta carrera de tensiones y N el número total de ciclos necesarios para que rompa el material. En caso de que C sea mayor que 1 el material rompe por fatiga.

5.6.2 CALCULO DE LA ESTRUCTURA CON CATEGORÍA DE DETALLE 160

Como para este caso ninguna de las carreras de tensiones de generación de potencia supera el límite de truncamiento ya se puede deducir que el material no va a romper por fatiga pero aun así se estudiara.

Lo primero es ver que ciclos si que causan daño por fatiga. En este caso hay un ciclo con amplitud de 98.55 MPa en la parada normal y otro de 147.2 MPa en el arranque. Sumando los días en los que para por exceso y ausencia de viento llegamos a un total de 695 paradas y arranques. Calculando los ciclos necesarios para que rompa el material y aplicando la regla de miner se obtiene:

$$\frac{695}{8.31 * 10^{10}} + \frac{695}{5.56 * 10^{10}} \approx 0$$

Como era de esperar las contribuciones de las paradas y arranques son despreciables a la hora de calcular el daño por fatiga.

5.6.3 CALCULO DE LA ESTRUCTURA CON CATEGORÍA DE DETALLE 90

El resultado anterior indica que todavía se puede optimizar mas la estructura con el fin de reducir el coste, pero para ello primero se debe de usar una categoría de detalle más realista como puede ser la 90

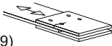
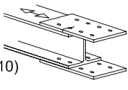

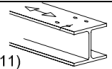
9)		9/ Junta simétrica con doble platavanda y tornillos calibrados	9/ $\Delta\tau$ calculado sobre la sección neta
90		10/ Unión mediante una platavanda mediante tornillos pretensados de alta resistencia	10/ $\Delta\tau$ calculado sobre la sección bruta
		10/ Unión mediante una platavanda con tornillos pretensados de inyección	
		11/ Pieza con agujeros sometida a flexión y axil	11/ $\Delta\tau$ calculado sobre la sección neta

Figura 35: Categoría de detalle 90

El límite de truncamiento para esta categoría se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/m} \cdot \left(\frac{2}{5}\right)^{1/m} \cdot \Delta\sigma_C$$

Sustituyendo se obtiene que $\Delta\sigma_L = 41.16 \text{ MPa}$

Para calcular el numero de ciclos basta con modificar las ecuaciones utilizadas para la categoría de detalle 160.

Tramo A-B-C

$$\Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 = \Delta\sigma_R^m \cdot N_R \quad \text{con } m = 3 \quad \text{para } N \leq 5 \cdot 10^6$$

Despejando y sustituyendo:

$$N_R = \frac{90^3 \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_R^3} = \frac{1.458 \cdot 10^{12}}{\Delta\sigma_R^3}$$

Tramo C-D

$$\Delta\sigma_D^m \cdot 5 \cdot 10^6 = \Delta\sigma_R^m \cdot N_R \quad \text{con } m = 5 \quad \text{para } 5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$$

$$\Delta\sigma_D = \left[\frac{2}{5}\right]^{1/m} \cdot \Delta\sigma_c$$

Despejando y sustituyendo

$$N_R = \frac{90^5 \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_R^5} = \frac{1.18098 \cdot 10^{16}}{\Delta\sigma_R^5}$$

La $\Delta\sigma_R$ del punto de inflexión C es de 66MPa

Al realizar los cálculos en Excel se incluye un coeficiente de seguridad de 2 y se llega a la conclusión de que es muy importante que pocos o ningún ciclo sobrepase los 41.6 MPa de amplitud puesto que al darse tantos ciclos durante la vida útil es muy fácil que estos sobrepasen el límite y el material rompa.

Unos valores de diámetros que cumplen esta condición para el caso de generación de potencia son $D_e=5m$ y $D_i=4.85m$. Estos valores minimizan el espesor fijando $D_e=5m$. Para estos valores el sumatorio de la Regla de Miner da 0.77 por lo que el material no rompe. Cuanto mayor sea el número de Miner más óptima será la estructura siempre y cuando este no supere el 1.

Cabe destacar que en algunos casos particulares como pueden ser la parada normal o el arranque en los que la función Rainflow de Bladed muestra un único ciclo de una amplitud mucho mayor que la media. Esto sería un problema de aparecer en el caso de generación de potencia puesto que es el que más tiempo se está dando, pero al ser las paradas y arranques no afecta al diseño.

Capítulo 6. MODELO B

En este capítulo se va a realizar el mismo análisis que en el anterior solo que sustituyendo el modelo de la torre por uno más realista.

El modelo de la torre anterior consistía en un tubo cilíndrico definido por únicamente dos puntos.

Para la nueva torre se ha optado por un diseño cónico que se asemeja más a la realidad. Esta torre cuenta con una base cilíndrica de grosor constante sumergida bajo el agua con el fin de imitar el monopilote y después se van reduciendo el grosor y el diámetro conforme aumenta la altura como se puede observar en la siguiente figura.

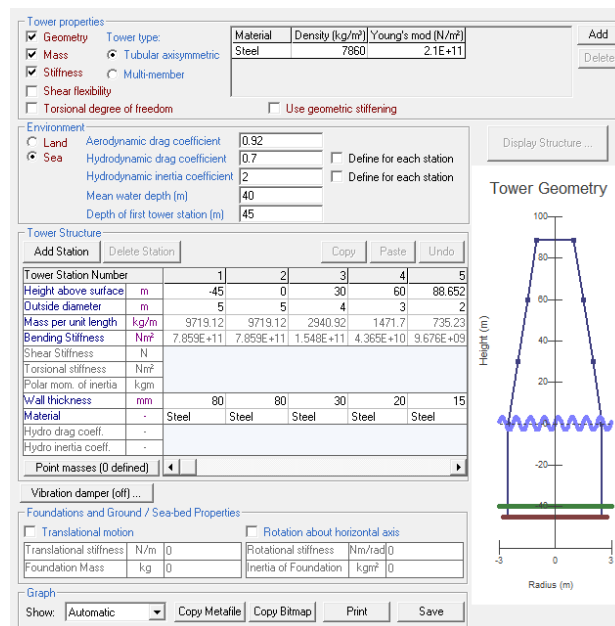


Figura 36: Torre del Modelo B

6.1 CARGAS EN EL MODELO B

Al haberse cambiado el modelo de la torre es necesario recalcular las cargas y los Rainflow en los distintos escenarios.

6.1.1 CALCULO DE LOS PESOS DE LAS TORRES

Lo primero es calcular las fuerzas para comprobar que la nueva torre se ha asimilado bien en el software.

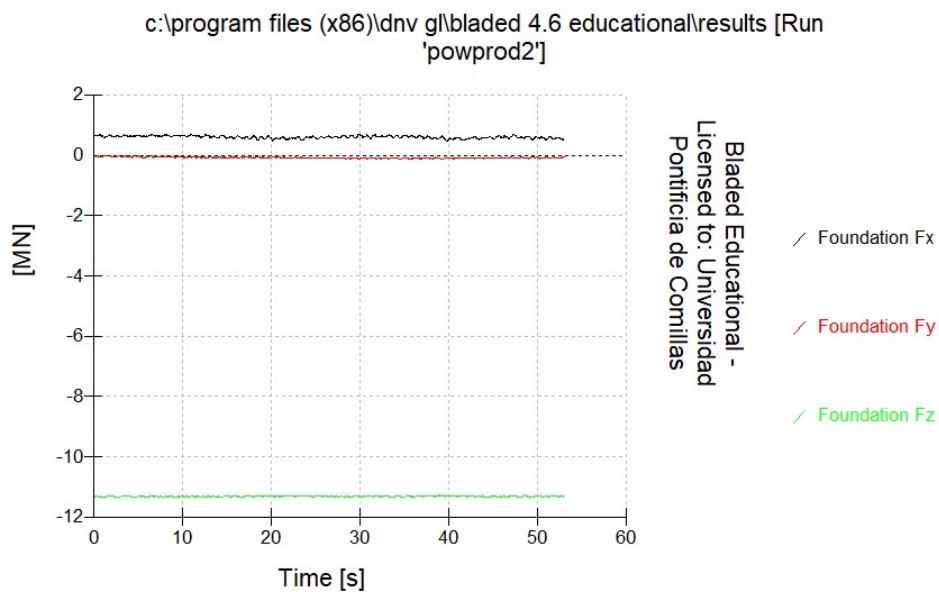


Figura 37: Fuerzas en la Base

En este caso la Fz ronda los 11.3 MN, un peso considerablemente inferior a los 21.7 MN de la anterior estructura. Partiendo de la base de que la torre inicial estaba bien metida en el software podemos usar las dimensiones de la torre y la densidad del material para calcular el peso de la torre y por consiguiente el peso del resto del aerogenerador.

Al hacer los cálculos se llega a la conclusión de que el resto del aerogenerador tiene un peso de 2.9MN, la torre cilíndrica pesa 18.78MN, la torre conica pesa 6.8MN aproximadamente y que esta bien medida en el software.

