UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes
y Aplicaciones Numéricas en la Ingeniería

SIANI

Máster Oficial en Eficiencia Energética

Trabajo Final de Máster

Prediseño de modelos a escala para el estudio de fenómenos dinámicos de interacción suelo - estructura en aerogeneradores off-shore sobre monopilotes

Autor: Esteban García Mariño

Tutores: Luis A. Padrón Hernández
Juan J. Aznárez González

Las Palmas de Gran Canaria, Julio de 2015

Agradecimientos

Me gustaría agradecer sinceramente a mis tutores del Trabajo Final de Máster, Dr Luis Alberto Padrón y Dr Juan José Aznárez, su esfuerzo y dedicación.

Sus conocimientos, su orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para mi formación.

Ellos han inculcado en mí un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podría tener una formación completa.

A su manera, han sido capaces de ganarse mi admiración, así como sentirme en deuda con ellos por todo lo recibido durante el periodo de tiempo que ha durado esta investigación.

A todo el equipo de medios continuos y estructuras dinámicas del grupo de investigación del SIANI de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria por su tiempo y dedicación a Guillermo Alamo Meneses y Jacob David Rodriguez. Sin ellos seguro que no hubiese sido posible.

A mi familia fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida y más aún en mis duros años de carrera profesional y en especial quiero expresar mi más grande agradecimiento a mi madre que sin su ayuda hubiera sido imposible culminar este proyecto.

Índice de contenidos

Abreviaturas **V**

1. Introducción **1**
1.1. Desafío energético actual . . . 1
1.2. Necesidad de energías renovables . . . 1
1.3. Energía eólica off-shore en España . . . 2
1.4. Motivación del trabajo fin de máster y objetivos de la investigación . . . 3

2. Propiedades estructurales de aerogeneradores Off-shore cimentados sobre monopilotes. **5**
2.1. Introducción . . . 5
2.2. Terminología . . . 5
2.3. Tipos de cimentación en aerogeneradores off-shore . . . 6
2.3.1. Cimentación por monopilote . . . 7
2.3.2. Cimentación por gravedad . . . 9
2.3.3. Tripodes . . . 10
2.3.4. Cimentación de cajón . . . 10
2.3.5. Cimentación Jacket por celosía . . . 11
2.3.6. Cimentaciones flotantes . . . 11
2.4. Cargas en aerogeneradores offshore . . . 12
2.4.1. Cargas de viento . . . 12
2.4.2. Cargas actuando en la torre del aerogenerador . . . 13
2.4.3. Cargas de las olas . . . 15
2.5. Aerogeneradores estudiados . . . 16

3. Relaciones de similitud para el diseño de modelos a escala de aerogeneradores **17**
3.1. Introducción . . . 17
3.1.1. Leyes de similitud de otras investigaciones . . . 17
3.2. Propuesta para los efectos de interacción suelo - estructura en régimen elástico - lineal . . . 18
3.2.1. Introducción de relaciones de similitud . . . 18
3.2.2. Relaciones de similitud . . . 19
3.2.3. Leyes dimensionales . . . 20
3.2.4. Relaciones adimensionales . . . 21
3.2.5. Relaciones estructura - suelo aerogenerador-modelo . . . 22
3.3. Revisión bibliográfica . . . 22
3.3.1. Estructura . . . 22
3.3.2. Cimentación . . . 23
3.3.3. Suelo . . . 24
3.4. Modelo matemático . . . 24

3.4.1. Introducción 24
3.4.2. Base Rígida 25
3.4.3. Base flexible 26

4. Estudio de alternativas para el modelado físico de aerogeneradores a escala 27
4.1. Introducción 27
4.2. Alternativas para el material a utilizar 27
4.2.1. Selección de Materiales 27
4.2.2. Proporciones geométricas del modelo 29
4.2.3. Selección del terreno 29
4.3. Diseño del sistema estructura-suelo 30
4.3.1. Modelo matemático 30

5. Resultados experimentales preliminares 35
5.1. Introducción 35
5.1.1. Elementos principales de un sistema de adquisición de datos 36
5.2. Sensores 36
5.2.1. Acelerómetros 36
5.2.2. Sensor utilizado en el análisis modal experimental 39
5.2.3. El hardware de adquisición de datos 41
5.2.4. Excitador electrodinámico (Excitador) 44
5.3. Modelo a escala utilizado en la investigación 45
5.3.1. Introducción 45
5.3.2. Definición de parámetros de los aerogeneradores utilizados 45
5.3.3. Experimentos realizados 47
5.3.4. Test modelo a escala en base fija 47
5.3.5. Test modelo a escala en base flexible 49
5.4. Resultados calculo $\overline{T}/T$ 50
5.4.1. Resultados analíticos 50
5.4.2. Resultados experimentales 50
5.5. Conclusiones 50

6. Conclusiones 51
6.1. Resumen 51
6.2. Resultados y conclusiones 52
6.2.1. Actualización del modelo analítico (ajuste de parámetros) 53
6.2.2. Resultados finales 53
6.2.3. Comentarios finales 53

Referencias 56

I Apéndices 57

A. Apéndice I 59
A.1. Revisión bibliográfica 59
A.2. Relaciones Similitud 59
A.3. Hoja de cálculo 60

B. Apéndice II 61
B.1. Elección geometría y material 61

Abreviaturas

Tipografia Romana

A Sección de la torre

A_f Área del fuste real

A_p Área proyectada sobre el plano normal en la dirección del viento

C_s Velocidad de propagación de la onda en el terreno

C_h Coeficiente que depende del peso de la torre

C_f Coeficiente que depende de la forma de la torre

D_i Diámetro inferior de la torre

D_p Diámetro del pilote

D_m Diámetro medio de la torre

D_s Diámetro superior de la torre

d_w Profundidad del aerogenerador desde el nivel del mar hasta el lecho marino

E_E Modulo de Young de la estructura

E_s Modulo de Young del terreno

F_D Resistencia de la carga

f_f Frecuencia forzada

F_h Total de la carga horizontal actuando en el elemento vertical

F_T Acción del viento sobre el rotor

f_s Frecuencia de la paso de la pala

F_{sh} Carga del viento sobre la torre

f_{rpm} Frecuencia de giro del rotor

F_M Inercia de la carga

G Modulo de Young del terreno

H Altura de la estructura

H' Altura del modelo a escala

H_s Altura significante de la ola

H_{max} Carga máxima horizontal de la ola

I_E Inercia de la estructura

K Rigidez de la estructura

K_{HH} Impedancia lateral de la cimentación

K_{RR} Impedancia de cabeceo de la cimentación

K_{RH} Impedancia cruzada de la cimentación

k_h Coeficiente de permeabilidad horizontal del terreno

L_w Longitud de la ola

m Masa de la góndola y palas del aerogenerador

$\overline{m}$ Masa linear superestructura

M_b Masa de la torre

m_f Masa total del fuste de la estructura

m_{g+p} Masa de la góndola y las palas

N_b Numero de palas del aerogenerador

P Equivalente total de la carga horizontal provocada por el viento a una distancia **a** desde el nivel de la cimentación hasta la turbina.

R_T Radio del rotor

S_σ Relación entre la velocidad de onda del suelo y las relaciones geométricas del aerogenerador real y del modelo a escala de altura

S_μ Relaciona la masa superior del aerogenerador respecto la masa que ocupa el pilote en el terreno junto con la altura de los modelos a escala y real.

S_{μ_e} Relación entre la masa de la góndola y las palas respecto la masa densidad del fuste del aerogenerador real respecto el modelo a a escala.

T Periodo de la estructura

T Periodo natural de la estructura en base rígida

$\overline{T}$ Periodo natural de la estructura incluyendo fenómenos de interacción suelo-estructura (SSI)

U_t Desplazamiento absoluto de la góndola es

U_w velocidad inducida por la ola en el agua

$\dot{U}_w$ Aceleración inducida por la ola en el agua

V_1 Velocidad del viento en el rotor

V_{rotor} Velocidad de giro del rotor

V_{wind} Velocidad del viento

z Coordenada vertical

Tipografía Griega

ξ Factor de amortiguamiento estructura

ξ' Coeficiente de amortiguamiento de el modelo a escala

ξ_s Factor de amortiguamiento del suelo

λ_s Coeficiente de la velocidad ratio

δt Tiempo de paso de la ola (Periodo)

ν' Coeficiente de Poisson

μ Ratio de densidad estructura - suelo

μ_e Ratio de la masa del fuste - góndola y palas

θ_c Momento en la base del modelo

ρ Densidad del material

ρ_f Densidad del fuste del modelo real

ρ' Densidad del material del modelo a escala

ρ_a Densidad del aire

ρ_s Densidad del terreno real

ρ'_s Densidad de la espuma

ρ_w Densidad del agua del mar

ψ Numero de olas en un metro lineal

σ Relación que permite anticipar el nivel de interacción suelo - estructura.

υ_s Coeficiente de Poisson

ω Frecuencia de la estructura

ω_n Frecuencia natural del aerogenerador

ω_r Frecuencia de resonancia del acelerómetro

ω_w Frecuencia angular de la ola

Índice de figuras

1.1. Consumo energético en el mundo 1980-2030 [23] 1
1.2. Potencia instalada de energías renovables 21,331.6(MW) en Europa [22]. . . . 2
1.3. Generación eléctrica 2000-2014. [23] 2
1.4. Potencia acumulado en europa de offshore MW. [23] 2
1.5. Aerogenerador Lely offshore en la granja eolica de Holanda [12]. 4

2.1. Esquema de las partes de un aerogenerador off-shore aerogeneradores off-shore [15] 5
2.2. Diferentes tipos de cimentación para aerogeneradores off-shore. a: mono-pilote; b: cimentación por gravedad; c: trípodes; d: jacket; e: Cajón; f: cimentaciones flotantes [15] 6
2.3. Cimentación por mono-pilote [15] 7
2.4. Cimentación por monopilote [15] 7
2.5. Aerogeneradores off-shore [23]. 8
2.6. Alternativas de diseño [15] 9
2.7. Cimentación por gravedad. [15] 10
2.8. Cimentación trípode [15]. 10
2.9. Ejemplo de cimentación Jacket [1] 11
2.10. Ejemplo de cimentación flotante [20] 11
2.11. El Coeficiente de empuje C_T de la turbina como función de el tipo de velocidad ratio [27]. 13
2.12. Efecto sombra de las palas [15] 13
2.13. Patrón de la típica carga de viento en una turbina utilizando la formula [2], de [6] 14
2.14. Altura significante y periodo de las olas en el espectro del mar por [21]. 16

3.1. Propuesta del modelo simplificado para obtener las leyes de similitud (de [9]). . 20
3.2. Aerogenerador off-shore considerando las dos componentes de calculo: góndola - torre y cimentación - suelo 25
3.3. Modelo simplificado de un aerogenerador en base rígida 25
3.4. Modelo simplificado de un aerogenerador en base flexible [9]. 26

4.1. Modelo simplificado de un aerogenerador en base rígida 31
4.2. Modelo simplificado de un aerogenerador en base flexible. 31
4.3. Modelo simplificado de un aerogenerador considerando la flexibilidad de la cimentación 32
4.4. Simplificación modelo para la obtención del valor de la inercia 32

5.1. Esquema básico de adquisición de datos. 36
5.2. Acelerómetro DE-ACCM3D Buffered $\pm$ 3g(de www.dimensionengineering.com). 40

5.3. Tensión de Acelerómetro (de www.dimensionengineering.com). 40
5.4. Dispositivo Labjack UE9 (de http://labjack.com/ue9). 43
5.5. Dispositivo Excitador (de http://reco.galeon.com/055f6480.jpg). 45
5.6. Partes Excitador (de http://reco.galeon.com/055f6480.jpg). 45
5.7. Evaluación experimentación del modelo a escala en base rígida vertical 48
5.8. Resultados de la experimentación en base rígida vertical. 48
5.9. Experimentación en base flexible. 49
5.10. Resultados de la experimentación en base flexible vertical. 49

Índice de tablas

2.1. Valores del coeficiente de altura para diferentes alturas 14

3.1. Datos de las estructuras de los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20]. 23
3.2. Datos de las estructuras de los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20] . 23
3.3. Datos del los mono-pilotes de los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20] 23
3.4. Datos del los mono-pilotes de los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20] 23
3.5. E: Modulo de elasticidad, C_s: Velocidad de propagación de la onda, ρ: Densidad de terreno. Datos del terreno los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20] 24
3.6. E: Modulo de elasticidad, C_s: Velocidad de propagación de la onda, ρ: Densidad de terreno. Datos del terreno los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20] 24

4.1. Resumen de los parametros fisicos de la espuma D30 30

5.1. Dimensiones tecnicas del aergonerador Vestas V90 3MW situado en Kentish Flats 46
5.2. K_{HH}: Impedancia lateral de la cimentación, K_{RR}: impedancia de cabeceo de la cimentación, K_{HR}: impedancia cruzada de la cimentación 46
5.3. Dimensiones tecnicas del modelo a escala. 46
5.4. K_{HH}: Impedancia lateral de la cimentación, K_{RR}: impedancia de cabeceo de la cimentación, K_{HR}: impedancia cruzada de la cimentación 47
5.5. Experimentaciones realizadas a lo largo del trabajo de fin de máster 47
5.6. Resultados analíticos del modelo a escala del aerogenerador V90 en el modelo analítico 50
5.7. Resultados analíticos del modelo a escala del aerogenerador V90 en el modelo experimental 50

6.1. Experimentaciones realizadas a lo largo del trabajo de fin de máster 52
6.2. Experimentaciones realizadas a lo largo del trabajo de fin de máster 52

Capítulo 1

Introducción

1.1 Desafío energético actual

Independientemente de la recesión económica y energética de 2008-2015, la demanda eléctrica se incrementará para un futuro próximo. Debido al crecimiento emergente de los mercados para el año 2030, el planeta necesitará un 25 por ciento más de energía de lo que se está consumiendo en la actualidad (ver figura 1.1).

Figura 1.1: Consumo energético en el mundo 1980-2030 [23]

La política energética actual es dependiente de los combustibles fósiles, el efecto invernadero está previsto a que aumente un 55 por ciento más gracias a este tipo política energética. Esta dependencia de los combustibles fósiles nos llevará a un irreversible cambio climático que potenciará más eventos extremos como inundaciones, ciclones, olas de calor y cambios de la velocidad del viento [22]. Es necesaria una estrategia para conseguir ambos puntos, energía y seguridad climática sin comprometer el crecimiento de la economía.

1.2 Necesidad de energías renovables

Como se muestra en la figura 1.2, la generación de energías renovables están aumentando constantemente en los últimos cuatro años y seguirá aumentando en las próximas décadas. Mientras algunas tecnologías de generación, incluyendo las hidroeléctricas, geotérmicas, presentan un pequeño aumento, el desarrollo de la generación eólica es exponencial.

La unión Europea está de acuerdo en suplir el veinte por ciento de la demanda energética mediante energía renovable para el año 2020. En estos dos últimos años (2013-2014) se han

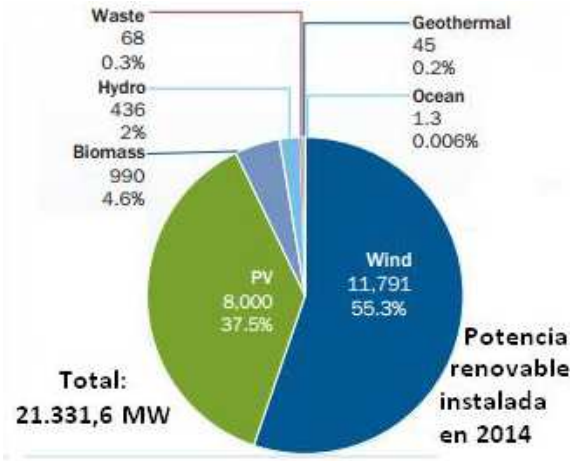


Figura 1.2: Potencia instalada de energías renovables 21,331.6(MW) en Europa [22].

instalado más de 42,500 MW . Un 40 por ciento de esta nueva capacidad eléctrica es gracias a la generación eólica como se muestra en la figura 1.3.

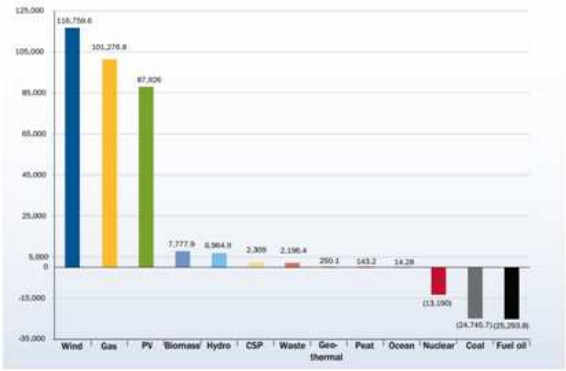


Figura 1.3: Generación eléctrica 2000-2014. [23]

En vistas hacia un futuro próximo la generación eólica offshore aumentará de manera exponencial (1.4).

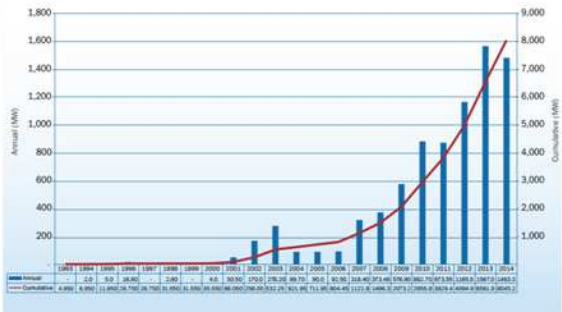


Figura 1.4: Potencia acumulado en europa de offshore MW. [23]

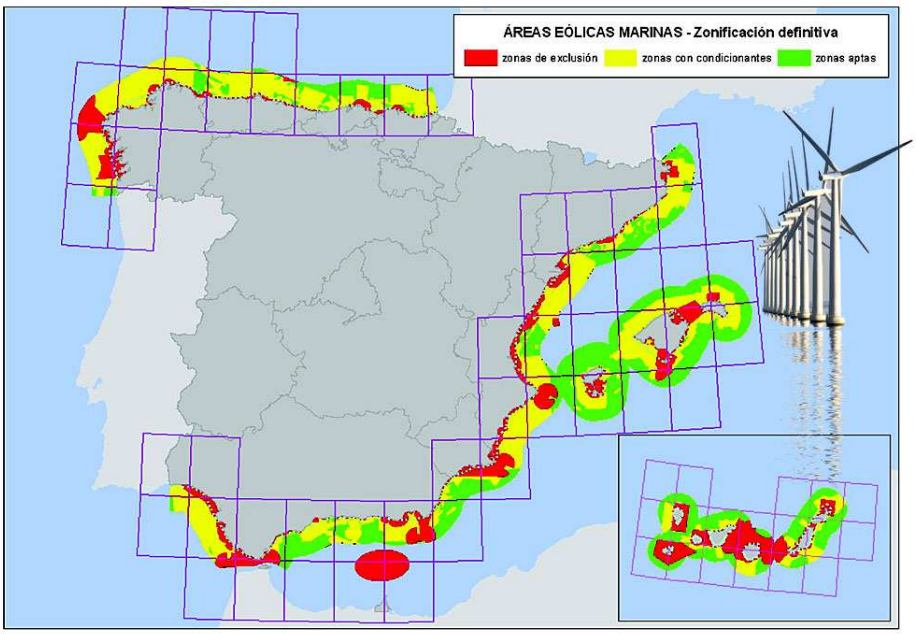
1.3 Energía eólica off-shore en España

A final de 2011 había en Europa una potencia eólica off-shore instalada de 3.812,6 MW, liderado por el Reino Unido con 2.093,7 MW (55 %) seguido de Dinamarca con 857,3 MW

(23 %). La mayor parte de estos parques eólicos marinos se encuentran en el Mar del Norte. En total se cuenta a finales de 2011 con 53 Parques Eólicos Marinos (PEM) que constan de 1.371 aerogeneradores y una inversión estimada de 11.000 millones de €. En otros países fuera de Europa existen planes ambiciosos para la implementación de eólica marina. Estados Unidos y China, van a tener sus primeros parques eólicos marinos en los próximos años.