6.1.2 POWER PRODUCTION LOADING

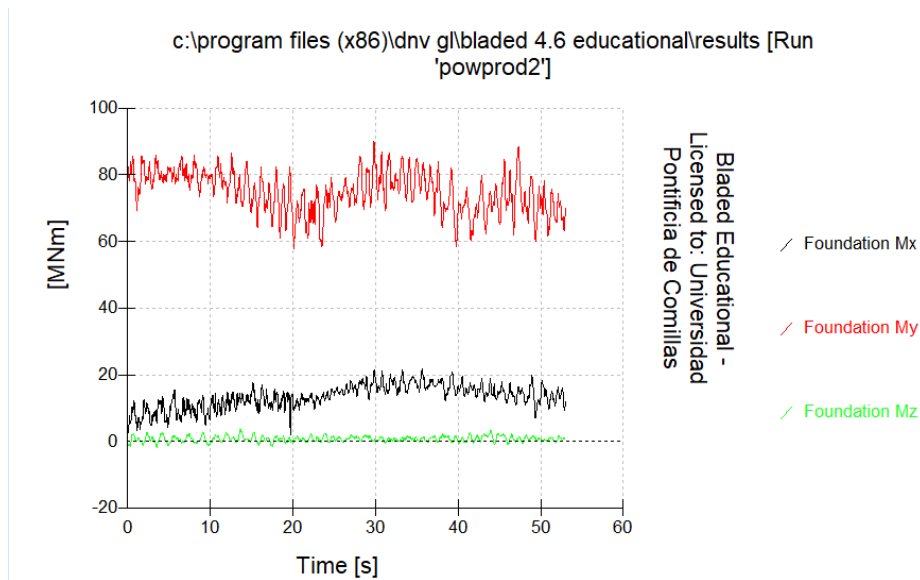


Figura 38: Momentos Power Production Loading

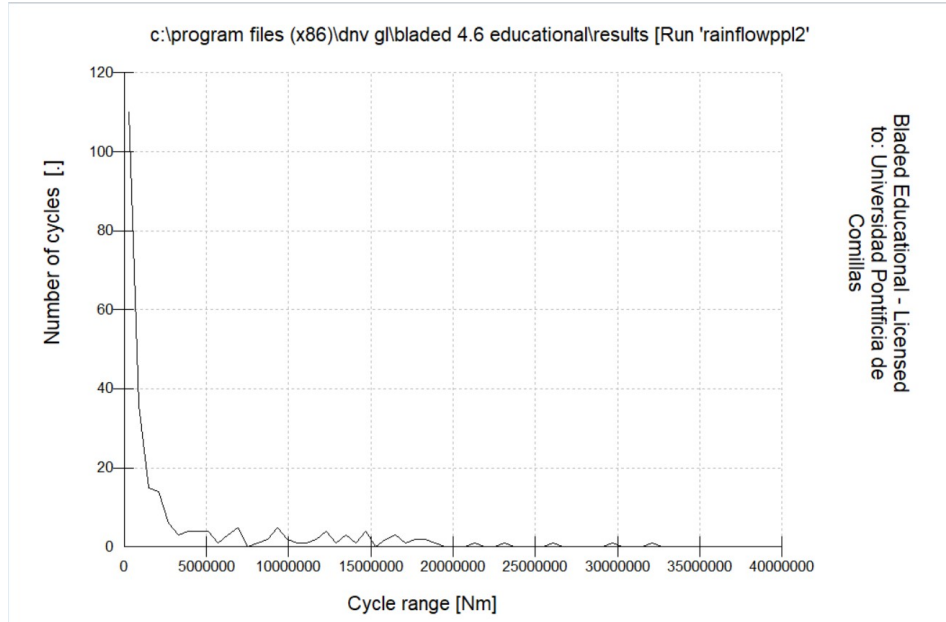


Figura 39: Grafico Ciclos de Lluvia Power Production Loading

6.1.3 START

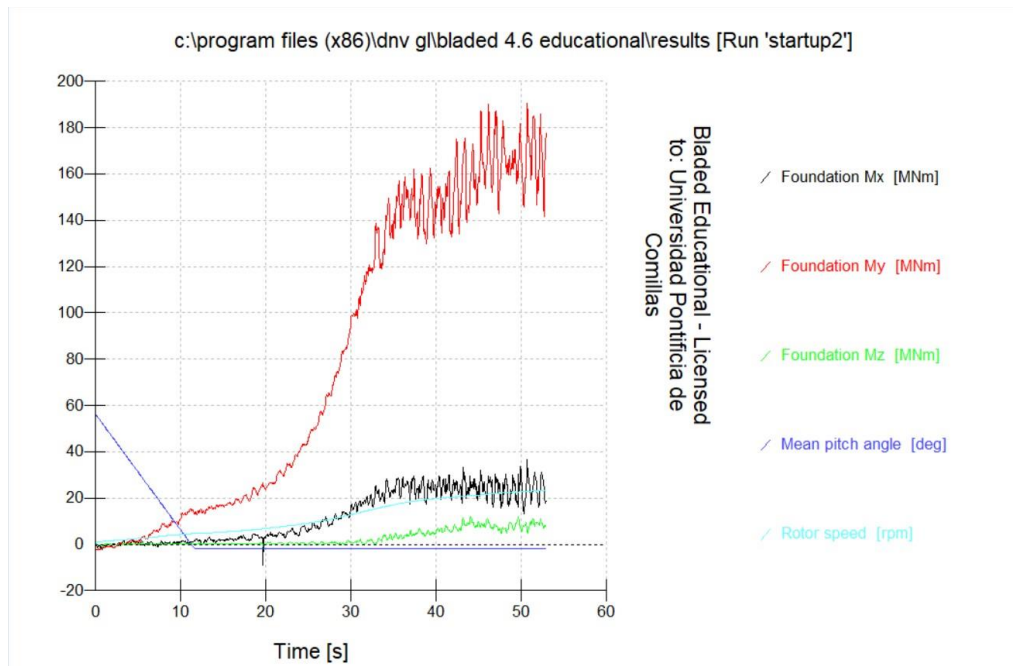


Figura 40: Momentos Start

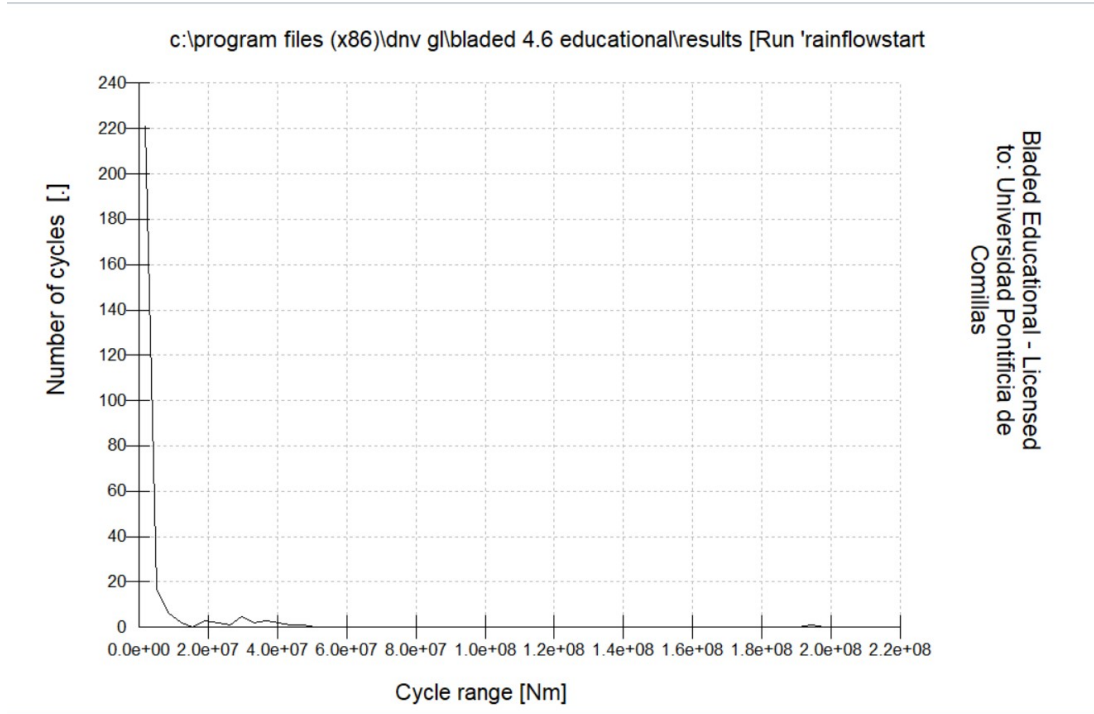


Figura 41: Grafico Ciclos de Lluvia Start

6.1.4 STOP

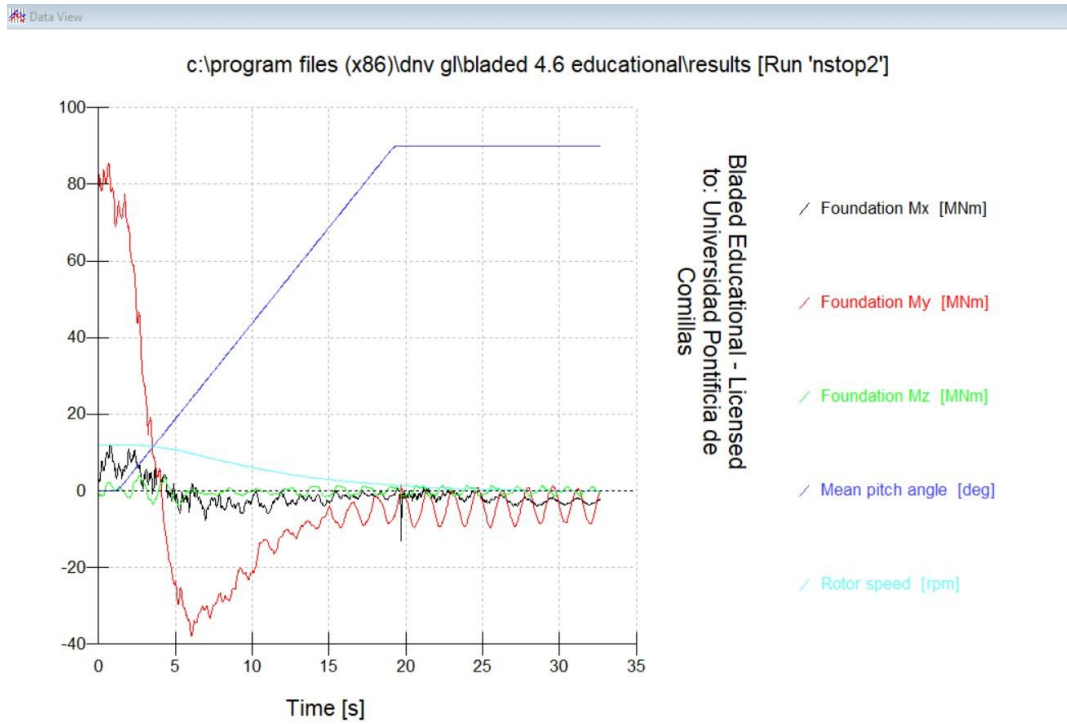


Figura 42: Momentos Stop

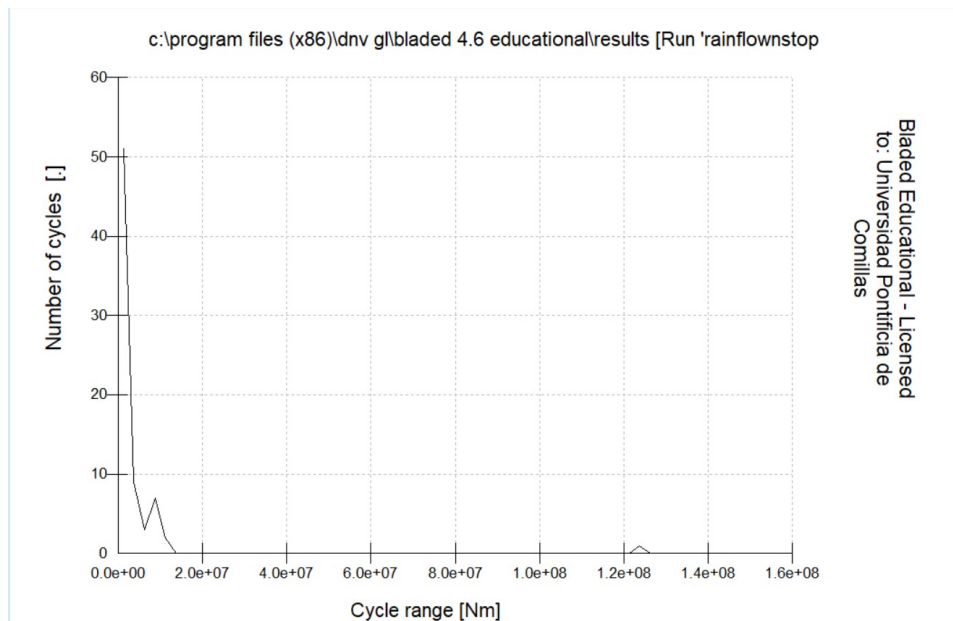


Figura 43: Grafico Ciclos de Lluvia Stop

6.1.5 PARKED

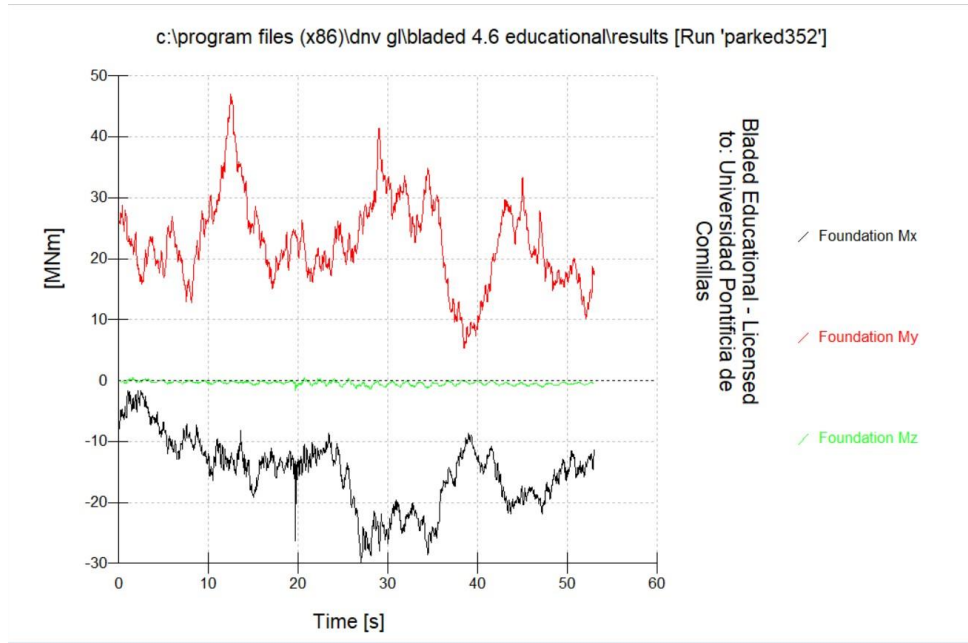


Figura 44: Momentos Parked

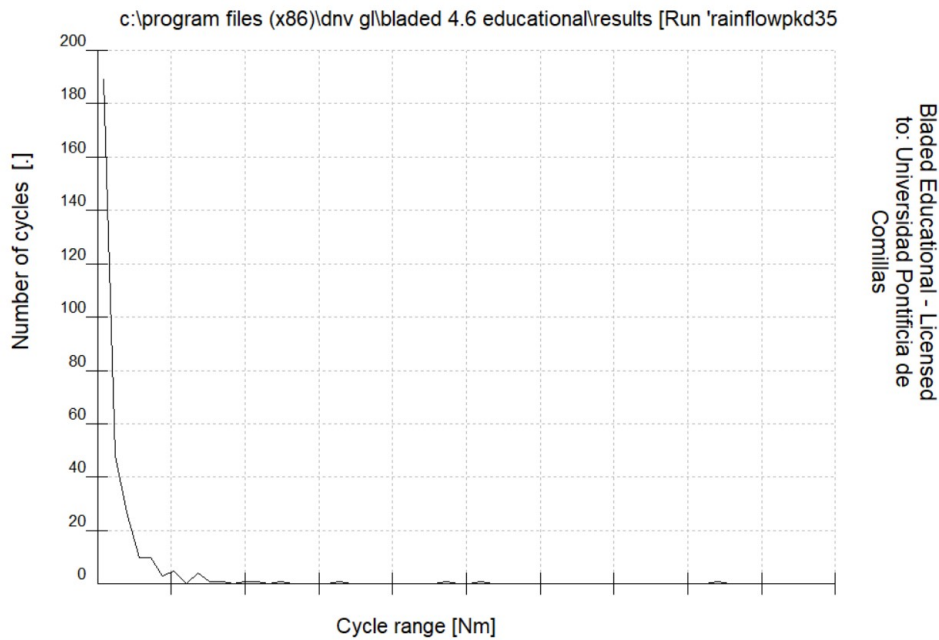


Figura 45: Grafico Ciclos de Lluvia Parked

Una vez que se tienen las nuevas cargas solo falta realizar el mismo análisis que para el anterior modelo. La conclusión a la que se llega, al estar usándose el mismo método, es la misma que para la torre cilíndrica, hay que tener cuidado con los ciclos que superan los 41.16 MPa de amplitud. Lo bueno de este nuevo diseño es que al tener menor superficie la torre las cargas que se producen en la base son menores y con las mismas dimensiones de la base se obtiene un sumatorio de Miner de 0.67, lo que indica que la estructura es más segura que la anterior.

El problema que tiene este método es que no está considerando el peso de la torre en ningún momento. Esto puede dar una idea equivocada puesto que el peso influye en la formación de grietas por fatiga. A continuación, se usara otro método de análisis más avanzado.

Capítulo 7. MODELO B CON METODOLOGÍA

AVANZADA

7.1 *MÉTODO STRAIN-LIFE*

7.1.1 INTRODUCCIÓN

Aunque la mayoría de las estructuras de ingeniería y componentes de máquinas están diseñados de manera que las tensiones resulten en deformaciones elásticas. Las concentraciones de tensiones a menudo causan deformaciones plásticas en las proximidades de las muescas donde la tensión se eleva debido al efecto de concentración de esfuerzo. Debido a la restricción impuesta por el material elásticamente estresado que rodea la zona plástica en la punta de la muesca, la deformación en la raíz de la muesca se considera controlada la deformación unitaria.

El supuesto básico del enfoque de análisis de fatiga basado en este método es que la acumulación de daño por fatiga y la vida útil hasta la iniciación de una grieta en la punta de la muesca son las mismas que en una muestra de material liso, si los estados de esfuerzo-deformación en la muesca y en la muestra son iguales.

7.2 *CURVA E-N*

La curva ϵ -N, también conocida como la curva Manson-Coffin es una curva ajustada a partir de la curva logarítmica para la deformación plástica y la curva logarítmica para la deformación elástica.

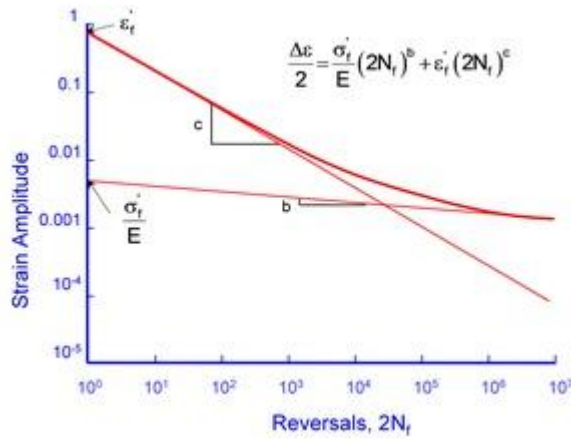


Figura 46: Curva Strain Life

En este caso aparece la amplitud de la deformación unitaria frente a el numero de ciclos o 2 veces el numero de medios ciclos. Los parámetros σ'_f , ϵ'_f , b y c son: coeficiente de resistencia a fatiga, coeficiente de ductilidad a fatiga, exponente de resistencia a fatiga y exponente de ductilidad a fatiga. Estos parámetros son específicos del material y se obtienen experimentalmente.

7.3 CALCULO DE LA AMPLITUD DE LA DEFORMACIÓN

Normalmente para calcular la deformación plástica de un material es necesario conocer la deformación total mediante bandas extensiométricas pero gracias a la Ecuación de Ramberg-Osgood es posible calcular la deformación total gracias a dos parámetros experimentales: K' o coeficiente de resistencia cíclica y n' o exponente de endurecimiento por trabajo cíclico.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}$$

Partiendo de esta ecuación y basándonos en la hipótesis de Massing que dicta que las ramas de la curva de histéresis se pueden obtener doblando la curva tensión deformación del material se obtiene la ecuación necesaria para calcular la amplitud de la deformación unitaria .

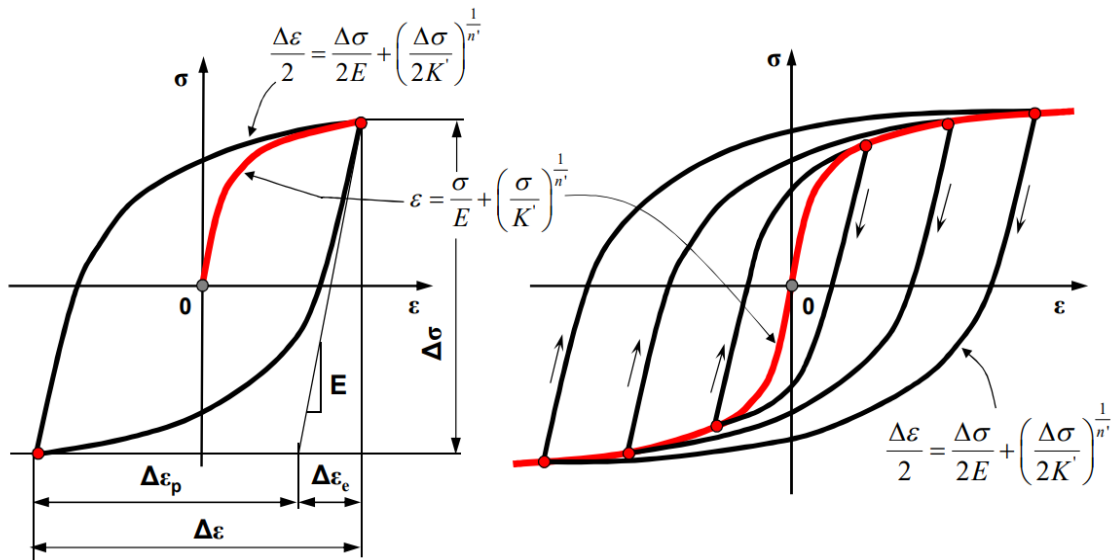


Figura 47: Curva Tensión Deformación y Bucle de Histeresis

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n'}$$

7.4 CORRECCION DE MORROW

Dado que las grietas por fatiga se dan debido a esfuerzos de tracción es importante tener en cuenta el esfuerzo medio sobre el punto que se está estudiando. Esto se debe a que un punto que tenga un esfuerzo medio de compresión es más resistente a fatiga que el mismo punto si tuviese un esfuerzo medio de tracción

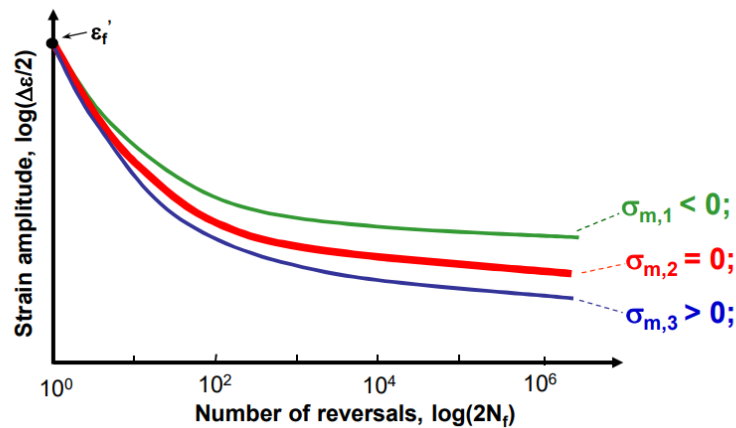


Figura 48: Influencia del esfuerzo medio

Este efecto se puede contabilizar mediante la corrección de Morrow, esta corrección consiste en restar el esfuerzo medio en la Ecuación de Manson-Coffin de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} \cdot (2N_f)^b + \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^c$$

El esfuerzo medio se ha calculado a partir de la fuerza en Z y del momento en Y. Al igual que se pueden obtener los gráficos de dichas cargas a partir de bladed también se pueden obtener los datos tabulados en Excel por lo que resulta trivial calcular la media de ambos.

Una vez que se tiene dicha media solo hay que calcular el esfuerzo medio a través de esta ecuación,

$$\sigma_m = \frac{M_{ym}}{I_y} x + \frac{N_m}{A}$$

En este caso si se considera el axil, despejando y sustituyendo se llega a la siguiente ecuación.

$$\sigma = \frac{M_y}{\frac{\pi(d_e^4 - d_i^4)}{64}} \frac{d}{2} + \frac{N}{\frac{\pi}{4}(d_e^2 - d_i^2)} = \frac{32M_y \cdot d_e}{\pi(d_e^4 - d_i^4)} - \frac{4N}{\pi(d_e^2 - d_i^2)} \text{ N/mm}^2$$

7.5 CALCULO DE LA VIDA A FATIGA

Una vez que se ha obtenido la amplitud de la deformación solo queda sustituir en la ecuación de Manson-Coffin y de ahí sacar el numero de ciclos que resiste el material a dicha amplitud para después aplicar la regla de Miner. Para este caso se ha calculado que con un diámetro exterior de 5m y un diámetro interior de 4.96m la estructura aguanta.