La eólica marina en España está aún en fase de despegue. Algunos de los factores que se detallan a continuación son los que marcan el avance de implantación de esta tecnología en nuestro país:

- La regulación nacional que establece el procedimiento de zonas medioambientalmente viables para la construcción de los parques eólicos marinos y otorga los permisos para la construcción de los parques.
- Costes asociados a tecnologías emergentes o desarrolladas y existencia de un marco retributivo estable que aporte rentabilidad a los proyectos.
- Desarrollo adecuado de infraestructuras (puertos, carreteras, etc.) e industria (metal, obra civil, etc.) que permita la ejecución de proyectos de gran envergadura. La posibilidad potencial de instalar aerogeneradores off-shore en España se muestra acontinuación:



1.4 Motivación del trabajo fin de máster y objetivos de la investigación

Los aerogeneradores off-shore son una nueva energía renovable con poco tiempo de puesta en práctica, con poco avance en la investigación experimental. El coste de un aerogenerador es tan alto que resulta inviable realizar pruebas con equipos reales (con excepción, claro está, de aquellos desarrollados e instalados para su explotación). Sería por lo tanto muy interesante poder construir modelos a escala de bajo coste que permitan estudiar los fenómenos de interacción suelo-estructura. Así, los objetivos de este Trabajo Fin de Máster son:

- Recopilación de la mayor cantidad posible de información disponible en relación con aquellos parámetros necesarios para el análisis de la interacción suelo-estructura en aerogeneradores off-shore reales descritos en trabajos técnicos y científicos disponibles.
- Propuesta y estudio de posibles relaciones de similitud que puedan utilizarse para la definición de modelos a escala de bajo coste utilizables para el estudio de fenómenos de interacción suelo-estructura en aerogeneradores off-shore. En primer lugar, el estudio se ceñirá a la respuesta lineal del sistema, para posteriormente, sobre un fundamento firme, poder pasar a estudiar fenómenos no lineales.
- Exploración preliminar de las posibilidades y posibles problemas técnicos a solventar a la hora de materializar un modelo a escala concreto.

Figura 1.5: Aerogenerador Lely offshore en la granja eolica de Holanda [12].

Capítulo 2

Propiedades estructurales de aerogeneradores Off-shore cimentados sobre monopilotes.

2.1 Introducción

Los objetivos de este capitulo son: Terminología de los aerogeneradores, encontrar diferentes tipos de diseños de cimentación para evaluar su potencial en la utilización de la investigación y conocer las cargas que soporta un aerogenerador off-shore en su medio de utilización.

2.2 Terminología

En el campo de los aerogeneradores off-shore se utiliza la terminología que se muestra a continuación (vease la figura 2.1):

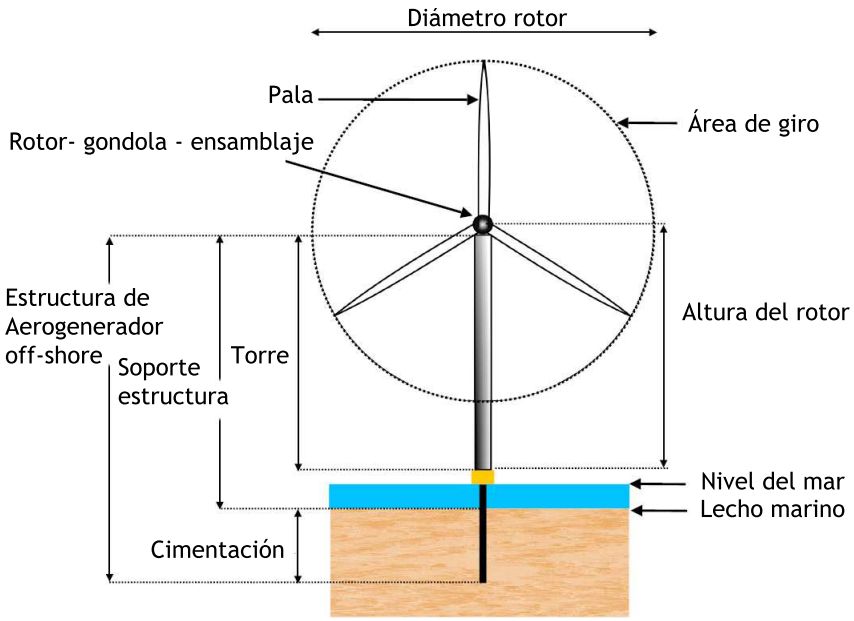


Figura 2.1: Esquema de las partes de un aerogenerador off-shore aerogeneradores off-shore [15]

- Cimentación: Componente estructural que se extiende desde el lecho marino hasta el pilar.
- Torre: Elemento estructural, se extiende desde el nivel del mar hasta la góndola de la turbina.

- Soporte estructura: parte estructural desde el lecho marino hasta la góndola de la turbina. La cimentación se toma como un componente aparte.
- Rotor - góndola -ensamblaje: es una la parte del aerogenerador que es soportada por la estructura.
- Estructura del aerogenerador off-shore: sistema estructural que consisten en el soporte de la estructura y la cimentación.

2.3 Tipos de cimentación en aerogeneradores off-shore

En los aerogeneradores off-shore hay diferentes tipos de cimentación como se puede ver en la figura 2.2.

- (a) Mono-pilote
- (b) Cimentación por gravedad
- (c) Trípodes
- (d) Jacket
- (e) Cajón
- (f) Cimentaciones flotantes

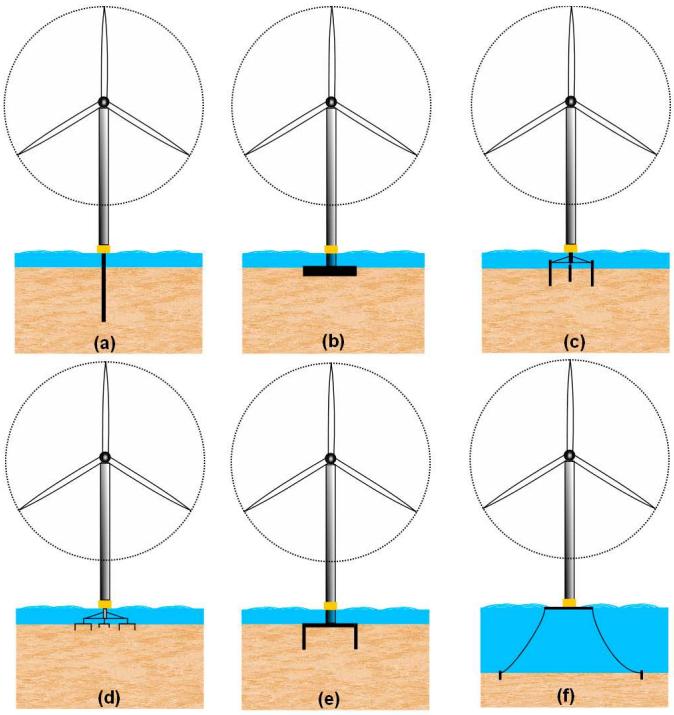


Figura 2.2: Diferentes tipos de cimentación para aerogeneradores off-shore. a: mono-pilote; b: cimentación por gravedad; c: trípodes; d: jacket; e: Cajón; f: cimentaciones flotantes [15]

Las cimentaciones de pilotes y por gravedad son las mas utilizadas por su tiempo en puesta de obra en la industria del petroleo y gas.

2.3.1 Cimentación por monopilote

Para poder fijar la torre a profundidades de entre 15 y 30 metros, puede que la solución más óptima sea el mono-pilote. Consiste en "clavar" literalmente un pilote en el fondo marino, a unos 10 metros bajo el suelo, sobre el cual se instalarán los módulos de la torre. Esta solución proporciona mucha estabilidad al modelo, pero para grandes alturas de torre se generarán grandes esfuerzos de flexión en la base de la misma. Por ello, cuando la cota superior prevista es demasiado elevada este método tiende a ser descartado. El material más común que se utiliza es el acero. Los mono-pilotes sobre todo se utilizan cuando el suelo es blando y cuando tiene grandes cargas aplicadas en la estructura. Estas dos condiciones suelen presentarse en los casos de los aerogeneradores off-shore y el mono-pilote es la opción que más se suele utilizar.

Por esta razón este tipo de cimentación será la que se lleve a cabo en la investigación.

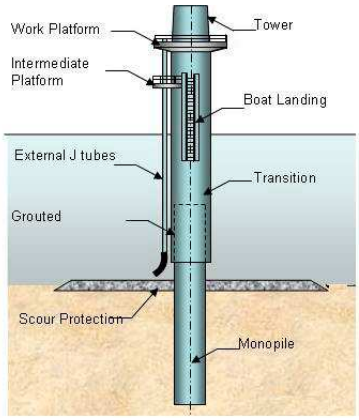


Figura 2.3: Cimentación por mono-pilote [15]

La respuesta al esfuerzo axial en el pilote consiste en dos partes: resistencia del cojinete y la resistencia del eje. La máxima resistencia del cojinete puede ser evaluada como el producto de los esfuerzos horizontales frente al fallo del eje con sus respectivos coeficientes. Para más detalles sobre el diseño del mono-pilote en la bibliografía de [9] y [25]

En la figura 2.4 la primera imagen muestra la instalación del martillo que provoca el orificio en el lecho marino a. En la segunda se ve como la transición de la instalación, ver figura 2.4 b. Finalmente la torre es levantada sobre toda la estructura como se muestra en la figura 2.4 c.

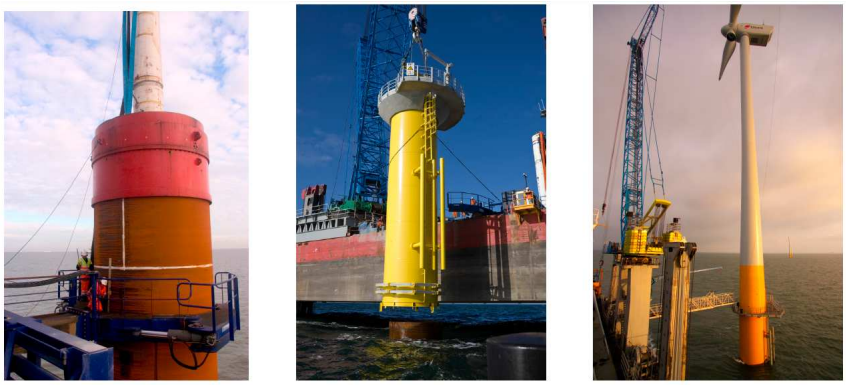


Figura (a) Figura (b) Figura (c)

Figura 2.4: Cimentación por monopilote [15]

2.3.1.1 Dinámica estructural de los aerogeneradores off-shore cimentados sobre mono-pilotes

Los aerogeneradores off-shore son altos y pesados, son estructuras esbeltas que se sitúan en condiciones adversas, provocando que el diseño de las cimentaciones sean todo un reto (figura 2.5). Hay diferentes propuestas de cimentación en practica, por ejemplo: los mono-pilotes, cimentación de gravedad, trípodes, multi-pilotes, ect. Sin embargo, en este Trabajo final de máster únicamente será estudiada la cimentación mono-pilote debido a la que es la más utilizada. El diseño de la cimentación es un reto debido a varias cargas dinámicas que se transmiten desde la turbina de la torre hasta la cimentación. Estas cargas consisten en: carga de viento, carga de olas, cargas dinámicas del rotor y efecto del viento en las palas del aerogenerador. Un diseño robusto debe asegurar que la frecuencia natural del conjunto del sistema(rotor-pala-torre-cimentación) no se aproxima a las frecuencias de las cargas impuestas por el medio ambiente o las frecuencias de las palas/rotor. Un fallo debido a la amplificación de la respuesta dinámica de la estructura provocaría un dominio de las flexiones que comprometerían el funcionamiento de los aerogeneradores.

Figura 2.5: Aerogeneradores off-shore [23].

La respuesta dinámica de los aerogeneradores depende de las condiciones de soporte (la rigidez de la cimentación). Esto también dependerá de la dureza del suelo. Sobre una cantidad moderadamente elevada de las cargas cíclicas las propiedades dinámicas de los aerogeneradores pueden cambiar debido a la degradación y densificación del terreno.[26] sugiere un completo análisis de la frecuencia natural que tiene que tener la combinación de la estructura de la turbina, torre y mono-pilote. Esto es debido a la verificación de pequeñas frecuencias que difieren entre un +-10 % del 1P y 3P de las frecuencias naturales nominales del rotor.

Las frecuencias producidas por las cargas ambientales y por el aerogenerador se pueden resumir en:

- Cargas de viento: La frecuencia predominante del viento se asume como 0.1Hz
- La carga undimotriz: predominantemente la frecuencia se asume como 0.1 Hz
- La frecuencia del rotor: Para un aerogenerador Syemens 107 con un intervalo de 8.6 – 18.4 rpm la frecuencia se asume entre un rango de 0.14-0.31Hz.
- La carga del viento sobre las palas en la torre: Cuando las palas pasan la torre, el efecto sombra del viento sobre la torre causa una carga cíclica sobre el aerogenerador. Esta frecuencia se puede saber a partir de multiplicar el numero de palas con la frecuencia del

rotor. Estas cargas cíclicas de 3P (cuando tiene tres palas para una frecuencia del rotor de 0.23 Hz el pase de la frecuencia del viento sobre las palas lo convierte en 0.69.

Se puede observar que dependiendo de el valor de la frecuencia natural del aerogenerador hay tres posibilidades de diseño (2.6)

1. Blando-blando: la primera frecuencia natural del aerogenerador es menor que la frecuencia del rotor (1P). La estructura del aerogenerador puede ser muy flexible.

2. Blando-rígido: la primera frecuencia natural del aerogenerador esta entre la primera frecuencia del rotor (1P) y la frecuencia del pase de las palas (3P)

3. Rígido-rígido: La primera frecuencia del sistema es mayor que el paso de palas (3P). La estructura del aerogenerador es muy rígida, además sería muy costoso.

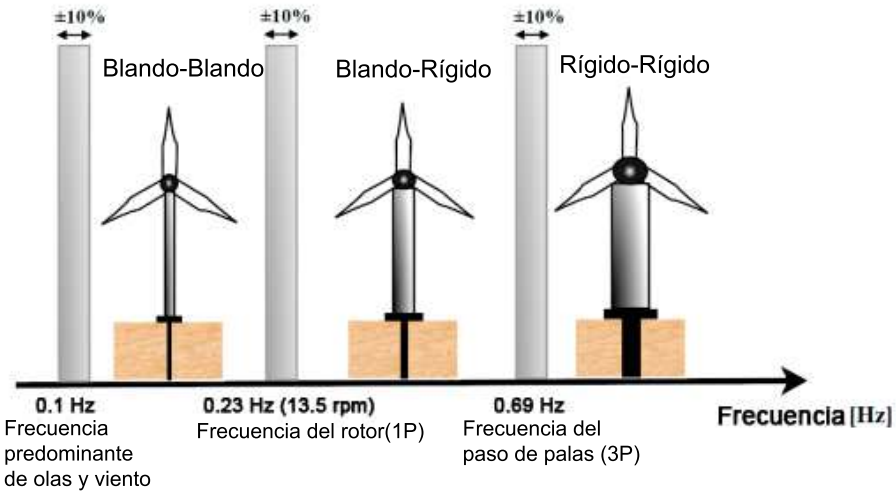


Figura 2.6: Alternativas de diseño [15]

Podemos concluir con la predicción de la frecuencia natural es crucial en el diseño de los aerogeneradores off-shore.

2.3.2 Cimentación por gravedad

Como se muestra en la figura 2.7, la cimentación por gravedad consiste en una amplia estructura que tiene que resistir todo el momento lateral por su propio peso. La base de la estructura de la cimentación por gravedad tiene un rango de diámetro sobre los 15-30 metros y comúnmente son construidas con hormigón armado, incluso se llegan a construir de acero en caso de que se necesite una base más pesada. Este tipo de cimentación se esta extendiendo en los aerogeneradores onshore. En el caso de los aerogeneradores off-shore, se utiliza únicamente en profundidades superficiales siempre y cuando el terreno permita las cargas de la estructura. Para grandes profundidades este tipo de cimentación es realmente caro debido a la gran cantidad de material requerido por el momento provocado por por las cargas sobre el aerogernerador.

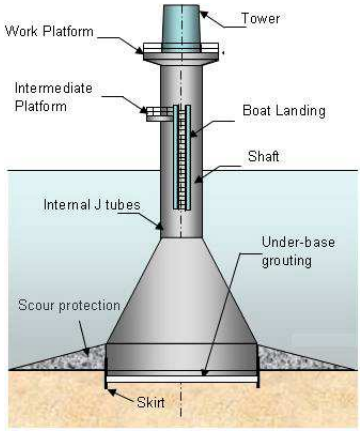


Figura 2.7: Cimentación por gravedad. [15]

2.3.3 Tripodes

Como las aerogeneradores se están llevando a profundidades mayores, las cimentaciones por trípodes esta teniendo mayor atractivo. La estructura de la cimentación por Trípodes son fabricados de acero. Normalmente tres patas soportan la estructura (ver figura 2.8) ,en este caso son llamados trípodes, pero se están llevando casos a utilizar cuatro pilotes incluso cinco. Son utilizados para profundidades alrededor de 20 - 50 metros de profundidad.

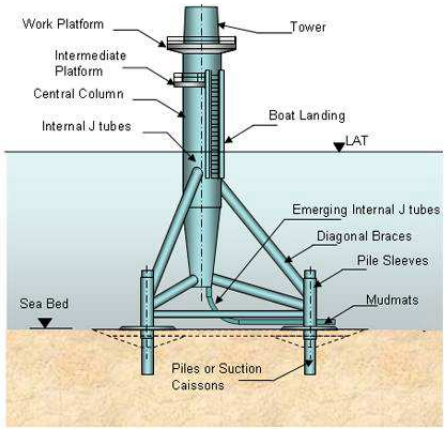


Figura 2.8: Cimentación trípode [15].

2.3.4 Cimentación de cajón

Las cimentaciones de succión por cajón son un nuevo tipo de cimentación, que esta tendiendo un extendido estudio en la universidad de Oxford, como por ejemplo el trabajo [27]. Las cimentaciones de cajón son utilizadas en terrenos donde se puede aplicar las bombas de aspiración mejor que los martillos. Estas cimentaciones ayudan al medio ambiente ya que requiere menos tiempo para su instalación. Sin embargo, estas no tienen todavía implantación en los aerogeneradores off-shore.

2.3.5 Cimentación Jacket por celosía

La cimentación por celosía son pequeñas estructuras jacket similares a las plataformas usadas en los aerogeneradores (ver figura 2.9). La estructura jacket consiste en tres o cuatro patas, las cuales estas conectadas mediante nudos. Estos pilares se instalan en el lecho marino a los pilotes. Este tipo de cimentación se suele utilizar para profundidades alrededor de 20-50 metros.