Capítulo 8. COMPARACION DE RESULTADOS

Antes de realizar la comparación es importante tener en cuenta que no se han utilizado los mismos aceros para ambos métodos debido a la exactitud de la información encontrada en la bibliografía. Puesto que tanto la curva SN como los parámetros necesarios para las ecuaciones utilizadas en el método Strain Life se obtienen de manera experimental no resulta fácil encontrar información online. Esto se debe a que las empresas que necesitan dichos parámetros suelen realizar ellas mismas los experimentos o acuden a terceros. Para la curva SN se utilizó la curva del acero S-275 mientras que se utilizaron los parámetros asociados al acero S-355 basados en la Uniform Material Law (UML). Debido a esta limitación es complicado discernir si la diferencia en los resultados es debida a un cambio en la metodología o a un cambio en el material. De todos modos, cabe destacar que ambos aceros poseen propiedades bastante similares.

Analizando los resultados obtenidos en los 4 casos se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

	Modelo A SN	Modelo B SN	Modelo A Strain Life	Modelo B Strain Life
Espesor (mm)	75	75	20	20
Coef Miner	0.76	0.67	0.07	0.08

Tabla 12: Resultados Finales

8.1 COMPARACIÓN DE MODELOS:

En el análisis por el método SN se puede observar que el modelo B obtiene un coeficiente de Miner menor, esto se debe a que el número de ciclos que aguanta el material es directamente proporcional a las cargas que soporta la base. Puesto que el modelo B tiene menor superficie de contacto con el viento y la marea, además de ser mas ligero, las cargas en la base son inferiores.

Por otro lado cuando se analiza el problema por el método Strain Life es el modelo A el cual tiene un coeficiente de Miner menor. Esto se debe a que este método tiene en cuenta los esfuerzos medios y por consiguiente el axil. Puesto que el modelo A tiene un peso mayor el esfuerzo medio es menor, es decir, esta mas cerca de ser un esfuerzo de compresión. Como ya se explicó en el apartado 7.4 en este caso el peso extra favorece a la estructura.

8.2 COMPARACIÓN DE METODOS:

Con el método SN se obtienen unos resultados bastante mas conservadores que con el método strain life. Esto se puede atribuir tanto a la resistencia superior del acero utilizado como a la precisión del método.

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Glinka, G. (2008). *The Local Stress-Strain Fatigue Method*.
- [2] Kreithner, M., Niederwanger, A., & Lang, R. E. (2023). Influence of the ductility exponent on the fatigue of structural steels. *Metals*, 13(4), 759. <https://doi.org/10.3390/met13040759>
- [3] Documento Basico Seguridad Estructural del Acero. (2007).
- [4] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*.
<https://doi.org/10.1002/9781119992714>
- [5] Palmer, T. (2014). Fatigue in Welded-Steel Structures. *Machine Design*.
- [6] Ambrose, J. (2019, 28 octubre). Offshore windfarms «can provide more electricity than the world needs». *the Guardian*.
<https://www.theguardian.com/environment/2019/oct/24/offshore-windfarms-can-provide-more-electricity-than-the-world-needs>
- [7] Zhang, S. (2021, 21 julio). Are wind turbines a danger to wildlife? Ask the dogs. *The Atlantic*. <https://www.theatlantic.com/science/archive/2021/07/bat-dogs-wind-turbines/619482/>
- [8] arXiv, E. T. F. T. (2020, 2 abril). First evidence that offshore wind farms are changing the oceans. *MIT Technology Review*.
<http://www.technologyreview.com/2017/09/22/149001/first-evidence-that-offshore-wind-farms-are-changing-the-oceans/>
- [9]

ANEXO I: SOSTENIBILIDAD, RECICLAJE Y ODS

SOSTENIBILIDAD:

Como ya es sabido por muchos, el termino sostenibilidad se refiere a satisfacer las necesidades actuales sin poner en peligro la capacidad de generaciones futuras de cubrir las suyas propias. Debido a los objetivos impuestos por la unión europea de descarbonización para 2050 muchos países han empezado a tomar medidas al respecto pero aun queda un largo camino por recorrer. De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (IEA) En la actualidad el 5% de la energía global es producida mediante aerogeneradores y dentro de ese 5% solo el 0.3% proviene de aerogeneradores marinos. Este numero es muy bajo, sobre todo si consideramos el hecho de que si se colocasen aerogeneradores marinos en todos los emplazamientos aptos (distancia a la costa inferior a 60km y profundidad del agua menor a 60m) se produciría mas energía que la necesaria para cubrir la demanda global. Aunque esto no sea un proyecto realista, vale para mostrar la importancia de los aerogeneradores marinos a la hora de alcanzar la descarbonización.

EFECTO EN LA FAUNA:

Uno de los problemas que tienen los aerogeneradores terrestres es su efecto en las aves. De acuerdo con el periódico The Atlantic, solo en Norteamérica mueren al año entre 600,000 y 949,000 murciélagos y entre 140,000 y 679,000 pájaros. Aunque estos números no son lo suficientemente altos como para considerarse una amenaza para la supervivencia de las especies afectadas es importante considerarlo y más si se tiene en cuenta el incremento en la construcción de estas estructuras. Al situar los aerogeneradores en el mar evitamos en gran medida estas muertes puesto que la gran mayoría de las aves no se aventuran tan lejos de la costa y con un estudio de los patrones de migración podrían encontrarse localidades por las

que virtualmente no pase ningún ave. En cuanto a la vida marina es todo lo contrario, un estudio del MIT afirma que los aerogeneradores marinos son beneficiosos para la fauna oceánica, especialmente para los mejillones. La inmensa mayoría del fondo marino en el que habitan los moluscos se encuentra en la costa, pero al encontrarse los aerogeneradores lejos de esta están proporcionando un hábitat completamente nuevo para esta especie. Se estima que una sola torre puede soportar hasta 4 toneladas de mejillones. También se ha descubierto que los parques eólicos marinos se han convertido en el equivalente a áreas marinas protegidas para todo tipo de peces debido a que la pesca convencional y la pesca de arrastre están prohibidas por temas de seguridad.

RECICLAJE:

Los aerogeneradores tienen una esperanza de vida de aproximadamente 20 a 25 años y, después del boom que tuvieron en la década de los 90 y los 2000, muchos están llegando al fin de su vida útil. Esto plantea una cuestión, que hacer con estas estructuras de más de 60m de altura una vez que ya han cumplido con su función. Debido a su composición, el 85% del material es fácilmente reciclable (acero, cobre y componentes electrónicos) pero donde se encuentra mayor dificultad es a la hora de reciclar las palas hechas a partir de poliéster o epoxy reforzado con fibra de carbono o fibra de vidrio. Hasta hace unos años las únicas alternativas eran o cortarlas en trozos más pequeños y enterrarlas en vertederos o ‘reciclarlas’ mediante un proceso denominado pirolisis. Este proceso consiste en calentar a altas temperaturas un material en ausencia de oxígeno con el fin de cambiar su composición química. La pirolisis puede ayudar a convertir las palas en pinturas o pegamentos, el problema es que se consume una gran cantidad de energía en el proceso.

Afortunadamente hoy en día hay varias empresas y naciones que están descubriendo nuevas formas de reciclar las palas o incluso soluciones alternativas que no necesitarían de este tipo de materiales para fabricar aerogeneradores.

La empresa Tennessee Carbon Recycling Outfit ha conseguido reciclar el 100% de las palas de un aerogenerador separando la fibra de carbono del epoxy. La fibra de carbono termina

en un estado granulado que se puede usar en diversas aplicaciones y el epoxy es transformado en un combustible que se usa para el propio reciclaje. Por otro lado Suecia ha sido el primer país en construir un aerogenerador a partir de madera, con una torre de 30m de altura este prototipo sienta las bases para un posible futuro en el que los aerogeneradores estén hechos a partir de un material completamente renovable como es la madera.

<https://www.windpowerengineering.com/tennessee-carbon-fiber-recycling-outfit-can-recycle-100-of-wind-turbine-blades/>

<https://electrek.co/2020/05/07/sweden-erects-first-wooden-wind-turbine/>

ODS:

Una vez explicados estos aspectos se puede ver claramente con que Objetivos de Desarrollo Sostenible se alinea este proyecto:



Salud y Bienestar: La ausencia de emisiones contaminantes de los aerogeneradores facilita una atmosfera limpia y salubre.



La energía procedente de los aerogeneradores no es contaminante al proceder de una fuente renovable como es el viento y ser carente de emisiones. Además, conforme vaya avanzando la tecnología las instalaciones serán cada vez menos costosas, hoy en día por cada KW de capacidad que tenga una turbina su coste es de aproximadamente \$1,718 una cifra considerablemente inferior a los \$4,074 que cuesta el carbón.



Estos 3 objetivos se cumplen por los motivos que ya han sido explicados previamente en los apartados de reciclaje y efecto en la fauna.

ANEXO II: CALCULOS EN EXCEL

La inmensa mayoría de los cálculos descritos en la memoria se han realizado en hojas de Excel construidas a partir de los datos exportados de Bladed. En este anexo se va a explicar como se han creado dichas hojas.

Método S-N para modelo simple

Power Production Loading

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O
1	c:\program files (x86)\dnv gl\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowppmy']													
2			De(m)	5 D(m)						4.85 Wj(m ³)		1.407669 N(N)		2.17E+07
3	Number of cycles [L]		De ⁴ (m ⁴)	625 D ⁴ (m ⁴)						553.308 A(m ²)		1.160426		
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [L]	Cycle range(N/mm ²)	Cycle range(N/mm ²)	# cycles to break 160	# cycles to break 90	# total cycles	Miner		0.75	n		2	
5	300000	106	4.26E+05	0.43	1.00E+100	6.05E+08	6.05E+08	6.05E-92						
6	900000	37	1.28E+06	1.28	1.00E+100	2.11E+08	2.11E+08	2.11E-92						
7	1.50E+06	16	2.13E+06	2.13	1.00E+100	9.13E+07	9.13E+07	9.13E-93						
8	2.10E+06	13	2.98E+06	2.98	1.00E+100	7.42E+07	7.42E+07	7.42E-93						
9	2.70E+06	6	3.84E+06	3.84	1.00E+100	3.42E+07	3.42E+07	3.42E-93						
10	3.30E+06	4	4.69E+06	4.69	1.00E+100	2.28E+07	2.28E+07	2.28E-93						
11	3.90E+06	2	5.54E+06	5.54	1.00E+100	1.14E+07	1.14E+07	1.14E-93						
12	4.50E+06	5	6.39E+06	6.39	1.00E+100	2.85E+07	2.85E+07	2.85E-93						
13	5.10E+06	4	7.25E+06	7.25	1.00E+100	2.28E+07	2.28E+07	2.28E-93						
14	5.70E+06	2	8.10E+06	8.10	1.00E+100	1.14E+07	1.14E+07	1.14E-93						
15	6.30E+06	3	8.95E+06	8.95	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
16	6.90E+06	3	9.80E+06	9.80	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
17	7.50E+06	1	1.07E+07	10.66	1.00E+100	5.71E+06	5.71E+06	5.71E-94						
18	8.10E+06	1	1.15E+07	11.51	1.00E+100	5.71E+06	5.71E+06	5.71E-94						
19	8.70E+06	3	1.24E+07	12.36	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
20	9.30E+06	3	1.32E+07	13.21	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
21	9.90E+06	3	1.41E+07	14.07	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
22	1.05E+07	2	1.49E+07	14.92	1.00E+100	1.14E+07	1.14E+07	1.14E-93						
23	1.17E+07	3	1.66E+07	16.62	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
24	1.23E+07	3	1.75E+07	17.48	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
25	1.29E+07	3	1.83E+07	18.33	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
26	1.41E+07	3	2.00E+07	20.03	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
27	1.47E+07	3	2.09E+07	20.89	1.00E+100	1.71E+07	1.71E+07	1.71E-93						
28	1.53E+07	1	2.17E+07	21.74	1.00E+100	5.71E+06	5.71E+06	5.71E-94						
29	1.59E+07	1	2.26E+07	22.59	1.00E+100	5.71E+06	5.71E+06	5.71E-94						
30	1.65E+07	2	2.34E+07	23.44	1.00E+100	1.14E+07	1.14E+07	1.14E-93						
31	1.71E+07	2	2.43E+07	24.30	1.00E+100	1.14E+07	1.14E+07	1.14E-93						
32	1.77E+07	2	2.51E+07	25.15	1.00E+100	1.14E+07	1.14E+07	1.14E-93						
33	1.83E+07	2	2.60E+07	26.00	1.00E+100	1.14E+07	1.14E+07	1.14E-93						
34	1.89E+07	1	2.69E+07	26.85	1.00E+100	5.71E+06	5.71E+06	5.71E-94						
35	2.13E+07	1	3.03E+07	30.26	1.00E+100	5.71E+06	5.71E+06	5.71E-94						
36	2.31E+07	1	3.28E+07	32.82	1.00E+100	5.71E+06	5.71E+06	5.71E-94						
37	2.67E+07	1	3.79E+07	37.94	1.00E+100	5.71E+06	5.71E+06	5.71E-94						
38	3.03E+07	1	4.30E+07	43.05	1.83E+07	5.71E+06	5.71E+06	3.12E-01						
39	3.39E+07	1	4.82E+07	48.16	1.30E+07	5.71E+06	5.71E+06	4.37E-01						

Figura 49: Hoja de Excel PPL Método S-N Modelo A

Esta hoja de Excel solo contenía las columnas A y B cuando fue exportada de Bladed a través de la función de post processing Rainflow. Dichas columnas contienen la amplitud y el

numero de ciclos que se dan en 60s. Las filas 2 y 3 contienen parámetros necesarios para los cálculos como pueden ser los diámetros de la base, el área y el momento de inercia.