Figura 2.9: Ejemplo de cimentación Jacket [1]

2.3.6 Cimentaciones flotantes

Las cimentaciones flotantes fueron las primeras en utilizarse en los aerogeneradores off-shore por las compañías petroleras por su instalación en grandes profundidades. Por ejemplo la plataforma petrolífera Perdido esta anclada a 2.400 metros, la más profunda de el mundo. Las cimentaciones flotantes consisten en fijar la estructura mediante tirantes. La compañía petrolífera Norwegian a anunciado un plan para los primeros aerogeneradores off-shore. La estructura sera colocado por medio de tres cadenas al fondo marino (ver figura 2.10)

Figura 2.10: Ejemplo de cimentación flotante [20]

2.4 Cargas en aerogeneradores offshore

Los aerogeneradores off-shore están diseñados para diferentes tipos de cargas. Estas están clasificadas en:

- Cargas permanentes: masa de la estructura, masa permanente del equipamiento, etc.
- Cargas variables: personal, grúa operacional, impacto de barcos, cargas asociadas a operaciones de instalación, etc.
- Cargas medioambientales: cargas de viento, cargas hidro-dinámicas provocadas por las olas y corrientes, cargas por terremotos, efectos maremotrices, nieve y cargas de hielo.

La siguiente sección describe a modo simplificado los esfuerzos provocados por el viento y las olas actuando sobre los aerogeneradores off-shore.

2.4.1 Cargas de viento

Los esfuerzos creados por el viento en los aerogeneradores off-shore son dinámicos en su naturaleza, para los propósitos del diseño de la cimentación es suficiente considerar los esfuerzos equivalentes a la presión estática. El total de la carga de viento aplicada a la turbina puede considerarse compuestos en dos partes diferentes:

1. Cargas en las palas del aerogenerador
2. Cargas en la torre del aerogenerador

2.4.1.1 Cargas actuando sobre las pales de los aerogeneradores

La acción del viento en las palas de la turbina es evaluada considerando la presión del viento en el área de rotación de las palas. La ecuación que define la fuerza aerodinámica del rotor es [27]:

$$F_T = \frac{1}{2}\rho_a \pi R_T^2 V_1^2 C_T(\lambda_s) \tag{2.1}$$

Donde:

- F_T es la acción del viento en el rotor [N]
- V_1 es la velocidad del viento en el rotor [m/s]
- R_T es el radio del rotor [m]
- ρ_a es la densidad del aire, se puede asumir 1.225 a una temperatura de 15ºC a una atm.[kg/m^3]
- $C_T(\lambda_s)$ es el resultado del coeficiente de la velocidad ratio λ_s que es dada por:

$$\lambda_s = \frac{(V_{rotor} R_T)}{V_1} \tag{2.2}$$

- V_{rotor} es la velocidad de giro del rotor [rad/s].

El coeficiente del empuje esta provocado por la rotación de las palas. Figura 2.11 dibuja el valor de C_T en función de λ

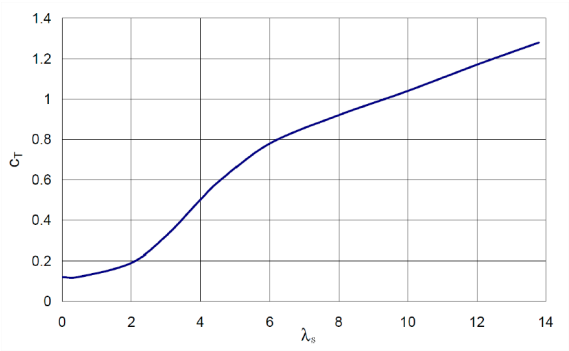


Figura 2.11: El Coeficiente de empuje C_T de la turbina como función de el tipo de velocidad ratio [27].

2.4.2 Cargas actuando en la torre del aerogenerador

Hay dos tipos diferentes cargas sobre la torre:

1. Parte de la torre que no se ve afectada por las palas.
2. Parte de la torre que esta obstruida por el movimiento de las palas, el viento crea una carga dinámica sobre este efecto. La figura 2.12 muestra el efecto de sombra que crean las palas sobre la torre.

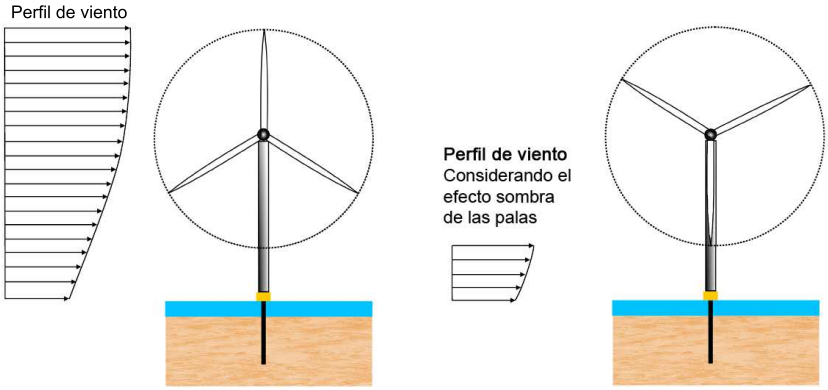


Figura 2.12: Efecto sombra de las palas [15]

El efecto sombra que crean las palas sobre la torre es un esfuerzo dinámico por el movimiento de las palas cuando obstruyen que llegue el viento sobre la torre y al continuar su paso vuelve a dejar pasar el viento (ver figura 2.12). [6] analizaron esta carga cíclica utilizando una función simplificada derivada de la relación entre la sección de área proyectada y el momento de angulo de rotación de la pala. La carga aerodinámica aplicada sobre la torre se puede evaluar usando uno de los muchos modelos estándar. Este expresión se obtiene originalmente del diseño de las plataformas de gas y petroleo. Hay muchas ecuaciones sugeridas algunas de ellas se encuentran en la bibliografía [2] y [26]

Coeficiente de altura	Altura
1.00	0-15.3
1.18	15.3-30.5
1.31	30.5-46
1.40	46-61
1.47	61-76
1.53	76-91.5
1.58	91.5-106.5

Tabla 2.1: Valores del coeficiente de altura para diferentes alturas

Por simplicidad, la formula de [2] puede ser evaluada simplificadamente como:

$$F_{sh} = 0.61 V_{wind}^2 C_h C_f A_p \tag{2.3}$$

Donde

- F_{sh} es la carga del viento sobre la torre [N]
- V_{wind} es la velocidad del viento [m/s]
- C_h coeficiente que depende del peso de la torre [dimensional]
- C_f coeficiente que depende de la forma de la torre [dimensional]
- A_p es el área proyectada sobre el plano normal en la dirección del viento [m^2]

De la ecuación 2.3. El coeficiente de forma, C_f es 0.5 para estructuras cilíndricas. El coeficiente de peso, C_h, es a partir del efecto del perfil de velocidad del viento en el plano vertical y es en función de la altura (ver tabla 2.1). El efecto sombra induce una frecuencia forzada (llamada paso de la frecuencia de la pala) El sistema para estimarlo se calcula empíricamente con la ecuación:

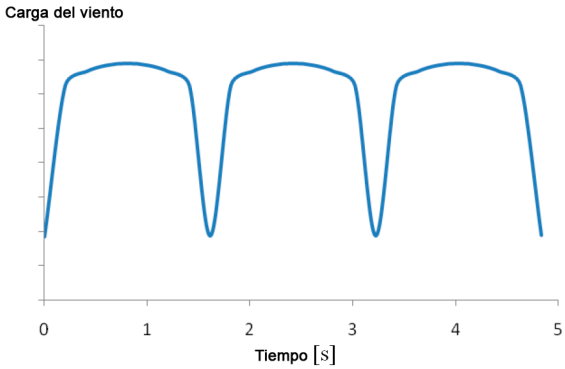


Figura 2.13: Patrón de la típica carga de viento en una turbina utilizando la formula [2], de [6]

$$f_s = \frac{f_{rpm}}{60} N_b \tag{2.4}$$

Donde:

- f_s es la frecuencia de la paso de la pala [Hz]
- f_rpm es la frecuencia del rotor [rpm]
- N_b es el numero de la pala [dimensional]

2.4.3 Cargas de las olas

Las olas son cargas que actúan sobre la estructura sumergida, suele evaluarse utilizando la adaptación de la formula de Morison's, la cual esta basada en [26]. Esta ecuación expresa la carga horizontal en un elemento vertical con ancho dz y profundidad z:

$$dF_h = dF_D + dF_M = C_D \rho_w \frac{D_t}{2} |U_w| U_w(dz) + C_{m\rho_w} \frac{\pi}{4} D_t^2 \dot{U}_w(dz) \tag{2.5}$$

Donde:

- F_h es el total de la carga horizontal actuando en el elemento vertical [N]
- F_D es la resistencia de la carga [N]
- F_M es la inercia de la carga [N]
- C_D es la resistencia del coeficiente (0.7 es el valor para sacciones circulares)[dimensional]
- C_M es el coeficiente de la masa (2 es el valor para una sección tubular)[dimensional]
- ρ_w es la densidad del agua del mar (1030 kg/m^3 aproximadamente)
- D_t diámetro de la torre [m]
- U_w velocidad inducida por la ola en el agua [m/s]
- $\dot{U}_w$ aceleración inducida por la ola en el agua [m/s^3]
- z coordenada vertical [m]

[28], [12] and [27] Definen como carga de fuerza, F_D y la fuerza de la inercia, F_D, que espera ocurrir en la estructura sumergida por los efectos debajo del agua provocados por la carga de la ola como:

$$F_D = \frac{C_D \rho_w D_t H_S^2 \omega_w^2}{16\psi} \frac{\sinh(2\psi d_w) + 2\psi d_w}{\cosh(2\psi d_w) - 1} \tag{2.6}$$

$$F_M = \frac{\pi C_M \rho_w (D_t)^2 H_S \omega_w^2}{8\psi} \tag{2.7}$$

$$\psi = \frac{2\pi}{L_w} \tag{2.8}$$

Donde:

- H_s es la altura significante de la ola [m]
- d_w es la profundidad del agua [m]
- $\omega_w$es la frecuencia angular de la ola [rad/s]
- ψ es el numero de olas [1/m]
- L_w es la longitud de la ola [m]

Como las olas son periódicas, es necesario considerar que las fuerzas dinámicas varían según el periodo de las olas. La siguiente ecuación relaciona el paso horizontal y el momento de carga total dado para un especifico momento, [27].

$$H_{max} = F_D \cos^2(-\omega_w \delta t) + F_M \sin(-\omega_w \delta t) \tag{2.9}$$

Donde:

- H_{max} es la carga máxima horizontal [N]
- δt es el tiempo de paso [s]

En orden a la aplicación de la formula es necesario saber la altura significante de las ola y el periodo esperado de las olas en la región donde se encuentra la estructura construida. Un método simplificado de estimar la altura de la ola y el periodo es el propuesto por [21] .

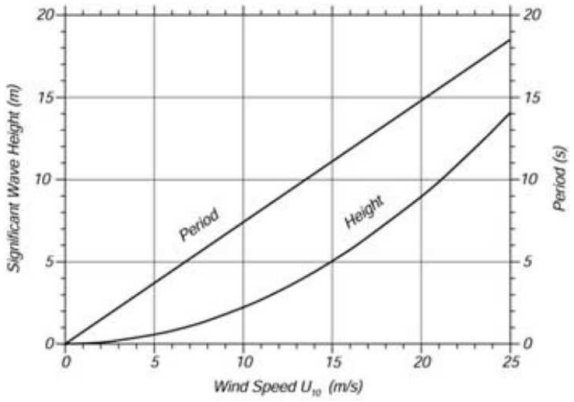


Figura 2.14: Altura significante y periodo de las olas en el espectro del mar por [21].

2.5 Aerogeneradores estudiados

La revisión bibliográfica realizada sobre los aerogeneradores off-shore utilizados en la actualidad ha sido sobre multitud de tipos. De los que más información se posee en artículos de investigación, tesis y las propias casas comerciales son:

- Vestas 2MW-V66
- Vestas 3MW-V90
- Vestas 2MW-V80
- SIEMENS SWT 3.6 - 107
- Irene Vorrink 600K
- Walney 1.t 3.6 MW

En los siguientes capítulos, apéndices y bibliografía se encuentra toda la información sobre los aerogeneradores off-shore estudiados.

Capítulo 3

Relaciones de similitud para el diseño de modelos a escala de aerogeneradores

3.1 Introducción

A lo largo de este capítulo, se presentarán las relaciones de similitud para el diseño de modelos de aerogenerador a escala. Dichas relaciones son definidas según los parámetros que queramos definir en nuestro modelo a escala. Para plantear las distintas relaciones en este capítulo se ha llevado a cabo: una revisión bibliográfica de distintos artículos de investigación que utilizan similares relaciones de similitud, se han propuesto las relaciones y también se definen los resultados analíticos que cumplen con el teorema, se definen los parámetros de los aerogeneradores reales que se van a utilizar en los análisis numéricos y también se ha definido el modelo matemático a utilizar.

3.1.1 Leyes de similitud de otras investigaciones

Las propuestas de leyes de similitud de otros casos de investigación relacionados con los aerogeneradores off-shore son los del articulo:

"Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil, los autores son Domenico Lombardi, Subhamoy Bhattacharya, David Muir Wood"[9].

Las relaciones de similitud utilizadas en este articulo son:

1. Esfuerzo del terreno cercano al mono-pilote, bajo cargas cíclicas.

$$\frac{P}{GD^2} \tag{3.1}$$

   Donde:

   - P representa el equivalente total de la carga horizontal provocada por el viento a una distancia **a** desde el nivel de la cimentación hasta la turbina.
   - G es el modulo de Young del terreno.
   - D es el diámetro del mono-pilote.

2. Ratio de carga

$$\frac{k_h}{f_f D} \tag{3.2}$$

   Donde:

   - k_h coeficiente de permeabilidad horizontal del terreno

- f_f frecuencia forzada

3. Sistema dinámico (relación entre la frecuencia forzada y la frecuencia natural del sistema)

$$\frac{f_f}{f_n} \tag{3.3}$$

El estudio de este articulo se centra en el comportamiento del terreno bajo cargas cíclicas provocadas por esfuerzos naturales. Las relaciones escogidas para esta investigación son orientadas a cargas dinámicas sobre la estructura que afecten al terreno. Para el estudio de investigación de Domenico Lombardi [9] en el estudio experimental de un modelo a escala las variables escogidas son: El terreno (modulo de Young y coeficiente de permeabilidad), las cargas aplicadas y las geometrías de los modelos a escala y reales.

La propuesta de este Trabajo Final de Máster es diferente a cualquier investigación que se haya encontrado en la revisión bibliográfica.

El primer objetivo de este apartado es encontrar las leyes de similitud que definan el modelo de aerogenerador a escala para el estudio de fenómenos dinámicos de interacción suelo - estructura sobre mono-pilotes. En los siguientes apartados el objetivo es recopilar toda la información disponible en relación a los parámetros necesarios para el análisis de la interacción suelo - estructura en aerogeneradores off-shore reales descritos en trabajos técnicos y científicos disponibles. Para acabar proponiendo un modelo a escala en las siguientes secciones de bajo coste utilizable para el estudio de fenómenos de interacción suelo estructura en aerogeneradores off-shore sujeto a las posibles relaciones de similitud para la definición del modelo. Realizando una exploración preliminar de las posibilidades y posibles problemas técnicos a solventar a la hora de materializar un modelo a escala concreto.

Cumpliendo todos los objetivos podría construirse un modelo a escala de bajo coste que permitiría estudiar los fenómenos de interacción suelo-estructura.

3.2 Propuesta para los efectos de interacción suelo - estructura en régimen elástico - lineal

3.2.1 Introducción de relaciones de similitud

A través del el teorema de Π de Vaschy-Buckingham, se ha hecho una propuesta de leyes de similitud para la definición de un modelo de aerogenerador a escala para estudiar la interacción suelo-estructura.

El teorema de Π de Vaschy-Buckingham del análisis dimensional. El teorema establece que dada una relación física expresable mediante una ecuación en la que están involucradas **n** magnitudes físicas o variables, y si dichas variables se expresan en términos de **k** cantidades físicas dimensionalmente independientes, entonces la ecuación original puede escribirse equivalentemente como una ecuación con una serie de **n** - **k** números adimensionales construidos con las variables originales.

Este teorema proporciona un método de construcción de parámetros adimensionales, incluso cuando la forma de la ecuación es desconocida. De todas formas la elección de parámetros adimensionales no es única y el teorema no elige cuáles tienen significado físico.

Por lo tanto los parámetros del aerogenerador que vayamos a utilizar en las relaciones de

similitud se tienen que adecuar a la interacción suelo - estructura en aerogeneradores off-shore sobre mono-pilotes frente a fenómenos dinámicos.

En el capitulo dos y Apéndice I se realiza la busquedad bibliográfica de aerogeneradores reales instalados para definir sus características y poder utilizarlas en las relaciones de similitud.

3.2.2 Relaciones de similitud

Las dimensiones que se utilizan para definir las relaciones de similitud pueden ser cualquiera como se ve en el teorema de Π de Vaschy-Buckingham , para este Trabajo Final de Máster relacionado con el estudio de los efectos de interacción suelo - estructura en régimen elástico - lineal se usan las dimensiones:

- Geométrica del aerogenerador
- Masa
- Tiempo

Primero se definen las proporciones geométricas de la review de los aerogeneradores (véase Anexo I) (H/d, sección, L/d),etc.) Para el estudio de las relaciones de similitud se definen los parametros H, m,ρ y ω que se utilizan en las relaciones del Teorema.

- H altura de la estructura [m]
- m masa de la góndola y palas [kg]
- ρ densidad de la estructura [kg/m^3]
- ω frecuencia de la estructura [rad/s]
- La rigidez de la superestructura puede derivarse a partir de las anteriores:

$$k = \omega^2 m \tag{3.4}$$

Como se comprueba en el Apéndice I para este trabajo se asume que el pilote y la superestructura comparten modulo de elasticidad y densidad. Los parámetros que faltan para completar la definición del terreno del sistema, son:

1. Parámetros dimensionales del terreno
   - C_s Velocidad de propagación de la onda en el terreno
   - ρ_sDensidad del terreno real
2. Parámetros adimensionales
   - ξ Factor de amortiguamiento estructura
   - ξ_s Factor de amortiguamiento del suelo
   - υ_s Coeficiente de Poisson

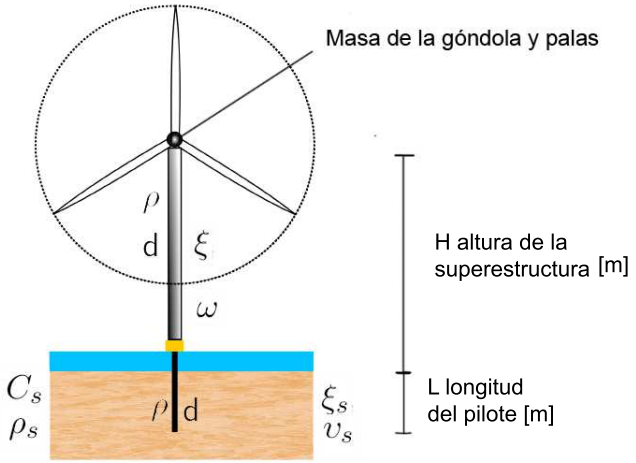


Figura 3.1: Propuesta del modelo simplificado para obtener las leyes de similitud (de [9]).

Para el modelo a escala se utilizarán las mismas abreviaturas pero indicándoles al final de cada una con ≪'≫. Con los parámetros y dimensiones definidos para el teorema el modelo simplificado para la obtención de las leyes de similitud se define en la figura 3.1

Con las dimensiones y parámetros dimensionales se aplica el teorema de Π de Vaschy-Buckingham del análisis dimensional para el modelo simplificado y se obtiene como resultado:

- Número total de parámetros dimensionales: 6
- Número de dimensiones fundamentales: 3 (longitud, tiempo y masa)
- Número de relaciones adimensionales necesarias: 6 - 3 = 3

Se necesitan tres relaciones adimensionales para realizar la investigación y poder asemejar un modelo a escala de aerogenerador a la realidad. Estas relaciones adimensionales no podrán variar demasiado de la unidad. Si las relaciones adimensionales varían en exceso de la unidad no se podrá llevar a cabo la investigación debido a que el modelo a escala es diferente al de la realidad.

3.2.3 Leyes dimensionales

Dadas las tres dimensiones fundamentales, pueden proponerse tres leyes dimensionales:

- $\lambda = \frac{H'}{H}$ ratio geométrico utilizado para fijar el tamaño del modelo (1.5>H'>0.5 m)
- $\beta = \frac{\omega'_n}{\omega_n}$ ratio de frecuencias naturales. Útil para definir la frecuencia natural del modelo (10> ω'_w >4 Hz)
- $\alpha = \frac{m'}{m}$ ratio de masas.

Donde:

- H' es la altura del modelo a escala [m]

- H es la altura del aerogenerador real [m]
- ω'_n es la frecuencia natural del modelo a escala [Hz]
- ω_n es la frecuencia natural del aerogenerador real [Hz]
- m' es la masa de la góndola y palas del modelo a escala [kg]
- m es la masa de la góndola y palas del aerogenerador real [kg]

3.2.4 Relaciones adimensionales

Las relaciones adimensionales sugeridas para este proyecto han sido seleccionadas para mantener el nivel de interacción suelo - estructura entre el prototipo real y el modelo a escala. Las tres leyes adimensionales se enumeran a continuación:

1. σ Es el la relación que permite anticipar el nivel de interacción suelo - estructura.

$$\sigma = \frac{C_s T}{H} \tag{3.5}$$

   Donde:

   - C_s es la velocidad de propagación de la onda en el suelo [m/s].
   - T es el periodo de la estructura. Que se calcula a través de :

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} \tag{3.6}$$

   - H altura del aerogenerador real [m].

2. μ ratio de densidad estructura - suelo.

$$\mu = \frac{4m}{\rho_s \pi d^2 H} \tag{3.7}$$

   Donde:

   - m es la masa de las góndolas y las palas [kg].
   - ρ_s es la densidad del suelo [kg/m^3].
   - d es el diámetro del pilote [m^2].
   - H es la altura del aerogenerador real [m].

3. μ_e es el ratio de la masa del fuste - góndola y palas.

$$\mu_e = \frac{m_{g+p}}{m_{fuste}} \tag{3.8}$$

   Donde:

   - m_{g+p} masa de la góndola y las palas [kg].
   - m_f masa total del fuste de la estructura [kg].

3.2.5 Relaciones estructura - suelo aerogenerador-modelo

En función de las leyes dimensionales a adimensionales las relaciones pueden escribirse como:

- S_σ Es la relación entre la velocidad de onda del suelo y las relaciones geométricas del aerogenerador real y del modelo a escala de altura.

$$S_\sigma = \frac{\frac{C'_s T'}{H'}}{\frac{C_s T}{H}} = \frac{C'_s}{C_s}\frac{T'}{T}\frac{H}{H'} = \frac{C'_s}{C_s}\frac{1}{\beta}\frac{1}{\lambda} \tag{3.9}$$

  Donde obtenemos la ecuación final:

$$\frac{C'_s}{C_s} = S_\sigma \beta \lambda \tag{3.10}$$

- La siguiente ecuación 3.11 Relaciona la masa superior del aerogenerador respecto la masa que ocupa el pilote en el terreno junto con la altura de los modelos a escala y real.

$$S_\mu = \frac{\frac{4m'}{\rho'_s \pi d'^2 L'}}{\frac{4m}{\rho_s \pi d^2 L}} = \frac{m'}{m}\frac{\rho_s}{\rho'_s}\frac{d^2}{d'^2}\frac{L}{L'} = \frac{\rho_s}{\rho'_s}\alpha\frac{1}{\lambda^3} \tag{3.11}$$

  De donde se obtiene:

$$\frac{\rho_s}{\rho'_s} = S_\mu \frac{\lambda^3}{\alpha} \tag{3.12}$$

- La siguiente ecuación 3.13 define la relación entre la masa de la góndola y las palas respecto la masa densidad del fuste del aerogenerador real respecto el modelo a a escala.

$$S_{\mu_e} = \frac{m'}{m}\frac{m_f}{m'_f} = \alpha\frac{A_f \rho_f}{A'_f \rho'_f} \tag{3.13}$$

  Donde:

  - A_f es el área del fuste real [m^2]
  - A'_f es el área del fuste del modelo a escala [m^2]
  - ρ_f es la densidad del fuste del modelo real [kg/m^3]
  - ρ'_f es la densidad del fuste del modelo a escala[kg/m^3]

3.3 Revisión bibliográfica

La información recogida de los aerogeneradores reales ha sido sacada de tesis doctorales, artículos de investigación y casas comerciales del campo de las estructuras dinámicas aplicadas a los aerogeneradores off-shore en este Trabajo final de máster esta información se recoge en las tablas: 5.1, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6; en las referencias: [3], [16], [4], [5], [11] y [20]; y además en el Apéndice I quedan resumidos los valores utilizados para este proyecto.

3.3.1 Estructura

Las tablas 3.1 y 3.2 muestran el conjunto de parámetros utilizados para el calculo de las relaciones geométricas, dimensionales y adimensionales:

	Vestas 2MW-V66	Vestas 3MW-V90	Vestas 2MW-V80
Altura de la superestructura	71 - 89 m	90 - 115 m	80 - 120 m
Diámetro del rotor	66m	90 m	80 m
Altura del rotor	60 - 78 m	80 - 105 m	60 - 100 m
Masa de la torre [T]	100 - 159	145 - 255	137 - 198
Material	Acero	Acero	Acero
Frecuencia [Hz]	0.41	0.38	0.35
Diámetro inferior [m]	4.00	3.98	4.00
Diámetro superior [m]	2.3	2.3	2.3
Espesor de la torre [m]	0.0035	0.003	0.0035
Profundidad dentro del agua [m]	11	10	20

Tabla 3.1: Datos de las estructuras de los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20].

	SIEMENS SWT 3.6 - 107	Irene Vorrink 600k	Walney 1 S 3.6 MW
Altura de la superestructura [m]	99 - 115	81 - 121	105 - 121
Diámetro del rotor [m]	107	80	107
Altura del rotor [m]	80 - 96	60 - 100	80 - 96
Masa de la torre [T]	253 - 269	137 - 198	253 - 269
Material	Acero	Acero	Acero
Frecuencia [Hz]	0.38	0.35	0.38
Diámetro inferior [m]	4.20	4.00	4.20
Diámetro superior [m]	2.3	2.3	2.3
Espesor de la torre [m]	0.003	0.0035	0.003
Profundidad dentro del agua [m]	19	21	25

Tabla 3.2: Datos de las estructuras de los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20]

3.3.2 Cimentación

En las siguientes tablas 3.3 y 3.4 se muestra la información utilizada respecto la cimentación en mono-pilotes para calcular las relaciones de similitud.

	Vestas 2MW-V66	Vestas 3MW-V90	Vestas 2MW-V80
Material	Acero	Acero	Acero
Longitud del pilote [m]	15	28	31
Diametro pilote [m]	3.50	4.30	4.20
Espesor del pilote[m]	0.0045	0.0045	0.05

Tabla 3.3: Datos del los mono-pilotes de los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20]

	SIEMENS SWT 3.6 - 107	Irene Vorrink 600k	Walney 1 S 3.6 MW
Material	Acero	Acero	Acero
Longitud del pilote [m]	11	33	33
Diámetro pilote [m]	4.70	4.00	4.70
Espesor del pilote[m]	0.055	0.035	0.055

Tabla 3.4: Datos del los mono-pilotes de los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20]

3.3.3 Suelo

En las tablas siguientes 3.5 y 3.6 se muestran los parámetros del suelo de la realidad en granjas de aerogeneradores off-shore para su utilización en el cálculo de las relaciones adimensionales.

	Vestas 2MW-V66	Vestas 3MW-V90	Vestas 2MW-V80
E [N/m^2]	3.39x10^8 - 1.67x10^9	7.8x10^7 - 3.12x10^8	7.36x10^7 - 2.95x10^8
C_s [m/s]	360 - 800	180 - 360	180 -360
ρ [kg/m^3]	2200	1800	1800

Tabla 3.5: E: Modulo de elasticidad, C_s: Velocidad de propagación de la onda, ρ: Densidad de terreno. Datos del terreno los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20]

	SIEMENS SWT 3.6 - 107	Irene Vorrink 600k	Walney 1 S 3.6 MW
E [N/m^2]	2.27x10^7 - 7.36x10^7	7.36x10^7 - 2.95x10^8	7.54x10^7 - 3.02x10^8
ρ [m/s]	100 - 180	180 - 360	180 -360
Densidad [kg/m^3]	1800	1800	1900

Tabla 3.6: E: Modulo de elasticidad, C_s: Velocidad de propagación de la onda, ρ: Densidad de terreno. Datos del terreno los aerogeneradores off-shore. [3][16][4][5][11][20]

En el Apéndice I se encuentra el resultado de la relaciones geométricas, ratios, leyes adimensionales y relaciones.

3.4 Modelo matemático

3.4.1 Introducción

Esta sección introduce el modelo matemático simplificado del estudio de interacción suelo-estructura para un modelo de aerogenerador a escala. El objetivo es evaluar la frecuencia natural del modelo completo. En una primera aproximación es importante que la frecuencia natural del aerogenerador no se aproxime a valores cercanos de las frecuencias forzadas debidas al medio-ambiente o cargas del rotor/palas. El aerogenerador estará formado por dos componentes, ver figura 3.2.

1. Componente Góndola - torre

2. Componente Cimentación - suelo

Según la bibliografia; [19] y [24] normalmente el diseño de un aerogenerador off-shore se realiza considerando los componentes góndola-torre sujetos a una base rígida. En el análisis dinámico del aerogenerador de esta investigación se estudia la frecuencia natural experimentalmente en base rígida y flexible y analíticamente la frecuencia natural en base rígida y flexible. Con los resultados de las frecuencias naturales sacaremos las conclusiones si es posible la realización de un modelo a escala para el estudio de patrones en los aerogeneradores reales.

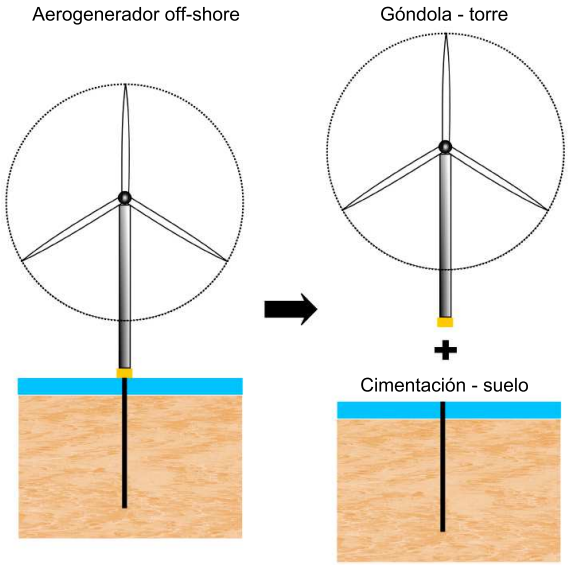


Figura 3.2: Aerogenerador off-shore considerando las dos componentes de calculo: góndola - torre y cimentación - suelo

3.4.2 Base Rígida

Cuando se modela un aerogenerador se hace en base rígida, la presencia de la componente cimentación - suelo es completamente ignorada. Como idealización resulta interesante, para la estimación de la frecuencia natural de la estructura torre-góndola.La figura 4.1 representa el modelo en base rígida de un aerogenerador. La góndola esta modelizada considerando la masa total m (masa de palas y góndola). La torre se representa por su masa m_t y modulo de elasticidad $(E_t I_t)$. La primera frecuencia natural de las estructura se denota como ω_n. Que valla acompañada de $\ll'\gg$ significa que es la frecuencia natural del modelo a escala, en caso contrario será del modelo real. El cálculo numérico de la frecuencia viene en el capitulo siguiente.La frecuencia natural de la estructura en base rígida se denotara como ω_f.

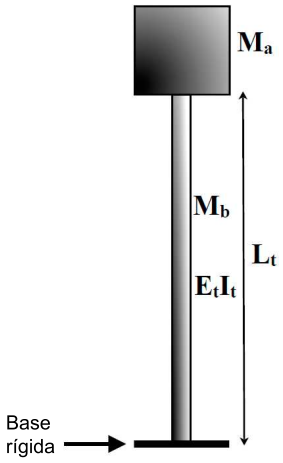


Figura 3.3: Modelo simplificado de un aerogenerador en base rígida

3.4.3 Base flexible

El análisis de un aerogenerador en base rígida esta basado en la rigidez de la estructura y por lo tanto en su frecuencia natural. Para diseños más precisos se ha de considerar la base flexible contando como parte de la estructura completa la cimentación - suelo como componente. Por este propósito la figura 4.2 representa el componente cimentación suelo el cual incluye tres impedancias. Estas impedancias definen la rigidez de la cimentación.

Los valores de las impedancias K_{HH}, K_{HR} y K_{RR} son calculados a través de un modelo acoplado de elementos de contorno y elementos finitos para el estudio en la respuesta dinámica de cimentaciones pilotadas [17][18]. Las expresiones de las impedancias también pueden ser encontradas en el [8]. Las impedancias estáticas se pueden utilizar cuando las frecuencias forzadas son próximas a cero. Para frecuencias forzadas superiores a 0 habría que utilizar impedancias dinámicas. Para el caso de los aerogeneradores off-shore, se utiliza las impedancias estáticas debido a las bajas frecuencias forzadas.

1. Impedancia lateral de la cimentación K_{HH}
2. Impedancia de cabeceo de la cimentación K_{RR}
3. Impedancia cruzada de la cimentación K_{RH}

El calculo de la frecuencia natural flexible se realiza por métodos analíticos y experimentales como se mostrará en los siguiente capítulos.

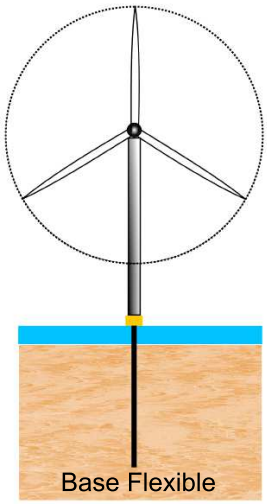


Figura 3.4: Modelo simplificado de un aerogenerador en base flexible [9].

Capítulo 4

Estudio de alternativas para el modelado físico de aerogeneradores a escala

4.1 Introducción

Como se ha comentado con anterioridad, en este Trabajo de Fin de máster, proponen posibles relaciones de similitud entre el modelo a escala del aerogenerador y el real con el fin de estimar la posibilidad de recrear los esfuerzos dinámicos de un aerogenerador off-shore con la interacción suelo - estructura sobre mono-pilotes en un modelo a escala. La elección geométrica y física del modelo a escala dependerá de los materiales para fabricar el modelo a escala, del terreno y de las proporciones geométricas del mismo. En este capitulo se realizará un estudio de las alternativas para realizar el modelo físico del aerogenerador off-shore a escala.

4.2 Alternativas para el material a utilizar

4.2.1 Selección de Materiales

Los materiales que se pueden utilizar como superestructura tiene que admitir que las relaciones de similitud entre el aerogenerador real y a escala valgan la unidad. A partir de estas relaciones escogeremos el material que mas convenga para la investigación.

Dentro de las posibilidades de los distintos materiales a utilizar:

1. Aluminio

   Es un metal plateado con una densidad de 2.70 g/cm3 a 20ºC. Es un material blando (escala de Mohs: 2-3-4) y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de 160-200 N/mm^2 (160-200 MPa). Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. También de esta forma se utiliza como soldadura.

   Para el caso del modelo a escala es un material apto para su uso porque su densidad es inferior a la del acero, lo que provoca que la relación adimensional S_{μ_e} entre el peso que soporta la estructura y la torre pueda ser más parecida a uno.

   Respecto su Modulo de elasticidad del aluminio (4.6x10^{10} Pa)es inferior al del acero (2.1x11^{11} Pa) por lo que es peor para las relaciones de S_{μ_e} y S_σ. Además se ha comprobado por el Trabajo Fin de Grado de los alumnos de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria de Ingeniería Industrial como el modulo de elasticidad varia respecto los datos medios establecidos entre un 20 y 40 %

2. Policroruro de vinilo (PVC) Es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo. Es el derivado del plástico más versátil. Se presenta como un material blanco que comienza a reblandecer alrededor de los 80 °C y se descompone sobre 140 °C. El PVC se caracteriza por ser dúctil y tenaz; presenta estabilidad dimensional y resistencia ambiental. Además, es reciclable por varios métodos. Baja densidad (1,4 g/cm^3), buena resistencia mecánica y al impacto, lo que lo hace común e ideal para la edificación y construcción.

   En la industria existen dos tipos:

   - Rígido: para envases, ventanas, tuberías, las cuales han reemplazado en gran medida al hierro (que se oxida más fácilmente), muñecas antiguas.
   - Flexible: cables, juguetes y muñecas actuales, calzados, pavimentos, recubrimientos, techos tensados...

   Para este Trabajo Final de Máster se llevaría a cabo la utilización del PVC rígido debido a sus características físicas y debido al parecido tubular con la torre del aerogenerador con las tuberías de PVC.

   La utilización del PVC para el modelo a escala queda como un material apto para su uso porque su densidad es más inferior aún que la del aluminio, provocando que la relación adimensional S_{μ_e} sea aún más parecida a uno disminuyendo la masa. El modulo de elasticidad utilizado en los cálculos ha sido 2,6x10^{9}Pa inferior al del acero provocando que las relaciones S_{μ_e} y S_σ sean mas alejadas a la unidad.

3. Acero

   Mezcla de hierro con una cantidad de carbono variable entre el 0,03 % y el 2,14 % en masa de su composición, dependiendo del grado. Existen muchos tipos de acero en función del elemento o los elementos aleantes que estén presentes. La definición en porcentaje de carbono corresponde a los aceros al carbono, en los cuales este no metal es el único aleante, o hay otros pero en menores concentraciones. Otras composiciones específicas reciben denominaciones particulares en función de múltiples variables como por ejemplo los elementos que predominan en su composición (aceros al silicio), de su susceptibilidad a ciertos tratamientos (aceros de cementación), de alguna característica potenciada (aceros inoxidables) e incluso en función de su uso (aceros estructurales). Esta gran cantidad de posibilidades de acero crea una incertidumbre en los parámetros físicos del acero que vayamos a utilizar.