En las columnas C y D se transforma la amplitud de los ciclos de Nm a Pa y MPa con la formula explicada en el apartado 5.4. Las columnas E y F muestran a través de las fórmulas derivadas de la curva S-N el numero de ciclos necesarios para que rompa el material a dicha amplitud de tensión.

Hasta aquí todas las columnas son iguales para los distintos casos, es en la columna G en la que empiezan a diferir las formulas puesto que en esta columna es en la que se utiliza la información obtenida en el apartado 5.6 para estimar el numero de ciclos que se van a dar en toda la vida útil de la estructura. Por ultimo en la columna H se divide la columna G por la E o la F dependiendo de que categoría se quiera usar y se suman en la I para obtener el resultado final.

Normal Stop

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	c:\program files (x86)\dnv gl\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflownsmv']									
2			De(m)	5 Di(m)		4.85 Wy(m^3)	1.407669 N(N)	2.17E+07		
3	Number of cycles [.]		De^4(m^4)	625 Di^4(m^4)		553.3080063 A(m^2)	1.160426 n			2
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]	Cycle range(N/m^2)	Cycle range(N/mm^2)	# cycles to break 160	# cycles to break 90	# total cycles	Miner	0.00	
5	1.25E+06	61	1.78E+06	1.78	4.61E+12	1.00E+100	4.19E+04	4.19E-96		
6	3.75E+06	9	5.33E+06	5.33	1.54E+12	1.00E+100	6.18E+03	6.18E-97		
7	6.25E+06	3	8.88E+06	8.88	9.23E+11	1.00E+100	2.06E+03	2.06E-97		
8	8.75E+06	6	1.24E+07	12.43	6.59E+11	1.00E+100	4.12E+03	4.12E-97		
9	1.13E+07	3	1.60E+07	15.98	5.13E+11	1.00E+100	2.06E+03	2.06E-97		
10	1.21E+08	1	1.72E+08	172.34	4.75E+10	2.85E+05	6.87E+02	2.41E-03		

Figura 50: Hoja de Excel Stop Método S-N Modelo A

Start

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	c:\program files (x86)\dntv g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowstartmy']									
2			De(m)	5 Di(m)		4.85 Wy(m^3)		1.407669 N(N)		2.17E+07
3	Number of cycles [.]		De^4(m^4)	625 Di^4(m^4)		553.3080063 A(m^2)		1.160426 n		2
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]	Cycle range(N/m^2)	Cycle range(N/mm^2)	# cycles to break	# cycles to break 90	# total cycles	Miner		0.01
5	1.75E+06	233	2.49E+06	2.49		1.00E+100	1.60E+05	1.60E-95		
6	5.25E+06	18	7.46E+06	7.46		1.00E+100	1.24E+04	1.24E-96		
7	8.75E+06	6	1.24E+07	12.43		1.00E+100	4.12E+03	4.12E-97		
8	1.23E+07	2	1.74E+07	17.40		1.00E+100	1.37E+03	1.37E-97		
9	1.93E+07	2	2.74E+07	27.35		1.00E+100	1.37E+03	1.37E-97		
10	2.28E+07	3	3.23E+07	32.32		1.00E+100	2.06E+03	2.06E-97		
11	2.63E+07	2	3.73E+07	37.30		1.00E+100	1.37E+03	1.37E-97		
12	2.98E+07	4	4.23E+07	42.27		1.93E+07	2.75E+03	1.42E-04		
13	3.33E+07	2	4.72E+07	47.24		1.38E+07	1.37E+03	9.94E-05		
14	3.68E+07	2	5.22E+07	52.21		1.02E+07	1.37E+03	1.34E-04		
15	4.03E+07	3	5.72E+07	57.19		7.80E+06	2.06E+03	2.64E-04		
16	4.38E+07	1	6.22E+07	62.16		6.07E+06	6.87E+02	1.13E-04		
17	5.08E+07	1	7.21E+07	72.11	1.14E+11	3.89E+06	6.87E+02	1.77E-04		
18	1.94E+08	1	2.76E+08	276.06	2.97E+10	6.93E+04	6.87E+02	9.91E-03		

Figura 51: Hoja de Excel Start Método S-N Modelo A

Parked 35

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	c:\program files (x86)\dntv g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowpkd35']									
2			De(m)	5 Di(m)		4.85 Wy(m^3)		1.407669 N(N)		2.17E+07
3	Number of cycles [.]		De^4(m^4)	625 Di^4(m^4)		553.3080063 A(m^2)		1.160426 n		2
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]	Cycle range(N/m^2)	Cycle range(N/mm^2)	# cycles to break	# cycles to break 90	# total cycles	Miner		0.01
5	550000	175	7.81E+05	0.78		1.00E+100	1.81E+06	1.81E-94		
6	1.65E+06	59	2.34E+06	2.34		1.00E+100	6.09E+05	6.09E-95		
7	2.75E+06	18	3.91E+06	3.91		1.00E+100	1.86E+05	1.86E-95		
8	3.85E+06	11	5.47E+06	5.47		1.00E+100	1.14E+05	1.14E-95		
9	4.95E+06	6	7.03E+06	7.03		1.00E+100	6.19E+04	6.19E-96		
10	6.05E+06	7	8.60E+06	8.60		1.00E+100	7.22E+04	7.22E-96		
11	7.15E+06	5	1.02E+07	10.16		1.00E+100	5.16E+04	5.16E-96		
12	8.25E+06	3	1.17E+07	11.72		1.00E+100	3.10E+04	3.10E-96		
13	9.35E+06	1	1.33E+07	13.28		1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
14	1.05E+07	3	1.48E+07	14.85		1.00E+100	3.10E+04	3.10E-96		
15	1.16E+07	2	1.64E+07	16.41		1.00E+100	2.06E+04	2.06E-96		
16	1.49E+07	1	2.11E+07	21.10		1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
17	1.60E+07	1	2.27E+07	22.66		1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
18	1.71E+07	1	2.42E+07	24.22		1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
19	1.82E+07	1	2.58E+07	25.79		1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
20	2.37E+07	1	3.36E+07	33.60		1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
21	2.59E+07	1	3.67E+07	36.73		1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
22	4.13E+07	1	5.86E+07	58.61		7.24E+06	1.03E+04	1.42E-03		
23	5.01E+07	1	7.11E+07	71.11	4.95E+06	4.05E+06	1.03E+04	2.55E-03		
24	6.11E+07	1	8.67E+07	86.74	4.77E+06	2.23E+06	1.03E+04	4.62E-03		

Figura 52: Hoja de Excel Parked 35 Método S-N Modelo A

Método SN para modelo avanzado

A continuación se muestra el mismo análisis solo que en este caso se realiza sobre las cargas obtenidas de la torre del modelo B.

Power Production Loading

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O
1	c:\program files (x86)\dnv g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowppmy']													
2			De(m)	5 D(m)						4.85 Wy(m³3)	1.407669 N(N)	2.17E+07		
3	Number of cycles [.]		De^4(m^4)	625 D^4(m^4)						553.308 A(m²2)	1.160426 n			2
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]	Cycle range(N/m²2)	Cycle range(N/mm²2)	# cycles to break 160	# cycles to break 90	# total cycles	Miner		0.67				
5	300000	110	4.26E+05	0.43		1.00E+100	6.28E+08	6.28E-92						
6	900000	36	1.28E+06	1.28		1.00E+100	2.05E+08	2.05E-92						
7	1.50E+06	15	2.13E+06	2.13		1.00E+100	8.56E+07	8.56E-93						
8	2.10E+06	14	2.98E+06	2.98		1.00E+100	7.99E+07	7.99E-93						
9	2.70E+06	6	3.84E+06	3.84		1.00E+100	3.42E+07	3.42E-93						
10	3.30E+06	3	4.69E+06	4.69		1.00E+100	1.71E+07	1.71E-93						
11	3.90E+06	4	5.54E+06	5.54		1.00E+100	2.28E+07	2.28E-93						
12	4.50E+06	4	6.39E+06	6.39		1.00E+100	2.28E+07	2.28E-93						
13	5.10E+06	4	7.25E+06	7.25		1.00E+100	2.28E+07	2.28E-93						
14	5.70E+06	1	8.10E+06	8.10		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
15	6.30E+06	3	8.95E+06	8.95		1.00E+100	1.71E+07	1.71E-93						
16	6.90E+06	5	9.80E+06	9.80		1.00E+100	2.85E+07	2.85E-93						
17	8.10E+06	1	1.15E+07	11.51		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
18	8.70E+06	2	1.24E+07	12.36		1.00E+100	1.14E+07	1.14E-93						
19	9.30E+06	5	1.32E+07	13.21		1.00E+100	2.85E+07	2.85E-93						
20	9.90E+06	2	1.41E+07	14.07		1.00E+100	1.14E+07	1.14E-93						
21	1.05E+07	1	1.49E+07	14.92		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
22	1.11E+07	1	1.58E+07	15.77		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
23	1.16E+07	2	1.66E+07	16.62		1.00E+100	1.14E+07	1.14E-93						
24	1.23E+07	4	1.75E+07	17.48		1.00E+100	2.28E+07	2.28E-93						
25	1.29E+07	1	1.83E+07	18.33		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
26	1.35E+07	3	1.92E+07	19.18		1.00E+100	1.71E+07	1.71E-93						
27	1.41E+07	1	2.00E+07	20.03		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
28	1.47E+07	4	2.09E+07	20.89		1.00E+100	2.28E+07	2.28E-93						
29	1.59E+07	2	2.26E+07	22.59		1.00E+100	1.14E+07	1.14E-93						
30	1.65E+07	3	2.34E+07	23.44		1.00E+100	1.71E+07	1.71E-93						
31	1.71E+07	1	2.43E+07	24.30		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
32	1.77E+07	2	2.51E+07	25.15		1.00E+100	1.14E+07	1.14E-93						
33	1.83E+07	2	2.60E+07	26.00		1.00E+100	1.14E+07	1.14E-93						
34	1.89E+07	1	2.69E+07	26.85		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
35	2.13E+07	1	3.03E+07	30.26		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
36	2.31E+07	1	3.28E+07	32.82		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
37	2.61E+07	1	3.71E+07	37.08		1.00E+100	5.71E+06	5.71E-94						
38	2.97E+07	1	4.22E+07	42.20		1.94E+07	5.71E+06	2.94E-01						
39	3.21E+07	1	4.56E+07	45.61		1.54E+07	5.71E+06	3.71E-01						