   Aunque es difícil establecer las propiedades físicas y mecánicas del acero debido a que estas varían con los ajustes en su composición y los diversos tratamientos térmicos, químicos o mecánicos, con los que pueden conseguirse aceros con combinaciones de características adecuadas para infinidad de aplicaciones, se pueden citar algunas propiedades genéricas:

   - Su densidad media es de 7850 kg/m^3.
   - Es un material muy tenaz.
   - Relativamente dúctil.
   - Modulo de elasticidad del acero 2,1x10^{11}Pa

   La utilización del acero para el modelo a escala es una de las mejores opciones debido a que es el mismo material que se utiliza en los aerogeneradores reales, ya que su modulo de elasticidad es el mas elevado reduciendo de esta manera las relaciones S_{μ_e} y S_σ a la unidad y debido a que podemos aumentar la masa superior del modelo a escala debido a su mayor densidad en comparación con los materiales en la relación S_{μ_e}.

4.2.2 Proporciones geométricas del modelo

Las variables de las proporciones de los materiales son:

- Longitud total de la estructura [m]
- Masa de la góndola y de las palas [kg]
- Tipo de Sección de la estructura [m^2].
  1. Circular maciza
  2. Circular hueca
  3. Rectangular/Cuadrada maciza
  4. Rectangular/Cuadrada hueca

  Dependiendo de si la estructura se realiza hueca o maciza hay que añadir otra variable que es el espesor. Esta variable afecta al volumen de la estructura que a su vez esta afecta la masa del fuste que afecta a todas las demás relaciones. Existen las variables del radio en caso circular o de la longitud de los lados de las demás secciones geométricas. Para las secciones que son simétricas como la circular o cuadrada existe además el problema que tienen mismas inercias para ambos ejes locales de la estructura. Esta característica provoca que bajo la vibración libre de la estructura en un eje local X por ejemplo la vibración acabe terminando en los ejes locales X e Y.

4.2.3 Selección del terreno

El terreno con el que se encuentran los aerogeneradores off-shore varía desde terrenos sumergidos: de roca, arena con una densidad media, arcillas con arenas, gravas, etc. Aún varían más sus cualidades físicas. La solución adoptada para el modelo fue utilizar un material linear que tenga un comportamiento previsible. La utilización de un terreno parecido al real tiene aspectos negativos como; no es lineal, cada día de experimentación el terreno variará por efecto ambiental, dependencia a la colocación, presiones de confinamineto, etc. Esto provoca que el estudio varié por la no linealidad y que dependa fuertemente de las presiones de confinamiento. Además, en el caso común de la existencia de aguas intersticiales, las presiones intersticiales son fundamentales en el comportamiento de los suelos. Por ello, la utilización de suelos reales requiere, para la realización de estudios rigurosos, el uso de instalaciones centrífugas [7].

Dado la utilización una instalación centrifuga [7] es muy compleja y en el SIANI no disponemos de estas herramientas, nos planteamos el uso de un material lineal que no presente dichos inconvenientes. La posibilidad que adoptamos fue la Espuma D30. Esta espuma ha sido el objeto de de anteriores estudios en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria del cual se obtienen los valores de los parámetros físicos descritos en la tabla 4.1.

La velocidad de onda se calcula analíticamente a través de la ecuación 4.1 :

$$C_s = \frac{E'_s}{2(1+\nu')\rho')^{\frac{1}{2}}} \tag{4.1}$$

La utilización de la Espuma D30 tiene aspectos muy positivos y otro negativo.

Las características positivas son:

- Linealidad de deformación.
- No varia su estructura en el tiempo.
- Misma densidad a diferente cota.
- No tienes presiones intersticiales.

Las características negativas únicamente son:

- La densidad de la espuma es de 30 [kg/m^3] y la densidad de los terrenos reales varia ente 1800-2400 [kg/m^3] esta diferencia actúa en las relaciones adimensionales teniendo que utilizar menores valores de masa en el modelo a escala actuando sobre la relación S_σ provocando que se desvié de uno.

Parámetros Espuma	Valor
ξ' (coeficiente de amortiguamiento)	0.05
ν' Coeficiente de Poisson	0.1
E'_s Modulo de elasticidad [Pa]	200000
ρ' Densidad del suelo [kg/m^3]	30
C_s Velocidad de onda del suelo [m/s]	50

Tabla 4.1: Resumen de los parametros fisicos de la espuma D30

Para la realización de este investigación se necesito cortar la espuma D30 ya que las dimensiones de trabajo eran mas reducidas, la mejor forma de corte que se encontró entre las demás alternativas fue una cortadora de hilo de Nichrome. Las dimensiones de entrada eran 1x1x1.2 y gracias a la cortadora se recudió a 1x1x0.6. La cortadora se realizo con herramientas caseras y gratuitas.

4.3 Diseño del sistema estructura-suelo

El modelo matemático que se realiza en esta investigación consta de dos partes, el estudio experimental de la frecuencia natural del modelo a escala en base rígida (ver figura 4.1) y flexible (ver figura 4.2) y el estudio de la frecuencia natural del modelo matemático en base rígida y flexible. Por comparación de los estudios en base rígida y base flexible de la experimentación y el análisis matemático concluiremos si el modelo a escala del aerogenerador cumple con el objetivo de modelizar el aerogenerador real.

4.3.1 Modelo matemático

Sea el modelo siguiente de aerogenerador en base flexible, donde se considera que la estructura del aerogenerador es de sección constante, con Inercia **I'** y módulo de Young **E'** , altura **H**, densidad linear de la torre $\overline{m}$ y masa de la góndola-palas **m'**.(véase 4.3).

En el modelo anterior 4.3, u es el desplazamiento relativo de la góndola respecto de la base, de manera que el desplazamiento absoluto de la góndola es $U_t = U + U_c + (\theta_c H)$.

Por otro lado, K_{HH}, K_{RR} y K_{RH} son las impedancias horizontal, de cabeceo y cruzada de la cimentación del aerogenerador, en general dependientes de la frecuencia.

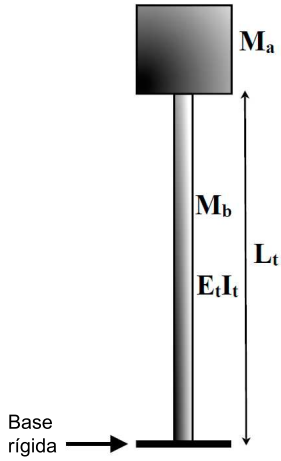


Figura 4.1: Modelo simplificado de un aerogenerador en base rígida

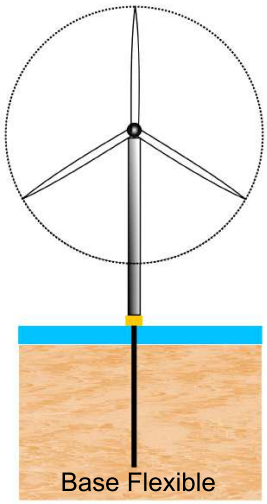


Figura 4.2: Modelo simplificado de un aerogenerador en base flexible.

A es el área de la sección de la torre considerada constante con la altura

Escribiendo las ecuaciones de equilibrio horizontal de la góndola (4.2), equilibrio horizontal del aerogenerador completo (4.3), y equilibrio de giro del aerogenerador completo(4.4):

$$M^*(\ddot{U} + \ddot{U}_c + H^*\ddot{\theta}_c) + Ku = f_{ext} \tag{4.2}$$

$$M^*(\ddot{U} + \ddot{U}_c + H^*\ddot{\theta}_c) + K_{HH} \cdot U_c + K_{hr}\theta_c = f_{ext} \tag{4.3}$$

$$M^*(\ddot{U} + \ddot{U}_c + H^*\ddot{\theta}_c)H^* + K_{RH} \cdot U_c + K_{RR}\theta_c = M_{ext} \tag{4.4}$$

$$\left(\begin{bmatrix} K^* & 0 & 0 \\ 0 & K_{HH}(\omega) & K_{HR}(\omega) \\ 0 & K_{RH}(\omega) & K_{RR}(\omega) \end{bmatrix} - M^*\omega^2 \begin{bmatrix} 1 & 1 & H^* \\ 1 & 1 & H^* \\ H^* & H^* & (H^*)^2 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u \\ u_b \\ \theta_b \end{Bmatrix} = \overrightarrow{F_{ext}} \tag{4.5}$$

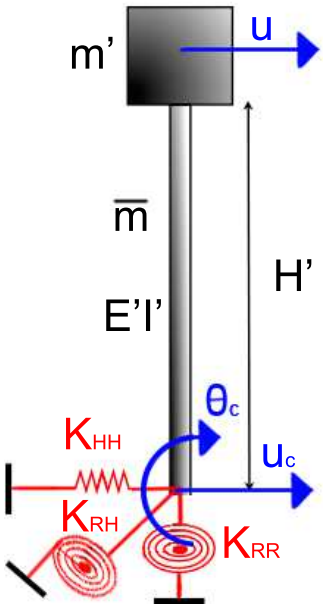


Figura 4.3: Modelo simplificado de un aerogenerador considerando la flexibilidad de la cimentación

Donde ω es la frecuencia de la excitación.

En las ecuaciones anteriores 4.5, correspondientes a la respuesta dinámica de un sistema de un grado de libertad en base flexible, la masa vibrante m* y su altura H* son distintas de la masa de la góndola y su altura. Se trata, en cambio, de una masa y una altura tales que el sistema anterior sea equivalente a la respuesta en torno a la primera frecuencia natural del sistema completo en el que también se considera la masa de la torre.

Esta masa y altura equivalen son la masa modal y la altura modal del sistema a base rígida, que puede demostrase que tienen la siguiente expresión.

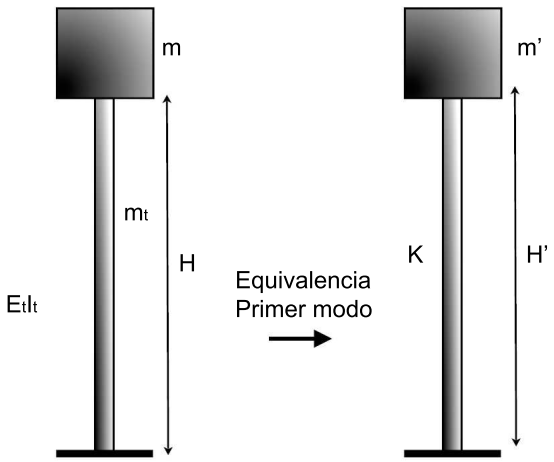


Figura 4.4: Simplificación modelo para la obtención del valor de la inercia

$$M^* = \frac{(\frac{3}{8}H\overline{m} + m)^2}{\frac{33}{140}H\overline{m} + M} \tag{4.6}$$

$$H^* = \frac{(\frac{11}{40}H\overline{m} + m)}{\frac{3}{8}H\overline{m} + M}H \tag{4.7}$$

$$K = M^*\omega_n^2 \tag{4.8}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{3EI}{(\frac{33}{140}H\overline{m} + M)H^3}} \tag{4.9}$$

Para obtener la frecuencia natural en base flexible $\overline{\omega_n}$ podemos actuar de dos maneras:

1. Resolver el 4.11 con ω para:

$$\overrightarrow{F_{ext}} = \left\{ \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \tag{4.10}$$

   Y localizar el máximo de la función U(ω):

$$\left(\left[\begin{array}{ccc} K(1+2i\xi) & 0 & 0 \\ 0 & K_{HH}(\omega) & K_{HR}(\omega) \\ 0 & K_{RH}(\omega) & K_{RR}(\omega) \end{array} \right] - M^*\omega^2 \left[\begin{array}{ccc} 1 & 1 & H^* \\ 1 & 1 & H^* \\ H^* & H^* & (H^*)^2 \end{array} \right] \right) \left\{ \begin{array}{c} u \\ u_c \\ \theta_c \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \tag{4.11}$$

   Donde se ha tomado amortiguamiento histerético y ξ es el factor de amortiguamiento histerético.

2. También puede localizarse la frecuencia $\overline{w_n}$ como el autovalor de la matriz del sistema anterior, es decir:

$$\overline{w_n} = \omega/|A(\omega)| \tag{4.12}$$

$$\left(\left[\begin{array}{ccc} K^* & 0 & 0 \\ 0 & K_{HH}(\omega) & K_{HR}(\omega) \\ 0 & K_{RH}(\omega) & K_{RR}(\omega) \end{array} \right] - M^*\omega^2 \left[\begin{array}{ccc} 1 & 1 & H^* \\ 1 & 1 & H^* \\ H^* & H^* & (H^*)^2 \end{array} \right] \right) \tag{4.13}$$

Capítulo 5

Resultados experimentales preliminares

5.1 Introducción

Este capitulo da una visión del modelo a escala durante la investigación experimental realizada en el laboratorio de medios continuos y estructuras dinámicas. Debido a la limitación de tiempo disponible para la realización de este Trabajo Final de Máster dentro del curso académico, se trata solamente de unos ensayos preliminares con el objetivo de realizar un primer acercamiento al problema y anticipar los problemas técnicos que deberán ser tenidos en cuenta y solventados en los trabajos siguientes.

Se describe el modelo experimental y se ilustra la realización de los test de las medidas de la frecuencia natural en base rígida y flexible. Además los elementos principales para la adquisición de datos serán definidos y desarrollados en esta sección. Finalmente da una descripción de las frecuencias naturales obtenidas mediante las técnicas utilizadas.

Para obtener el rango de frecuencias comentado en los apartados anteriores, se desea diseñar un modelo reducido de una estructura para la realización del análisis modal experimental y de esta forma obtener parámetros fundamentales.

Puesto que las señales obtenidas se caracterizan por tener un movimiento oscilatorio, la medición puede realizarse del desplazamiento del cuerpo, su velocidad o su aceleración. Los sensores más ampliamente utilizados son los de aceleración (acelerómetros). En la etapa de conversión analógica a digital se adquieren muestras a intervalos equiespaciados de tiempo de la señal continua proporcionada por un sensor, de manera que la señal pasa a ser temporalmente discreta. Para cada uno de estos instantes de tiempo, el valor de la señal no se mide exactamente, sino con la precisión dada por el rango dinámico y la resolución digital del equipo, así que la señal es también discreta en el eje de voltaje.

A continuación se hará una breve introducción sobre este tipo se sensores, su funcionamiento, y los diferentes tipos que pueden utilizarse. Además la forma en que se sujeta el acelerómetro al punto de medida es un factor muy importante para obtener datos precisos en la práctica. Por último se mostrarán los acelerómetros y sus respectivas especificaciones, utilizados en la adquisición modal, serán sensores con tecnologías MEMS. En la etapa final es cuando se realiza el procesado digital de la señal para obtener la información necesaria sobre el fenómeno vibratorio de estudio. Para la lectura y procesamiento que proporciona un acelerómetro, es necesario un dispositivo el cual sea capaz de convertir digitalmente la señal eléctrica mediante muestras de voltajes. El dispositivo de adquisición de datos utilizado será el Labjack y UE9, capaces de leer la salida de los sensores, este recoge los datos en un ordenador, donde son almacenados y procesados como se desee. Al mismo tiempo en esta sección se definirá su funcionamiento, los tipos de dispositivos utilizados en el análisis experimental y sus respectivas

funciones para el procesado de la señal.

5.1.1 Elementos principales de un sistema de adquisición de datos

En la figura 5.1 se muestra un esquema de los elementos básicos de adquisición de datos. En primer lugar se muestra un modelo de un grado de libertad de la estructura empotrada en la mesa, al que va unido un acelerómetro mediante el sistema de montaje escogido, adhesivo a doble cara. Éste se conecta a la fuente de alimentación de energía eléctrica y al dispositivo para la adquisición de datos. El hardware de adquisición de datos es conectado a un ordenador donde la señal será procesada. El procedimiento realizado consiste en darle un golpe a la estructura (input), de manera que se obtenga la respuesta en aceleraciones en el punto de interés (output).

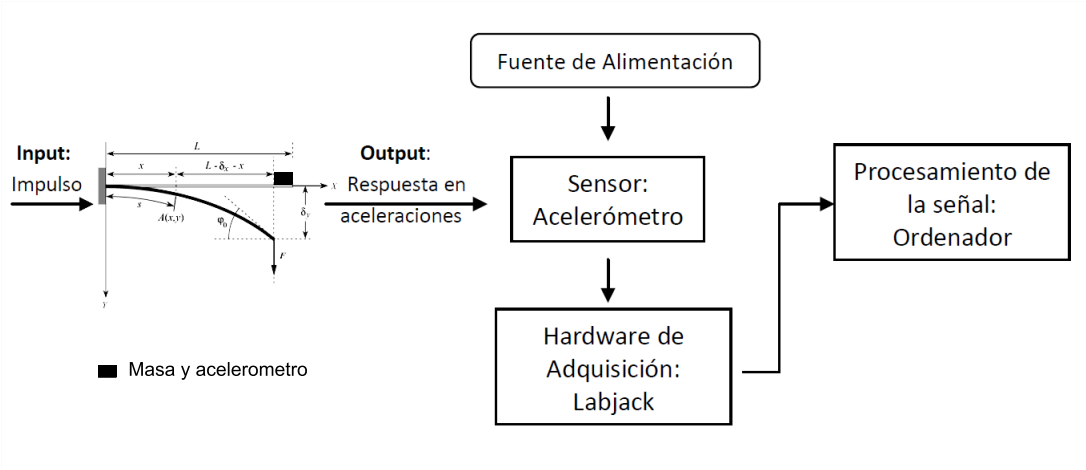


Figura 5.1: Esquema básico de adquisición de datos.

5.2 Sensores

Para caracterizar el movimiento oscilatorio puede medirse el desplazamiento del cuerpo, su velocidad o su aceleración. Los sensores más ampliamente utilizados son los de aceleración (acelerómetros).

5.2.1 Acelerómetros

En esta sección se hará una introducción sobre el funcionamiento, tipos que pueden haber y diferencias entre un acelerómetro y otro. El acelerómetro es un sensor que proporciona una señal eléctrica que varía de forma proporcional a la aceleración medida. La proporcionalidad viene dada por la sensibilidad del acelerómetro. Es deseable que la sensibilidad sea independiente de la frecuencia, lo que se consigue sólo dentro de un determinado rango de frecuencias que constituye el denominado frecuencial de funcionamiento. Los acelerómetros uniaxiales miden la aceleración en la dirección perpendicular a la superficie de medida; sin embargo, los hay también triaxiales, que son capaces de medir la aceleración en las tres direcciones del espacio. Existen una serie de parámetros a tener en cuenta a la hora de elegir los acelerómetros que se desea utilizar.

- Rango aproximado de amplitud de la aceleración
- Rango frecuencial de interés
- Masa máxima admisible del acelerómetro
- Tipo de alimentación disponible para el acelerómetro
- Temperatura de trabajo
- Existencia de campos electromagnéticos que afecten a la zona de medida

Tipos de acelerómetros y su funcionamiento Los tres tipos más conocidos de acelerómetros son los:

- Acelerómetros capacitivos
- Acelerómetros piezo-resistivos
- Acelerómetros piezo-eléctricos

El principio mecánico de funcionamiento de los tres tipos es el mismo. Una masa inercial está elásticamente unida a la carcasa del acelerómetro; si se asume que ésta está sólidamente unida a la superficie de medida, el desplazamiento oscilatorio de la carcasa (x) será solidario al de la superficie, y diferirá del desplazamiento oscilatorio de la masa (y), por lo que existirá un desplazamiento relativo entre la masa y la carcasa. Se puede demostrar que el desplazamiento relativo entre masa y carcasa tiene la misma frecuencia que movimiento oscilatorio de la superficie medida, pero difiere en módulo y fase. Concretamente, la relación entre la amplitud de aceleración del movimiento oscilatorio de la superficie y el desplazamiento relativo masa-carcasa (z=x·y) viene dado por la función de respuesta en frecuencia mecánica:

$$\frac{Z}{X} = \frac{m}{k\sqrt{(1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2 - (2\xi\frac{\omega}{\omega n})^2}} \tag{5.1}$$

La diferencia entre los distintos tipos de acelerómetros reside en cómo este desplazamiento relativo masa-carcasa se convierte en una señal eléctrica de variación de potencial proporcional a la aceleración. La relación entre la señal eléctrica y la aceleración medida$(\Delta\ddot{V}/X)$ viene dada por el producto entre la función de respuesta en frecuencia mecánica Z/X y la relación /Z. En consecuencia $(\Delta\ddot{V}/X)$ es función de la frecuencia puesto que $Z/\ddot{X}$ también lo es.