Figura 53: Hoja de Excel PPL Método S-N Modelo B

Start

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	c:\program files (x86)\dnv g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowstartmy']									
2			De(m)	5 D(m)			4.85 Wy(m³3)	1.407669 N(N)	2.17E+07	
3	Number of cycles [.]		De^4(m^4)	625 D^4(m^4)			553.3080063 A(m²2)	1.160426 n		2
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]	Cycle range(N/m²2)	Cycle range(N/mm²2)	# cycles to break	# cycles to break 90	# total cycles	Miner	0.01	
5	1.75E+06	221	2.49E+06	2.49		1.00E+100	1.52E+05	1.52E-95		
6	5.25E+06	17	7.46E+06	7.46		1.00E+100	1.17E+04	1.17E-96		
7	8.75E+06	6	1.24E+07	12.43		1.00E+100	4.12E+03	4.12E-97		
8	1.23E+07	2	1.74E+07	17.40		1.00E+100	1.37E+03	1.37E-97		
9	1.93E+07	3	2.74E+07	27.35		1.00E+100	2.06E+03	2.06E-97		
10	2.28E+07	2	3.23E+07	32.32		1.00E+100	1.37E+03	1.37E-97		
11	2.63E+07	1	3.73E+07	37.30		1.00E+100	6.87E+02	6.87E-98		
12	2.98E+07	5	4.23E+07	42.27		1.93E+07	3.44E+03	1.78E-04		
13	3.33E+07	2	4.72E+07	47.24		1.38E+07	1.37E+03	9.94E-05		
14	3.68E+07	3	5.22E+07	52.21		1.02E+07	2.06E+03	2.01E-04		
15	4.03E+07	2	5.72E+07	57.19		7.80E+06	1.37E+03	1.76E-04		
16	4.38E+07	1	6.22E+07	62.16		6.07E+06	6.87E+02	1.13E-04		
17	4.73E+07	1	6.71E+07	67.13		4.82E+06	6.87E+02	1.43E-04		
18	1.94E+08	1	2.76E+08	276.06	2.97E+10		6.93E+04	6.87E+02	9.91E-03	
19										

Figura 54: Hoja de Excel Start Método S-N Modelo B

Stop

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	c:\program files (x86)\dnv gl\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowsmy']									
2			De(m)		5 Di(m)		4.85 Wy(m^3)		1.407669 N(N)	2.17E+07
3	Number of cycles [.]		De^4(m^4)		625 Di^4(m^4)		553.3080063 A(m^2)		1.160426 n	2
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]	Cycle range(N/m^2)	Cycle range(N/mm^2)	# cycles to break 160	# cycles to break 90	# total cycles	Miner		0.00
5	1.25E+06	51	1.78E+06	1.78		1.00E+100	3.50E+04	3.50E-96		
6	3.75E+06	9	5.33E+06	5.33		1.00E+100	6.18E+03	6.18E-97		
7	6.25E+06	3	8.88E+06	8.88		1.00E+100	2.06E+03	2.06E-97		
8	8.75E+06	7	1.24E+07	12.43		1.00E+100	4.81E+03	4.81E-97		
9	1.13E+07	2	1.60E+07	15.98		1.00E+100	1.37E+03	1.37E-97		
10	1.24E+08	1	1.76E+08	175.89	4.66E+10	2.68E+05	6.87E+02	2.56E-03		

Figura 55: Hoja de Excel Stop Método S-N Modelo B

Parked

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	c:\program files (x86)\dnv gl\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowpkd35']									
2			De(m)		5 Di(m)		4.85 Wy(m^3)		1.407669 N(N)	2.17E+07
3	Number of cycles [.]		De^4(m^4)		625 Di^4(m^4)		553.3080063 A(m^2)		1.160426 n	2
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]	Cycle range(N/m^2)	Cycle range(N/mm^2)	# cycles to break	# cycles to break 90	# total cycles	Miner		0.00
5	400000	189	5.68E+05	5.68E-01	2.03E+08	1.00E+100	1.95E+06	1.95E-94		
6	1.20E+06	48	1.70E+06	1.70E+00	1.99E+08	1.00E+100	4.95E+05	4.95E-95		
7	2.00E+06	27	2.84E+06	2.84E+00	1.96E+08	1.00E+100	2.79E+05	2.79E-95		
8	2.80E+06	10	3.98E+06	3.98E+00	1.92E+08	1.00E+100	1.03E+05	1.03E-95		
9	3.60E+06	10	5.11E+06	5.11E+00	1.89E+08	1.00E+100	1.03E+05	1.03E-95		
10	4.40E+06	3	6.25E+06	6.25E+00	1.86E+08	1.00E+100	3.10E+04	3.10E-96		
11	5.20E+06	5	7.39E+06	7.39E+00	5.69E+06	1.00E+100	5.16E+04	5.16E-96		
12	6.80E+06	4	9.66E+06	9.66E+00	5.66E+06	1.00E+100	4.13E+04	4.13E-96		
13	7.60E+06	1	1.08E+07	1.08E+01	5.65E+06	1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
14	8.40E+06	1	1.19E+07	1.19E+01	5.63E+06	1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
15	1.00E+07	1	1.42E+07	1.42E+01	5.61E+06	1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
16	1.08E+07	1	1.53E+07	1.53E+01	5.60E+06	1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
17	1.24E+07	1	1.76E+07	1.76E+01	5.57E+06	1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
18	1.64E+07	1	2.33E+07	2.33E+01	5.50E+06	1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
19	2.36E+07	1	3.35E+07	3.35E+01	5.39E+06	1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
20	2.60E+07	1	3.69E+07	3.69E+01	5.35E+06	1.00E+100	1.03E+04	1.03E-96		
21	4.20E+07	1	5.97E+07	5.97E+01	5.08E+06	6.86E+06	1.03E+04	1.50E-03		

Figura 56: Hoja de Excel Parked Método S-N Modelo B

Método Strain Life para modelo avanzado

Estas hojas han sido creadas a partir de datos con la misma estructura que las anteriores hojas por lo que son similares.

Power Production Loading

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	C:\program files (x86)\dnh_gl\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowppl2']												
2			De(m)	5 Dl(m)					4.96 Wv(m/s)	0.38801178 N(N)			1.13E+07
3	Number of cycles []		De^4(m^4)	625 Dl^4(m^4)					605.238723 A(m^2)	0.31290263			
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles []	Cycle range(N/m^2)	Cycle range(N/mm^2)	# cycles total	Strain parameters	Δε/2		2Nf	eq	minor		0.08
5	300000		1.55E+06	1.55	3.77E+10 E		208.94	0.00370054	1.33E+33	0.0037	2.84E-23		
6	900000	36	4.64E+06	4.64	1.23E+10 n'		0.15	0.01110162	4.35E+27	0.0111	2.84E-18		
7	1.50E+06	15	7.73E+06	7.73	5.14E+09 k'		820.00	0.01850270	1.23E+25	0.0185	4.19E-16		
8	2.10E+06	14	1.08E+07	10.82	4.79E+09 Rm		497.00	0.02590378	2.56E+23	0.0259	1.87E-14		
9	2.70E+06	6	1.39E+07	13.92	2.05E+09 of ^f		745.50	0.03330486	1.43E+22	0.0333	1.44E-13		
10	3.30E+06	3	1.70E+07	17.01	1.03E+09 of ^f		0.59	0.04070594	1.42E+21	0.04071	7.23E-13		
11	3.90E+06	4	2.01E+07	20.10	1.37E+09 b		-0.09	0.04810703	2.08E+20	0.04811	6.58E-12		
12	4.50E+06	4	2.32E+07	23.20	1.37E+09 c		-0.58	0.05550811	4.02E+19	0.05551	3.41E-11		
13	5.10E+06	4	2.63E+07	26.29	1.37E+09 Safety coeff			0.06290919	9.53E+18	0.06291	1.44E-10		
14	5.70E+06	1	2.94E+07	29.38	3.42E+08 n		2.00	0.07031027	2.66E+18	0.07031	1.29E-10		
15	6.30E+06	3	3.25E+07	32.47	1.03E+09			0.07771135	8.40E+17	0.07771	1.22E-09		
16	6.90E+06	5	3.56E+07	35.57	1.71E+09			0.08511243	2.95E+17	0.08511	5.80E-09		
17	8.10E+06	1	4.18E+07	41.75	3.42E+08			0.09991459	4.68E+16	0.09991	7.32E-09		
18	8.70E+06	2	4.48E+07	44.84	6.85E+08			0.10731567	2.06E+16	0.10732	3.33E-08		
19	9.30E+06	5	4.79E+07	47.94	1.71E+09			0.11471675	9.56E+15	0.11472	1.79E-07		
20	9.90E+06	2	5.10E+07	51.03	6.85E+08			0.12211783	4.66E+15	0.12212	1.47E-07		
21	1.05E+07	1	5.41E+07	54.12	3.42E+08			0.12951891	2.37E+15	0.12952	1.45E-07		
22	1.11E+07	1	5.72E+07	57.21	3.42E+08			0.13692000	1.25E+15	0.13692	1.74E-07		
23	1.17E+07	2	6.03E+07	60.31	6.85E+08			0.14432108	6.83E+14	0.14432	1.00E-06		
24	1.23E+07	4	6.34E+07	63.40	1.37E+09			0.15172216	3.84E+14	0.15172	3.56E-06		
25	1.29E+07	1	6.65E+07	66.49	3.42E+08			0.15912324	2.22E+14	0.15912	1.54E-06		
26	1.35E+07	3	6.96E+07	69.59	1.03E+09			0.16652432	1.32E+14	0.16652	7.79E-06		
27	1.41E+07	1	7.27E+07	72.68	3.42E+08			0.17392540	8.00E+13	0.17393	4.28E-06		
28	1.47E+07	4	7.58E+07	75.77	1.37E+09			0.18132648	4.95E+13	0.18133	2.77E-05		
29	1.59E+07	2	8.20E+07	81.96	6.85E+08			0.19612864	2.01E+13	0.19613	3.41E-05		
30	1.65E+07	3	8.50E+07	85.05	1.03E+09			0.20352973	1.31E+13	0.20353	7.83E-05		
31	1.71E+07	1	8.81E+07	88.14	3.42E+08			0.21093081	8.71E+12	0.21093	3.93E-05		
32	1.77E+07	2	9.12E+07	91.23	6.85E+08			0.21833189	5.86E+12	0.21833	1.17E-04		
33	1.83E+07	2	9.43E+07	94.33	6.85E+08			0.22573297	3.99E+12	0.22573	1.72E-04		
34	1.89E+07	1	9.74E+07	97.42	3.42E+08			0.23313405	2.76E+12	0.23313	1.24E-04		
35	2.13E+07	1	1.10E+08	109.79	3.42E+08			0.26273838	6.98E+11	0.26274	4.91E-04		
36	2.31E+07	1	1.19E+08	119.07	3.42E+08			0.28494164	2.75E+11	0.28494	1.25E-03		
37	2.61E+07	1	1.35E+08	134.53	3.42E+08			0.32194707	6.75E+10	0.32195	5.08E-03		
38	2.97E+07	1	1.53E+08	153.09	3.42E+08			0.36633364	1.53E+10	0.36633	2.24E-02		
39	3.21E+07	1	1.65E+08	165.46	3.42E+08			0.39595805	6.25E+09	0.39596	5.48E-02		
40	My Avg												
41	7.49E+07												
42	sigma avg (Pa)		1.57E+08										
43	sigma avg (MPa)		156.76										

Figura 57: Hoja de Excel PPL Método Strain Life Modelo B

Como se puede observar las columnas de la A a la E son iguales que en las anteriores hojas salvo por la adición del Momento en Y medio y la tensión media que se utilizara para la corrección de Morrow. Las columnas F y G están dedicadas a los parámetros necesarios para aplicar la ecuación de Manson Coffin. En las columnas H I J se realizan los cálculos necesarios para obtener el numero de ciclos necesarios (Columna I) para que rompa el material a dicha amplitud (Columna H). Debido a la forma de la ecuación de Manson-Coffin, es imposible despear manualmente el termino 2Nf de forma que se pueda calcular fácilmente por lo que es necesario utilizar la función de Excel Goal Seek.