La representación en frecuencia de $(\Delta\ddot{V}/X)$ se denomina función de respuesta en frecuencia del acelerómetro. Como estos transductores son generalmente independientes de los equipos de adquisición, es necesario que esta relación sea un valor constante independiente de la frecuencia, lo que sólo se consigue dentro de un determinado rango de frecuencias. Normalmente se define el rango de frecuencia de funcionamiento de un acelerómetro como aquél en el que existe un menos de un 10 % de variación de la relación $(\Delta\ddot{V}/X)$. Bajo esta hipótesis, el límite superior del rango de frecuencias es 0.3·ω_r siendo ω_r la frecuencia de resonancia del acelerómetro. Dentro del rango de frecuencias de funcionamiento la relación se denomina sensibilidad del acelerómetro y se considera constante.

Igualmente dentro del rango de frecuencias de funcionamiento del acelerómetro, la relación $Z/\ddot{X}$ se considera constante, y el valor de esta constante se suele denominar sensibilidad mecánica $s_m = m/k$. Cuando mayor es la masa inercial, mayor es la sensibilidad mecánica obteniendo un mayor desplazamiento relativo para la misma amplitud de vibración. Este hecho va a repercutir en la sensibilidad final del acelerómetro, de manera que la sensibilidad

del acelerómetro aumentará con el incremento de su masa inercial. Una sensibilidad alta es preferible, puesto que se obtiene una mejor relación señal-ruido. Sin embargo, en ocasiones no es posible el uso de acelerómetros de masa elevada, puesto que la masa del acelerómetro debe ser claramente menor a la masa del cuerpo que se ensaya para no influir en su comportamiento vibratorio.

5.2.1.1 Montaje de los acelerómetros

La forma en que sujeta el acelerómetro al punto de medida es un factor crítico para obtener en la práctica datos precisos. Los montajes sueltos producen una reducción de la frecuencia de resonancia del acoplamiento, es decir de la gama de frecuencias útiles del sensor. El acelerómetro debe colocarse de manera que la dirección de medida deseada coincida con la de su máxima sensibilidad. También es sensible a las vibraciones en sentido transversal, aunque su sensibilidad transversal típica es inferior al 1 % de la principal, por lo que se la puede ignorar. Pero la frecuencia de resonancia transversal del acelerómetro suele ser 1/3 de la del eje principal, de manera que debe tenerse en cuenta esta situación cuando hay niveles apreciables de vibraciones transversales. Los métodos de unión de los acelerómetros con la superficie de medida son los siguientes: unión roscada, adhesivo a doble cara base magnética, cera de abeja, resinas epoxi o mediante piquetas. La selección del tipo de sujeción depende de las posibilidades que ofrezca la superficie a medir y el efecto de la sujeción en la frecuencia de resonancia del acelerómetro, puesto que ésta disminuye conforme se reduce la rigidez de la sujeción. A continuación se presentan diferentes posibilidades de unión.

- Una unión roscada es la unión que menos modifica la frecuencia de resonancia del acelerómetro, por lo que es la más adecuada en caso de alta frecuencia. La seguridad de este tipo unión permite la medición de grandes amplitudes de vibración y no modifica el rango de temperaturas de uso del acelerómetro. Como contrapartida, no siempre es posible mecanizar la superficie de medida y su instalación requiere tiempo.
- El adhesivo a doble cara es la unión que modifica ligeramente la frecuencia de resonancia del acelerómetro. Es un método rápido y eficaz para realizar en todo tipo de materiales. No tiene una unión sólida, pero puede llegar a ser bastante estable.
- La cera de abeja modifica la frecuencia de resonancia ligeramente, y es útil en caso de acelerómetros sin rosca, en caso de test rápidos o si hay que realizar mediciones en superficies no alterables. En contrapartida, no se pueden utilizar en casos de grandes amplitudes debido a que no se trata de una unión sólida, y tampoco son aconsejables para temperaturas altas en las que la cera se pueda fundir, ni se puede garantizar la repetitividad del punto de medida.
- Las uniones magnéticas son rápidas y se pueden utilizar en casos de altas amplitudes, pero se necesita que la superficie de medida sea ferro magnética. El hecho de añadir la base magnética al acelerómetro aumenta su masa.
- Las resinas epoxi son útiles en caso de no disponer de rosca en el acelerómetro o no poder mecanizar la superficie de medida. Son válidas también para grandes amplitudes y un amplio rango de temperaturas. Como contrapartida hay que señalar el cuidado que exige la retirada del transductor: la unión debe usualmente romperse mediante un golpe seco en la base del acelerómetro, en dirección paralela a la superficie, lo que puede causar daños en el transductor. Es aconsejable, por este motivo, usar una base añadida (que puede ser la base magnética que suelen equipar los acelerómetros) para realizar este tipo de fijación.

La manera de unión que se ha elegido entre el acelerómetro y la estructura ha sido finalmente el adhesivo a doble cara, debido su facilidad y rapidez a la hora de la unión, a la calidad de las medidas en los rangos de frecuencia de interés, y a la dificultad de utilizar otros métodos para la unión del acelerómetro MEMS utilizado debido a la inexistencia de encapsulamiento. Otro método utilizado en este Trabajo de Fin de Máster, fueron la unión del acelerómetro a la estructura mediante bridas. Proporcionaba peores resultados, por lo que fue descartado.

5.2.2 Sensor utilizado en el análisis modal experimental

Los acelerómetros utilizados en el análisis modal experimental, son los denominados MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Son un tipo de dispositivos electromecánicos que detectan el movimiento y pueden transmitir estos datos a un circuito mayor que lo utiliza y lo registra. Se trata de un componente muy compacto que puede ser insertado dentro de un chip y son muy económicos.

Por todo esto en este Trabajo de Fin de Máster, se ha examinado la posible adaptación de los acelerómetros MEMS de bajo costo, a la identificación modal. El acelerómetro DEACCM3D Buffered es el utilizado. La descripción y características este sensor se ha obtenido de sus correspondientes hojas de características.

5.2.2.1 Acelerómetro DE-ACCM3D Buffered $\pm$ 3g

El acelerómetro DE-ACCM3D es una solución de acelerómetro analógica 3D para $\pm$ 3g. Cuenta con un amplificador operacional integrado para la conexión directa a las entradas analógicas de un microcontrolador, o para conducir las cargas más pesadas. El regulador de la tensión a 3.3V y el desacoplamiento del condensador dan una gran flexibilidad a la hora de encender el dispositivo, y puede ser también desviado para las operaciones hasta 2.0V. El DE-ACCM3D está diseñado para adaptarse al factor de forma DIP-16, siendo adecuado para breadboarding (Tabla de circuitos), Prefboarding (Placa de circuito perforada cuyos huecos están circundados por material conductor, generalmente cobre) y la inserción de los chips estándar de las tomas de corriente. Además estos acelerómetros presentan las siguientes características:

- Doble eje $\pm$ 3g
- Sensibilidad de 360 mV/g
- 500 Hz de ancho de banda
- Operación de voltaje entre 3,5V y 15 V (con regulación)
- Operación de voltaje entre 2V y 3,6 V (sin regulación)
- Regulador de 3.3V puede microcontrolador de alimentación externa
- Protección contra la tensión inversa
- Protección contras las salidas
- Factor de forma estándar DIP-16
- Desacoplamiento de la fuente de alimentación integrada
- Consume menos de 0,9 mA

Voltaje de operación [V]	Sensibilidad [mV/g]
3.6	360
3.33	333
3.0	300
2.0	195

- Con precisión disco duro de 500 cargas

En la figura 5.3 se muestra el esquema tipo de acelerómetro, donde se muestran los terminales de entrada y salida. Se han de tener ciertos aspecto a la hora de colocar el acelerómetro en

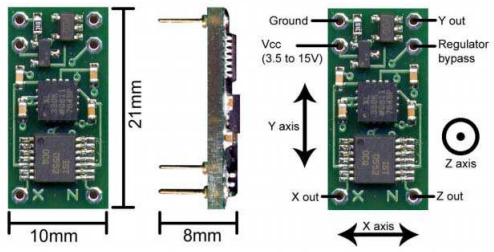


Figura 5.2: Acelerómetro DE-ACCM3D Buffered ± 3g(de www.dimensionengineering.com).

la estructura, cómo están colocados, la inclinación que tiene y la tensión que mide según su posición, por ello en la figura 5.3 se muestran los voltajes que tienen según la posición del sensor. Las salidas de la tensión en el DE-ACCM3D corresponden a las aceleraciones que se

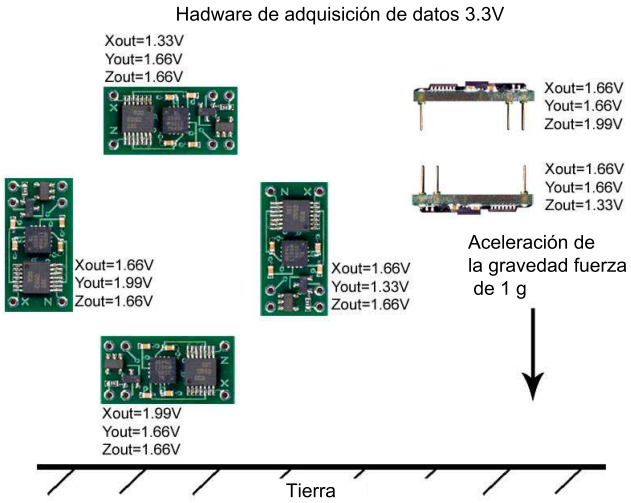


Figura 5.3: Tensión de Acelerómetro (de www.dimensionengineering.com).

dan en las direcciones X, Y y Z. La salida es radiométrica, por lo que la sensibilidad de salida (en mV / g) dependerá de la tensión de alimentación. **Sensibilidad y precisión** En la siguiente tabla se muestran los valores de sensibilidad típica de los voltajes de operación común: Debido a las variaciones de fabricación cuando un dispositivo análogo crea sus fichas del acelerómetro, estos valores no siempre son constantes. La sensibilidad puede variar hasta en un 10 % en casos extremos, y el punto de polarización 0g puede variar hasta un 5 % en los ejes X e Y, y el 10 % en el eje Z.

Por último se definen las características de rendimiento de estos acelerómetros:

Buffers de salida

Un chip de un acelerómetro desnudo tiene una impedancia de salida de 32 K, que no es apto para la obtención fiable de mediciones cuando se conecta a un convertidor analógico a digital. En el DE-ACCM3D se reduce la impedancia de salida. La carga máxima absoluta más allá del cual la precisión empieza a sufrir en serio es 3.3mA, o 500.

Suministro de filtrado

Un condensador de 1uF del DE-ACCM3D proporciona un desacoplamiento excelente de la potencia de suministro. No son necesarios condensadores externos entre Vcc y GND.

Filtrado de salida y el ruido

Un par de condensadores de 10nF limitan el ruido del DE-ACCM3D, sin sacrificar demasiado ancho de banda. RMS es típicamente 7.3mg y el ancho de banda de salida es de 500Hz - lo que es adecuado para las frecuencias altas de la aceleración muestreada.

5.2.3 El hardware de adquisición de datos

5.2.3.1 Introducción

Para la lectura y procesamiento del voltaje que proporcionan los acelerómetros, es necesario un dispositivo el cual sea capaz de traducir digitalmente la señal obtenida. El dispositivo de adquisición de datos que desempleará esta función en este Trabajo de Fin de Máster es el LabJacks y UE9. Los manuales de referencia de estos dispositivos pueden consultarse en la página web de Labjack. Los Labjacks son dispositivos USB/Ethernet capaces de medir la señal eléctrica proporcionada por todo tipo de sensores. Estos dispositivos sirven como una interfaz de bajo costo y fácil de manejar entre los ordenadores y el mundo físico y real. El Labjack, recoge estos datos en un ordenador, donde son almacenados y procesados como se desee.

5.2.3.2 Funcionamiento

El funcionamiento de este dispositivo requiere el conocimiento de ciertos parámetros para su utilización. En primer lugar están las entradas analógicas que convierten un nivel de tensión en un valor digital, para que pueda ser procesada y almacenada; Las salidas analógicas de los Labjack convierten los valores digitales de un ordenador en un nivel de tensión; El contador, en general, va incrementando un registro interno cada vez que se detecta un pulso de voltaje en la entrada del contador. Este registro interno va leyendo periódicamente para determinar la cantidad de eventos que han ocurrido; Una entrada digital proporciona las operaciones del umbral de la tensión. Si la tensión es mayor que algún determinado valor, el ordenador detectará la entrada digital como high/set/1. Si la tensión es menor que cierto valor, el ordenador detectará la entrada digital como low/clear/0. Una salida digital permite controlar la tensión mediante un ordenador. Si el equipo indica que la salida ha de ser alta, ésta produce una tensión (generalmente alrededor de 5 o 3,3 voltios). Si el equipo indica que la salida ha de ser baja, se conecta a tierra y no se produce ninguna tensión; Las mediciones eléctricas analógicas se refieren a los modos básicos de realizar una medición eléctrica analógica, las cuales pueden ser:

Simple o asimétrica: El Labjack convierte la diferencia entre una entrada que se conecta a la tensión y otra tensión de referencia (normalmente a tierra).

Diferencial o simétrica: El labjack convierte la diferencia entre el voltaje de una entrada y la tensión entre otra entrada que no necesariamente es tierra.

El amplificador, PGA (amplificador de ganancia programable) proporciona una ganancia variable que se controla por software. Se utiliza para amplificar bajos voltajes en las entradas analógicas. La mayoría de los LabJacks tienen un PGA interno que se puede utilizar para proporcionar pequeñas ganancias en algunas situaciones, pero para las grandes ganancias debe ser utilizado un amplificador externo; La Resolución se refiere a la conversión de una señal analógica en un valor digital a un ordenador (y viceversa). Un ordenador es una máquina digital, por lo que almacena un número como una serie de unos y ceros. Por último se define el ruido inherente del Labjack, el cual es propio de los convertidores ADC (analógico-digital) que se le suma a la circuitería.

5.2.3.3 Labjack U9

En esta sección se hará una descripción del dispositivo Labjack UE9, utilizado en este Trabajo de Fin de Máster. Se definirán las especificaciones, el software y la documentación específica de este dispositivo.

Descripción del Hardware

Las características externas del UE9 son las siguientes:

- Cuenta con 14 entradas analógicas (de 12 a 16 bits dependiendo de la velocidad)
- Tiene un rango de entrada analógica de
- Tiene 2 salidas analógicas
- Cuenta con 23 conexiones digitales de entrada y salida
- Cuenta con dos contadores de 32-Bits cada uno
- Tiene hasta 6 contadores de tiempo (Tiempo de pulso, salida PWM, Entrada de cuadratura, ...)
- Soporta SPI, I2C y asíncronos Protocolos de Serie (Maestro)
- Soporta Software o Hardware de Adquisición de temporizado
- Velocidad máxima de entrada de corriente de 50 kHz + (Dependiendo de la resolución)
- Capaz de comando / respuesta de tiempos tan bajos como 1,5 milisegundos
- Built-In terminales de tornillo para algunas señales
- Interfaz USB 2.0/1.1 Alta velocidad
- Ethernet 10 Base-T Interfaz
- Doble procesador con 168 MHz de potencia de procesamiento total
- Aislamiento eléctrico posible con la interfaz Ethernet
- Posible adquisición de datos inalámbrica con interfaz Ethernet y el Puente de 802,11
- No necesita fuente de alimentación USB para la operación

- Modbus / TCP compatibles con el hardware
- Controladores disponibles para Windows, Linux, Mac y Pocket PC
- Ejemplos disponibles para C / C + +, VB, LabVIEW, Java y más
- Incluye cable USB y el cable Ethernet, fuente de alimentación, y el destornillador
- Fuente de alimentación universal con clips (Australia, Europa, Reino Unido, EE.UU.)
- Actualizaciones de firmware gratuitas
- Garantía de Devolución del Dinero
- Caja Tamaño Aproximadamente 3 "x 7"x 1 "(75mm x 185mm x 30mm)
- Calificación de rango de temperatura industrial (-40 a +85 ° C)

En la Figura 5.4 se muestra el dispositivo Labjack UE9

Figura 5.4: Dispositivo Labjack UE9 (de http://labjack.com/ue9).

Descripción del dispositivo

A continuación se hará una descripción de todas las entras y salidas que se muestran en este dispositivo.

Entradas analógicas:

El Labjack UE9 cuenta con 14 entradas analógicas externas (AIN0-AIN13). Cada entrada analógica se puede configurar individualmente como unipolar (cuatro rangos de 0-5 voltios a 0-0.625 voltios) o bipolar (± 5 voltios). La resolución de entrada analógica es de 12-bits a la velocidad máxima (12 como tiempo de conversión), el aumento de hasta 16 bits a velocidades más bajas (2,7 ms tiempo de conversión). Comando/Respuesta (software de tiempo) se lee la entrada analógica que suele tener 1,5 + ms dependiendo del número de canales y la configuración de la comunicación. El Hardware de entrada programada de transmisión tiene una tasa máxima que varía de acuerdo con resolución de 250 muestras / s en 16-bits a 50 + kmuestras/s en 12-bits.

Salidas analógicas:

El LABJACK UE9 tiene 2 salidas analógicas (DAC0 y DAC1). Cada salida analógica puede ajustarse a un voltaje entre 0 y 4,9 voltios con 12 bits de resolución. Las salidas analógicas se actualizan en el modo de comando o respuesta, con un tiempo de actualización típica de 1.5-4.0 ms dependiendo de la configuración de la comunicación.

Entradas y salidas digitales

El LABJACK UE9 cuenta con 23 entras y salidas digitales que se pueden configurar individualmente como entrada, de salida alta, o baja la producción. Las primeras cuatro FIO están disponibles en terminales de tornillo y el conector DB37. Todas las entradas FIO 8 y MIO 3 están disponibles en el conector DB37, y las 8 de EIO y CIO 4 están disponibles en el conector DB15. En la función comando y respuesta se lee y escribe, normalmente se toman de 1,5 a 4,0 ms dependiendo de la configuración de la comunicación. Las entradas digitales también se pueden leer en una corriente de entrada de hardware programada, donde hasta 16 entradas contarán como un canal de flujo único.

Contadores de tiempo:

Hay hasta 6 entradas FIO que se pueden configurar como temporizadores. Los temporizadores son muy flexibles, ofreciendo opciones de cómo salida PWM, el tiempo de pulso, el conteo de pulso y la entrada en cuadratura.

Entradas y salidas de Protección:

Todas las líneas de entrada y salida en los UE9 están protegidas contra sobretensiones de menor importancia. Las líneas de AIN pueden soportar sobretensión continua de ± 15 voltios, las líneas de la FIO puede soportar un máximo de $\pm$ 10 voltios, mientras que las líneas EIO / CIO / MIO pueden soportar un máximo de $\pm$ 6 voltios.

Fuente de alimentación:

La alimentación puede ser proporcionada por el cable USB o una fuente externa de 5 voltios (incluida). Cuando sólo Ethernet está conectado, y una fuente de alimentación aislada se utiliza el UE9 entero está aislado eléctricamente.

Las solicitudes de alta Cuenta del canal:

Mediante el uso de concentradores USB o conmutadores Ethernet, muchos LabJacks pueden ser conectado a un solo ordenador, proporcionando una solución económica para aplicaciones de baja velocidad de varios canales.

Modbus:

Modbus es un estándar de la industria de comando/respuesta del protocolo de adquisición de datos y equipos de control. El UE9 apoya Modbus/TCP en el hardware, por lo que cualquier software que soporte Modbus/TCP puede conectarse con el UE9 sin necesidad de software adicional y controladores necesarios.

5.2.4 Excitador electrodinámico (Excitador)

Introducción

Un Excitador electrodinámico tiene el objetivo de recrear las cargas de viento en un modelo a escala de aerogenerador. Para nuestro caso se ha utilizado para recrear un rango de frecuencias sobre la estructura y que de este modo podamos analizar donde se encuentra la frecuencia natural de la estructura por el principio de resonancia.

Funcionamiento

Basándose en los mismos principios electromagnéticos que hacen que la membrana de un altavoz vibre al compás de la música ($F(t) = B \times n \times l \times i(t)$, donde B es la intensidad de campo, n es el número de espiras en la bobina móvil, l es la longitud de cada espira, e i(t) es la

corriente que circula por las mismas), los excitadores electromagnéticos aprovechan un campo magnético creado mediante un electroimán o un imán permanente para generar vibración al hacer pasar una corriente eléctrica por una bobina situada en medio del campo magnético.

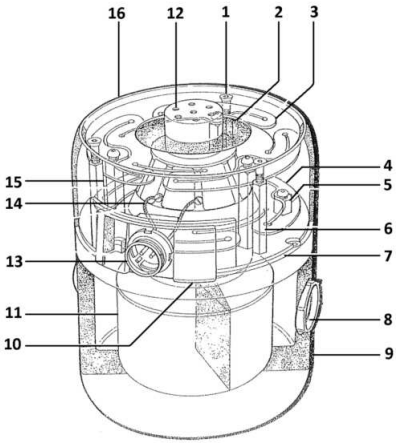


Figura 5.5: Dispositivo Excitador (de http://reco.galeon.com/055f6480.jpg).

Number	Part	Number	Part
1	Top cover retaining screw	9	Magnetic housing
2	Dust seal	10	Cooling air exhaust ports
3	Upper flexure	11	Columax permanent magnet
4	Lower flexure	12	Moving platform and coil assembly
5	Lower flexure support ring	13	Vibrator input drive socket
6	Top cover retaining pillars	14	Electrical drive leads
7	Flexural supporting	15	Upper flexure support pillars
8	Trunnion attachment and air coaling inlets	16	Top cover

Figura 5.6: Partes Excitador (de http://reco.galeon.com/055f6480.jpg).

5.3 Modelo a escala utilizado en la investigación

5.3.1 Introducción

Esta sección presenta los ensayos preliminares realizados como punto final al desarrollo de este Trabajo Fin de Máster. Con los instrumentos anteriormente comentados se han llevado a cabo diferentes ensayos sobre un modelo a escala de aerogenerador off-shore con cimentación de mono-pilote. El resumen de los ensayos preliminares realizados se muestra en la tabla 5.5.

5.3.2 Definición de parámetros de los aerogeneradores utilizados

En esta sección se dan los parámetros físicos de los modelos de aerogenerador reales y a escala. Para el modelo real de aerogenerador se escogió el modelo Vestas V90 3MW debido a que es el es el que mas información se encuentra en artículos y tesis de investigación y porque su ley adimensional $1/\sigma_{max} = 0.14$ .Este valor tiene que estar comprendido entre 0.1-0.3 Por lo que cumple con las relaciones.

Las características físicas del modelo real de aerogenerador off-shore Vestas-V90 para el cual se han tomado las relaciones se muestran en la tabla 5.1

Características	Símbolo	Valor
Radio rotor	R_T	45 m
Altura torre	H	115 m
Masa de la torre	M_b	145t
Diámetro superior torre	D_s	4.20m
Diámetro inferior torre	D_i	2.31m
Espesor de la torre	t_t	30mm
Modulo de Young de la torre	E_t	210GPa
Longitud mono-pilote	L_p	28 m
Diámetro mono-pilote	D_p	4.3 m
Espesor mono-pilote	t_p	45 mm
Masa mono-pilote	M_{pilote}	132t
Modulo de Young del mono-pilote	E_p	210GPa
Masa (palas - rotor - góndola)	M_{p-r-g}	111t
Intervalo operacional del rotor	V_{rotor}	8.6-18.4rpm

Tabla 5.1: Dimensiones tecnicas del aergonerador Vestas V90 3MW situado en Kentish Flats

Los valores de las impedancias K_{HH}, K_{HR} y K_{RR} que son calculados a través del modelo acoplado de elementos de contorno y elementos finitos para el estudio de la respuesta dinámica de cimentaciones pilotadas [17][18] para los aerogeneradores reales son los mostrados en la tabla 5.2.

Impedancias modelo a escala	Resultados
K_{HH}	1.947651e+09 + 3.0438854e+08i
K_{RR}	7.4752306e+10 + 3.9743464e+09i
K_{HR}	-7.2105218e+09 - 8.8517302e+08i

Tabla 5.2: K_{HH}: Impedancia lateral de la cimentación, K_{RR}: impedancia de cabeceo de la cimentación, K_{HR}: impedancia cruzada de la cimentación

Las características físicas del modelo a escala utilizado en esta investigación se muestran en la tabla 5.3

Características	Símbolo	Valor
Altura torre	H	942mm
Masa de la torre	M'_b	210 gr
Diámetro de la torre torre	D'_s	6mm
Espesor de la torre	t'_t	Macizo
Modulo de Young de la torre	$E_{t'}$	210GPa
Longitud mono-pilote	L'_p	24 mm
Diámetro mono-pilote	$D_{p'}$	6 mm
Espesor mono-pilote	$t_{p'}$	Macizo
Masa linear superestructura	$\overline{m}'$	0.223kg m t
Modulo de Young del mono-pilote	E'_p	210GPa
Masa (palas - rotor - góndola)	M'_{p-r-g}	26 gr

Tabla 5.3: Dimensiones tecnicas del modelo a escala.

Utilizando los datos anteriores en el análisis numérico de las relaciones entre modelo real y a escala. Las relaciones adimensionales quedan expuestas en el Apéndice II.

Los valores de las impedancias para el modelo a escala son los mostrados en la tabla 5.4:

Impedancias modelo a escala	Resultados
K_{HH}	2.0512293e+04 + 1.6606488e+03i
K_{RR}	1.9136775e+02 + 5.4226164e+00i
K_{HR}	-1.3584254e+03 - 6.67918e+01i

Tabla 5.4: K_{HH}: Impedancia lateral de la cimentación, K_{RR}: impedancia de cabeceo de la cimentación, K_{HR}: impedancia cruzada de la cimentación

5.3.3 Experimentos realizados

ID test	Tipo de test	Objetivo	Observaciones.
PF-1	Estudio de la frecuencia natural del modelo a escala en base rígida en vibración libre vertical	Calculo experimental de la frecuencia natural del aerogenerador	Estudio de la frecuencia natural del modelo a escala en base rígida en vibración libre vertical
PF-2	Estudio de la frecuencia natural del modelo a escala en base flexible en vibración libres	Calculo experimental de la frecuencia natural del aerogenerador	Estudio de la frecuencia natural del modelo a escala en base flexible en vibración libre

Tabla 5.5: Experimentaciones realizadas a lo largo del trabajo de fin de máster

5.3.4 Test modelo a escala en base fija

Cumpliendo con el teorema de las relaciones adimensionales que se han expuesto en las secciones anteriores se paso al calculo matemático de las frecuencias naturales de los aerogeneradores para poder comparar los resultados con las experimentaciones posteriormente realizadas que se muestran acontinuación.

El estudio de la frecuencia natural del modelo de aerogenerador a escala en base rígida esxperimental en vibración libre se muestra en la figura 5.7:

5.3.4.1 PF-4 Vibración libre vertical

La experimentación de la frecuencia natural del modelo del aerogenerador a escala en base rígida en vibración libre vertical obtuvo como resultados los mostrados en la gráfica 5.8.

El resultado exacto para vibración libre vertical es una frecuencia de 3.623 Hz, tal. Un resultado muy parecido al que se calcula en el modelo matemático.

Figura 5.7: Evaluación experimentación del modelo a escala en base rígida vertical

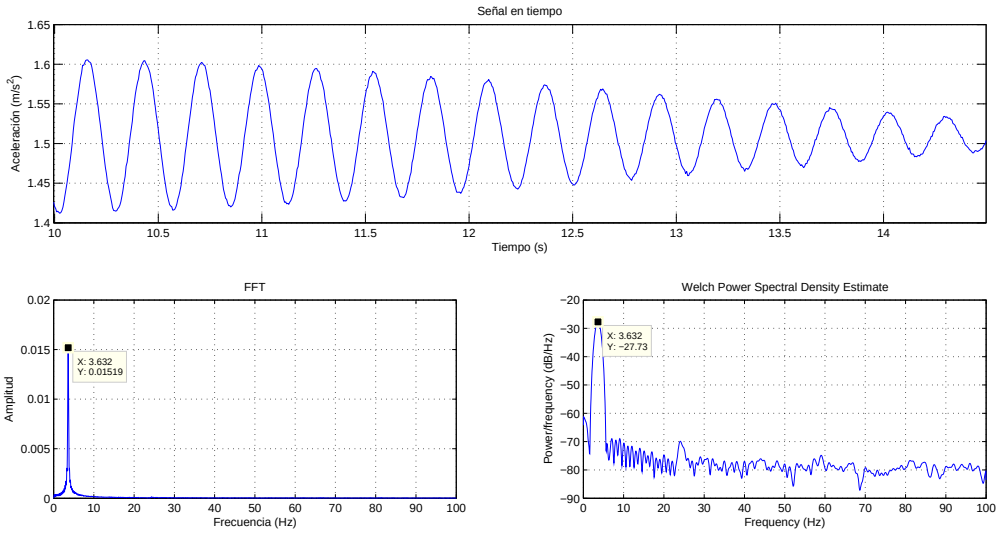


Figura 5.8: Resultados de la experimentación en base rígida vertical.

5.3.5 Test modelo a escala en base flexible

Después del estudio de las relaciones, desarrollo analítico de las impedancias de la cimentación gracias al método numérico previamente desarrollado por el grupo basado en modelo de contornos y finitos [17]. Y a la obtención de la frecuencia natural de la estructura en base rígida se llevo a cabo la evaluación experimental de la frecuencia natural en base flexible del modelo a escala del aerogenerador off-shore (PM-5).

El experimento se realizo como se muestra en la figura 5.9

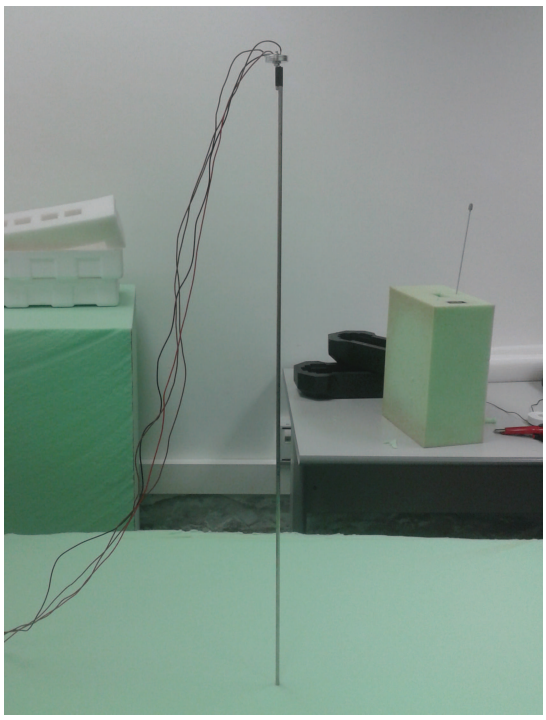


Figura 5.9: Experimentación en base flexible.

Los resultados gráficos de esta experimentación se muestran en la figura 5.10:

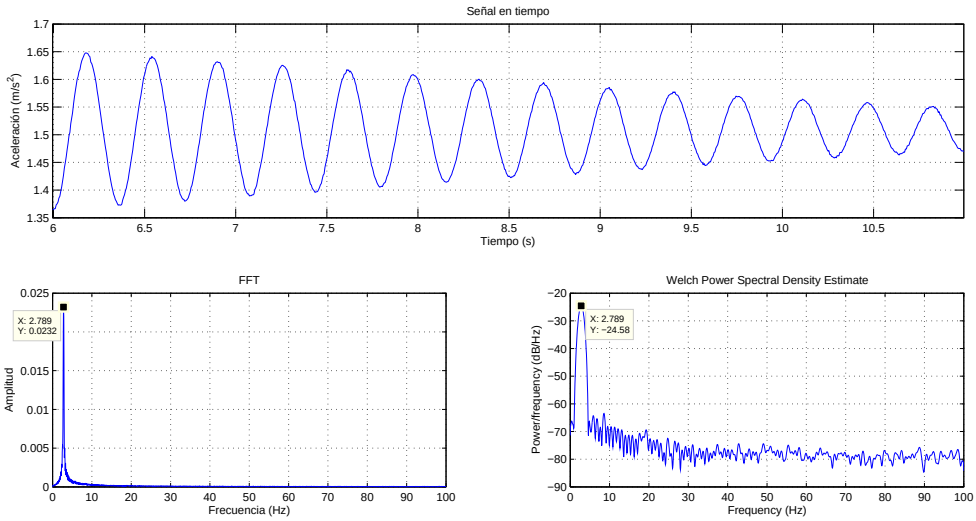


Figura 5.10: Resultados de la experimentación en base flexible vertical.

La frecuencia natural que se obtuvo de la experimentación de la figura 5.10 es de 2.789 Hz.

5.4 Resultados calculo $\overline{T}/T$

Recordando de apartados anteriores, el objetivo de la investigación de este Trabajo Fin de Máster, es la obtención de dos relaciones una que exprese los cálculos analíticos en base rígida y flexible y otra relación que muestre los cálculos experimentales en base rígida y base flexible. La Variación de estas dos relaciones nos definirá si es posible realizar un modelo a escala que cumpla con el modelo analítico para de esta manera poder realizar más investigaciones sobre los aerogeneradores off-shore.

5.4.1 Resultados analíticos

En la tabla 5.6 se muestran los resultados analíticos en base rígida y en base flexible además de la relación entre ellos lo que marca el resultado de toda la investigación

Calculo Analítico	Frecuencia Natural [Hz]
Base rígida	3.61
Base flexible	3.31
Relación	1.09

Tabla 5.6: Resultados analíticos del modelo a escala del aerogenerador V90 en el modelo analítico

5.4.2 Resultados experimentales

En la tabla 5.7 se muestran los resultados analíticos en base rígida y en base flexible además de la relación entre ellos lo que marca el resultado de toda la investigación

Calculo Experimental	Frecuencia Natural [Hz]
Base rígida	3.632
Base flexible	2.789
Relación	1.30

Tabla 5.7: Resultados analíticos del modelo a escala del aerogenerador V90 en el modelo experimental

5.5 Conclusiones

Como resumen a todo este capitulo y los resultados obtenidos, a medida que se relacionan parámetros físicos de los materiales y se comparan analítica y experimentalmente se llega a la conclusión de que hay que ser muy preciso en la utilización de las características de los modelos. Los resultados muestran una variación entre el calculo de las frecuencias naturales en vibración libre analítica y experimentalmente de sus respectivas base rígida y flexible de un 21 % (Relación experimental - Relación analítica = 1.30-1.09 = 21 %).

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Resumen

El análisis del comportamiento dinámico de estructuras requiere el conocimiento de una serie de parámetros tales como frecuencias naturales y coeficientes de amortiguamiento. Esto permite, entre otras cosas, controlar la calidad de la ejecución, calibrar modelos estructurales para permitir un análisis más exacto, o detectar daños estructurales de diversa índole que pueda sufrir la estructura a lo largo de su vida útil.

En este Trabajo Fin de Máster se ha procedido a la identificación modal experimental de una estructuras a escala reducida de un aerogenerador off-shore en dos distintas bases, una primera estructura en base rígida y una segunda en base flexible.

En primer lugar se ha realizado una busquedad bibliográfica de documentos técnicos, de investigación y casas comerciales sobre estructuras dinámicas relacionadas con los aerogeneradores off-shore. Con las características y parámetros obtenidos se desarrollo posteriormente relaciones adimensionales que cumplan con el teorema de Π de Vaschy-Buckingham del análisis dimensional para poder realizar un modelo a escala de aerogenerador que cumpla con las leyes físicas de los aerogeneradores reales. Comparando las relaciones propuestas en este Trabajo Final de Máster con otras investigaciones, las utilizadas en este proyecto son relacionadas con la interacción suelo-estructura. Estás definen la geometría de los modelos, la relación de la velocidad de onda del terreno, la relación de masas entre el fuste y la masa superior(góndola - rotor - palas) y la relación entre la masa superior y la masa que ocupa el pilote en el terreno.

Para el calculo de las impedancias se ha utilizado un modelo numérico previamente desarrollado por el grupo de investigación de estructuras dinámicas y medios continuos del instituto SIANI de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria basado en un modelo de contornos y elementos finitos [17] [18].

Además en el Trabajo de Fin de Máster se utilizan unos sensores con tecnologías MEMS, de bajo coste, encargados de la obtención de la señal. Es de interés conocer el rendimiento que se puede obtener de los sensores de bajo costo cuando se utilizan para la identificación de sistemas estructurales de ingeniería civil.

Antes de la construcción de la estructuras a escala para su identificación, se realizó un modelo numérico de las misma, para lo que era necesario estimar los valores de inercia y de módulo de elasticidad del material que los constituye.

Posteriormente, se procedió al diseño del modelo. Una vez concluido el diseño se procedió a su construcción. El proceso de construcción se realizó mediante la utilización de la barra de acero. Por ser un material muy apropiado para la construcción gracias a su fortaleza, durabilidad,

resistencia y es el que se utiliza en la realidad, además se utiliza este material y no otros como podría ser el aluminio porque al introducir más densidad con el acero en el fuste del aerogenerador necesitaremos más masa en la góndola por relaciones las de similitud.

Finalmente, se procedió a la realización de ensayos experimentales de vibración libre para su identificación modal experimental en base rígida y flexible.

6.2 Resultados y conclusiones

Del análisis modal experimental se han podido identificar las frecuencias naturales de vibración correspondientes a la base rígida y flexible. La tabla 6.1 resume los resultados obtenidos

ID test	Tipo de test	Resultados.
PF-1	Estudio de la frecuencia natural	Los resultados gráficos se muestran en la figura 5.7 la frecuencia natural del modelo a escala en base rígida en vibración libre vertical es de 3.623 Hz
PF-2	Estudio de la frecuencia natural	Los resultados gráficos de la experimentación del aerogenerador del modelo a escala en base flexible se muestran en la figura 5.10 El resultado de la frecuencia natural es de 2.789 Hz

Tabla 6.1: Experimentaciones realizadas a lo largo del trabajo de fin de máster

Por su parte, la tabla 6.2 muestra el conjunto de resultados analíticos de la frecuencia natural del aerogenerador a escala en base rígida y flexible.