La función Goal Seek sirve para hacer que una celda sea igual a otra ajustando el valor de una tercera celda.

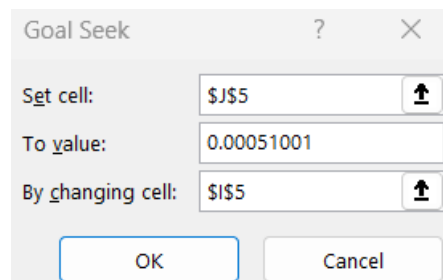


Figura 58: Función Goal Seek

En este caso lo que quiero hacer es que la columna J donde está metido el miembro derecho de la ecuación de Manson-Coffin sea igual a la columna H en la que está la amplitud de la deformación (en este caso 0.00051001) modificando la columna I donde se encuentra el número de ciclos. Esta función es muy útil, pero tiene 2 grandes inconvenientes. El primero es que el valor al que se tiene que igualar la celda tiene que ser incluido manualmente y no puede igualarse a una celda. El segundo es que no se puede expandir la fórmula de la misma forma que se expande un sumatorio o una media para que repita lo mismo en todas las líneas. La solución que se ha tomado para resolver estos 2 problemas es el uso de una macro que automatiza el uso de la función Goal Seek.

El código usado en dicha macro ha sido sacado de internet y modificado para que se ajuste a las necesidades del proyecto

```

RainflowMyPPL2M.xls.xlsm - Module1 (Code)
(General) Eq
Sub Eq()
'Defining variable k
Dim k As Integer
'We are looping through each row in our table
For k = 5 To 39
'Below is how we replicate the Goal Seek functionality via VBA
Cells(k, "J").GoalSeek Goal:=Cells(k, "H"), ChangingCell:=Cells(k, "I")
'Go to next iteration
Next k
End Sub

```

Figura 59: Macro Bucle Goal Seek

Como se puede observar esta macro es un simple bucle que realiza la función Goal Seek para cada iteración.

Una vez conocidos el número de ciclos necesarios para que rompa el material solo falta usar la regla de Miner como se ha hecho previamente.

Start

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	c:\program files (x86)\dnv gl\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowstart2']												
2		De(m)		5 Di(m)					4.85 Wy(m^3)	1.407669006 N(N)			1.13E+07
3	Number of cycles [.]	De^4(m^4)		625 Di^4(m^4)					553.3080063 A(m^2)	1.160425786			
4	Cycle rang	Number of Cycle range(N/m^2)	Cycle range(N/mm^2)	# cycles total	Strain parameters	Δε/2		2Nf	eq	miner			2.69
5	1.75E+06	221	2.49E+06	2.49	7.57E+10 E	208.94		0.00595013	4.11998E+31	0.00595	1.84E-21		
6	5.25E+06	17	7.46E+06	7.46	5.82E+09 n'	0.15		0.01785038	1.35127E+26	0.01785	4.31E-17		
7	8.75E+06	6	1.24E+07	12.43	2.05E+09 k'	820.00		0.02975064	3.80853E+23	0.02975	5.40E-15		
8	1.23E+07	2	1.74E+07	17.40	6.85E+08 Rm	497.00		0.04165090	7.96388E+21	0.04165	8.60E-14		
9	1.93E+07	3	2.74E+07	27.35	1.03E+09 of'	745.50		0.06545141	4.41433E+19	0.06545	2.33E-11		
10	2.28E+07	2	3.23E+07	32.32	6.85E+08 eF'	0.59		0.07735166	6.47066E+18	0.07735	1.06E-10		
11	2.63E+07	1	3.73E+07	37.30	3.42E+08 b	-0.09		0.08925192	1.24912E+18	0.08925	2.74E-10		
12	2.98E+07	5	4.23E+07	42.27	1.71E+09 c	-0.58		0.10115217	2.96349E+17	0.10115	5.78E-09		
13	3.33E+07	2	4.72E+07	47.24	6.85E+08 Safety coeff			0.11305243	8.25236E+16	0.11305	8.30E-09		
14	3.68E+07	3	5.22E+07	52.21	1.03E+09 n	2.00		0.12495269	2.61199E+16	0.12495	3.93E-08		
15	4.03E+07	2	5.72E+07	57.19	6.85E+08			0.13685294	9.18018E+15	0.13685	7.46E-08		
16	4.38E+07	1	6.22E+07	62.16	3.42E+08			0.14875320	3.52062E+15	0.14875	9.73E-08		
17	4.73E+07	1	6.71E+07	67.13	3.42E+08			0.16065345	1.45358E+15	0.16065	2.36E-07		
18	1.94E+08	1	2.76E+08	276.06	3.42E+08			0.66064114	127112240.4	0.66064	2.69E+00		
19	My avg												
20	7.79E+07												
21	sigma avg	4.56E+07											
22	sigma avg	45.60											

Figura 60: Hoja de Excel Start Método Strain Life Modelo B

Stop

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	c:\program files (x86)\dnv g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowstop2']												
2		De(m)		5 Di(m)					4.85 W _y (m ³)		1.407669006 N(N)		1.13E+07
3	Number of cycles [.]	De ⁴ (m ⁴)		625 Di ⁴ (m ⁴)					553.3080063 A(m ²)		1.160425786		
4	Cycle range [Nm]	Number of Cycle range(N/m ²)	Cycle range(N/mm ²)	# cycles total	Strain parameters		Δε/2		2Nf	eq	miner		0.00
5	1.25E+06	51	1.78E+06	1.78	1.75E+10 E		208.94		0.00425009	4.18096E+33	0.00425		4.18E-24
6	3.75E+06	9	5.33E+06	5.33	3.08E+09 n'		0.15		0.01275027	1.37127E+28	0.01275		2.25E-19
7	6.25E+06	3	8.88E+06	8.88	1.03E+09 k'		820.00		0.02125046	3.86489E+25	0.02125		2.66E-17
8	8.75E+06	7	1.24E+07	12.43	2.40E+09 Rm		497.00		0.02975064	8.08172E+23	0.02975		2.97E-15
9	1.13E+07	2	1.60E+07	15.98	6.85E+08 σ ^f		745.50		0.03825082	4.49749E+22	0.03825		1.52E-14
10	1.24E+08	1	1.76E+08	175.89									
11	My avg				e ^f		0.59						
12	-2.45E+06		-1.74E+06	-1.74	b		-0.09						
13					c		-0.58						
14					Safety coeff								
					n		2.00						

Figura 61: Hoja de Excel Stop Método Strain Life Modelo B

Parked

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	c:\program files (x86)\dnv g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowpkd352']												
2		De(m)		5 Di(m)					4.85 W _y (m ³)		1.407669006 N(N)		1.13E+07
3	Number of cycles [.]	De ⁴ (m ⁴)		625 Di ⁴ (m ⁴)					553.3080063 A(m ²)		1.160425786		
4	Cycle range [Nm]	Number of Cycle range(N/m ²)	Cycle range(N/mm ²)	# cycles total	Strain parameters		Δε/2		2Nf	eq	miner		0.00
5	400000	189	5.68E+05	0.57	6.47E+10 E		208.94		0.00136003	1.80E+39	0.0013600		3.60E-29
6	1.20E+06	48	1.70E+06	1.70	1.64E+10 n'		0.15		0.00408009	5.90E+33	0.0040801		2.79E-24
7	2.00E+06	27	2.84E+06	2.84	9.25E+09 k'		820.00		0.00680015	1.66E+31	0.0068001		5.56E-22
8	2.80E+06	10	3.98E+06	3.98	3.42E+09 Rm		497.00		0.00952020	3.47E+29	0.0095202		9.86E-21
9	3.60E+06	10	5.11E+06	5.11	3.42E+09 σ ^f		745.50		0.01224026	1.93E+28	0.0122403		1.77E-19
10	4.40E+06	3	6.25E+06	6.25	1.03E+09 e ^f		0.59		0.01496032	1.93E+27	0.0149603		5.33E-19
11	5.20E+06	5	7.39E+06	7.39	1.71E+09 b		-0.09		0.01768038	2.82E+26	0.0176804		6.07E-18
12	6.80E+06	4	9.66E+06	9.66	1.37E+09 c		-0.58		0.02312050	1.29E+25	0.0231205		1.06E-16
13	7.60E+06	1	1.08E+07	10.80	3.42E+08 Safety coeff				0.02584056	3.60E+24	0.0258406		9.51E-17
14	8.40E+06	1	1.19E+07	11.93	3.42E+08 n		2.00		0.02856061	1.14E+24	0.0285606		3.01E-16
15	1.00E+07	1	1.42E+07	14.21	3.42E+08				0.03400073	1.54E+23	0.0340007		2.23E-15
16	1.08E+07	1	1.53E+07	15.34	3.42E+08				0.03672079	6.34E+22	0.0367208		5.40E-15
17	1.24E+07	1	1.76E+07	17.62	3.42E+08				0.04216091	1.30E+22	0.0421609		2.64E-14
18	1.64E+07	1	2.33E+07	23.30	3.42E+08				0.05576120	5.21E+20	0.0557612		6.57E-13
19	2.36E+07	1	3.35E+07	33.53	3.42E+08				0.08024173	7.94E+18	0.0802417		4.31E-11
20	2.60E+07	1	3.69E+07	36.94	3.42E+08				0.08840190	2.61E+18	0.0884019		1.31E-10
21	4.20E+07	1	5.97E+07	59.67	3.42E+08				0.14280307	1.05E+16	0.1428031		3.25E-08
22	My avg												
23	2.27E+07												
24	sigma avg (Pa)	6.37E+06											
25	sigma avg (MPa)	6.37											

Figura 62: Hoja de Excel Parked Método Strain Life Modelo B

Método Strain Life para modelo simple

Power Production Loading

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	c:\program files (x86)\dng g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowpp1']												
2		De(m)		5 Di(m)					4.96 Wy(m³)	0.38801178 N(N)		2.17E+07	
3	Number of cycles [.]	De^4(m^4)		625 Di^4(m^4)					605.238723 A(m^2)	0.31290263			
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]	Cycle range(N/mm^2)	Cycle range(N/mm^2)	# cycles total	Strain parameters	Δε/2		2Nf	eq	miner	0.07	
5	300000	106	1.55E+06	1.55	3.63E+10 E		208.94		0.00370054	2.67E+33	3.70E-03	1.36E-23	
6	900000	37	4.64E+06	4.64	1.27E+10 n'		0.15		0.01110162	8.77E+27	0.0111	1.45E-18	
7	1.50E+06	16	7.73E+06	7.73	5.48E+09 k'		820.00		0.01850270	2.47E+25	0.0185	2.22E-16	
8	2.10E+06	13	1.08E+07	10.82	4.45E+09 Rm		497.00		0.02590378	5.17E+23	0.0259	8.62E-15	
9	2.70E+06	6	1.39E+07	13.92	2.05E+09 eF'		745.50		0.03330486	2.87E+22	0.0333	7.15E-14	
10	3.30E+06	4	1.70E+07	17.01	1.37E+09 b		0.59		0.04070594	2.86E+21	0.04071	4.78E-13	
11	3.90E+06	2	2.01E+07	20.10	6.85E+08 c		-0.09		0.04810703	4.20E+20	0.04811	1.63E-12	
12	4.50E+06	5	2.32E+07	23.20	1.71E+09 c		-0.58		0.05550811	8.10E+19	0.05551	2.11E-11	
13	5.10E+06	4	2.63E+07	26.29	1.37E+09 Safety coeff				0.06290919	1.92E+19	0.06291	7.13E-11	
14	5.70E+06	2	2.94E+07	29.38	6.85E+08 n		2.00		0.07031027	5.35E+18	0.07031	1.28E-10	
15	6.30E+06	3	3.25E+07	32.47	1.03E+09				0.07771135	1.69E+18	0.07771	6.06E-10	
16	6.90E+06	3	3.56E+07	35.57	1.03E+09				0.08511243	5.96E+17	0.08511	1.73E-09	
17	7.50E+06	1	3.87E+07	38.66	3.42E+08				0.09251351	2.28E+17	0.09251	1.50E-09	
18	8.10E+06	1	4.18E+07	41.75	3.42E+08				0.09991459	9.43E+16	0.09991	3.63E-09	
19	8.70E+06	3	4.48E+07	44.84	1.03E+09				0.10731567	4.15E+16	0.10732	2.48E-08	
20	9.30E+06	3	4.79E+07	47.94	1.03E+09				0.11471675	1.93E+16	0.11472	5.33E-08	
21	9.90E+06	3	5.10E+07	51.03	1.03E+09				0.12211783	9.39E+15	0.12212	1.09E-07	
22	1.05E+07	2	5.41E+07	54.12	6.85E+08				0.12951891	4.78E+15	0.12952	1.43E-07	
23	1.17E+07	3	6.03E+07	60.31	1.03E+09				0.14432108	1.38E+15	0.14432	7.46E-07	
24	1.23E+07	3	6.34E+07	63.40	1.03E+09				0.15172216	7.75E+14	0.15172	1.33E-06	
25	1.29E+07	3	6.65E+07	66.49	1.03E+09				0.15912324	4.48E+14	0.15912	2.29E-06	
26	1.41E+07	3	7.27E+07	72.68	1.03E+09				0.17392540	1.61E+14	0.17393	6.37E-06	
27	1.47E+07	3	7.58E+07	75.77	1.03E+09				0.18132648	9.99E+13	0.18133	1.05E-05	
28	1.53E+07	1	7.89E+07	78.86	3.42E+08				0.18872756	6.31E+13	0.18873	5.43E-05	
29	1.59E+07	1	8.20E+07	81.96	3.42E+08				0.19612864	4.05E+13	0.19613	8.45E-05	
30	1.65E+07	2	8.50E+07	85.05	6.85E+08				0.20352973	2.65E+13	0.20353	2.59E-05	
31	1.71E+07	2	8.81E+07	88.14	6.85E+08				0.21093081	1.76E+13	0.21093	3.90E-05	
32	1.77E+07	2	9.12E+07	91.23	6.85E+08				0.21833189	1.18E+13	0.21833	5.80E-05	
33	1.83E+07	2	9.43E+07	94.33	6.85E+08				0.22573297	8.05E+12	0.22573	8.51E-05	
34	1.89E+07	1	9.74E+07	97.42	3.42E+08				0.23313405	5.56E+12	0.23313	6.16E-05	
35	1.95E+07	1	1.10E+08	109.79	3.42E+08				0.26273838	1.41E+12	0.26274	2.44E-04	
36	2.31E+07	1	1.19E+08	119.07	3.42E+08				0.28494164	5.54E+11	0.28494	6.19E-04	
37	2.67E+07	1	1.38E+08	137.62	3.42E+08				0.32934816	1.05E+11	0.32935	3.27E-03	
38	3.03E+07	1	1.56E+08	156.18	3.42E+08				0.37375474	2.45E+10	0.37375	1.40E-02	
39	3.39E+07	1	1.75E+08	174.74	3.42E+08				0.41816140	6.74E+09	0.41816	5.09E-02	
40	My Avg												
41		7.33E+07											
42	sigma avg (Pa)		1.20E+08										
43	sigma avg (MPa)		119.72										

Figura 63: Hoja de Excel PPL Método Strain Life Modelo A

Start

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	c:\program files (x86)\dng g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowstart2']												
2		De(m)		5 Di(m)					4.85 Wy(m³)	1.407669006 N(N)		2.17E+07	
3	Number of cycles [.]	De^4(m^4)		625 Di^4(m^4)					553.3080063 A(m^2)	1.160425786			
4	Cycle range [Nm]	Number of cycles [.]	Cycle range(N/mm^2)	Cycle range(N/mm^2)	# cycles total	Strain parameters	Δε/2		2Nf	eq	miner	0.00	
5	1.75E+06	233	2.49E+06	2.49	1.60E+05 E		208.94		0.00595013	5.27712E+31	0.00595	3.03E-27	
6	5.25E+06	18	7.46E+06	7.46	1.24E+04 n'		0.15		0.01785038	1.73079E+26	0.01785	7.14E-23	
7	8.75E+06	6	1.24E+07	12.43	4.12E+03 k'		820.00		0.02975064	4.87819E+23	0.02975	8.45E-21	
8	1.23E+07	2	1.74E+07	17.40	1.37E+03 Rm		497.00		0.04165090	1.02006E+22	0.04165	1.35E-19	
9	1.93E+07	2	2.74E+07	27.35	1.37E+03 eF'		745.50		0.06545141	5.65413E+19	0.06545	2.43E-17	
10	2.28E+07	3	3.23E+07	32.32	2.06E+03 b		0.59		0.07735166	8.28801E+18	0.07735	2.49E-16	
11	2.63E+07	2	3.73E+07	37.30	1.37E+03 c		-0.09		0.08925192	1.59995E+18	0.08925	8.59E-16	
12	2.98E+07	4	4.23E+07	42.27	2.75E+03 c		-0.58		0.10115217	3.79582E+17	0.10115	7.24E-15	
13	3.33E+07	2	4.72E+07	47.24	1.37E+03 Safety coeff				0.11305243	1.05701E+17	0.11305	1.30E-14	
14	3.68E+07	2	5.22E+07	52.21	1.37E+03 n		2.00		0.12495269	3.3456E+16	0.12495	4.11E-14	
15	4.03E+07	3	5.72E+07	57.19	2.06E+03				0.13685294	1.17585E+16	0.13685	1.75E-13	
16	4.38E+07	1	6.22E+07	62.16	6.87E+02				0.14875320	4.50942E+15	0.14875	1.52E-13	
17	5.08E+07	1	7.21E+07	72.11	6.87E+02				0.17255371	8.18888E+14	0.17255	8.39E-13	
18	1.94E+08	1	2.76E+08	276.06	6.87E+02				0.66064114	162808505.5	0.66064	4.22E-06	
19	My avg												
20	6.90E+07												
21	sigma avg	3.04E+07											
22	sigma avg	30.37											

Figura 64: Hoja de Excel Start Método Strain Life Modelo A

Stop

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
c:\program files (x86)\dnv g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowstop2']												
	De(m)		5	Di(m)				4.85	Wy(m ³)	1.407669006	N(N)	2.17E+07
3	Number of cycles [.]	De ⁴ (m ⁴)	625	Di ⁴ (m ⁴)				553.3080063	A(m ²)	1.160425786		
4	Cycle range [Nm]	Number of Cycle range(N/m ²)	Cycle range(N/mm ²)	# cycles total	Strain parameters	Δε/2		2Nf	eq	miner		0.00
5	1.25E+06	61	1.78E+06	1.78	2.09E+10	E	208.94	0.00425009	4.15373E+33	0.00425	5.03E-24	
6	3.75E+06	9	5.33E+06	5.33	3.08E+09	n'	0.15	0.01275027	1.36234E+28	0.01275	2.26E-19	
7	6.25E+06	3	8.88E+06	8.88	1.03E+09	k'	820.00	0.02125046	3.83973E+25	0.02125	2.68E-17	
8	8.75E+06	6	1.24E+07	12.43	2.05E+09	Rm	497.00	0.02975064	8.02912E+23	0.02975	2.56E-15	
9	1.13E+07	3	1.60E+07	15.98	1.03E+09	σf'	745.50	0.03825082	4.46821E+22	0.03825	2.30E-14	
10	1.21E+08	1	1.72E+08	172.34		εf'						
11	My avg					b						
12	-1.85E+06		-1.32E+06	-1.32		c						
13						Safety coeff						
14						n						2.00

Figura 65: Hoja de Excel Stop Método Strain Life Modelo A

Parked

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
c:\program files (x86)\dnv g\bladed 4.6 educational\results [Run 'rainflowpkd352']												
	De(m)		5	Di(m)				4.96	Wy(m ³)	0.388011775	N(N)	2.17E+07
3	Number of cycles [.]	De ⁴ (m ⁴)	625	Di ⁴ (m ⁴)				605.2387226	A(m ²)	0.312902628		
4	Cycle range [Nm]	Number of Cycle range(N/m ²)	Cycle range(N/mm ²)	# cycles total	Strain parameters	Δε/2		2Nf	eq	miner		0.00
5	500000	175	2.83E+06	2.83	5.99E+10	E	208.94	0.00678432	1.55E+31	0.0067843	3.86E-21	
6	1.65E+06	59	8.50E+06	8.50	2.02E+10	n'	0.15	0.02035297	5.10E+25	0.0203530	3.96E-16	
7	2.75E+06	18	1.42E+07	14.17	6.16E+09	k'	820.00	0.03392162	1.44E+23	0.0339216	4.29E-14	
8	3.85E+06	11	1.98E+07	19.84	3.77E+09	Rm	497.00	0.04749027	3.00E+21	0.0474903	1.25E-12	
9	4.95E+06	6	2.55E+07	25.51	2.05E+09	σf'	745.50	0.06105892	1.67E+20	0.0610589	1.23E-11	
10	6.05E+06	7	3.12E+07	31.18	2.40E+09	εf'	0.59	0.07462757	1.67E+19	0.0746276	1.44E-10	
11	7.15E+06	5	3.69E+07	36.85	1.71E+09	b	-0.09	0.08819621	2.44E+18	0.0881962	7.02E-10	
12	8.25E+06	3	4.25E+07	42.52	1.03E+09	c	-0.58	0.10176486	4.71E+17	0.1017649	2.18E-09	
13	9.35E+06	1	4.82E+07	48.19	3.42E+08	Safety coeff		0.11533351	1.12E+17	0.1153335	3.05E-09	
14	1.05E+07	3	5.39E+07	53.86	1.03E+09	n	2.00	0.12890216	3.11E+16	0.1289022	3.30E-08	
15	1.16E+07	2	5.95E+07	59.53	6.85E+08			0.14247081	9.85E+15	0.1424708	6.95E-08	
16	1.49E+07	1	7.65E+07	76.54	3.42E+08			0.18317675	5.48E+14	0.1831768	6.25E-07	
17	1.60E+07	1	8.22E+07	82.21	3.42E+08			0.19674540	2.41E+14	0.1967454	1.42E-06	
18	1.71E+07	1	8.79E+07	87.88	3.42E+08			0.21031405	1.12E+14	0.2103141	3.06E-06	
19	1.82E+07	1	9.36E+07	93.55	3.42E+08			0.22388270	5.46E+13	0.2238827	6.27E-06	
20	2.37E+07	1	1.22E+08	121.90	3.42E+08			0.29172597	2.61E+12	0.2917260	1.31E-04	
21	2.59E+07	1	1.33E+08	133.24	3.42E+08			0.31886329	9.38E+11	0.3188633	3.65E-04	
22	4.13E+07	1										
23	5.01E+07	1										
24	6.11E+07	1										
25												
26	My avg											
27	3.17E+07											
28	sigma avg (Pa)	1.24E+07										
29	sigma avg (MPa)	12.37										
30												

Figura 66: Hoja de Excel Parked Método Strain Life Modelo A