ID test	Tipo de test	Resultados.
PA-1	Estudio de la frecuencia natural	Los resultados analíticos de la frecuencia natural del modelo matemático en base rígida en vibración libre son 3.62 Hz
PA-2	Estudio de la frecuencia natural	Los resultados analíticos de la frecuencia natural del modelo matemático en base flexible en vibración libre son 3.31 Hz

Tabla 6.2: Experimentaciones realizadas a lo largo del trabajo de fin de máster

La siguiente tabla, por su parte, muestra la comparación entre los resultados de las frecuencias naturales experimentales y los numéricos del modelo, pudiéndose apreciar diferencias notables en las frecuencias naturales en base flexible.

Resultados	Análitico	Experimental
Base Rígida	3.61 [Hz]	3.632 [Hz]
Base Flexible	3.31 [Hz]	2.789 [Hz]

Estas diferencias en la base flexible pueden deberse a muchas causas, pero se estima que son debidas, principalmente , a los defectos de las propiedades de los materiales en sus propiedades físicas y a las diferencias que ello genera entre el modelo analítico y experimental. Estos defectos se centran que el modulo de elasticidad de la estructura, a la realización de la experimentación con los acelerómetros DE-ACCM3D Buffered que tienen que estar conectados con cables añadiendo inercia sobre la estructura y masa sobre el componente góndola y palas. Además, la rigidez de la estructura ha resultado ser sensiblemente diferente, lo que ha dado lugar a la excitación involuntaria de modo de vibración transversales y rotacionales que también han debido ser estudiados en este Trabajo Final de Máster.

6.2.1 Actualización del modelo analítico (ajuste de parámetros)

Las diferencias nombradas anteriormente entre el modelo analítico y las características obtenidas experimentalmente son esperables en este tipo de estudios y llevan lo que se denomina 'actualización del modelo' o 'ajuste de parámetros'. Por falta de tiempo para la presentación del Trabajo Final de Máster esta parte queda a la espera para próximas investigaciones en el Doctorado.

6.2.2 Resultados finales

El objetivo principal de este Trabajo Final de Máster es que la diferencia entre el calculo Analítico y experimental tenga la mínima variación entre ellos para poder realizar investigaciones sobre los aerogeneradores reales.

Resultados	Analítico	Experimental
Base Rígida	3.61 [Hz]	3.632 [Hz]
Base Flexible	3.31 [Hz]	2.789 [Hz]
Relación	1.09	1.30

$$Relacion_{experimental} - Relacion_{analica} = 21\,\% \tag{6.1}$$

6.2.3 Comentarios finales

En primer lugar, este trabajo ha afrontado el estudio de los conceptos básicos de dinámica estructural, teoría de la señal y análisis experimental.

Los pasos realizados a lo largo de este Trabajo Final de Máster comenzaron realizando un revisión bibliográfica recabando la información existente de artículos de investigación, empíricos y de casas comerciales. Seguidamente se desarrollaron las leyes de similitud para poder verificar que el modelo a escala comparte las leyes físicas del aerogenerador real a través del teorema Π de Vaschy-Buckingham. Aceptando que las leyes de similitud son correctas para realizar los modelos a escala del aerogenerador real V90 y incluyendo a las leyes de similitud, las propiedades geométricas y y propiedades de los materiales se realizo el modelo a escala cumpliendo que estas leyes de similitud no variasen. Tendiendo definidos los parámetros de los aerogeneradores del modelo a escala y real se realizo el estudio analítico de la frecuencia natural del aerogenerador a escala en base flexible y base rígida. Finalmente se construyo el modelo a escala del aerogenerador y se estudio experimentalmente la frecuencia natural del modelo a escala en base rígida y base flexible. La comparación entre los resultados experimentales y analíticos tiene una gran variación.

Las conclusiones de esta investigación son que el método utilizado necesita una actualización del modelo para poder realizar un diseño de modelos a escala para el estudio de fenómenos dinámicos de interacción suelo - estructura en aerogeneradores off-shore sobre monopilotes debido a la gran variación entre los resultados experimentales y empíricos. Las razones de esta diferencia son debidos a la falta de tiempo para determinar los parámetros físicos de los materiales utilizados en la estructura y terreno. La utilización de los acelerómetros DE-ACCM3D Buffered también vario los resultados experimentales por tener que estar conectados mediante cables a la estructura.

Referencias

[1] www.repower.com

[2] ABS. Rules for Building and Classing Offshore Installation. *American Bureau Shipping*, 1997.

[3] L. Arany, S. Bhattacharya, S. Adhikari, S.J. Hogan, and J.H.G. Macdonald. An analytical model to predict the natural frequency of offshore wind turbines on three-spring flexible foundations using two different beam models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 74:40–45, July 2015.

[4] S. Bhattacharya and S. Adhikari. Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(5-6):805–816, 2011.

[5] S. Bhattacharya, N. Nikitas, J. Garnsey, N. a. Alexander, J. Cox, D. Lombardi, D. Muir Wood, and D. F T Nash. Observed dynamic soil-structure interaction in scale testing of offshore wind turbine foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 54:47–60, 2013.

[6] C. Cox, J. Jones. *Long Term Performance of Suction Caisson Supported Off-shore Wind Turbines*. PhD thesis, University of Bristol, 2010.

[7] Sandra Escoffier. Experimental study of the effect of inclined pile on the seismic behavior of pile group. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42:275–291, November 2012.

[8] Eurocode. Eurocodigo 8, 1998.

[9] Fleming. Flow mechanism of soil around laterally loaded pile. 2009.

[10] Frank P Incropera, David P DeWitt, Theodore L Bergman, and Adrienne S Lavine. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, volume 6th of *Dekker Mechanical Engineering*. John Wiley & Sons, 2007.

[11] Ingeniero Industrial, Gamesa Solar, Proyectos Internacio, and Gamesa Energ. Los Parques Eólicos Marinos (II / III). pages 12–16, 2008.

[12] M. Kuhn. *Wind power Plants: Fundamentals, desing, construction and operation,*. 2002.

[13] L D Landau and E M Lifshitz. *Fluid Mechanics*, volume 6 of *Course of Theoretical Physics*. Pergamon Press, 1987.

[14] H Lomax, TH Pulliam, DW Zingg, and TA Kowalewski. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, 2002.

[15] Domenico Lombardi. *Dynamics of Offshore Wind Turbines*. PhD thesis, University of Bristol, 2010.

[16] Domenico Lombardi, Subhamoy Bhattacharya, and David Muir Wood. Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 49:165–180, 2013.

[17] L.A. Padrón, J.J. Aznárez, and O. Maeso. *BEM-FEM coupling model for the dynamic analysis of piles and piles groups,*. PhD thesis, Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, 2007.

[18] L.A. Padrón, J.J. Aznárez, and O. Maeso. *3-D boundary element - finite element method for the dynamic analysis of piled buildings,*. PhD thesis, Las Palmas de Gran Canaria, 2011.

[19] J. Peeters, D. Vadepitte, P. Sas, and S. Lammens. *Comparison of analysis techniques for the dynamic behaviour of an integrated drive train in a wind turbine*. Belgium, 2002.

[20] Siemens. Siemens.

[21] R.H. Stewart. *Introducction to Physical Oceanography*. PhD thesis, Texas A&M University, 2005.

[22] International Energy Agency Tech rep. International Energy Agency, 2006.

[23] U.S. Department of Energy Tech rep. Energy information Administration, 2009.

[24] J.V.D. Tempel and David-pieter Molenaar. *Wind Turbine Structural Dynamics*. 2002.

[25] J Tomlinson, M. Woodward. Pile Desing and Construction Practice. *Taylor and Francis*, 2008.

[26] Veritas. Design of offshore wind turbine structures. *Offshore Standard DNV-OS-J101*, 2007.

[27] Villalobos Jara. *Model Testing of Foundations for Offshore Wind Turbines*. PhD thesis, University of Oxford, 2006.

[28] K.G. Zienkiewiez, O.C. Lewis, R.W. Stagg. Numerical methods in offshore engineering. 1978.

Parte I

Apéndices

Apéndice A

Apéndice I

A.1 Revisión bibliográfica

En el Anexo I se encuentra la hoja de calculo de las relaciones de los aerogeneradores dividida en:

1. Definición de los parámetros de la revisión bibliográfica de los aerogeneradores Off-shore
   - Parámetros estructurales
   - Parámetros de la cimentación
   - Parámetros del terreno
2. Definición de las Proporciones geométricas de los aerogeneradores Off-shore
   - $\frac{H}{D_m}$ Altura de la torre dividido por el diámetro medio de la torre
   - Área de la sección circular de la torre
   - $\frac{L}{D_p}$ Longitud del pilote dividido por el diámetro del pilote
   - $\frac{H_{hub}}{L}$ Relación de altura del rotor con la longitud del pilote
   - $\frac{masafuste}{masagondola}$ Relación de las masas

A.2 Relaciones Similitud

1. Ratios
   - λ Relación entre la altura del modelo a escala y el modelo real
   - β Relación de frecuencias del modelo a escala y el modelo real
   - α Relación de masas de góndola y palas del modelo a escala y el modelo real
2. Relaciones adimensionales
   - S_σ Relación entre la velocidad de onda del suelo (mínima o máxima) y las relaciones geométricas del aerogenerador real y del modelo a escala.
   - S_μ Relaciona la masa superior del aerogenerador respecto la masa que ocupa el pilote en el terreno junto con la altura de los modelos a escala y real.
   - S_{μ_e} relación entre la masa de la góndola y las palas respecto la masa densidad del fuste del aerogenerador real respecto el modelo a a escala

AEROGENERDORES		Vestas 2MW-V6		Vestas 3MW-V90		Vestas 2MW-V80		SIEMENS 107		Irene Vorrink 600K		Walney 1.t 3.6 MW	
Estructura	Support structure	71	89	90	115	80	120	99	115	81	121	105	121
	rotor diametrer	66	66	90	90	80	80	107	107	80	80	107	107
	Hub height(m)	60	78	80	105	60	100	80	96	60	100	80	96
	m(kg)torre	100000	159000	145000	255000	137000	198000	253000	269000	137000	198000	253000	269000
	rotor-nacelle m(kg)	80000	80000	111000	111000	94000	94000	220000	220000	94000	94000	220000	222000
	ρ(kg/m^3)	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850
	ω (Hz)(articulo)	0,41	0,41	0,38	0,38	0,35	0,35	0,38	0,38	0,35	0,35	0,38	0,38
	ω(rad/s)	2,5761038	2,5761038	2,3876084	2,3876084	2,199113	2,199113	2,3876084	2,3876084	2,199113	2,199113	2,3876084	2,3876084
	d(m)inferior	4	4	3,98	3,98	4	4	4,2	4,2	4	4	4,2	4,2
	d(m)superior	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,31	2,31	2,3	2,3	2,31	2,31
	d(m) medio	3,15	3,15	3,14	3,14	3,15	3,15	3,255	3,255	3,15	3,15	3,255	3,255
	tower thickness	0,0035	0,0035	0,003	0,003	0,0035	0,0035	0,003	0,003	0,0035	0,0035	0,003	0,003
	water deph	11	11	10	10	20	20	19	19	21	21	25	25
	T (s)ariculo	2,43902439	2,43902439	2,631578947	2,63157895	2,857142857	2,857142857	2,631578947	2,63157895	2,857142857	2,85714286	2,63157895	2,63157895
Cimentación y pilote	ρ(kg/m^3)	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850	7850
	L(m)	15	15	28	28	31	31	11	11	33	33	30	30
	d(m)	3,5	3,5	4,3	4,3	4,2	4,2	4,7	4,7	4	4	4,7	4,7
	wall thicknees(m)	0,045	0,045	0,045	0,045	0,05	0,05	0,055	0,055	0,035	0,035	0,055	0,055
Suelo	G shear modulus(min)	339000000	339000000	78000000	78000000	73600000	73600000	22700000	22700000	73600000	73600000	75400000	75400000
	G shear modulus(max)	1670000000	1670000000	312000000	312000000	295000000	295000000	73600000	73600000	29500000	29500000	302000000	302000000
	cs(min),30 m/s	360	360	180	180	180	180	100	100	180	180	180	180
	cs(max),30m/s	800	800	360	360	360	360	180	180	360	360	360	360
	ρ(kg/m^3)	2200	2200	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1900	1900
	v	0,25	0,25	0,45	0,45	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,3	0,3
Proporciones Geometricas	H/d (estructura)	22,54	28,25	28,66	36,62	25,40	38,10	30,41	35,33	25,71	38,41	32,26	37,17
	Sección (m^2)	7,79	7,79	7,74	7,74	7,79	7,79	8,32	8,32	7,79	7,79	8,32	8,32
	L/d(cimentación)	4,29	4,29	6,51	6,51	7,38	7,38	2,34	2,34	8,25	8,25	6,38	6,38
	Hub/L (estructura/cimentació	4,73	5,93	3,21	4,11	2,58	3,87	9,00	10,45	2,45	3,67	3,50	4,03
masa fuste/ masa gondola		1,25	1,99	1,31	2,30	1,46	2,11	1,15	1,22	1,46	2,11	1,15	1,21
Ratios	λ(H'/H)	0,00989187	0,00789127	0,007803589	0,00610716	0,008779038	0,005852692	0,007094172	0,00610716	0,008670655	0,00580432	0,00668879	0,00580432
	β(wn'/wn) articulos	17,7408585	17,74085848	19,14145257	19,1414526	20,7821485	20,7821485	19,14145257	19,1414526	20,7821485	20,7821485	19,1414526	19,1414526
	α(m'/m)	3,125E-07	3,125E-07	2,25225E-07	2,2523E-07	2,65957E-07	2,65957E-07	1,13636E-07	1,1364E-07	2,65957E-07	2,6596E-07	1,1364E-07	1,1261E-07
Leyes adimensionales	σ(max)	27,481965	21,92381474	10,52631579	8,23798627	12,85714286	8,571428571	4,784688995	4,11899314	12,6984127	8,50059032	9,02255639	7,82949108
	1/σ(max)	0,0363875	0,0456125	0,095	0,12138889	0,077777778	0,116666667	0,209	0,24277778	0,07875	0,11763889	0,11083333	0,12772222
	σ(min)	12,3668842	9,865716635	5,263157895	4,11899314	6,428571429	4,285714286	2,658160553	2,28832952	6,349206349	4,25029516	4,5112782	3,91474554
	1/σ(min)	0,08086111	0,101361111	0,19	0,24277778	0,155555556	0,233333333	0,3762	0,437	0,1575	0,23527778	0,22166667	0,25544444
	μ	0,06571991	0,052428242	0,088482579	0,06924724	0,083763219	0,055842146	0,148361802	0,12772016	0,082729105	0,05538064	0,13252167	0,11604358
	μc (gondola/fuste)	0,8	0,503144654	0,765517241	0,43529412	0,686131387	0,474747475	0,869565217	0,81784387	0,686131387	0,47474747	0,86956522	0,82527881
Relaciones	Sσ (min)	0,87133934	1,092242271	2,047393021	2,31611331	1,676228205	2,514342307	4,053838183	4,70900395	1,697181057	2,53529516	2,38862519	2,75260617
	Sσ (max)	0,3921027	0,491509022	1,023696511	1,30805665	0,838114102	1,257171154	2,252132324	2,61611331	0,848590529	1,26764758	1,1943126	1,37630309
	Sμ	23,6764029	46,63486192	28,43708238	14,3268144	23,58427846	79,59693981	19,09692267	29,9330745	24,4797901	81,6034921	24,0495414	36,4724316
	S μ c	0,37836049	0,601593174	0,395403752	0,69536522	0,441152227	0,637577672	0,348091648	0,37010535	0,441152227	0,63757767	0,34809165	0,36677107

Apéndice B

Apéndice II

B.1 Elección geometría y material

Este Apéndice define la geometría y el material a utilizar en l modelo a escala a partir de las leyes de similitud del apéndice anterior.

Como se comenta en el capitulo dos se definen cuatro variables para para definir el modelo a escala; la altura, la masa de la góndola, la densidad y el modulo de Young según el material que fuéramos a utilizar. Según variemos alguna de las variables también variarán los parámetros del apéndice I.

Las celdas que están con fondo azul claro son dependientes de las cuatro variables y de la sección que escojamos: Circulo Hueco, Circulo Macizo, Cuadrado Macizo y Cuadrado Hueco(celdas en blanco)

- Área: varía según el tipo de sección y sus dimensiones
- Volumen: área por la altura del modelo
- Masa del fuste del modelo: volumen por la densidad del material escogido(acero)
- Masa del fuste entre la masas superior: Masa del fuste entre la variable de la masa superior.
- Frecuencia de la estructura:

$$\omega = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3E'_E I'_E}{(m' + 33/140M'_b)H'}} \tag{B.1}$$

- Masa lineal $\overline{m}' =$ Área por la Densidad del material

$$\overline{m}' = A' * \rho' \tag{B.2}$$

- Rigidez del modelo analítico en base rígida

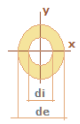
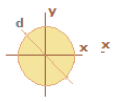
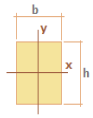
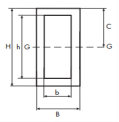
$$K = (\omega * 2\pi)^2)(0,227M_b + m') \tag{B.3}$$

- Rigidez a flexión de la torre en base rígida $E'_E I''_E$

$$E'_E I'_E = \frac{K(H')^3}{3} \tag{B.4}$$

- Inercia de la estructura del modelo a escala I_E

$$I_E = \frac{E'_E I'_E}{E_E} \tag{B.5}$$

Pre - Prototipo		C.Hueco	C.Macizo	Cuadrado M.	Cuadrado. H
Estructura	H'm	0,75	0,692	0,75	0,75
	ω (Hz)	1,454109593	3,61	1,221303272	10,09382791
	m'	0,025	0,026	0,025	0,025
	ρ'(kg/m^3)	1400	7890	1400	1400
	m lineal	0,030787608	0,223084494	0,0504	0,1974
	K	2,524402727	31,4058132	1,977403187	235,7347536
	EI'	0,354994134	3,469022142	0,278072323	33,15019972
	E	2,60E+09	2,10E+11	2,60E+09	2,60E+09
	I	1,37E-10	1,65E-11	1,07E-10	1,28E-08
		O HUECO	O MACIZO	CUA. MAZIZO	RECT. HUECO
B o Diametro		0,008	0,006	0,006	0,025
H o Diametro interior		0,006		0,006	0,025
b o radio ext		0,004	0,003	0,004	0,022
h o radio int		0,003		0,004	0,022
espesor t		0,001		0,001	0,0015
area m2		2,19911E-05	2,82743E-05	0,000036	0,000141
volumen m3		1,64934E-05	1,95658E-05	0,000027	0,00010575
m'fuste(kg)		0,023090706	0,15437447	0,0378	0,14805
m'f/m'g		0,92362824	5,937479618	1,512	5,922
i		1,37445E-10	6,36173E-11	1,08E-10	1,30308E-08
					
		$I_x = \frac{\pi \cdot (de^4 - di^4)}{64}$	$I_x = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$	$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12}$	(BH3 - bh3)/12